

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Avaliação dos Impactos Ambientais da Produção de Carvão
Vegetal: Um estudo de caso**

Sarah Alves e Silva

Mai de 2022

Itajubá - MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Sarah Alves e Silva

**Avaliação dos Impactos Ambientais da Produção de Carvão
Vegetal: Um estudo de caso**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: **Energia, Sociedade e Meio Ambiente**

Orientador: **Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**

Coorientador: **Prof. Dr. Márcio Montagnana Vicente Leme**

Mai de 2022

Itajubá – MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Sarah Alves e Silva

**Avaliação dos Impactos Ambientais da Produção de Carvão
Vegetal: Um estudo de caso**

**Dissertação submetida ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia de Energia
como parte dos requisitos para obtenção
do Título de Mestre em Ciências em
Engenharia de Energia.**

Itajubá - MG, __ de _____ de _____

Banca examinadora:

Prof. Dr. Osvaldo J. Venturini (Orientador): _____

Prof. Dr. Márcio M. V. Leme (Coorientador): _____

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora (UNIFEI): _____

Prof. Dr. José Carlos Escobar Palacio (UNIFEI): _____

Prof. Dr. Marcelo Risso Errera (UFPR): _____

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Avaliação dos Impactos Ambientais da Produção de Carvão
Vegetal: Um estudo de caso**

Autora: **Sarah Alves e Silva**

Orientador: **Prof. Dr. Osvaldo J. Venturini**

Coorientador: **Prof. Dr. Márcio M. V. Leme**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Osvaldo J. Venturini – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Márcio M. V. Leme - UFLA

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. José Carlos Escobar Palacio - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Marcelo Risso Errera - UFPR

Mai de 2022

Itajubá – MG

À minha avó Maria (*in memoriam*),
mulher mais inteligente que já
conheci, cuja presença foi muito
importante na minha vida.

AGRADECIMENTOS

À UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá, ao meu orientador, Prof. Dr. Osvaldo Venturini e ao meu Co-orientador, Prof. Dr. Márcio Montagnana, pelo tempo cedido e apoio na elaboração deste trabalho.

À Plantar Siderúrgica, principalmente à colaboradora Tatiane, por fornecer todas as informações necessárias para a construção do Inventário do Ciclo de Vida.

À CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais, pelo apoio financeiro.

À minha família, em especial à minha mãe que me auxiliou com a revisão deste trabalho.

Aos meus amigos que tornaram esta jornada mais leve.

Ao Pedro, por sempre me incentivar e por compartilhar todos os momentos comigo.

RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, produto utilizado principalmente como fonte de energia e agente redutor de minério de ferro na indústria de ferro-gusa e aço. Apesar de vasta, grande parte da produção brasileira de carvão vegetal é pouco tecnológica e ineficiente, com baixo aproveitamento dos subprodutos e resíduos gerados. O carvão vegetal, produzido através da pirólise lenta da madeira, também produz gases condensáveis (alcatrão insolúvel e extrato pirolenhoso) e gases não condensáveis. Normalmente, os gases da carbonização são lançados diretamente na atmosfera, causando impactos à saúde humana e ao meio ambiente, além do desperdício energético, uma vez que o gás não condensável possui cerca de 30% da energia contida na madeira. Sendo assim, buscando reduzir os impactos ambientais potenciais, promover a economia circular e melhorar a eficiência energética da cadeia produtiva do carvão vegetal, este trabalho apresenta os benefícios da utilização de subprodutos e resíduos da carbonização da madeira, por meio de uma Análise do Ciclo de Vida (ACV). Para isso, os impactos ambientais são avaliados comparando 4 cenários: i) Cenário atual de carbonização da madeira; ii) Carbonização da madeira com queima de gases não condensáveis; iii) Carbonização da madeira com recuperação da energia dos gases não condensáveis para geração de eletricidade; e o cenário iv) que avalia a recuperação de alcatrão insolúvel e dos resíduos florestais para gerar eletricidade adicional ao sistema, além do uso do Extrato Pirolenhoso (EP) no cultivo de eucalipto. Os resultados mostram que, devido a emissão de monóxido de carbono nos fornos de carbonização, a oxidação fotoquímica resultou no impacto mais significativo. É estimado que sejam sequestrados da atmosfera 3,3 toneladas de CO₂ eq./ton de carvão vegetal em todo seu ciclo de vida, e os cenários 2, 3 e 4 podem aumentar em 5,06%, 6,7% e 0,48% a quantidade de carbono sequestrada, respectivamente. O aproveitamento do Extrato pirolenhoso para utilização no cultivo de eucalipto traz ganhos ambientais importantes, devido ao seu potencial de reduzir o consumo de formicidas e herbicidas.

Palavras-chave: Carvão Vegetal, Eletricidade, Resíduos florestais, Combustão de gases, ACV, GEE.

ABSTRACT

Brazil is the world's leading producer of charcoal, mainly used as an energy source and reducing agent for iron ore in the pig iron and steel industry. Despite being vast, much of the Brazilian production of charcoal is low-tech and inefficient, with low use of the by-products and waste generated. Charcoal is produced through slow pyrolysis of wood, which also produces condensable gases (insoluble tar and pyroligneous extract) and non-condensable gases. Usually, carbonization gases are released directly into the atmosphere, causing health and environmental impacts, in addition to energy waste, since the non-condensable gas has about 30% of the energy contained in the wood. Therefore, seeking to reduce the potential environmental impacts, promote circular economy and improve energy efficiency of the charcoal production chain, this work presents the benefits arising from the use of wood carbonization by-products and wastes, through a Life Cycle Analysis (LCA). The environmental impacts were evaluated by comparing 4 scenarios: i) Current wood carbonization scenario; ii) Wood carbonization with non-condensable gases burning; iii) Wood carbonization with the recovering of non-condensable gases energy for electricity generation; and scenario iv) that assesses the recovering of insoluble tar and forest waste to generate additional electricity to the system, in addition to the use of Pyroligneous Extract (PE) in the cultivation of Eucalyptus. The results show that, due to carbon monoxide emissions in the carbonization furnaces, photochemical oxidation resulted in the most significant impact. It is estimated that 3.3 tons of CO₂ eq./ton of charcoal are sequestered from the atmosphere throughout its life cycle, and scenarios 2, 3 and 4 can increase the amount of sequestered carbon by 5,06%, 6,7% and 0,48%, respectively. The utilization of Pyroligneous Extract for use in eucalyptus cultivation brings important environmental gains, due to its potential to reduce the consumption of formicides and herbicides.

Keywords: Charcoal, Electricity, Biomass waste, Gases Combustion gases, LCA, GHG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forno primitivo do tipo meda.....	38
Figura 2 - Fornos do tipo hot tail	39
Figura 3 - Fornos de Superfície	40
Figura 4 - Forno retangular	41
Figura 5 - Forno do tipo retorta contínua.....	43
Figura 6 - Fornos metálicos de carbonização via micro-ondas.....	43
Figura 7 - Consumo de carvão vegetal na Indústria.....	44
Figura 8 - Preço Médio do Carvão Vegetal	45
Figura 9 - Principais consumidores de carvão vegetal no Brasil	46
Figura 10 - Produção de carvão vegetal em Minas Gerais.....	47
Figura 11 - Concentração de árvores plantadas por estado.....	48
Figura 12 - Metodologia utilizada	71
Figura 13 - Forno retangular da UPC de Curvelo.....	72
Figura 14 - Produção do forno 30 da UPC	72
Figura 15 - Balanço de energia, com base no PCS	73
Figura 16 - Balanço de energia, com base no PCI.....	73
Figura 17 - Limite do sistema.....	76
Figura 18 - Resultado AICV: Caracterização geral.....	103
Figura 19 - Resultado AICV: Normalização.....	105
Figura 20 - Resultado AICV: Depleção abiótica, durante a produção florestal	106
Figura 21 - Resultado AICV: Depleção abiótica de fósseis, durante a produção florestal	107
Figura 22 - Resultado AICV: Depleção de Recursos Abióticos	108
Figura 23 - Resultado AICV: Depleção de Recursos Abióticos Fósseis	109
Figura 24 - Resultado AICV: Aquecimento Global (GWP 100a), em kg CO _{2eq} /tcarvão	110
Figura 25 - Resultado AICV: Aquecimento Global, durante a produção florestal.....	112
Figura 26 - Resultado AICV: Depleção da Camada de Ozônio, em kg CFC-11eq/tcarvão.....	112
Figura 27 - Resultado AICV: Depleção da Camada de Ozônio, durante a produção florestal.....	113
Figura 28 - Resultado AICV: Toxicidade Humana, em kg 1,4-DBeq/tcarvão.....	114
Figura 29 - Resultado AICV: Toxicidade Humana, durante a produção florestal	115
Figura 30 - Resultado AICV: Oxidação Fotoquímica, em kg de C ₂ H ₄ eq/tcarvão	116
Figura 31 - Resultado AICV: Acidificação, durante a produção florestal	117
Figura 32 - Resultado AICV: Acidificação, em kg de SO _{2eq} /tcarvão	118
Figura 33 - Resultado AICV: Eutrofização, durante a produção florestal.....	119
Figura 34 - Resultado AICV: Eutrofização, em kg de PO _{4eq} /tcarvão	120
Figura 35 - Massa de CH ₄ e H ₂ ao longo do tempo (Forno 30)	151
Figura 36 - Massa de CO ao longo do tempo (Forno 30)	151
Figura 37 - Massa de CO ₂ e O ₂	152

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características físicas e químicas do carvão vegetal	29
Quadro 2 - Condições operacionais da carbonização	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processos de conversão e rendimento de produtos.....	24
Tabela 2 - Constituintes do Eucalipto.....	26
Tabela 3 - Produtos da carbonização	32
Tabela 4 - Composição média dos Gases Não Condensáveis (GNC)	32
Tabela 5 - Composição do gás não condensável ao longo da carbonização	33
Tabela 6 - Produtos da carbonização: composição do GC	35
Tabela 7 - Caracterização do GC de Eucalipto Mallee.....	36
Tabela 8 – Potencial de utilização dos produtos líquidos da carbonização	67
Tabela 9 - Cenários avaliados na ACV	75
Tabela 10 – Entradas e saídas para a produção de 1.000 mudas de eucalipto	78
Tabela 11 – Entradas e saídas para a produção de 1m ³ de madeira de eucalipto	82
Tabela 12 – Entradas e saídas para a produção de 1m ³ de madeira de eucalipto	83
Tabela 13 - Insumos para a produção de 1 tonelada de carvão vegetal	86
Tabela 14 - Fonte dos dados de entrada e do inventário: Produção de mudas.....	90
Tabela 15 - Fonte dos dados de entrada e do inventário: Produção de madeira.....	91
Tabela 16 - Emissão de poluentes a partir da queima de 1 kg de diesel.....	93
Tabela 17 - Consumo de diesel em cada operação florestal.....	95
Tabela 18 - Resíduos da biomassa gerados.....	96
Tabela 19 – Maquinários utilizados e consumo de diesel no processamento e transporte dos resíduos	97
Tabela 20 - Fonte dos dados de entrada e do inventário: Produção de carvão vegetal	98
Tabela 21 - Poluentes emitidos (kg/ton de carvão produzido) para a combustão do GNC, alcatrão e resíduos da biomassa.....	100
Tabela 22 - Potencial de geração de eletricidade a partir da queima do alcatrão.....	100
Tabela 23 - Potencial de geração de eletricidade a partir da queima dos resíduos da biomassa	101
Tabela 24 - Categorias de impactos selecionadas.....	102
Tabela 25 - Potencial anual de redução de impacto	122
Tabela 26 - Cálculo estequiométrico da queima do GNC.....	142
Tabela 27 - Cálculo estequiométrico da queima do Alcatrão.....	142
Tabela 28 - Composição do Gás condensável.....	153
Tabela 29 - Potência térmica disponível no Cluster	154
Tabela 30 – Produtividade de eletricidade por ton de carvão.....	154

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Análise de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
AMS	Associação Mineira de Silvicultura
BEN	Balanco Energético Nacional
BEEMG	Balanco Energético do Estado de Minas Gerais
CEMIG	Concessionária de Energia do Estado de Minas Gerais
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CML	<i>Chain Management by Life Cycle Assessment</i>
COVNM	Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
EFGT	Turbina a gás de Queima Externa (<i>Externally Fired Gas Turbines</i>)
EP	Extrato Pirolenhoso
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GC	Gases Condensáveis
GEE	Gases de Efeito Estufa
GNC	Gases Não Condensáveis
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KCL	Cloreto de Potássio
MAP	Fosfato Monoamônico
Mdc	Metros cúbicos de carvão
MMA	Ministério do Meio Ambiente
Mtoe	Milhões de toneladas de óleo equivalente
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
ORC	Ciclo Rankine Orgânico (<i>Organic Rankine Cycle</i>)
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
RCK	Fornos Container Rima
SRC	Ciclo Rankine Convencional (<i>Steam Rankine Cycle</i>)

SINDIFER	Sindicato da Indústria do Ferro em Minas Gerais
SSP	Superfosfato Simples
UPC	Unidade produtora de Carvão Vegetal
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO	16
1.1 Introdução	16
1.2 Motivação.....	18
1.3 Objetivos	19
1.4 Estrutura da dissertação.....	20
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Carvão vegetal	22
2.2 Produção do carvão vegetal.....	23
2.2.1 Propriedades da madeira.....	25
2.2.2 Variáveis do processo e qualidade do carvão vegetal.....	27
2.2.3 Gases Condensáveis e Não Condensáveis da carbonização	31
2.3 Fornos de carbonização	37
2.4 Produção de carvão vegetal no Brasil	43
2.5 Impactos da produção de carvão vegetal	48
2.5.1 Degradação de florestas nativas.....	48
2.5.2 Más condições de trabalho	49
2.5.3 Emissões atmosféricas e baixo nível tecnológico.....	49
2.6 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)	51
2.6.1 Objetivo e escopo	51
2.6.2 Análise de inventário.....	52
2.6.3 Avaliação de impactos	52
2.6.4 Interpretação.....	54
CAPÍTULO 3: ALTERNATIVAS DE UTILIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS E RESÍDUOS DA CADEIA PRODUTIVA DO CARVÃO VEGETAL	55
3.1 Combustão dos gases da carbonização.....	55
3.1.1 Queimadores	59
3.2 Geração de Eletricidade	61
3.3 Aproveitamento dos Gases Condensáveis	63
3.4 Aproveitamento dos resíduos florestais.....	67
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA	70
4.1 Metodologia utilizada.....	70
4.2 Caracterização da Unidade Produtora de Carvão Vegetal	71
CAPÍTULO 5: ESTUDO DE CASO	75

5.1	Objetivos e escopo do sistema.....	75
5.1.1	Função, Unidade Funcional e Limites do sistema	76
5.1.2	Fronteiras geográfica, temporal e tecnológica.....	76
5.1.3	Limitações da ACV	77
5.2	Inventário do Ciclo de Vida.....	78
5.2.1	Etapa Produção Florestal de Eucalipto	78
5.2.2	Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC).....	85
5.2.3	Considerações sobre o Inventário.....	88
5.3	Metodologia de Avaliação dos Impactos Ambientais	101
	CAPÍTULO 6: RESULTADOS E DISCUSSÕES	103
6.1	Resultados da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	103
6.1.1	Depleção de Recursos Abióticos	105
6.1.2	Aquecimento Global.....	109
6.1.3	Depleção da Camada de Ozônio	112
6.1.4	Toxicidade humana.....	113
6.1.5	Oxidação Fotoquímica	115
6.1.6	Acidificação.....	116
6.1.7	Eutrofização.....	118
6.2	Discussão dos resultados e recomendações.....	120
	CAPÍTULO 7: CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
7.1	Conclusão	125
	CAPÍTULO 8: REFERÊNCIAS, APÊNDICES E ANEXOS	128
8.1	Referências bibliográficas	128
	APÊNDICE A – QUEIMA DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO.....	142
	APÊNDICE B – Inventários do Ciclo de Vida (ICV)	143
	ANEXO A – Resultado das análises <i>in loco</i> dos gases GNC e GC	150
	ANEXO B – <i>Clusterização</i> e Geração de Eletricidade	153

CAPÍTULO 1: PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO

1.1 Introdução

O carvão vegetal, produzido através da carbonização da biomassa, é um combustível comumente utilizado para cozimento e aquecimento doméstico em certas partes do mundo em desenvolvimento, especialmente na África e no Sudeste Asiático. No Brasil, o carvão vegetal é produzido em larga escala, principalmente, para utilização como fonte de energia e termo redutor nas indústrias de ferro-gusa e aço.

O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo, produzindo cerca de 6,18 milhões de toneladas em 2020 (IBGE, 2021), além de ser um dos únicos países que utilizam o carvão vegetal nas indústrias de ferro-gusa e aço. Tradicionalmente, o carvão mineral é utilizado como redutor do minério de ferro na siderurgia, entretanto, substituí-lo pelo carvão vegetal torna o processo produtivo mais sustentável em termos de emissões, quando se compara o balanço de emissão de ambos processos (PAULA, 2014). Desse modo, o carvão vegetal é um insumo muito importante para a economia brasileira, além de ter um grande papel para descarbonização da indústria siderúrgica. O carvão vegetal é muito presente no estado de Minas Gerais, onde se concentra o maior consumo e produção no país (IBÁ, 2021).

O carvão vegetal é produzido através da pirólise lenta da madeira - a biomassa é submetida a um aquecimento lento, atingindo temperaturas entre 400°C e 500°C, em um ambiente com pouca, ou nenhuma, quantidade de oxigênio. A biomassa sofre um processo de decomposição térmica, e o produto principal é o carvão vegetal. Além do carvão, ocorre também a produção de Gases Condensáveis (extrato pirolenhoso e alcatrão insolúvel) e de Gases Não Condensáveis (Dióxido de carbono, Monóxido de carbono, Hidrogênio e Metano) (PINHEIRO *et al.*, 2006; ALVES, 2003). A quantidade e composição de cada um dos produtos da carbonização depende de algumas variáveis de operação, como a biomassa, taxa de aquecimento, temperatura final e tipo de forno (ANTAL & GRØNLI, 2003).

Apesar do Brasil ser o maior produtor de carvão vegetal no mundo, grande parte de sua produção ainda é pouco eficiente. No país, cerca de 70% da produção, ocorre em fornos menos tecnológicos (rabo-quente e fornos de superfície) por pequenos e médios produtores (OLIVEIRA *et al.*, 2017), sendo que esses fornos possuem menor rendimento gravimétrico em carvão e pouco é feito em relação aos gases da carbonização.

É muito comum que os gases produzidos na carbonização sejam lançados diretamente na atmosfera, sem nenhum tratamento prévio ou queima, principalmente por produtores informais. A consequência disso é que a saúde dos trabalhadores e da comunidade próxima é prejudicada, devido a piora da qualidade do ar, além do impacto no meio ambiente, já que a carbonização da madeira emite gases de efeito estufa como o Dióxido de Carbono (CO₂) e o Metano (CH₄) na atmosfera.

Além dos impactos sociais e ambientais, a emissão de gases é um desperdício de energia, pois os gases eliminados podem conter cerca de 30 a 50% da energia da madeira, e essa energia é desperdiçada ao ser lançada na atmosfera em forma de gases de carbonização (LEME *et al.*, 2018).

No cenário atual, onde há o crescimento da demanda energética global, principalmente por fontes limpas e renováveis, e onde tem sido crescente a preocupação ambiental devido a elevação da temperatura média global, ações que visam a redução do desperdício energético e a mitigação das emissões de efeito estufa são urgentes.

Desse modo, aproveitar os gases da carbonização pode ser muito vantajoso. Por apresentar em sua composição gases combustíveis, os gases da carbonização podem ser queimados para mitigação das emissões de gases de efeito estufa e para geração de eletricidade, sendo que alguns estudos têm avaliado essa possibilidade, como em Leme (2016), Bailis *et al.* (2013), Vilela *et al.* (2014), Santos *et al.* (2017), Chiamenti *et al.*, (2016).

Para fomentar a economia circular e o aproveitamento de todos os coprodutos do processo produtivo do carvão vegetal, o extrato pirolenhoso, contido no gás condensável vem sendo estudado como potencial pesticida (inseticida, fungicida, bactericida, entre outros) e também como agente conservante de produtos químicos por autores como Zeferino *et al.* (2018), Cardoso (2004), Neto *et al.* (2017), Almeida (2012). Além disso, o alcatrão

insolúvel tem sido estudado para ser utilizado como biocombustível em Czernik & Bridgewater (2004), PIRES et al, (2019), Zedah et al., (2020).

Sendo assim, este trabalho visa integrar todas essas possibilidades, buscando reduzir os impactos ambientais potenciais, promover a economia circular e melhorar a eficiência energética da cadeia produtiva do carvão em uma Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC), através de uma Avaliação de Ciclo de Vida. Desse modo, a combustão dos gases não condensáveis da carbonização e seu aproveitamento térmico para geração de eletricidade serão discutidos e avaliados. Adicionalmente, a queima do alcatrão insolúvel e dos resíduos florestais para geração de eletricidade adicional ao sistema, e o aproveitamento do extrato pirolenhoso no cultivo do eucalipto são outras possibilidades que também serão incorporadas nos outros cenários avaliados.

1.2 Motivação

Mitigar o aquecimento global e limitar o aquecimento da terra em 1,5°C é um dos maiores desafios que a sociedade já enfrentou. Segundo Nogueira *et al.* (2021), para atingir esse objetivo, acordado por 195 nações no acordo de Paris, as emissões de carbono precisam ser reduzidas em 7,6% todos os anos até 2030. Entretanto, em abril de 2020, mesmo com o mundo enfrentando a crise do COVID-19, a concentração média de CO₂ na atmosfera foi a mais alta desde o início das medições, em 1958 (PNUMA, 2020). Desse modo, ações que busquem a descarbonização da economia em seus diversos setores são urgentes.

A siderurgia é considerada um setor intensivo em carbono e, ainda, de difícil descarbonização. No processo de produção de ferro-gusa, seja na rota que utiliza carvão vegetal ou mineral, sempre haverá a emissão de CO₂ para a atmosfera. O processo de produção de ferro gusa com carvão vegetal pode levar a uma vantagem ambiental significativa, já que a emissão de CO₂ equivale a 10% do valor observado para uma usina integrada a coque, a partir de uma análise de todo o ciclo de vida dos produtos (PAULA, 2014). Ainda assim, um forno retangular de alvenaria emite, em média, 1306 kg de CO₂, 421 kg de CO e 76,7 kg de CH₄ e 16 kg de H₂ para cada tonelada de carvão vegetal produzido (LEME, 2016).

Além da preocupação com a crise climática, a redução do consumo de recursos naturais, o aproveitamento e descarte adequados de resíduos, iniciativas de combate ao desmatamento e iniciativas para propiciar melhores condições de trabalho para os trabalhadores são alguns dos temas que tem sido foco na última década com o avanço da agenda ESG (*Environmental, Social e Governance*).

Portanto, apesar do carvão vegetal ser uma alternativa sustentável para a siderurgia, o seu processo produtivo pode causar impactos ambientais e sociais significativos. Muita evolução ainda pode ser promovida no ciclo de vida produtivo do carvão vegetal, e é evidente que o contínuo estudo e desenvolvimento de novas tecnologias e melhorias dos processos atuais de carbonização, visando aprimorar o rendimento do carvão vegetal e tornar seu ciclo de vida mais sustentável, além de serem primordiais para o meio ambiente e para sustentabilidade das florestas, são essenciais também para a indústria.

Desse modo, buscando reduzir os impactos ambientais potenciais, promover a economia circular e melhorar a eficiência energética da cadeia produtiva do carvão, este trabalho apresenta os benefícios decorrentes da utilização de subprodutos e resíduos da carbonização da madeira, por meio de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

1.3 Objetivos

Objetivo geral:

Avaliar os impactos potenciais da produção de carvão vegetal, em uma Unidade Produtora (UPC) carvão vegetal típica, através da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Objetivos específicos:

- Levantamento de dados e elaboração do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) para uma Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC) típica e sua unidade florestal;

- Identificar oportunidades para reduzir os impactos ambientais potenciais, promover a economia circular e melhorar a eficiência energética da cadeia produtiva do carvão vegetal;

- Comparando 4 diferentes cenários: i) Cenário atual de carbonização da madeira; ii) Carbonização da madeira com queima de gases não condensáveis; iii) Carbonização da madeira com recuperação da energia térmica gerada na queima dos gases não condensáveis para geração de eletricidade; e o cenário iv) que avalia a recuperação de gases não condensáveis, do alcatrão insolúvel e dos resíduos da biomassa para gerar eletricidade, bem como o uso do extrato pirolenhoso no cultivo de eucalipto. Para o estudo de caso será considerada a UPC de Curvelo – MG.

- Avaliar diferentes cenários de produção de carvão vegetal, frente às categorias de impacto: potencial de aquecimento global, toxicidade humana, oxidação fotoquímica, acidificação, eutrofização, depleção de recursos abióticos e depleção da camada de ozônio.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação possui a seguinte estrutura:

Capítulo 1: Proposta da dissertação. Este capítulo introduz o assunto, apresentando a motivação do trabalho, objetivo geral e específicos, bem como a estrutura da dissertação.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica. Este capítulo apresenta o processo da carbonização da madeira em geral, as variáveis do processo e aspectos relevantes das propriedades da matéria-prima e da qualidade do carvão vegetal. Os tipos de fornos utilizados na produção de carvão vegetal são abordados, com foco na produção de carvão vegetal brasileira em fornos retangulares. Por último, trata sobre os impactos relevantes da cadeia produtiva do carvão vegetal e apresenta a ferramenta para avaliação e quantificação de impactos ambientais, conhecida como Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Capítulo 3: Alternativas de utilização dos subprodutos e resíduos da cadeia produtiva do carvão vegetal. Este capítulo apresenta métodos que buscam melhor aproveitamento dos subprodutos e resíduos, a fim de reduzir as emissões, trazer ganhos ambientais e reduzir o desperdício energético. A combustão dos gases da carbonização é um dos principais meios para redução das emissões, dessa forma, serão discutidos os desafios e benefícios da combustão dos gases e os equipamentos queimadores. Além disso, a geração

de eletricidade, formas de aproveitamento do gás condensável e dos resíduos florestais serão abordados.

Capítulo 4: Metodologia. Neste capítulo, a Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC) de Curvelo – MG é apresentada, bem como a metodologia utilizada para avaliação dos impactos ambientais.

Capítulo 5: Estudo de caso. Este capítulo descreve a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) realizada na Unidade Produtora de carvão vegetal de Curvelo - MG e de sua unidade florestal de produção de eucalipto.

Capítulo 6: Resultados e discussões. Este capítulo apresenta os resultados da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) para os 4 cenários avaliados, além de propor recomendações para a UPC.

Capítulo 7: Considerações finais. Este capítulo expõe as conclusões do estudo e sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 8: Referências bibliográficas, Apêndices e Anexos. Por fim, o capítulo final apresenta as referências bibliográficas utilizadas, apêndices e anexos.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Carvão vegetal

O carvão vegetal é um material orgânico com elevado teor de carbono, que é utilizado para fornecer energia a muitas residências em países em desenvolvimento, para aquecimento e também cocção de alimentos, além de desempenhar um papel importante como fonte de calor e carbono na indústria.

O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo, sendo que produziu cerca de 6,18 milhões de toneladas em 2020, o que representa 12% da produção de carvão vegetal mundial. São milhões de toneladas de carvão vegetal consumidas ao ano, principalmente como matéria-prima na indústria de siderurgia (IBGE 2021; IBÁ, 2021).

Ao redor do mundo, o carvão mineral é utilizado como agente termo redutor na produção de ferro-gusa e aço, já o Brasil é o único país que utiliza carvão vegetal em escala industrial na indústria siderúrgica (RODRIGUES & JUNIOR, 2019). O carvão mineral é uma fonte não renovável de energia, e seu processo produtivo emite elevados volumes de gases de efeito estufa na atmosfera. Quando uma rota produtora de ferro-gusa que utiliza carvão mineral é comparada com uma rota que utiliza carvão vegetal, pode-se observar uma grande diferença no balanço de emissões líquidas. De acordo com Paula (2014), em usinas integradas a carvão vegetal oriundo de florestas plantadas, a emissão de CO₂ equivale a 10% do valor observado para uma usina integrada a coque. Segundo o autor, considerando a análise do ciclo do produto, cerca de 200 kg de CO₂ são emitidos por tonelada de aço bruto produzida pela rota a carvão vegetal.

Além do fator ambiental, a utilização do carvão vegetal na indústria siderúrgica resulta em melhor qualidade do produto final. Segundo Antal & Grønli (2003), o carvão vegetal não contém praticamente enxofre ou mercúrio, o que reflete na qualidade do aço. Ademais, se comparado com outros combustíveis renováveis, como etanol e hidrogênio, o carvão é fácil de armazenar e barato de produzir (RODRIGUES & JUNIOR, 2019).

Outra aplicação do carvão vegetal é como aditivo no solo, também chamado de biochar. Segundo Antal & Grønli (2003), após observações em uma

área de terra muito fértil presente na floresta Amazônica, também conhecida como “terra preta”, foi notado os benefícios da aplicação do biochar no solo. Há muitos anos, povos indígenas da floresta amazônica adicionavam grandes quantidades de carvão vegetal na terra para torná-la fértil e alguns pesquisadores estimam que a terra preta ocupe uma área entre 1% e 10% de toda a área de floresta na Amazônia (MANGRICH *et al*, 2011). O carvão vegetal contém carbono roubado da atmosfera e, ao ser aplicado no solo, retém carbono e reduz os efeitos dos gases de efeito estufa (BENITES *et al*, 2010).

2.2 Produção do carvão vegetal

A biomassa é uma fonte renovável de energia que pode ser aproveitada, entre outras formas, através de processos de conversão termoquímica. Dentre esses processos, a pirólise é um dos meios de se converter, termoquimicamente, a biomassa em outros produtos. Este processo ocorre na presença de pouca, ou nenhuma, quantidade de oxigênio, e em temperaturas relativamente baixas (~500 °C), quando comparada com a gaseificação, que utiliza altas temperaturas (~900°C) (LOHRIA *et al.*, 2016).

A pirólise pode ocorrer de diferentes maneiras, o que influencia diretamente no rendimento dos produtos do processo. A Tabela 1 apresenta diferentes tipos de processos para a conversão termoquímica da biomassa, sendo possível notar que os 3 produtos (líquido, sólido e gás) sempre serão produzidos, porém o rendimento de cada um irá depender das condições operacionais do tratamento termoquímico.

A pirólise rápida é caracterizada por possuir altas taxas de aquecimento (~1000 °C/s), com transferência de calor muito rápida entre a fonte de calor e a biomassa, baixos tempos de residência para evitar reações secundárias entre as moléculas altamente reativas formadas e resfriamento rápido dos gases condensáveis para formação do líquido da pirólise. O líquido, ou bio-óleo é o produto principal de seu processo (rendimento aproximado de 75%), sendo o carvão apenas um subproduto, que pode ser utilizado como aditivo para solo ou combustível (BRIDGWATER, 2012). A tecnologia de pirólise rápida tem recebido grande atenção na produção de combustíveis líquidos e de outros produtos químicos especiais.

Tabela 1 - Processos de conversão e rendimento de produtos

Tipo de processos	Condições operacionais	Rendimento dos produtos		
		Líquido	Carvão	Gás
Pirólise rápida	Temperatura moderada (~500 °C). Tempo de residência dos vapores baixo (~1 segundo).	75%	12%	13%
Pirólise intermediária	Temperatura moderada (~500 °C). Tempo de residência dos vapores moderado (10 - 20 segundos).	50%	20%	30%
Pirólise lenta (Carbonização)	Temperatura baixa (~400 °C). Tempo de residência dos vapores alto (horas ou dias).	30%	35%	35%
Gaseificação	Temperatura alta (~900°C). Tempo de residência dos vapores alto.	5%	10%	85%

Fonte: Adaptado de Lohria et al., (2016) e Bridgwater (2012)

Nota-se na Tabela 1, que os processos que possuem tempos de residência mais longos e temperaturas moderadas, favorecem a produção do sólido. Esse é o caso da carbonização da madeira, para a produção de carvão vegetal. Assim, o carvão vegetal é produzido através de um processo de pirólise lenta, no qual a madeira é submetida a um aquecimento lento, atingindo temperaturas entre 400 °C e 500 °C, em um ambiente com pouca ou nenhuma quantidade de oxigênio. Após o processo de decomposição térmica da biomassa, o produto principal é o carvão vegetal. Além do carvão, ocorre também a produção de Gases Condensáveis (extrato pirolenhoso e alcatrão insolúvel) e de Gases Não Condensáveis (Dióxido de carbono, Monóxido de carbono, Hidrogênio e Metano) (PINHEIRO *et al.*, 2006; ALVES, 2003).

Durante o processo de carbonização, parte do carbono concentra-se na parte sólida, enquanto os componentes voláteis da madeira são liberados com o aumento da temperatura, o que torna o material mais limpo, de menor peso e de

maior teor energético (aproximadamente de 18 para 30 MJ/kg - PCI) (LEME, 2016).

Segundo Raad (2004), o processo de carbonização pode ser dividido em algumas etapas, de acordo com a temperatura do processo:

- **Secagem da madeira:** Etapa em que a água contida inicialmente na madeira se evapora. Geralmente, a temperatura dessa etapa fica abaixo de 180 °C.
- **Pré-carbonização:** Etapa em que começa a liberação dos produtos voláteis da decomposição da madeira, em um processo endotérmico. São liberados nesta etapa CO, CO₂, CH₄, ácido acético, metanol, enquanto a madeira se decompõe. A temperatura desta etapa fica entre 180 °C e 270 °C.
- **Carbonização:** Com o aumento da temperatura, a decomposição térmica da madeira se acelera, atingindo seu máximo valor, e o processo se torna exotérmico e autossustentável. As reações se tornam mais complexas e a eliminação de gases como CO, H₂, CO₂, CH₄, e vapores condensáveis são liberados são mais intensas. A liberação de alcatrão e de extrato pirolenhoso atinge sua quantidade máxima. A temperatura do processo fica entre 270°C e 500 °C e o produto final dessa etapa é o carvão vegetal. Se a temperatura do forno atinge valores superiores a 500°C, o carvão começa a se degradar termicamente, iniciando a gaseificação do mesmo.

2.2.1 Propriedades da madeira

Celulose, hemicelulose e lignina são os três principais componentes da biomassa lignocelulósica. A biomassa lignocelulósica típica contém cerca de 40 - 50% em peso de celulose, 20 - 40% em peso de hemicelulose e 10 - 40% em peso de lignina, porém o conteúdo de cada componente é diferente de acordo com o tipo de biomassa (ZADEH *et al.*, 2020).

O rendimento em carvão vegetal dependerá das frações mássicas de cada componente da madeira, por exemplo, as hemiceluloses apresentam baixa eficiência, com rendimento de 10 a 15%; a celulose, média eficiência, com rendimento de 25 a 30%; e a lignina, possui alta eficiência, com rendimento de 60 a 85%. Portanto, a madeira com maior teor de lignina, resultará em maior

rendimento de carvão. Isso é explicado, pois a presença de lignina contribui para a estabilidade térmica da madeira, influenciando o rendimento gravimétrico da carbonização. A presença de lignina costuma ser maior em árvores mais jovens, e tende a diminuir conforme a árvore envelhece (OLIVEIRA, 2010; CGEE, 2015).

No Brasil, a madeira de Eucalipto (*Eucalyptus spp.*) é a mais comumente usada para produção do carvão, e sua composição química média é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Constituintes do Eucalipto

Constituinte químico	%
Celulose	46%
Hemiceluloses	23%
Lignina total	27%
Extrativos totais	3,5%
Cinzas	0,5%

Fonte: Adaptado de MMA (2019)

O componente menos estável da biomassa é a hemicelulose, devido sua natureza amorfa, e sua degradação se inicia na temperatura de 250 °C, produzindo os gases não combustíveis, alcatrão e a maioria do ácido acético. A lignina é o componente mais resistente à degradação térmica, devido ao seu alto nível de aromaticidade e ao tamanho e disposição de sua estrutura. A decomposição da lignina é lenta (entre 100 °C a 900 °C) e sua presença contribui com o rendimento em carvão vegetal, ácidos carboxílicos, metanol e com a presença de fenóis e outros compostos aromáticos no líquido da pirólise. A celulose se decompõe a partir da temperatura de 260 °C até 350°C e contribui com quase toda a produção dos compostos voláteis inflamáveis (PEREIRA et al., 2017; HAYKIRI-ACMA *et al*, 2010).

Além de sua composição, outra propriedade da madeira que possui uma influência significativa no processo de carbonização é a sua umidade. A umidade da madeira afeta muito o tempo de carbonização e o rendimento do carvão vegetal, principalmente em fornos convencionais. Segundo Antal & Grønli (2003), um teor de umidade de 15 a 20% já é satisfatório para a maioria dos fornos de carbonização. Caso a madeira não seja submetida a um aquecimento prévio para redução de umidade, ela deve ser empilhada ao ar livre, de 90 a 150 dias, para secagem (MMA, 2019).

Chagas (2010) realizou experimentos com madeiras que possuíam diversos tipos de teores de umidade, com a finalidade de avaliar o rendimento gravimétrico, o tempo de carbonização e o índice de quebra. Quando a madeira possuía de 0 - 5% de teor de umidade, o rendimento gravimétrico atingiu o valor de 38,7% e, para umidade de 40-50%, o rendimento gravimétrico era de 37,7%. Em relação ao índice de quebra (tamboramento), para teor de umidade de 0 - 5%, o índice de quebra era 59% e passou a ser 61,7% com o aumento da umidade. O autor também relatou que o tempo de carbonização é maior para madeira com maiores teores de umidade. Ou seja, além do menor rendimento gravimétrico e maior tempo de carbonização, com o aumento da umidade, aumenta-se também a produção de finos.

Segundo Cardoso (2015), o maior teor de finos é explicado da seguinte maneira: quando a madeira é aquecida dentro do forno de carbonização, a energia cinética das moléculas de água presente na madeira é elevada, aumentando sua movimentação e, conseqüentemente, vapor de água é formado, e a agitação das moléculas dentro das células causa o rompimento da parede celular das fibras da madeira ($P_{\text{vapor}} > \text{resistência da célula}$). Desse modo, o rendimento em carvão vegetal é menor, devido às perdas por finos, o que origina um carvão de menor qualidade, pois este torna-se mais quebradiço.

A densidade da madeira é um parâmetro importante para avaliar a qualidade do carvão vegetal que será produzido. Se uma madeira com densidade alta e outra com densidade menor forem carbonizadas, com o mesmo volume pode-se obter maior rendimento gravimétrico de carvão vegetal para a madeira com densidade maior. A densidade da madeira tende a aumentar com a maturidade da árvore, pois a composição química se torna mais estável e há maior concentração de carbono (OLIVEIRA *et al*, 2010).

2.2.2 Variáveis do processo e qualidade do carvão vegetal

A qualidade do carvão vegetal pode ser definida por suas propriedades físicas: densidade, poder calorífico e resistência mecânica; e também por suas propriedades químicas: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas (resíduo pós-queima). Algumas variáveis operacionais da carbonização como temperatura

final e taxa de aquecimento possuem grande influência na produção e na qualidade do carvão vegetal.

A densidade do carvão vegetal é uma propriedade física importante para a qualidade do mesmo. Quanto maior sua densidade, maior será seu estoque energético (energia por volume). Além disso, com uma densidade maior, a resistência mecânica do carvão vegetal também aumenta. É também desejado que o carvão vegetal possua maior Poder Calorífico Superior (PCS), e quanto mais lignina presente, maior será o PCS, pois a lignina possui grande quantidade de carbono e libera grandes quantidades de energia na sua combustão (SILVA *et al.*, 2014).

Quanto menores forem os teores de matéria volátil e cinzas e maior o teor de carbono fixo, melhor será a qualidade do carvão vegetal. A qualidade do produto final irá determinar a sua finalidade, por exemplo, se o carvão vegetal possuir de 20 a 30% de conteúdo volátil, será destinado para uso doméstico. Se possuir entre 10 a 15% de conteúdo volátil e 80% de carbono fixo, poderá ser utilizado como carvão metalúrgico (GOMES, 2011; LEME, 2016).

O carbono fixo pode ser definido como a quantidade de carbono presente no carvão vegetal após a carbonização, ou seja, que não é eliminado. Pode ser calculado subtraindo da massa inicial a umidade, os voláteis e a cinza. A quantidade de carbono fixo fornecido por unidade de carvão é função do teor de lignina (ELYOUNSSI *et al.*, 2010).

O teor de cinzas de um carvão de boa qualidade normalmente situa-se entre 0,5 e 5%, resultando em uma faixa de poder calorífico entre 28 e 33 MJ/kg (OLIVEIRA *et al.*, 2010; ANTAL & GRØNLI, 2003). Segundo Pereira *et al.* (2013), um alto teor de cinzas pode causar a diminuição do poder calorífico do carvão vegetal, desgastes nos altos-fornos e, ainda pode prejudicar a qualidade do ferro-gusa, causando a formação de trincas e fissuras. O Quadro 1 apresenta um breve resumo das características físicas e químicas do carvão vegetal.

Quadro 1 - Características físicas e químicas do carvão vegetal

Características físicas do carvão vegetal	
Densidade	Quanto maior a densidade, maior será seu estoque energético (energia por volume) e sua resistência mecânica.
Poder calorífico	Quanto maior o Poder Calorífico Superior (PCS), maior será a qualidade do carvão vegetal para queima. PCS está diretamente relacionado com a quantidade de lignina presente, que libera grandes quantidades de energia na sua combustão.
Resistência mecânica	Mais resistência do material e menor produção de finos.
Características químicas do carvão vegetal	
Carbono fixo	Maior teor de carbono fixo (80%) resultará em um carvão de melhor qualidade, essa característica é função do teor de lignina.
Materiais voláteis	Menor o teor de matéria volátil, resultará em um carvão vegetal de melhor qualidade. Entre 20 a 30% de conteúdo volátil - uso doméstico. Entre 10 a 15% de conteúdo volátil - uso como carvão metalúrgico.
Cinzas	Menor o teor de cinzas, resultará em um carvão de melhor qualidade. O teor de cinzas de um carvão de boa qualidade normalmente situa-se entre 0,5 e 5%.

Em se tratando dos parâmetros operacionais da carbonização, a taxa de aquecimento (°C/min) é um parâmetro fundamental. Segundo Oliveira *et al.* (2010), maiores taxas de aquecimento resultam na redução dos teores de materiais voláteis e dos valores de densidade aparente e no aumento dos teores de carbono fixo e de cinzas.

O rendimento gravimétrico do carvão vegetal e sua resistência mecânica também são afetados pela taxa de aquecimento. Segundo diversos estudos encontrados na literatura (BRUNNER, 1977; MACKAY & ROBERTS; 1982, VARHEGYI & SZEKELY, 1990; ANTAL & GRØNLI, 2003; RODRIGUES & JUNIOR, 2019), quando a biomassa é aquecida rapidamente, o rendimento do carvão vegetal diminui, além disso, o carvão produzido se torna menos resistente, ou seja, mais friável. MacKay & Roberts (1982) relataram um aumento de 22 para 32% no rendimento de carvão produzido quando a taxa de

aquecimento é reduzida de 200 para 1°C/min. Entretanto, vale ressaltar taxas de aquecimento muito baixas podem não ser aplicáveis porque os tempos de reação necessários podem ser antieconômicos.

Assim, fica evidente que, quanto menor a taxa de aquecimento, maior o rendimento do carvão vegetal produzido. Entretanto, deve-se ter atenção com o período total da carbonização, pois longos tempos de carbonização podem se tornar antieconômicos para a unidade produtora de carvão vegetal. Além disso, segundo Rodrigues e Junior (2019) existem algumas controvérsias, como por exemplo: uma taxa alta de aquecimento resulta em menor rendimento e densidade aparente, entretanto, o conteúdo volátil da matéria também é menor, fator positivo para a qualidade do carvão. Desse modo, deve haver um equilíbrio ao se trabalhar com essa variável.

A qualidade final do carvão vegetal é muito influenciada pela temperatura final da carbonização, também conhecida como temperatura de pico, pois é a temperatura mais alta atingida. A temperatura final tem forte influência na estrutura dos poros, na área superficial, nas propriedades de adsorção do carvão e nos rendimentos dos produtos do processo (COSTA *et al*, 2016; ANTAL & GRØNLI, 2003). Quanto maior a temperatura final de carbonização, menor será o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e maior o rendimento gravimétrico em gases, além disso, maior será o teor de carbono fixo e o poder calorífico do carvão (TRUGILHO, 2001). Segundo Antal & Grønli (2003), quanto maior a temperatura de pico, maior será a porosidade do carvão vegetal, até atingir um valor de temperatura na qual a porosidade se estabiliza. O mesmo ocorre para a área superficial.

Outra variável do processo de carbonização que pode afetar o rendimento em carvão vegetal é a pressão, diversos autores estudaram o efeito da pressão no processo da carbonização. Blackadder & Rensfelt (1985) estudaram a influência da pressão no rendimento em carvão e concluíram que, em um intervalo de pressão de 0,1 MPa a 0,4 MPa, há um aumento do rendimento em carvão vegetal. Mok *et al* (1992) explicam que a melhora do rendimento do carvão deve-se ao fato da maior concentração da fase gasosa no interior do forno de carbonização, composta pelos materiais voláteis, e não pelo simples aumento da pressão do forno. Antal *et al*. (1996) concluíram que operar em altas pressões resultam na melhora da transferência de calor dentro do forno,

melhorando a uniformidade do carvão e reduzindo também o tempo do processo. Porém, aumentar a pressão para acima de 1 MPa não apresenta resultados satisfatórios.

Na maior parte dos casos, a carbonização ocorre em pressão atmosférica; apenas, em alguns experimentos laboratoriais, este parâmetro é alterado. Assim, é preciso avaliar sua aplicabilidade para cada situação, pois operar sob pressão certamente aumentará o custo operacional da planta, tornando-se antieconômico. O Quadro 2 apresenta um breve resumo das condições operacionais da carbonização.

Quadro 2 - Condições operacionais da carbonização

Condições operacionais	
Temperatura final	Quanto maior a temperatura final de carbonização, menor será o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e maior o rendimento gravimétrico em gases. Entretanto, maior o teor de carbono fixo e o poder calorífico do carvão.
Taxa de aquecimento	Maiores taxas de aquecimento resultam na redução dos teores de materiais voláteis e dos valores de densidade aparente, e no aumento dos teores de carbono fixo e de cinzas. Altas taxas de aquecimento diminuem o rendimento do carvão vegetal, e o carvão torna-se mais friável.
Pressão	A carbonização pressurizada pode resultar em um aumento do rendimento em carvão vegetal, entretanto é preciso avaliar sua aplicabilidade, devido ao aumento do custo operacional.

2.2.3 Gases Condensáveis e Não Condensáveis da carbonização

A carbonização da madeira produz carvão vegetal (sólido); extrato pirolenhoso e alcatrão insolúvel (gases condensáveis); e Dióxido de carbono (CO₂), Monóxido de Carbono (CO), Hidrogênio (H₂), Metano (CH₄) e uma pequena fração de Etano (C₂H₆) (gases não-condensáveis). A Tabela 3 mostra a composição aproximada dos produtos da carbonização (pirólise lenta), obtidos em um forno retangular, com capacidade de produção de 875 toneladas de carvão vegetal ao ano.

Tabela 3 - Produtos da carbonização

Produtos da carbonização	% base seca
Carvão vegetal	35%
Gases Condensáveis	43%
Gases Não condensáveis	22%

Fonte: Adaptado de CGEE (2015)

- Composição dos Gases Não Condensáveis

A composição da fração não condensável inclui CO₂, e N₂, e compostos combustíveis como CH₄, CO e H₂ (PEREIRA *et al.*, 2017, LEME *et al.*, 2018). A Tabela 4 é elaborada com base nos resultados de Leme (2016), que avalia as emissões típicas de um forno metálico retangular. Vale ressaltar novamente que a composição varia, consideravelmente, a depender de cada processo e da matéria-prima e, em muitos casos, há uma grande concentração de N₂ e O₂.

Tabela 4 - Composição média dos Gases Não Condensáveis (GNC)

Composição média dos Gases Não Condensáveis (GNC)	
Componente	%*
Nitrogênio	67,8%
Oxigênio	15,69%
Dióxido de Carbono	11,82%
Monóxido de Carbono	3,84%
Metano	0,7%
Hidrogênio	0,15%
Outros	0,8

Fonte: Adaptado de Leme (2016)

Nos primeiros estágios da carbonização, a quantidade de gases combustíveis liberadas no processo é baixa e há maior presença de vapor de água. Ao longo da carbonização, a temperatura aumenta, a quantidade de vapor de água diminui, e a presença de gases combustíveis é maior. Desse modo, o gás da pirólise possui uma fase inicial de baixa energia com alto teor de água, e uma fase posterior com o gás apresentando maior conteúdo energético (MIRANDA *et al.*, 2013). A Tabela 5 apresenta os principais produtos gerados em cada etapa da carbonização, de acordo com o aumento da temperatura do processo.

Tabela 5 - Composição do gás não condensável (base combustível), ao longo da carbonização

Estágio	<i>Remoção de água</i>	<i>Produção de gases oxigenados</i>	<i>Início da liberação de hidrocarbonetos</i>	<i>Liberação de hidrocarbonetos</i>
Temperatura (°C)	150 - 200	200 - 280	280 - 380	380 - 500
Conteúdo de carbono (% no carvão)	60	68	78	84
Conteúdo dos gases não condensáveis (% mássica)				
CO₂	68	66,5	35,5	31,5
CO	30	30	20,5	12,3
H₂	0	0,2	6,5	7,5
Hidrocarbonetos (Principalmente CH₄)	2	3,3	37,5	48,7

Fonte: Adaptado de Brito & Barrichello (1981)

De acordo com Zadeh *et al.* (2020), a formação de CO₂ se origina principalmente de reações de decomposição de grupos carbonila e carboxila, durante a pirólise da biomassa, enquanto a formação de CO se origina da quebra das ligações C-O-C e C = O. A formação de H₂ resulta, principalmente, da quebra de grupos C-H e aromáticos. Monóxido de carbono e Dióxido de carbono são produtos gasosos dominantes em baixas temperaturas e o Metano é um produto dominante em altas temperaturas, devido às reações de despolarização da lignina.

- Composição dos Gases Condensáveis

Os gases condensáveis são uma mistura de compostos oxigenados, voláteis à temperatura de pirólise e condensáveis em temperatura ambiente. Em sua forma condensada, possui cor marrom escura, odor similar ao de fumaça e pode ser chamado de líquido da pirólise, bio-óleo, líquido da madeira, óleo da madeira, licor pirolenhoso, entre outros. Aqui será utilizado o termo líquido da pirólise ou gás condensável (GC) para toda a mistura líquida condensável da carbonização.

O líquido da pirólise é uma mistura complexa contendo ácidos, álcoois, aldeídos, ésteres, cetonas, açúcares, fenóis, guaiacóis, siringóis, furanos, fenóis

derivados de lignina e terpeno extraível com multigrupos funcionais (QI *et al*, 2007). Podem existir mais de 300 componentes químicos em sua composição, a maioria desses possui baixa concentração e, geralmente, poucos podem ser encontrados em quantidades, suficientemente, altas (> 5% em peso) para justificar sua separação e comercialização como produtos químicos, como é o caso do ácido acético. O metanol também pode ser produzido em quantidades que justifiquem sua comercialização, nesse caso a madeira de árvores folhosas (*hardwood*) deve ser utilizada como matéria-prima (PIRES *et al*, 2019).

A água está presente no líquido da pirólise em decorrência da umidade inicial da biomassa utilizada, e pode representar cerca de 30% do seu conteúdo (JAHIRUL *et al*, 2012). O líquido da pirólise possui um pH baixo, em uma faixa de 2-3, sua acidez está relacionada com a presença do ácido acético e ácidos fórmicos em sua composição e, devido a essa acidez, o líquido torna-se corrosivo, principalmente, em altas temperaturas, o que demanda alguns requisitos de materiais na construção de equipamentos e tubulações (QI *et al*, 2007).

A composição específica do líquido da pirólise está diretamente relacionada ao tipo de biomassa utilizada, as condições operacionais (temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento) e ao processo de condensação (técnica de condensação e taxa de resfriamento) (ZADEH *et al.*, 2020). Todavia, sabe-se que existem duas frações: uma fração aquosa e outra fração orgânica (oleosa). A fração aquosa, também chamada de extrato pirolenhoso (EP), é composta majoritariamente por água (~80%), e outros compostos orgânicos, sendo o ácido acético o principal deles. Além disso, uma porção de alcatrão que é solubilizada pelo ácido acético se encontra nessa fração (ALVES, 2003). A fração orgânica, também chamada de alcatrão insolúvel, é mais densa e viscosa que o extrato pirolenhoso e possui uma cor mais escura; sua composição apresenta derivados fenólicos, sendo basicamente fenóis, cresóis, guaiacóis e siringóis (GOMES, 2011; ALVES, 2003). A composição aproximada do líquido da pirólise é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Produtos da carbonização: composição do GC

Produtos da carbonização	% em base seca
Carvão vegetal (80% carbono fixo)	33%
Gases condensáveis	42%
Extrato pirolenhoso	35,5%
Ácido Acético	5
Metanol	2
Alcatrão solúvel	5
(Fenol – 0,2%)	0,01
(Guaiacol – 0,1%)	0,005
(Cresol – 0,1%)	0,005
(0-Cresol – 1,1%)	0,055
(4-Etil-guaiacol – 0,2%)	0,01
(Siringol – 1 %)	0,05
(4-Metil-siringol – 1%)	0,05
(4-Etil-siringol – 0,6%)	0,03
(Outros – 15,7%)	0,785
(Água – 80%)	4
Água e outros	23,5
Alcatrão insolúvel	6,5%
Fenol – 6%	0,39
Guaiacol – 6%	0,39
2,6-Xilenol – 1%	0,065
Cresol – 1%	0,065
o-Cresol – 6%	0,39
p,m-Cresol – 7%	0,45
4-Etil-guaiacol – 1%	0,065
4-Propil-guaiacol – 0,1%	0,0065
3,5-Xilenol – 5%	0,325
Siringol – 35%	2,275
4-Metil-siringol – 11%	0,715
4-Etil-siringol – 5%	0,325
Água (16~20%) – 15,9%	1,0335
Gases não-condensáveis	25%

Fonte: Adaptada de Santos (2017)

Como mencionado, o líquido da pirólise pode ser separado em uma fase aquosa e em outra fase orgânica viscosa. A separação das fases pode ser feita

por destilação (ALVES, 2003), apesar de haver algumas controvérsias acerca desse método na literatura, devido à instabilidade térmica e química do líquido da pirólise (ZILNIK & JAZBINŠEK, 2012); ou pode ser realizada por decantação, ocorrendo mais facilmente quando a quantidade de água representar entre 30 a 45% da composição do líquido (TOMASSINI, 2015). Além disso, o fracionamento das fases pode ser realizado através de outros métodos de extração como, por exemplo, a extração com solvente (ex: metanol, acetona, acetato de etila, etc) ou cromatografia em coluna em escala laboratorial (ZADEH *et al.*, 2020; TOMASSINI, 2015). Bridgwater *et al.* (2007) realizou a caracterização do líquido da pirólise, apresentada na Tabela 7, avaliando as características de ambas frações, aquosa e orgânica viscosa, separadamente.

Tabela 7 - Caracterização do GC de Eucalipto Mallee

(*Continua*)

	Pirólise lenta (420 °C)	Pirólise lenta (500 °C)
Líquido total (% peso base seca)	51,9	52,8
Rendimento de Carvão (% peso base seca)	33,6	31,9
Rendimento de gás (% peso base seca)	13,4	11,3
Taxa de aquecimento (°C/min)	14,5	13,7
Líquido da pirólise - água e frações leves		
Conteúdo de água (%)	45,9	48,2
Conteúdo de carvão (%)	0,02	0,03
Viscosidade, cP	1,4	1,1
pH	2,3	2,5
<i>Análise elementar (%)</i>		
C	28,13	28
H	9,38	9,38
N	0,03	-
O (por diferença)	62,5	62,7
HHV (<i>wet</i>), MJ/kg	6,8	6,4

Tabela 7 - Caracterização do GC de Eucalipto Mallee

Líquido da pirólise - fração orgânica pesada		
Conteúdo de água (%)	8,6	11,3
Viscosidade, cP*	-	-
pH	2,8	2,6
<i>Análise elementar (%)</i>		
C	54,8	53,75
H	7,14	7,41
N	0,1	0,13
O (por diferença)	38	38,72
HHV (<i>wet</i>), MJ/kg	21,3	20,4

*A quantidade de óleo coletado não foi suficiente para medir a viscosidade, mas estava na ordem de várias centenas ou milhares de cp.

Fonte: Adaptado de Bridgwater *et al.* (2007)

2.3 Fornos de carbonização

O forno é um elemento fundamental no processo de carbonização, e o rendimento gravimétrico dos produtos pode variar de acordo com o tipo de forno utilizado. Os produtos da carbonização dependem da interação entre a matéria-prima e as variáveis do processo, desse modo é importante que o forno possua instrumentos que possibilitem que seus operadores realizem o monitoramento e controle apropriado do processo de carbonização (RODRIGUES e JUNIOR, 2019).

Fornos menos tecnológicos são altamente ineficientes e eliminam grandes quantidades de gases de efeito estufa, na atmosfera. Segundo Alfaro & Jones (2018), o rendimento gravimétrico em carvão desses tipos de fornos pode variar de 8% até 20%. A utilização de tecnologias mais avançadas de carbonização pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 43%, trazendo consequências positivas para o meio ambiente e benefícios econômicos para os produtores, pois essas tecnologias costumam apresentar um rendimento gravimétrico de carvão vegetal mais elevado (PENNISE *et al.*, 2001).

Os fornos podem ser classificados em fornos **primitivos** (fornos de terra), fornos **convencionais** (feitos de alvenaria) e fornos **metálicos** (PINHEIRO et al, 2006a).

- **Fornos primitivos:**

A maior parte do carvão produzido em países com alto índice de pobreza ocorrem em fornos de baixa tecnologia, chamados de fornos primitivos. Nesses locais, é comum a produção em dois tipos diferentes de fornos: fornos do tipo meda e fornos em trincheira. O forno do tipo meda pode ser construído ao cobrir pilhas de madeira no solo com material herbáceo e solo; para a construção de fornos em trincheira, é necessário cavar uma vala na terra, preencher a vala com madeira e cobrir com folhas verdes ou chapas metálicas e solo, para evitar que a madeira se transforme em cinzas no processo. Em ambos os casos, é preciso haver passagem de ar na terra para entrada de ar e saída de gases produzidos no processo de carbonização, que pode durar entre 8 a 12 dias. A principal vantagem dos fornos primitivos é o baixo custo, e as principais desvantagens são o baixo rendimento gravimétrico de carvão e a grande quantidade de gases emitidos, prejudicando a saúde dos trabalhadores e o meio ambiente (CHIDUMAYO & GUMBO, 2013, PINHEIRO *et al*, 2006a).



Figura 1 - Forno primitivo do tipo meda

Fonte: FAO (1984)

- **Fornos convencionais:**

Os fornos convencionais, ou de alvenaria, são os mais tradicionalmente usados no Brasil, devido ao seu baixo custo. O forno rabo-quente (*hot tail*) possui estrutura semiesférica e é construído com tijolos de barro; não possui chaminé

e, ao invés disso, possui furos nas paredes, que funcionam como uma passagem de entrada para o ar e de saída para os gases. O controle do processo é visual, feito a partir da coloração e quantidade da fumaça que sai dos buracos nas paredes (RODRIGUES e JUNIOR, 2019). O ciclo da carbonização é de sete dias; o rendimento gravimétrico de carvão é baixo, entre 25 a 30%, possuindo capacidade de produção anual aproximada de 50 toneladas (CGEE, 2015).

Uma das vantagens que esse forno apresenta é seu baixo custo de construção e manutenção, além de ser relativamente fácil encontrar mão de obra para operar o forno. Entretanto, o forno rabo-quente é caracterizado pela falta de mecanismos de controle de temperatura, o que prejudica a qualidade do carvão; pelo resfriamento lento e pela falta da possibilidade de mecanização do forno, o que leva a alta dependência de mão de obra para operações manuais de carga de madeira e descarga do carvão. Devido aos diversos furos nas paredes do forno rabo quente, há uma dificuldade em controlar a saída dos gases produzidos, que são eliminados na atmosfera sem tratamento, resultando em impactos negativos ambientais, sociais e econômicos (CGEE, 2015; RODRIGUES e JUNIOR, 2019).



Figura 2 - Fornos do tipo hot tail

Fonte: Zakaria *et al.* (2016)

Outro forno de alvenaria que é utilizado no Brasil é o forno de superfície (Figura 3), também chamado de *Beehive Kiln*, que é bastante similar com o forno Rabo-quente, porém com melhorias na sua estrutura. Este forno possui chaminé (1 a 6 chaminés) e, geralmente, tem 1 ou 2 portas; devido a sua estrutura, há a

possibilidade de maior controle da carbonização através dos operadores. A chaminé elimina os gases gerados na carbonização e melhora as condições térmicas do forno, assim como o fluxo de gases no seu interior (RODRIGUES e JUNIOR, 2019). O ciclo da carbonização dura em torno de 12 dias, apresentando um rendimento gravimétrico de carvão vegetal de 28 a 34%, e com capacidade individual de produção anual de 350 toneladas de carvão vegetal (CGEE, 2015).



Figura 3 - Fornos de Superfície

Fonte: (CEMIG, 2017)

Os fornos retangulares são utilizados no Brasil por grandes empresas, que desenvolverem este tipo de forno para produzir carvão vegetal em larga escala, de boa qualidade e buscando mecanizar ao máximo as operações. Sua estrutura é de concreto armado e alvenaria, possuem grande capacidade volumétrica, entre 150 e 450 m³, e um rendimento gravimétrico em carvão vegetal de 32 a 35% (LEME, 2016; RODRIGUES & JUNIOR, 2019).

O ciclo de carbonização dura em torno de 12 dias, sendo em média 4 dias para carbonização, 7 dias para o resfriamento e 1 dia para que o forno seja carregado/descarregado. Esse tipo de forno permite que as operações de carregamento e descarregamento sejam mecanizadas, necessitando de baixa mão de obra e melhorando as condições de trabalho dos operadores. Além disso, com a implementação dos fornos retangulares, houve um aumento significativo da produtividade de carvão vegetal nas unidades de carbonização (CGEE, 2015; LEME, 2016).

Os fornos retangulares mudaram a produção de carvão vegetal em escala industrial e esses fornos têm evoluído ao longo dos anos. De acordo com Leme (2016), os fornos retangulares começaram a ser utilizados nos anos 90, e o primeiro forno retangular a ser utilizado era denominado RAC 40 (R = retangular, AC = Acesita, 40 m³ de capacidade), com capacidade produtiva de 13 toneladas por mês. Com o passar dos anos, os fornos retangulares foram aumentando de tamanho e os mais recentes são o RAC 220 (220 m³ de capacidade), com duas portas metálicas e com capacidade produtiva de 72 toneladas por mês e o RAC 700 com capacidade produtiva de 200 toneladas por mês.

Em virtude do tamanho do forno retangular, realizar o controle da temperatura interna do forno é desafiador e, conseqüentemente, a carbonização pode não ocorrer de maneira uniforme, prejudicando a qualidade do carvão vegetal (RODRIGUES & JUNIOR, 2019; OLIVEIRA, 2012). Para evitar esse problema, equipar o forno com tecnologias para controle de temperatura permite um melhor controle da carbonização, resultando em maior rendimento gravimétrico de carvão e melhora da sua qualidade. Outras desvantagens dos fornos retangulares são possuir um alto custo de manutenção e necessitar de um longo tempo para seu resfriamento (RODRIGUES & JUNIOR, 2019).



Figura 4 - Forno retangular

Fonte: CIFlorestas (2008)

- **Fornos metálicos:**

Os fornos metálicos são construídos com chapas metálicas, geralmente possuem grande capacidade volumétrica (~200 m³) para a entrada de grande

volume de biomassa e, portanto, são utilizados principalmente em escala industrial.

As principais vantagens desses fornos é que permitem a mecanização para operações de carregamento/descarregamento, possuem maior rendimento em carvão vegetal, em torno de 35% - 40%, e permitem a recuperação dos subprodutos da carbonização (GOMES, 2011; COLOMBO *et al*, 2006).

Existem algumas variações de fornos metálicos, sendo elas: fornos metálicos de batelada, fornos metálicos semicontínuos e contínuos e forno metálicos de retortas contínuas.

Os fornos metálicos de batelada utilizam aquecimento direto e são, normalmente, de menor porte e podem ser fixos ou móveis. A desvantagem deste tipo de forno é a perda de calor pelas paredes, o que reduz o rendimento em carvão vegetal. Já os fornos semicontínuos e contínuos utilizam fonte externa de calor para aquecer a madeira e são de maior porte. Nesses fornos, os subprodutos são reaproveitados, principalmente, para secagem da madeira (GOMES, 2011).

As retortas contínuas são fornos de grande porte, possuem estrutura vertical, proporcionando maior aproveitamento dos subprodutos voláteis (GOMES, 2011). Nesses fornos, a madeira é cortada em pequenos pedaços (20 a 40 cm de comprimento) e são introduzidos no topo do forno vertical, descendo por gravidade até a base, em contracorrente com os gases queimados da própria pirólise (CGEE, 2015).

Segundo Raad (2004), as retortas contínuas podem ser consideradas o sistema de carbonização de madeira mais eficiente em operação no mundo, com rendimentos que podem alcançar até 38%. Entretanto, fatores como alto preço inicial para investimento e alto custo operacional impedem a aplicação de larga escala desse tipo de forno no Brasil.



Figura 5 - Forno do tipo retorta contínua

Fonte: Vilela *et al.* (2014)

Outro tipo de forno metálico é o que realiza a carbonização através de **micro-ondas**. Essa tecnologia é conhecida como Ondatec e consiste em um forno horizontal, equipado com esteira rolante que utiliza micro-ondas para fornecer a energia necessária para que ocorra a decomposição térmica da madeira e sua transformação em carvão vegetal (CGEE, 2015). De acordo com Jahirul *et al.* (2012), quando comparada com a pirólise lenta, a carbonização a partir de micro-ondas requer menor tempo de processo, possui maior eficiência na transferência de calor e há um melhor controle da temperatura do processo.



Figura 6 - Fornos metálicos de carbonização via micro-ondas

Fonte: (ONDATEC, 2020)

2.4 Produção de carvão vegetal no Brasil

Em 2020, o Brasil produziu cerca de 6,18 milhões de toneladas de carvão vegetal, consolidando sua posição como o principal país produtor de carvão

vegetal, com uma parcela de 12% da produção de carvão vegetal mundial (IBGE 2021; IBÁ, 2021). Aproximadamente 87,8% do carvão vegetal é consumido no setor industrial, 10% é destinado ao setor residencial brasileiro, 1,95% ao setor comercial e 0,22% ao setor agropecuário (BEN, 2020).

A indústria é responsável por quase todo o consumo nacional de carvão vegetal, grande parte das 177 produtoras de médio e grande porte de ferro-gusa, ferro liga e aço do país faz uso de carvão vegetal no seu processo produtivo (IBÁ, 2021). Como pode ser observado na Figura 7, construído a partir de dados obtidos em BEN (2020), o consumo do carvão vegetal na indústria concentra-se na produção de ferro-gusa e aço (84%), sendo consumidos 4,48 milhões de toneladas para essa finalidade, em 2019. Em 2020, o consumo do carvão vegetal na siderurgia caiu modestamente de 4,48 para 4,45 milhões de toneladas, com relação ao ano anterior (IBÁ, 2021).

Apesar de grande parte do carvão vegetal produzido ser destinado à produção de ferro-gusa, o carvão mineral ainda é o insumo mais consumido nesse processo. De acordo com SINDIFER – Sindicato da Indústria do Ferro em Minas Gerais (2020), em 2019, a produção de ferro-gusa no Brasil foi de 30,7 milhões de toneladas, sendo 77,1% oriunda de siderurgia a coque e 22,9% da siderurgia a carvão vegetal.

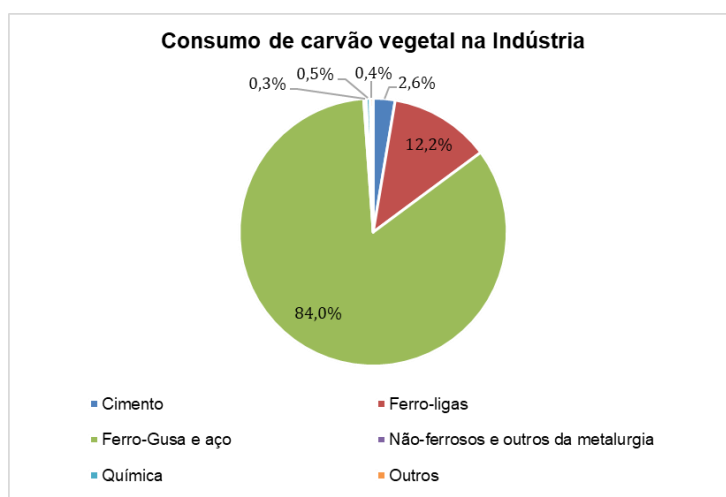


Figura 7 - Consumo de carvão vegetal na Indústria

Há uma grande oportunidade para a expansão do consumo de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira. Como já mencionado, quando uma rota produtora de ferro-gusa que utiliza carvão mineral é comparada com uma

rota que utiliza carvão vegetal, pode ser observada uma grande diferença no balanço de emissões líquidas e, de acordo com Paula (2014), a emissão de CO₂ em usinas a carvão vegetal equivalem a 10% do valor observado para usinas integradas a coque (PAULA, 2014). Além das vantagens para o meio ambiente, a utilização do carvão vegetal na produção do ferro-gusa resulta em geração de empregos diretos e indiretos, pois há maior demanda por mão de obra no setor florestal. De acordo com SINDIFER (2017), no ano de 2016, apenas em Minas Gerais, a indústria siderúrgica gerou 70.595 empregos, sendo que 50.360, ou seja 71,33%, foram no setor florestal.

Em relação ao preço do carvão vegetal, devido à crise econômica que ocorreu no mundo em 2008, os preços do carvão vegetal despencaram, e passou de R\$ 509,14 o preço médio da tonelada, em 2008, para R\$ 442,43, em 2009 (SEAPA, 2020). Segundo a AMS - Associação Mineira de Silvicultura (2009), o preço da tonelada do carvão vegetal em Minas Gerais chegou até R\$342 nesse período. De acordo com Leme (2016), a partir de 2010, iniciou-se uma recuperação lenta do mercado de carvão vegetal, entretanto os Estados Unidos, China e outros países asiáticos haviam reduzido as compras do ferro-gusa brasileiro, afetando negativamente o mercado nacional de carvão vegetal. Os preços baixos de carvão se mantiveram até 2016, devido a diminuição da produção de carvão vegetal, mas começaram a subir a partir daí, alcançando o valor de R\$ 652,5, em 2019, como mostra a Figura 8 (SEAPA, 2020).

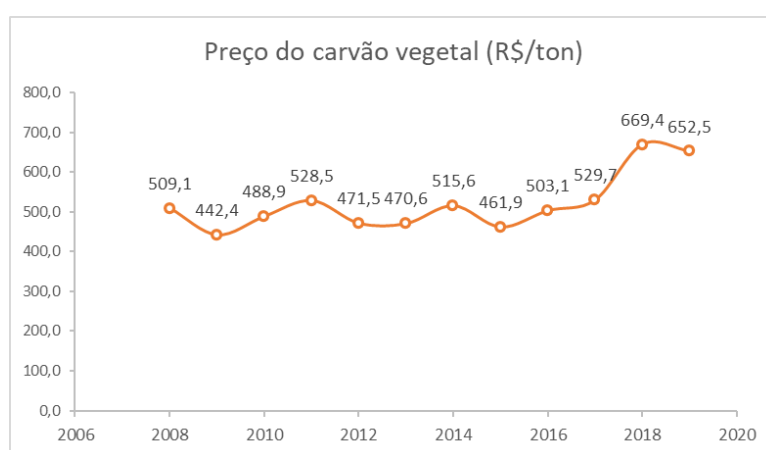


Figura 8 - Preço Médio do Carvão Vegetal

Fonte: Adaptado de SEAPA (2020)

O consumo de carvão vegetal ocorre, principalmente, no estado de Minas Gerais, sendo este um insumo muito importante para a economia do estado devido à presença de indústrias de ferro-gusa, aço e ferro-ligas e pelas indústrias de celulose (Figura 9).



Figura 9 - Principais consumidores de carvão vegetal no Brasil

Fonte: IBÁ (2019)

Além de ser o maior consumidor, segundo relatório do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, sobre a Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura brasileira, o estado de Minas Gerais foi responsável por 87,54% do total de carvão vegetal produzido nacionalmente em 2020. A produção de carvão vegetal, a partir da madeira de eucalipto, concentra-se principalmente na região do Jequitinhonha, noroeste e central do estado, como mostra a Figura 10.

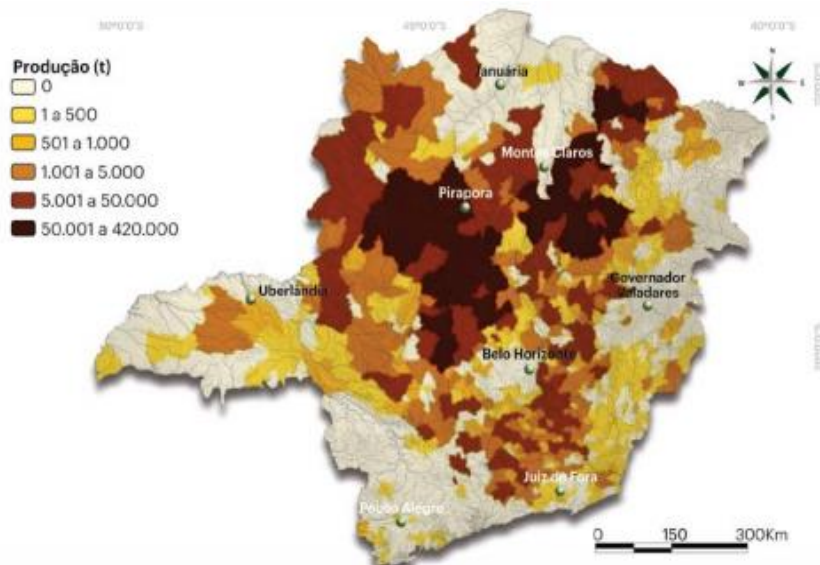


Figura 10 - Produção de carvão vegetal em Minas Gerais

Fonte: (CEMIG, 2017)

A madeira utilizada como insumo da carbonização pode ser proveniente de uma floresta plantada ou de uma floresta nativa. Em 2008, cerca de 51% da madeira utilizada era proveniente de florestas nativas, o que resultou em grandes áreas de florestas naturais desmatadas (IBÁ, 2017). Já em 2018, a produção de carvão vegetal no Brasil utilizava 94,24% de madeira proveniente da silvicultura, o que significou um grande avanço para o setor e uma menor degradação de florestas nativas. Em 2020, 94,15% da madeira para produção de carvão vegetal foi proveniente de florestas plantadas. Desse modo, apesar do grande avanço no setor florestal, ainda existe uma parcela de árvores nativas sendo consumidas para a produção de carvão vegetal no Brasil (IBÁ, 2021).

No Brasil, a espécie de árvore mais empregada, seja para consumo energético ou para fins industriais, é o *Eucalyptus* ssp., e a segunda mais utilizada é a espécie *Pinus*. Para produção de carvão vegetal o destaque é a espécie *Eucalyptus* ssp., que também pode ser destinada para indústria de papel e celulose e lenha para geração de energia térmica.

No ano de 2020, o total de área plantada de Eucalipto no país era de 7,47 milhões de hectares, e de Pinus era 1,7 milhões de hectares. Segundo IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores (2021), a maior quantidade de eucalipto plantada no país encontra-se no estado de Minas Gerais (Figura 11), representando cerca de 27,57% do total de eucalipto plantado no Brasil. Em seguida, aparecem os estados de São Paulo (18,07%) e Mato Grosso do Sul (14,99%).

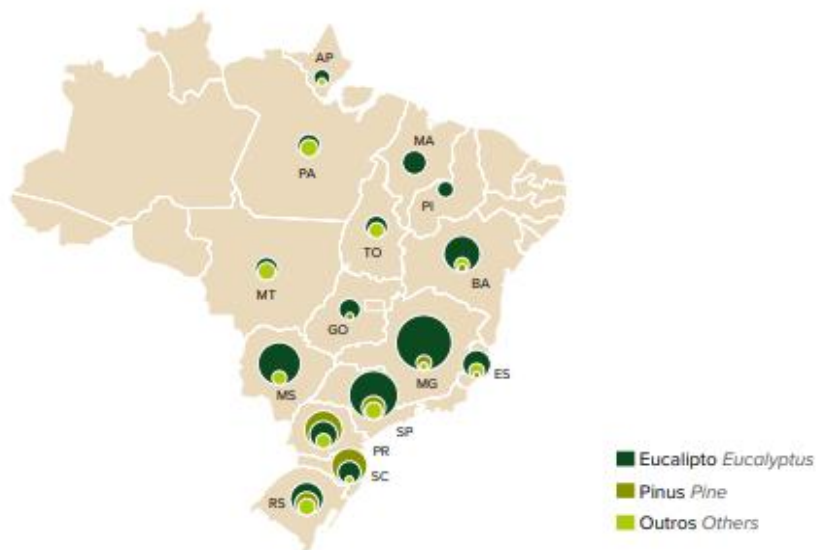


Figura 11 - Concentração de árvores plantadas por estado

Fonte: IBÁ (2019)

A produção de carvão vegetal brasileira, apesar de suas vantagens, possui algumas características negativas como a degradação de florestas nativas, más condições de trabalho, emissão atmosférica de gases e pelo baixo nível tecnológico utilizado em seus processos (LEME, 2016). Esses aspectos serão abordados no item 2.5.

2.5 Impactos da produção de carvão vegetal

2.5.1 Degradação de florestas nativas

Nos dias atuais, apesar de existirem maiores fiscalizações para evitar a extração vegetal de madeira nativa e do número de florestas plantadas estar crescendo, ainda existe a derrubada de vegetação nativa para a produção de carvão vegetal. Conforme apresentado no anuário estatístico do IBÁ (2020), apesar do grande avanço no consumo de florestas plantadas, em 2019, cerca de 300 mil toneladas de madeira provenientes de matas nativas foram consumidas para a produção de carvão vegetal, ocasionando impactos negativos para a biodiversidade brasileira.

Desse modo, para que haja um equilíbrio entre as necessidades socioeconômicas e ambientais, o uso de madeira proveniente de florestas nativas ainda é um problema que precisa ser combatido no Brasil. No mundo,

esse problema é ainda maior, pois a quantidade de florestas plantadas para produção de carvão é baixa, sendo consumido majoritariamente madeira de florestas nativas (IBÁ, 2017; RODRIGUES e JUNIOR, 2019).

O carvão vegetal produzido a partir de madeira da silvicultura pode ser visto como uma opção para combate ao desflorestamento. De acordo com IBÁ (2017), as florestas plantadas reduzem a pressão sobre florestas nativas, contribuindo para a conservação da biodiversidade, contribuem com o controle do clima, com a conservação do solo, com a regulação do fluxo hídrico, entre outros benefícios. Entretanto, existem controvérsias em relação ao cultivo de eucalipto, devido aos seus impactos socioambientais consequentes de sua monocultura, como a concentração fundiária, o êxodo rural e as alterações no equilíbrio dinâmico dos sistemas ambientais (TEIXEIRA & RODRIGUES, 2018).

2.5.2 Más condições de trabalho

Apesar de ser uma importante fonte de renda e geração de empregos, a produção de carvão vegetal no Brasil ainda está associada a más condições de trabalho, quando se trata de pequenos produtores informais. Grande parte da produção de carvão vegetal no Brasil, cerca de 70% da produção, ocorre em fornos menos tecnológicos, como os fornos do tipo rabo-quente e fornos de superfície, por pequenos e médios produtores (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Esses fornos necessitam de mão de obra humana, o que ocasiona na exposição dos trabalhadores a fumaça e ao calor que saem dos fornos (SOUZA *et al.*, 2010). A carbonização dura entre 3 e 4 dias e, apesar de ser um ambiente aberto, durante esse período, o carvoeiro inala gases tóxicos, fuligem e cinzas, além disso, a alta temperatura do forno pode provocar desidratação e queimaduras de 1º grau (CANETTIERI *et al.*, 2013). Em contrapartida, grandes unidades de carbonização possuem fornos mais tecnológicos e mecanizados, além de relações de trabalhos formais, o que torna as condições de trabalho melhores.

2.5.3 Emissões atmosféricas e baixo nível tecnológico

Do mesmo modo que a emissão de gases prejudica a saúde dos trabalhadores, ela também causa poluição ambiental. A produção de carvão

vegetal gera emissões de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), entre outros gases.

Como mencionado, 70% da produção brasileira de carvão vegetal ocorre em fornos de baixa tecnologia, e esses fornos produzem menor quantidade de carvão vegetal e possuem maior rendimento em gases, sendo que há pouco, ou nenhum, controle desses gases poluentes que são emitidos diretamente na atmosfera durante o processo (PEREIRA *et al.*, 2017). O estudo de Pennise *et al.* (2001) mostra a diferença nas emissões de diferentes fornos. Em seu experimento, o forno de superfície demonstra rendimento gravimétrico em carvão vegetal de 28,7%, e emite 1.533 kg de CO₂, 373 kg de CO e 56,8 kg de CH₄ para cada tonelada de carvão vegetal produzido. Enquanto o forno retangular demonstra valores muito melhores, possui rendimento gravimétrico em carvão vegetal de 36,4%, emite quase 1/3 da quantidade de CO₂ que o forno de superfície, 543 kg de CO₂, 162 kg de CO e 36,5 kg de CH₄ para cada tonelada de carvão vegetal produzido.

Alguns desses gases intensificam com o efeito estufa, sendo considerados GEE - Gases de Efeito Estufa, como é o caso do Dióxido de carbono e do Metano, que possui, aproximadamente, 29 vezes mais potencial de aquecimento global do que o CO₂, em um período de 100 anos (IPCC, 2021). O monóxido de carbono, apesar de possuir um curto tempo de vida na atmosfera, contribui para a formação de ozônio troposférico e, apesar de não afetar as mudanças climáticas de forma direta, sua presença afeta a abundância de gases de efeito estufa, como CH₄ e CO₂ (IPCC, 2021).

A combustão dos gases da carbonização é uma alternativa para controle da poluição, e pode fornecer calor para a secagem da madeira ou para geração de eletricidade, dessa forma, as empresas do setor investem continuamente em pesquisas e no desenvolvimento de tecnologias capazes de queimar eficientemente estes gases (LEME, 2016).

A falta de modernização na produção de carvão vegetal torna os processos ineficientes, sobrecarregam o sistema florestal, poluem mais e prejudicam a saúde dos trabalhadores. Desse modo, cada vez mais é necessário a inovação da produção do carvão vegetal, assim como promover incentivos para expandir a modernização para os pequenos e médios produtores, de forma a tornar o processo produtivo de carvão vegetal mais sustentável e eficiente (CGEE, 2015).

As emissões de Gases de Efeito Estufa, assim como outros impactos ambientais dentro do ciclo de vida do carvão vegetal, podem ser estimadas através da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

2.6 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação de Ciclo de Vida é uma metodologia que possui como objetivo avaliar os impactos ambientais de um produto, processo ou atividade ao longo de todo seu ciclo de vida. A ACV pode auxiliar na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais de produtos ou serviços, em vários pontos de seu ciclo de vida, e na tomada de decisões e na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição (ISO, 2006).

Para realizar a ACV é preciso realizar um inventário de entradas e saídas de um sistema de produto; avaliar os impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas; interpretar os resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos dos estudos (ISO, 2006).

A fronteira da ACV pode incluir todo o ciclo de vida do produto, conhecido como análise do berço-ao-túmulo (*cradle-to-grave*), onde a avaliação começa desde a aquisição da matéria-prima até a disposição final. Ou, pode ser uma análise portão ao portão (*gate-to-gate*), onde são avaliados os impactos de apenas uma etapa (ex. produção do carvão vegetal, excluindo os impactos ambientais da etapa de aquisição de matéria-prima e da utilização do carvão).

2.6.1 Objetivo e escopo

A primeira etapa de um ACV é definir o objetivo do estudo e seu escopo, todo os processos devem estar inclusos, assim como deve ser escolhida a unidade funcional. A unidade funcional é o parâmetro para qual todos os resultados são apresentados, é a unidade de referência do estudo. A unidade funcional de um estudo pode ser, por exemplo, a quantidade de biomassa utilizada, ou quantidade de carvão vegetal produzida.

As barreiras do sistema também devem ser definidas nessa fase. Exemplo: uma análise *cradle-to-gate*, pode incluir todas as etapas desde o plantio das árvores até a produção de carvão vegetal. Caso seja uma análise de todo o ciclo de vida, deve incluir desde a plantação de árvores, produção, transporte, até o consumo final do carvão vegetal, *cradle-to-grave*.

2.6.2 Análise de inventário

Essa etapa consiste em compilar e quantificar todas as entradas e saídas (materiais, energia, etc) do sistema estudado, ao longo de todo seu ciclo de vida. Nesta etapa deve haver descrição detalhada da tecnologia, período, região, limitações, validação, critérios de qualidade dos dados e coleta de dados (SANTOS *et al*, 2017).

2.6.3 Avaliação de impactos

Fase da avaliação do ciclo de vida com objetivo de compreender e avaliar a magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um produto ou atividade. Existem 2 categorias:

Midpoint – A caracterização *Midpoint* usa indicadores localizados ao longo do mecanismo ambiental antes de chegar ao ponto final da categoria. Entende-se como mecanismo ambiental o sistema de processos físicos, químicos e biológicos para uma dada categoria de impacto, vinculando os resultados da análise do inventário do ciclo de vida aos indicadores de categoria e aos pontos finais da categoria (MENDES *et al*, 2013).

Endpoint - A caracterização *Endpoint* considera todo o mecanismo ambiental até o seu ponto final. Portanto, refere-se a um dano específico relacionado com a área mais ampla de proteção, que pode ser saúde humana, ambiente natural ou recursos naturais. A área de proteção é um conjunto de pontos finais da categoria de valor reconhecido pela sociedade (saúde humana, recursos naturais, ambiente natural e ambiente antrópico) (MENDES *et al*, 2013).

É possível também combinar as 2 categorias. Mendes *et al*. (2013), identificaram 13 métodos de avaliação de impacto na literatura, 3 destes são citados abaixo:

- **ReCiPe**

Integra as abordagens *endpoint* e *midpoint*, sendo uma categoria combinada. Para as categorias de impacto mudança climática, destruição da camada de ozônio e consumo de recursos a aplicação é global; para as outras categorias, a aplicação é válida apenas para a Europa.

Categorias de impacto abordadas: mudança climática, depleção de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização aquática de água doce, eutrofização aquática marinha, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de matéria particulada, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha, radiação ionizante, uso do solo agrícola, uso do solo urbano, transformação de terra natural, esgotamento de recursos fósseis, esgotamento de recursos minerais e esgotamento de recursos de água doce.

- **Impact 2002+**

Avaliação é também combinada (*midpoint* + *endpoint*), e sua aplicação é válida apenas para a Europa.

Categorias de impacto *midpoint* abordadas: toxicidade humana, efeitos respiratórios, radiação ionizante, depleção de ozônio, formação de ozônio fotoquímico, ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre, acidificação aquática, eutrofização aquática, acidificação e eutrofização terrestre, ocupação do solo, aquecimento global, uso de energia renovável e extração mineral. Categorias *endpoint*: saúde humana, qualidade do ecossistema, mudança climática e recursos.

- **CML 2002**

Abordagem é *midpoint*, e sua aplicação é global para a maioria das categorias de impacto, exceto para as categorias de acidificação e formação de foto-oxidantes, que possuem aplicação apenas para a Europa.

Categorias de impacto abordadas: depleção de recursos abióticos, uso da terra, mudança climática, depleção de ozônio estratosférico, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha, ecotoxicidade terrestre, formação de foto-oxidantes, acidificação e eutrofização. Categorias de impacto adicionais que podem ser abordadas, a depender do estudo: perda de função de suporte à vida, perda de biodiversidade, ecotoxicidade em água doce (sedimentos), ecotoxicidade marinha (sedimentos),

impactos da radiação ionizante, mau cheiro do ar, barulho, calor residual, acidentes, letais, não letais, depleção de recursos bióticos, dessecação e mau cheiro da água.

A escolha do método de avaliação de impacto deve ser de acordo com o produto ou atividade do estudo em questão. Por exemplo, para ACV de processo carbonização com reaproveitamento de gases, sabendo que a combustão dos gases da carbonização reduz as emissões de GEE na atmosfera, seria interessante escolher uma categoria de impacto que abranja o impacto de mudanças climáticas.

2.6.4 Interpretação

Fase da Avaliação do Ciclo de Vida na qual as constatações da Análise de Inventário e/ou da Avaliação de Impacto são combinadas consistentemente com o objetivo e o escopo definidos para obter conclusões e recomendações e, desse modo, introduzir melhorias nos processos produtivos do estudo em questão (ISO, 2006).

CAPÍTULO 3: ALTERNATIVAS DE UTILIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS E RESÍDUOS DA CADEIA PRODUTIVA DO CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal possui destaque no mercado brasileiro, sendo impulsionado pelas indústrias e pelo setor energético. Entretanto, para que o carvão vegetal seja uma alternativa mais sustentável e de maior lucratividade, algumas mudanças em seu processo produtivo precisam ser levadas em consideração. O cenário atual da produção de carvão vegetal no Brasil é caracterizado, principalmente, pela utilização de fornos de baixa tecnologia, resultando em uma produção de carvão vegetal com baixa eficiência e na liberação de todos os gases produzidos para a atmosfera, sem nenhum tratamento prévio.

Neste capítulo, serão abordadas possíveis alternativas para o aproveitamento desses resíduos e coprodutos da carbonização, visando obter ganhos ambientais, de eficiência energética e promover a circularidade dentro da cadeia produtiva do carvão vegetal. Esses métodos compõem os cenários estudados na Avaliação de Ciclo de Vida, apresentada no Capítulo 5.

3.1 Combustão dos gases da carbonização

Os gases não condensáveis gerados durante a carbonização, os quais são compostos por Metano (CH_4), Monóxido de carbono (CO), Dióxido de carbono (CO_2), Hidrogênio (H_2), entre outros gases, geralmente são lançados na atmosfera, sem um tratamento prévio, reduzindo a qualidade do ar, causando impactos sociais e ambientais. Além disso, esses gases carregam cerca de 30 a 50% da energia contida inicialmente na madeira, e essa energia é desperdiçada ao ser emitida na atmosfera. No Brasil, é estimado que sejam lançados na atmosfera de 2 a 4 Mtoe anualmente em forma de gases de carbonização (LEME *et al.*, 2018).

Por conter gases combustíveis em sua composição, é possível realizar a combustão dos gases não condensáveis para redução dos impactos ambientais e para aproveitamento energético. Desse modo, através da queima, a fração de

CH₄ é reduzida consideravelmente, bem como a fração de CO (Miranda *et al*, 2013).

A energia térmica produzida com a queima dos gases também pode ser utilizada para secar a madeira que será carbonizada ou usada para geração de energia elétrica, podendo ser consumida no local e o excedente vendido para o distribuidor de energia (MIRANDA *et al*, 2013).

Apesar das grandes vantagens obtidas através da queima dos gases da carbonização, este processo encontra desafios técnicos em sua execução. Os principais desafios encontrados na queima dos gases da carbonização são: grande variação na composição dos gases, concentração de gases combustíveis abaixo do limite inferior de inflamabilidade, sistema de produção em batelada que requer a operação dos fornos de forma sincronizada (*clusterização*), transporte dos gases do forno até ao queimador e a resistência dos materiais utilizados no equipamento de queima (LEME *et al.*, 2018).

Para quantificar a energia contida no gás da carbonização, é preciso antes determinar a sua composição através de análises *in situ*. Um dos maiores desafios técnicos da queima dos gases da carbonização é a variação da sua composição durante a carbonização. Nos primeiros estágios da carbonização, a quantidade de gases combustíveis liberadas no processo é baixa e há maior presença de vapor de água. Ao longo da carbonização, a temperatura aumenta, a quantidade de vapor de água diminui, e a presença de gases combustíveis é maior. Desse modo, o gás da pirólise possui uma fase inicial de baixa energia com alto teor de água, e uma fase posterior com o gás apresentando maior conteúdo energético (MIRANDA *et al*, 2013), vide Tabela 5, item 2.2.3.

Diferentemente do carvão vegetal, material com alta densidade energética, os gases não condensáveis da carbonização possuem baixa densidade energética com um baixo poder calorífico (LHV - *Lower Heating Value*), geralmente abaixo de 6 MJ/kg (Leme *et al*, 2018). Esse fato tem influência com o conceito de Limite de Inflamabilidade, que define dois limites: Limite Inferior e Limite Superior de inflamabilidade. O Limite Inferior e Superior de inflamabilidade significam, respectivamente, o limite mínimo e máximo da fração de volume de um combustível em uma mistura comburentes que, quando submetido a uma fonte de ignição, causa uma combustão autossustentada (LEME *et al.*, 2018;

PEREIRA *et al.*, 2017). O que significa que o gás só entra em combustão quando está entre o limite inferior e superior de inflamabilidade.

Por ser um gás altamente diluído e possuir problemas de inflamabilidade, a combustão do gás não condensável é desafiadora (LEME *et al.*, 2018). Além desses fatores, sua disponibilidade não é constante devido ao sistema de produção em batelada, pois, após o processo de carbonização ser finalizado, o carvão precisa ser resfriado e descarregado, havendo interrupção do fornecimento do gás da pirólise (MIRANDA *et al.*, 2013).

Algumas medidas podem ser adotadas para tornar o gás da carbonização mais apto para combustão. Uma dessas medidas é diminuir o teor de umidade da madeira, para reduzir a quantidade de vapor d'água presente no gás. Isso pode ser feito através do reaproveitamento do calor residual gerado durante a queima dos gases para pré-secar a madeira, o que pode reduzir o teor de umidade inicial de 80% para cerca de 5 a 8%. Outras medidas que podem ser feitas para geração de energia com mais estabilidade é interligar fornos em diferentes estágios de carbonização, o que também pode ser chamado de *clusterização*, para garantir menor variação da composição do gás e do valor energético dos gases, ou pode-se ainda utilizar fornos semi-contínuos ou contínuos na UPC (VILELA *et al.*, 2014; MIRANDA *et al.*, 2013). Além disso, a fim de aumentar a capacidade de cogeração e garantir segurança energética, o uso de resíduos como galhos e folhas é estudado por alguns autores para ser utilizado como fonte suplementar de combustível.

Operar fornos de forma *clusterizada*, a fim de misturar gases de diferentes estágios da carbonização para combustão, é um tema que requer investigações e análises individuais, pois sincronizar os estágios de carbonização em diferentes fornos a fim de promover uma combustão autossustentável pode ser complexo. Além disso, existe a dificuldade em transportar os gases produzidos, até o queimador, pois os dutos de transporte possuem distâncias muito diferentes entre si, podendo ser desafiador alcançar a sincronia para manter a composição dos gases constante (PEREIRA *et al.*, 2017).

Diversos pesquisadores estudaram o aproveitamento dos gases de carbonização através da combustão. Barcellos (2002) é um dos primeiros estudos, se não o primeiro, a avaliar os benefícios da queima dos gases da carbonização em uma fornalha, e observa um efeito positivo, pois a combustão

na fornalha reduz as emissões de GEE's. A partir daí, outras pesquisas surgiram, como em Cardoso *et al.* (2010), onde é realizado a construção e a avaliação de um sistema de queima dos gases da carbonização, e é verificado a eficiência do sistema que reduz principalmente a emissão de metano e monóxido de carbono, em 96% e 93%, respectivamente. Coelho (2013) observou uma redução de emissões médias de CO de 74,14% e 99,8% das emissões de CH₄, após a queima em uma fornalha metálica.

Miranda *et al.* (2013) apresentam uma revisão técnica das tecnologias de cogeração na produção de carvão vegetal e revelam seu potencial de aplicação promissor no mundo e seus benefícios. Oliveira *et al.* (2013) avaliam o funcionamento de um sistema forno-fornalha, e identificam que, além do sistema possuir custo acessível, a fornalha funciona adequadamente e, durante cerca de 24h (34% do tempo da carbonização), realiza a combustão dos gases sem a necessidade de abastecimento com resíduos lignocelulósicos, reduzindo quase que todas as emissões para o ambiente. Bailis *et al.* (2013) apresentam uma ACV comparando a produção de carvão em fornos de cauda quente (*hot tail*) sem aproveitamento de gases e fornos “contêineres” de metal que, além de possuírem maior rendimento em carvão vegetal e processarem a madeira mais rapidamente, permitem que os gases de pirólise sejam utilizados para produzir calor e energia. Além de outros impactos avaliados, é identificado que os fornos de contêiner reduzem as emissões de GEEs em 52 até 119%.

Vilela *et al.* (2014) avaliam diferentes tecnologias de produção de carvão vegetal e cogeração de eletricidade através da queima dos gases. Cardoso (2015) avalia o potencial da utilização de um sistema forno-fornalha para queima dos gases de carbonização e aproveitamento do calor para secagem da madeira utilizada na produção do carvão. De modo geral, a redução relativa do teor de umidade, nas condições avaliadas é de 36,45%, e estima-se um ganho médio de 4,85% no rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Pereira *et al.* (2017) realizam um levantamento com fatores críticos da produção do carvão vegetal e discutem tecnologias referentes aos queimadores dos gases da carbonização. Santos *et al.* (2017) realizam uma Análise de Ciclo de Vida com diferentes tecnologias de carbonização buscando identificar seus impactos ambientais. Um forno retangular de alvenaria sem o aproveitamento de gases; um forno retangular de alvenaria acoplado a uma fornalha também de

alvenaria e um forno de alvenaria circular acoplado a uma fornalha de metal são comparados, e os resultados demonstram que o forno retangular de alvenaria acoplado a fornalha apresentou o melhor desempenho ambiental. LEME *et al.* (2018) estudam a recuperação energética dos gases de carbonização utilizando um sistema de *cluster* para produzir eletricidade. Três tecnologias de conversão de energia são avaliadas, e é indicado, através de uma análise econômica, que o Sistema Rankine a vapor é a tecnologia mais viável para geração de energia. Os autores também indicam que o Brasil tem perda estimada de 5.644 GWh de eletricidade anualmente na forma de gases de carbonização, e seu aproveitamento poderia reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa em até 15 Mton CO₂eq.

O aproveitamento dos subprodutos e resíduos da cadeia produtiva do carvão vegetal traz boas perspectivas para a indústria. Atualmente, apenas em grandes empresas estudos estão sendo realizados e aplicados para que os gases da carbonização sejam utilizados com a finalidade de aproveitamento energético e redução de emissões de GEEs.

3.1.1 Queimadores

O queimador é o equipamento desenvolvido para realizar a combustão dos gases gerados na carbonização e mitigar seu potencial poluidor, devendo funcionar de modo eficiente e contínuo. É essencial que o equipamento tenha baixo custo de instalação, operação e manutenção, para que a cadeia de produção do carvão vegetal não seja impactada economicamente, o que também afetaria o mercado de ferro-gusa. Desse modo, os modelos de queimadores aplicáveis as UCs são restritos a tecnologias menos avançadas, visto que as tecnologias mais avançadas poderiam encarecer o sistema produtivo (LEME, 2016).

O material utilizado na construção desses equipamentos pode sofrer rachaduras, desgastes e pode ocorrer até mesmo o seu colapso. Devido aos problemas constantes, os queimadores devem ser construídos com materiais resistentes a altas temperaturas para que sua vida útil seja maior (PEREIRA *et al.*, 2017). Assim, eles são geralmente construídos em alvenaria e componentes

refratários, como argamassas refratárias e mantas cerâmicas, usadas para isolar termicamente e proteger os materiais usados na construção.

O sistema de combustão é composto de um local para entrada de ar e de combustíveis, por uma câmara de combustão, que deve possuir volume suficiente para acomodar o gás produzido no processo de carbonização e evitar a combustão incompleta do gás, além de uma chaminé. Cabe ressaltar que volumes muito grandes na câmara de combustão também podem ser prejudiciais ao processo de ignição, devido à sua maior irradiação superficial que pode resultar em temperaturas mais baixas no local (CARDOSO, 2010).

Condições operacionais e de controle do processo como temperatura, tempo de residência e excesso de ar são fundamentais para o desempenho da queima, e devem ser considerados ao se fazer o projeto do queimador. A temperatura na câmara de combustão deve estar na temperatura de ignição do gás, ou acima, para iniciar e manter a combustão (800°C – 950°C) (PEREIRA *et al*, 2017)., ademais sabe-se que com o aumento da temperatura o combustível torna-se mais inflamável (CARDOSO, 2010).

A quantidade de ar requerida para a combustão de uma quantidade de gás é um dos principais parâmetros da combustão, é calculada de forma estequiométrica e significa a quantidade exata de moléculas de oxigênio necessárias para a oxidação completa de um combustível. Para garantir a queima completa do combustível, é necessário fornecer uma quantidade de ar maior que o requerido, ou seja, um excesso de ar (CARDOSO, 2010). No entanto, o excesso de ar não pode ser muito grande, pois desse modo irá causar um atraso na reação de combustão devido a redução da temperatura, diminuindo a eficiência geral do sistema. Além disso, deve haver turbulência, para garantir mistura adequada entre ar e o gás da carbonização e, assim, o contato entre os agentes oxidantes e o combustível (LEME *et al*, 2018).

O tempo de residência para a combustão completa deve ser longo o suficiente, devendo ser estabelecido um valor mínimo de permanência do gás em seu interior, porém esse valor irá depender para cada situação (PEREIRA *et al*, 2017). Nas tecnologias utilizadas, os mecanismos para controlar as condições operacionais dos queimadores ainda são inexistentes, sendo restritos ao controle da entrada de ar do equipamento, utilizadas pelos operadores para controle de temperatura do equipamento (LEME, 2016).

De acordo com Leme (2016), uma estratégia que permite que gases com baixa concentração de componentes combustíveis, como é o caso do gás da carbonização, sejam queimados de forma eficiente é a construção queimadores com amplo volume interno e elevado tempo de residência dos gases em seu interior, assim o tempo é suficiente para que o gás seja pré-aquecido, até atingir as condições de inflamabilidade, para que entre em combustão e troque calor com o gás frio que entra no queimador, aquecendo-o e gerando um processo autossuficiente e constante. Porém, Pereira *et al.* (2017) salientam que ainda não existe uma metodologia específica e definida para projetar câmara de combustão, chaminé e entradas de ar, portanto são baseadas em experiências prévias, de sucesso ou fracasso, de projetos já implementados.

Um sistema de combustão do gás deve ser eficiente para reduzir a maior parte das emissões de gases de efeito estufa, fato ainda mais importante para projetos que almejam se beneficiar com os créditos de carbono. Quando ocorre a queima completa do gás combustível, o gás da carbonização é convertido em dióxido de carbono e água. Entretanto, quando um dos 3 elementos necessários para a combustão (oxigênio, combustível e fonte de ignição) está em desequilíbrio com o restante, seja pelo excesso ou pela falta do mesmo, a qualidade da queima é afetada e a quantidade de calor liberada é menor. A consequência disso é uma combustão incompleta, e nesse caso outros elementos são emitidos na atmosfera, como o monóxido de carbono (CO), e óxidos de nitrogênio (NO_x), quando o nitrogênio reage com o combustível (TURNS, 2013).

3.2 Geração de Eletricidade

O potencial de produção de energia elétrica a partir de gases de carbonização é alto. A eletricidade produzida pode ser consumida pelo próprio produtor de carvão vegetal, entretanto, o valor produzido pode exceder o consumo da Unidade de produtora, desse modo, o restante da eletricidade produzida pode ser vendido ao distribuidor de energia da região ou até mesmo consumido pela comunidade local próximo de onde o carvão é produzido,

tornando o processo mais sustentável (MIRANDA *et al*, 2013; PEREIRA *et al*, 2017).

Alguns autores avaliaram o quanto de energia elétrica poderia ser gerada a partir do aproveitamento dos gases produzidos em diferentes fornos. Vilela *et al.* (2014) desenvolveram um projeto para recuperação de energia a partir de gases de carbonização produzidos em fornos Container Rima (RCK). Os resultados dos testes mostram que é possível gerar 200 kW de potência do gás de carbonização em fornos de 5m³ e 3.000 kW em fornos de 40 m³ de potência do gás de carbonização. Leme *et al.* (2018) avaliam a possibilidade de recuperação dos gases da carbonização para produzir eletricidade, através de uma simulação computacional de um sistema em *cluster* com 120 fornos retangulares interligados. O resultado da simulação mostra que o sistema possui potencial para gerar até 0,93 MWh por tonelada de carvão vegetal produzida. Miranda *et al* (2013) afirmam que pode ser produzido de 500 a 600 kWh de eletricidade por tonelada de carvão vegetal produzida. Outros autores, reportam valores mais baixos, porém ainda muito significantes, como em Bailis *et al* (2013), onde é estimado que a queima dos gases não condensáveis pode fornecer 329 kWh por tonelada de carbono produzida. O valor exato da geração de eletricidade irá depender da eficiência da pirólise e do equipamento usado para conversão energética.

Em se tratando dos equipamentos utilizados para se converter os gases da carbonização em eletricidade, os mais comumente avaliados em estudos são turbina a gás de queima externa (EFGT – *Externally Fired Gas Turbine*), Ciclo Rankine Convencional (SRC - *Steam Rankine Cycle*) e o Ciclo Rankine Orgânico (ORC – *Organic Rankine Cycle*) (LEME *et al*, 2018; VILELA *et al*, 2014; CASTRO, 2014; MIRANDA *et al*, 2013). Tecnologias que são amplamente utilizadas em outros setores, como os motores de combustão interna e as turbinas a gás de acionamento direto, não são boas opções para serem utilizadas com um combustível “pobre” e com alto teor de alcatrão, como é o caso dos gases da carbonização (MIRANDA *et al*, 2013).

Leme *et al.* (2018) avaliam as 3 opções tecnológicas EFGT, SRC, e ORC, que tiveram seus ciclos modelados para diferentes condições operacionais. As maiores eficiências alcançadas são de 24% para o SRC, 19,3% para o EFGT e 23,6% para o ORC. Segundo os autores, espera-se uma produtividade elétrica

específica que varia de 0,76 MWh/t de carvão vegetal até 0,93 MWh/t de carvão vegetal produzido, ao se converter os gases da carbonização através desses equipamentos. Uma análise econômica também é realizada onde o SRC apresentou os melhores resultados de acordo com os indicadores econômicos.

Apesar de suas inúmeras vantagens, a geração de eletricidade a partir dos gases da carbonização ainda exigem altos investimentos, dificultando a implementação desses sistemas por pequenos e médios produtores. Espera-se que, no futuro próximo, essas tecnologias sejam disseminadas e que programas de incentivos facilitem sua implementação por esses produtores, que contribuem com a maior parte da produção de carvão vegetal no Brasil. Enquanto isso não acontece, pode ser interessante o uso direto da energia térmica da queima dos gases para secagem da madeira que será carbonizada, pois os custos e riscos do investimento são menores, a produção de carvão se torna sustentável e eficiente (PEREIRA *et al*, 2017). O processo de secagem pode ocorrer em qualquer UPC, diferentemente da produção de eletricidade, que é mais provável de ser aplicada em grandes unidades de carbonização localizadas perto da rede elétrica (LEME *et al*, 2018).

3.3 Aproveitamento dos Gases Condensáveis

A utilização do extrato pirolenhoso (EP) é antiga, havendo indícios de sua utilização na China há milênios de anos (CAMPOS, 2007). Existem diversas pesquisas, com diferentes finalidades, a respeito da utilização do extrato pirolenhoso.

Zeferino *et al.* (2018) e Cardoso (2004) relatam que o EP apresenta ação herbicida. Zeferino *et al.* (2018) indicam em seu trabalho que o extrato pirolenhoso apresenta ação adjuvante, potencializando o efeito do herbicida, em todas as plantas daninhas testadas em seu estudo (*Brachiaria decumbens*, *Bidens pilosa* e *Amaranthus viridis*). De acordo com os autores, 2 L de EP por hectare, diluídos em água (4ml/L), são suficientes para reduzir em 50% a quantidade aplicada de herbicidas. Cardoso (2004) também constatou que, quando adicionado em defensivos químicos ácidos, o extrato age como um catalisador, podendo reduzir em até 50% o volume desses produtos, sem

prejudicar a eficiência. Além disso, o EP pode ser aplicado como adubo orgânico (CARDOSO, 2004).

Foi investigado por autores como Silva (2003) e Neto et al. (2017), a ação do EP como pesticida, especialmente em relação a seu efeito contra formigas cortadeiras. E, através destes estudos, os autores observaram a eficácia da aplicação do EP na mortalidade de formigas *Atta sexdens* L. e na redução de seu forrageamento.

Miyasaka et al. (2001) declaram que a aplicação do EP no solo melhora suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Uddin *et al.* (1994) relatam que a aplicação do EP no solo resulta em um aumento da produtividade de culturas de cana de açúcar, e Lee *et al.* (2007) obtêm resultados similares para culturas de arroz. Batista *et al.* (2013) aplicaram EP durante o cultivo de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*) e observaram que o produto ajuda no tamponamento do solo, facilitando a absorção do elemento fósforo. Schnitzer *et al.* (2015) e Trindade (2014) consideram o EP como uma alternativa na nutrição de plantas, como bioestimulante vegetal e indutor de enraizamento. Além disso, a aplicação do extrato pirolenhoso se mostra eficaz no cultivo da espécie *Cattleya loddigesii* Lindl. (Schnitzer *et al.*, 2015).

Almeida (2012) avaliou o potencial do extrato pirolenhoso da madeira de eucalipto como agente conservante de produtos cosméticos e saneantes, e observou um potencial de aplicação do EP, principalmente, como agente antifúngico e como possível conservante. Outros estudos demonstram a eficácia do EP como antibacteriano e antifúngico (DA COSTA *et al.*, 2003; DE MELO *et al.*, 2007; CHAN *et al.*, 2012; IBRAHIM *et al.*, 2013; CHIAMENTI *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2016; ARAUJO, 2018).

Já o alcatrão insolúvel possui potencial para ser utilizado como combustível (TOMASSINI, 2015), apesar de possuir características de combustão similares ao do óleo diesel, existem algumas diferenças em relação ao poder calorífico, ignição, viscosidade, estabilidade e pH (CARDOSO, 2004).

O alcatrão é considerado um óleo combustível, mas devido ao alto teor de componentes não voláteis é um combustível de baixa inflamabilidade, fazendo com que este necessite de uma energia significativa para sua ignição. Uma vez inflamado, o líquido queima com uma chama estável e autossustentável (CZERNIK & BRIDGEWATER, 2004). O alcatrão produzido, a partir de madeira

e resíduos agrícolas, possui um poder calorífico de, aproximadamente, 20 MJ/kg. Para base de comparação, o óleo diesel comercial possui um poder calorífico de 43,8 MJ/kg (PRAKASH *et al*, 2013). Quando são utilizadas plantas oleaginosas como matéria-prima é comum que o alcatrão produzido na pirólise tenha um poder calorífico mais elevado em comparação com os que são produzidos a partir de madeira ou de resíduos agrícolas (QI *et al*, 2007).

A presença de água reduz a emissão de NO_x, quando a fração oleosa é queimada, e melhora sua fluidez; entretanto reduz seu poder calorífico, prejudicando suas propriedades, principalmente, quando usado como combustível (JAHIRUL *et al*, 2012). O conteúdo de oxigênio presente no líquido é, geralmente, entre 35 e 40%, representando esse alto valor quando comparado com combustíveis fósseis que possuem um baixo conteúdo de oxigênio. As consequências disso são, um menor poder calorífico e a imiscibilidade com combustíveis fósseis (QI *et al*, 2007).

Em se tratando de viscosidade, o óleo da pirólise apresenta diferentes valores a depender da matéria-prima e das condições operacionais do processo. Segundo Czernik & Bridgewater (2004), a viscosidade pode variar em uma ampla faixa, entre 35 e 1000 cP a 40 °C, e esse valor também é influenciado pela eficiência da coleta de componentes de baixo ponto de ebulição. A viscosidade alta prejudica a qualidade do óleo, entretanto pode ser reduzida através da adição de solventes polares, como metanol ou acetona.

O alcatrão também se difere de combustíveis derivados do petróleo devido a sua instabilidade. De acordo com Czernik & Bridgewater (2004), um efeito indesejado é o aumento da viscosidade com o tempo, e isso ocorre, principalmente, quando o alcatrão é armazenado ou manuseado em temperaturas mais elevadas. Esse fato pode acontecer em consequência de reações químicas que ocorrem entre os vários compostos presentes no líquido, formando moléculas maiores. Ademais, o líquido também pode reagir com o oxigênio presente no ar.

A CEMIG - Concessionária de Energia do Estado de Minas Gerais, operou entre 2003 até 2009 uma usina de 15 MW projetada para usar alcatrão como combustível complementar a queima dos gases de exaustão de fornos de aço, em uma unidade que produz tubos de aços na região de Belo Horizonte. A planta consumia alcatrão em uma taxa de 500 kg por hora, sendo necessário uma

filtragem e um aquecedor para reduzir a viscosidade do alcatrão antes de ser injetado sob pressão na fornalha da caldeira (Miranda *et al.*, 2013).

Dessa forma, o óleo da pirólise possui potencial para ser utilizado diretamente como combustível em queimadores/fornos e em sistemas de queimador/caldeira, em motores diesel (velocidade média e lenta), em turbinas a gás e em motores Stirling. Entretanto, por serem muito corrosivos, possuírem pouca estabilidade e baixo poder calorífico seu armazenamento e uso direto como combustível líquido é prejudicado. Para que seja utilizado como combustíveis de transporte é necessário que passe por um *upgrading* (PIRES *et al.*, 2019).

O *upgrading* do óleo da pirólise pode ser alcançado em três métodos diferentes, sendo esses métodos físicos, químicos e catalíticos. Fluidos supercríticos, extração de solvente e emulsificação são três formas de métodos de *upgrading* físico. O método catalítico inclui o craqueamento na presença de zeólitas, hidrodessoxigenação e reforma a vapor. Já o método de *upgrading* químico envolve, principalmente, o método de esterificação (ZEDAH *et al.*, 2020).

Além do uso como combustível, é relatado por Benites *et al.* (2010) e Carazza & Okuma (2000) que, constituintes do alcatrão, podem ser utilizados como aditivos (flavorizantes) na indústria alimentícia. De acordo com Alves (2003), é possível a fabricação de resinas fenólicas do tipo resol, substituindo-se parcialmente o fenol e o formaldeído derivados do petróleo por óleos do alcatrão vegetal, trazendo vantagens econômicas e ambientais para a indústria. A atividade antioxidante das frações do líquido da pirólise também é estudada. As frações fenólicas do líquido da pirólise são comparadas com agentes estabilizadores comerciais e mostra atividade antioxidante idêntica ou até melhor em biodiesel por Larson *et al.* (2017) e García *et al.* (2017).

Em suma, existem diversas possibilidades de utilização do líquido da pirólise, e esse produto merece maiores investimentos em pesquisa e no desenvolvimento de tecnologias que possam torna-los escaláveis. A Tabela 8 reúne os principais potenciais de utilização dos produtos líquidos da carbonização encontrados na literatura.

Tabela 8 – Potencial de utilização dos produtos líquidos da carbonização

Produto	Potencial de utilização
Extrato Pirolenhoso	Herbicida
	Inseticidas
	Adubo orgânico
	Catalisador de defensivos químicos
	Antifúngico
	Antibacteriano
	Conservante
Alcatrão Insolúvel	Combustível
	Aditivos (flavorizantes)
	Resinas fenólicas

3.4 Aproveitamento dos resíduos florestais

A madeira é a principal matéria-prima obtida de uma floresta plantada, enquanto galhos, folhas, raízes são tratados como resíduos florestais. Os resíduos florestais podem ser definidos como todo material que fica na floresta ou no chão, ou seja, que não são aproveitados (CASTRO, 2014). Durante a colheita das árvores de eucalipto, folhas e galhos são removidos, gerando resíduos florestais que são geralmente deixados no local. Além disso, no transporte e empilhamento da madeira, parte da casca se desprende das toras, acumulando mais resíduos ao longo do ciclo de produção de carvão (LEME, 2016). Segundo Castro (2014), 11,67% da madeira é perdida em forma de resíduos durante a colheita, sendo que a casca é o principal resíduo.

Em algumas florestas, onde a madeira será destinada a um diferente fim que não seja a produção de carvão vegetal, é comum realizar o descascamento da madeira, já na produção de carvão vegetal a casca é considerada matéria-prima e é carbonizada juntamente com a madeira. Assim, não é interessante

perder essa fração da madeira, porém sabe-se que a casca do *Eucalyptus* se desprende com facilidade (CASTRO, 2014).

Os resíduos florestais, assim como outros subprodutos da carbonização, apresentam um grande potencial para a geração de energia térmica e elétrica através de sua combustão direta, portanto, aproveitá-los é muito importante para reduzir os custos da produção de carvão vegetal e melhorar a sua competitividade (PEREIRA *et al*, 2017). Castro (2014) mostra que os resíduos florestais como cascas, galhos e folhas apresentam potencial de geração de energia elétrica considerável, de aproximadamente 343,37 kWh por tonelada de resíduo. A tora de madeira é, claro, responsável pela maior parte da energia estocada na árvore de *Eucalyptus*, em média a madeira representa 88,47% do conteúdo energético, as cascas 7,07%, os galhos 2,4% e as folhas 2,06% (CASTRO, 2014).

Sabe-se que a geração dos gases da carbonização é inconstante e, mesmo em um sistema de *cluster*, com vários fornos interligados, ainda pode haver momentos em que a qualidade do gás diminui, desse modo sua composição pode se tornar insuficiente para sustentar a queima e, conseqüentemente, a cogeração de energia pode ser prejudicada. Quando isso ocorre, outros combustíveis gasosos como o gás natural ou Gás Liquefeito do Petróleo podem ser utilizados para sustentar a queima, e manter a cogeração do sistema constante (MIRANDA *et al*, 2013).

Todavia, é possível que o sistema de cogeração seja projetado para utilizar também um combustível sólido, como os resíduos florestais, para tornar a cogeração mais sustentável. Assim, alguns produtores brasileiros de carvão consideram o uso de resíduos de extração de madeira como fonte suplementar de combustível (BAILIS *et al*, 2013; MIRANDA *et al*, 2013).

Bailis *et al*. (2013) observam que, com a utilização de resíduos florestais como combustível suplementar à queima dos gases, há um acréscimo de geração de 611 kWh para cada tonelada de carbono produzida. Quando os resíduos são deixados no campo, são decompostos naturalmente e as emissões de decomposição são levadas em consideração na Avaliação de Ciclo de Vida realizada pelos autores.

Em seu trabalho, Castro (2014) calcula o potencial dos resíduos da biomassa florestal (casca, galhos e folhas de eucalipto) para geração de energia

elétrica e, verificou-se que o potencial total de geração, considerando uma conversão elétrica média de 11%, está em torno de 5.718 kWh.ha⁻¹. A autora utiliza os resíduos florestais como combustível auxiliar na queima dos gases da carbonização, que são utilizados quando a temperatura do queimador não está alta o suficiente para manter o funcionamento do sistema de cogeração, ocorrendo durante as cinco primeiras horas de operação dos fornos.

A maior dificuldade encontrada para se aproveitar os resíduos florestais é o seu transporte, devido ao grande volume dos resíduos, o que pode inviabilizar sua transferência até o equipamento gerador. Algumas alternativas para esse problema são a picagem do material, enfardamento ou a produção de cavacos, para diminuir seu volume e facilitar a movimentação (CASTRO, 2014).

CAPÍTULO 4: METODOLOGIA

4.1 Metodologia utilizada

A primeira etapa da realização deste trabalho foi a revisão da literatura, com objetivo de reunir a maior quantidade de informações sobre o tema. A Avaliação de Ciclo de Vida é a metodologia escolhida para avaliar os impactos ambientais da cadeia produtiva do carvão vegetal, em diferentes cenários, a fim de identificar de oportunidades de melhoria dos aspectos ambientais. Para elaboração da ACV, primeiro é preciso definir o objetivo e escopo do sistema, bem como seus limites. Ademais, é preciso coletar os dados para elaboração do Inventário do Ciclo de Vida.

O levantamento de dados para elaboração de um Inventário de Ciclo de Vida pode ser obtido de fontes primárias ou secundárias. São chamados de dados primários os dados obtidos diretamente da fonte, como os dados obtidos a partir de visitas ao local de estudo, através de medições diretas ou em entrevista com colaboradores da empresa. Na falta de dados primários, podem ser utilizados dados secundários, que podem ser encontrados através de revisão de literatura.

A coleta de dados para a elaboração da ICV deste trabalho, é realizada de 3 maneiras, sendo elas i) coleta de informações através de entrevista com uma funcionária da unidade da Plantar S.A., localizada na cidade de Curvelo - MG, durante o primeiro semestre de 2021 ii) coleta e análise dos resultados das medições realizadas *in loco*, em um forno da UPC, por outros pesquisadores, integrantes do mesmo projeto de pesquisa intitulado “Geração de Eletricidade Descentralizada a partir dos Gases Residuais da Carbonização” e iii) baseados em dados da literatura.

Após a compilação de dados e a consolidação dos inventários, eles foram inseridos no *Software* SimaPro, o qual gerou os resultados da Avaliação de impacto ambiental. Em seguida, é feita a análise da Avaliação de impacto do Ciclo de Vida e são propostas as recomendações para a UPC (Figura 12). Para

validar os resultados da Avaliação de Ciclo de Vida, uma análise de erros é realizada dentro do próprio software SimaPro®. O software utiliza o método de análise de Monte Carlo, que envolve a amostragem aleatória de cada distribuição de probabilidade de acordo com o modelo, para produzir milhares de cenários. A Análise de incertezas presente no SimaPro® é facilitada pelas atuais bases de dados, como por exemplo, a base do ecoinvent® que fornece informações sobre a incerteza de cada parâmetro. Os fatores de incertezas do ecoinvent® são estimados a partir de uma avaliação qualitativa das características dos dados em uma matriz pedigree que gera um desvio padrão geométrico default para cada parâmetro (FIORI et al, 2014; CHERUBINI, 2015).



Figura 12 - Metodologia utilizada

4.2 Caracterização da Unidade Produtora de Carvão Vegetal

Neste trabalho, o objeto de estudo é a Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC) da Plantar S.A., localizada na cidade de Curvelo, em Minas Gerais. A UPC utiliza a tecnologia de fornos retangulares de alvenaria (Figura 13) em seu processo de carbonização da madeira de eucalipto. A planta possui atualmente 60 fornos, com produção média mensal de carvão vegetal, em 2020, de 6.677,88 mdc (Metros cúbicos de carvão). O ciclo de carbonização dos fornos da UPC dura em média 12 dias, sendo que a carbonização em si necessita de 4 dias, o resfriamento leva cerca de 7 dias e é necessário 1 dia para o carregamento/descarregamento do forno.



Figura 13 - Forno retangular da UPC de Curvelo

Um forno retangular da UPC possui volume útil interno de 45 m³, capacidade de enfiar 27.436 kg de madeira úmida (18% de umidade) e de produzir 9.286,56 kg de carvão, com umidade de 7,3% e densidade (base úmida) de 257,96 kg/m³, além de 1.100,9 kg de tiço. O tiço, madeira parcialmente carbonizada, é introduzido novamente no forno para ser carbonizado por completo. Além do carvão vegetal e tiço, em média, um forno de carbonização da UPC elimina 60.931 kg de GNC e 17.186 kg de GC (Figura 14). O rendimento gravimétrico em carvão vegetal é de 33,8% em base úmida, sendo à média geral da UPC entre 30% a 35%, em base úmida.

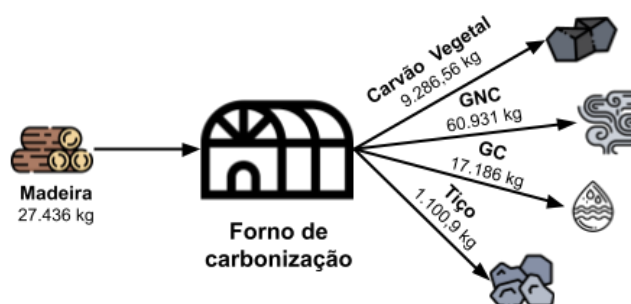


Figura 14 - Produção do forno 30 da UPC

Atualmente os gases produzidos durante a carbonização são lançados na atmosfera. Pesquisadores, integrantes do mesmo projeto de pesquisa o qual este trabalho faz parte, realizaram um cálculo do balanço de energia, e identificaram que o carvão vegetal contém cerca de 55,6% da energia inicial da madeira, o tiço 5,5%, o GNC 15,7%, o GC 19,6% e 3,6% da energia é perdida nas paredes dos fornos, resultados obtidos com base no PCS (Figura 15).

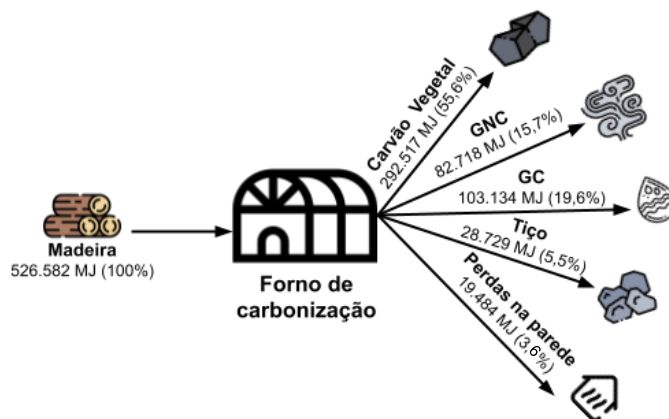


Figura 15 - Balanço de energia, com base no PCS

Segundo os resultados com base no PCI, o carvão vegetal contém cerca de 67,3% da energia inicial da madeira, o tiço 6,4%, GNC 20,1%, GC 2% e 4,2% da energia é perdida nas paredes dos fornos (Figura 16). Assim, é possível identificar que, em média, um forno pode desperdiçar entre 22,1% a 35,3% da energia inicialmente contida na madeira devido ao não aproveitamento dos GNC's e GC's.

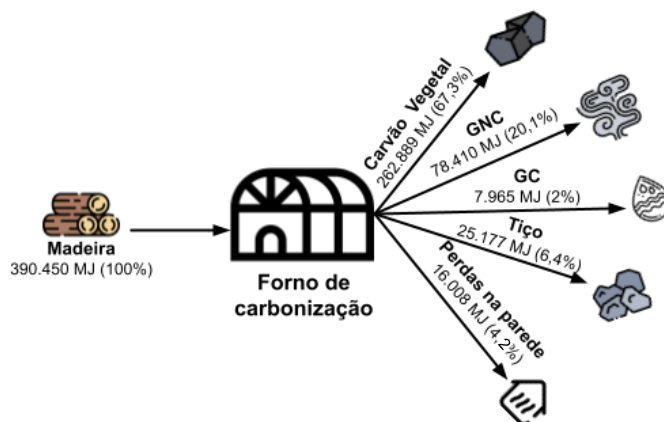


Figura 16 - Balanço de energia, com base no PCI

Na UPC da Plantar em Curvelo um queimador de gases está em fase de construção, visando o aproveitamento da energia dos gases de carbonização. A UPC também iniciou recentemente testes para avaliar a eficácia da utilização do líquido pirolenhoso produzido nos fornos para aplicação junto ao herbicida, no combate ao mato competição. Tem sido observado bons resultados, e uma economia de produtos químicos. Entretanto, por esta pesquisa interna ainda

estar na fase de testes, os dados referentes a esse aproveitamento não estão disponíveis e, portanto, não serão incluídos nesse trabalho.

A UPC está localizada dentro da sua unidade florestal, que possui aproximadamente 23 mil hectares de floresta plantada de eucalipto. São utilizados clones híbridos da espécie de eucalipto *Eucalyptus Urograndis*, e o plantio é feito com espaçamento de 3 x 3 m (9 m²), sendo plantadas, em média, 1.110 mudas por hectare.

CAPÍTULO 5: ESTUDO DE CASO

5.1 Objetivos e escopo do sistema

O objetivo é avaliar os impactos ambientais do processo de carbonização, através do estudo de diferentes cenários (Tabela 8). O Cenário 1 avalia o estado atual da carbonização da madeira na UPC, onde todos os gases produzidos são eliminados na atmosfera; o Cenário 2 estuda a queima dos gases não condensáveis; o Cenário 3 avalia, além da queima do GNC, a recuperação da energia térmica produzida na combustão para a geração de eletricidade; e, por último, o Cenário 4 avalia o processo da Carbonização da madeira ideal, onde há a recuperação da energia térmica da queima dos gases não condensáveis para geração de eletricidade, recuperação do alcatrão insolúvel e dos resíduos da biomassa para geração de eletricidade adicional ao sistema e aproveitamento do extrato pirolenhoso no cultivo de eucalipto.

Tabela 9 - Cenários avaliados na ACV

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Queima do GNC	✗	✓	✓	✓
Queima do Alcatrão Insolúvel	✗	✗	✗	✓
Aproveitamento dos resíduos da biomassa	✗	✗	✗	✓
Aproveitamento do Extrato Pirolenhoso	✗	✗	✗	✓
Geração de eletricidade	✗	✗	✓	✓

O público-alvo desse estudo engloba a comunidade acadêmica, principalmente aqueles próximos à área de ACV, da produção de eucalipto e do carvão vegetal e aqueles que estudam formas para a promoção da descarbonização de setores da economia. Além disso, esse estudo também se

destina as empresas do setor, a fim de incentivar melhorias ambientais dentro da cadeia produtiva de carvão vegetal.

5.1.1 Função, Unidade Funcional e Limites do sistema

A função do sistema estudado é produzir carvão vegetal, com o uso de madeira proveniente de florestas plantadas de eucalipto. A unidade funcional é uma tonelada de carvão vegetal produzido, e os valores de entrada e saída do sistema e os resultados do ICV são calculados com base nesta unidade funcional.

Essa avaliação de ciclo de vida trata-se de um sistema do berço ao portão (*cradle to gate*), pois o transporte do produto final (carvão vegetal) e seu consumo não estão inclusos, portanto, serão avaliados os impactos desde a etapa de produção florestal até a produção de 1 tonelada de carvão vegetal. A Figura 17 ilustra os limites do sistema a ser avaliado.

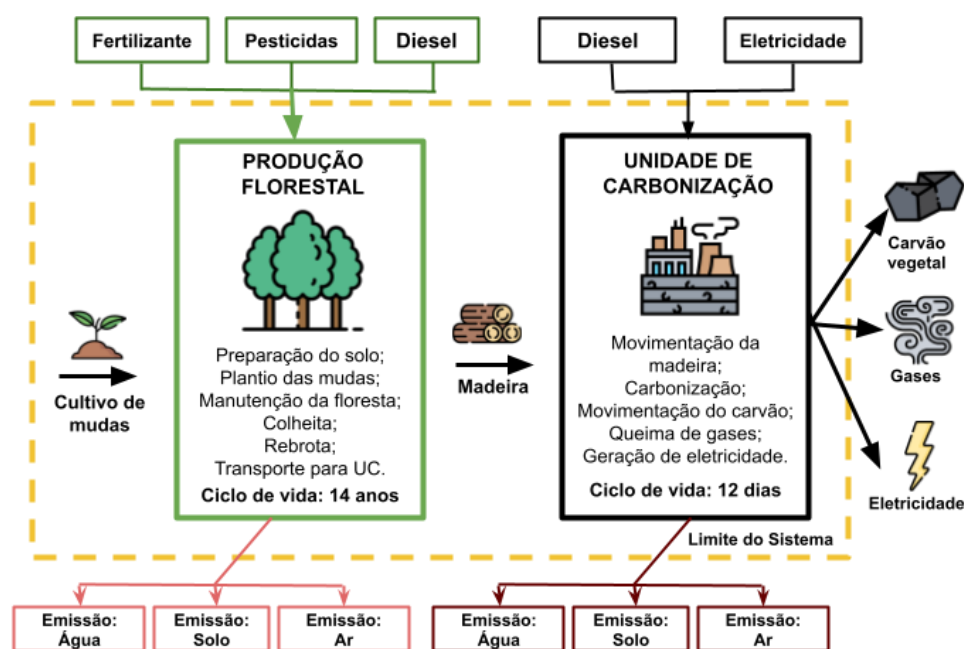


Figura 17 - Limite do sistema

5.1.2 Fronteiras geográfica, temporal e tecnológica

- Cobertura temporal: 2019/2021;

- Cobertura geográfica: Estado de Minas Gerais, onde se concentra 27,57% da produção de eucalipto brasileira (IBÁ, 2021) e 87,54% da produção de carvão vegetal do país (IBGE, 2021);
- Cobertura tecnológica: o processo produtivo de carvão vegetal no Brasil é caracterizado pela utilização de fornos menos tecnológicos, com baixa mecanização, representando 70% da produção (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Estima-se que o restante da produção ocorra em fornos retangulares, tipo de forno avaliado neste estudo. Assim, cabe ressaltar que os fornos aqui avaliados (retangulares) possuem tecnologia mais avançada em comparação aos que são utilizados majoritariamente no Brasil, com maior rendimento em carvão e menor em gás. Na unidade florestal, parte das operações é realizada manualmente e outra parte é realizada com maquinários agrícolas, e as tecnologias utilizadas são mais detalhadas no item 5.2.

5.1.3 Limitações da ACV

A Avaliação de Ciclo de Vida encontra algumas limitações, sendo uma delas a ausência de dados da cadeia produtiva brasileira de fertilizantes e pesticidas. A dificuldade de se encontrar esses dados pode ser justificada pelo fato de que o Brasil importa a maioria dos fertilizantes consumidos no país, mais de 80% dos fertilizantes são de origem estrangeira (SAE-PR, 2020). Assim, são incluídas as cadeias produtivas presentes na base de dados do Ecoinvent 3, não representando, portanto, a produção nacional.

Devido à ausência de um queimador na UPC, não houve medição direta dos poluentes emitidos na queima que, portanto, tiveram de ser estimados com base nos trabalhos encontrados na literatura. O resultado do cálculo das emissões resultantes da queima do GNC encontra-se no Apêndice A. O mesmo ocorreu para o cálculo da geração de eletricidade na UPC.

No cenário 4, a eficácia do Extrato Pirolenhoso no cultivo de eucalipto teve de ser baseada em estudos da literatura, devido a impossibilidade de realizar ensaios presenciais em razão da pandemia do COVID-19. Sendo assim, esse trabalho apresenta uma estimativa dos ganhos ambientais que podem ser

obtidos ao se adotar essas boas práticas, evidenciadas e comprovadas na literatura.

5.2 Inventário do Ciclo de Vida

As etapas de produção florestal de eucalipto e da Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC) de Curvelo – MG serão descritas e o inventário completo pode ser visualizado no Apêndice B.

5.2.1 Etapa Produção Florestal de Eucalipto

A etapa da produção florestal de eucalipto considera um ciclo de 14 anos, inclui a produção de mudas, preparação do solo, plantio e desenvolvimento das mudas, manutenção da floresta, primeira colheita no ano 7, condução da rebrota, desenvolvimento e manutenção da floresta, segunda colheita no ano 14, transporte da madeira e processamento dos resíduos. As informações de cada etapa são fornecidas pela UPC.

A produção de mudas é a primeira fase da produção florestal de eucalipto. As mudas são cultivadas pela empresa em um viveiro próprio. Elas se desenvolvem em recipientes (tubetes) com substrato e, posteriormente, são transportadas até o local de plantio. A Tabela 10 apresenta as entradas e saídas para produção de 1.000 mudas de eucalipto.

Tabela 10 – Entradas e saídas para a produção de 1.000 mudas de eucalipto

(Continua)

Saídas	Quantidade
Mudas de eucalipto	1.000
Entradas	Quantidade
Superfosfato Simples	800 g
PGmix (Fertilizante NPK)	60 g
Oscomote (NPK)	120 g
Nitrato de Cálcio	5,3 kg
Cloreto de Potássio (KCL)	3,4 kg
MAP purificado	1,75 kg
Sulfato de magnésio	3,1 kg
Uréia	3 kg
Sulfato de amônio	0,5 kg
Kellus Iron	200 g
Sulfato de manganês	35 g
Sulfato de zinco	10 g

Tabela 10 – Entradas e saídas para a produção de 1.000 mudas de eucalipto

Entradas	Quantidade
Sulfato de Cobre	5 g
Ácido Bórico	35 g
<hr/>	
Diesel ¹	0,0916 kg
Água	540,54 l
<hr/>	
Saídas	Quantidade
Amônia – NH ₃	0,2404 kg
Óxido Nitroso – N ₂ O	2,508 kg
Nitrato – NO ₃ ⁻	0,735 kg
Pentóxido de Fósforo – P ₂ O ₅	0,1227 kg

¹ Diesel consumido no transporte de insumos e das mudas

O solo precisa ser preparado previamente ao plantio das mudas, para que melhores condições sejam proporcionadas ao desenvolvimento das mudas. A primeira etapa de preparo do terreno é a manutenção de aceiros (proteção contra incêndios), feito com patrol, e a manutenção de caixa e camalhões. A formiga cortadeira é a principal praga da floresta de eucalipto, por isso é necessário iniciar seu combate antes do plantio. Para isso, o produto Isca AttaMex-S, a base de Sulfluramida, é utilizado, e sua aplicação é realizada de forma manual.

Cerca de 45 dias antes do plantio, é realizada a roçada da área total, feita de forma mecanizada, utilizando a roçadeira de arraste ou hidráulica acoplada ao trator. O herbicida pós-emergente Touchdown (utilizado após a emergência de plantas daninhas), produto a base de Glifosato Potássico, é aplicado na área total.

Aproximadamente 10 dias antes do plantio, a atividade de subsolagem é realizada com auxílio de um trator, a fim de quebrar as camadas do subsolo que podem limitar ou restringir o crescimento das raízes das árvores. Juntamente a subsolagem, ocorre a adubação, e um afastador de resíduo é incluído para realizar a limpeza da linha. Nessa atividade, são consumidos Superfosfato simples e Sulfurgran, fertilizante de solo composto por Enxofre e Boro. Além disso, nas atividades de preparo do terreno, os maquinários agrícolas consomem diesel.

Após a preparação do solo, realiza-se o plantio das mudas. As mudas chegam através de tratores até o local de plantio, a marcação das covas é realizada de forma manual, assim como o plantio, e são plantadas, aproximadamente, 1.110 mudas por hectare. As mudas são irrigadas, sendo

consumidos cerca de 4 a 5 litros de água por planta em cada irrigação. A irrigação apenas acontece em épocas do ano com pouca chuva, geralmente de 1 a 3 vezes por ciclo, a fim de prover a planta a quantidade necessária de água para seu desenvolvimento. Neste estudo, será considerada apenas 1 irrigação no momento do plantio, visto que a prática de irrigação não é muito comum. Além de água, MAP (Fosfato Monoamônico) e Actara, inseticida sistêmico à base de Tiametoxam, são consumidos no plantio.

Durante o plantio, é realizada a atividade de ronda as formigas, de forma manual, a fim de evitar a proliferação dos formigueiros e, para isso, é consumido K-otrine, produto à base de Deltametrina.

Segundo Mafia (2005), algumas mudas podem ter raízes com baixa absorção de água e nutrientes, ou podem aparecer doenças ou pragas, resultando em sua morte. Desse modo, as mudas precisam estar sob constante observação e, devido a essas falhas, entre 10 e 20 dias após o plantio, pode ser necessário realizar um novo plantio. Entretanto, para a Unidade florestal de Curvelo, o índice de falhas médio é 1,5%, e o replantio é apenas realizado quando o índice ultrapassa 2%, portanto, a atividade de replantio é desconsiderada neste estudo. Durante o plantio, diesel é consumido pelos maquinários agrícolas.

O desenvolvimento das mudas ocorre até, aproximadamente, 180 dias após o plantio. Nesta etapa de cultivo, deve-se controlar muito bem as ervas daninhas e, cerca de 10 dias após o plantio, Fordor, herbicida pré-emergente à base de Isoxaflutole, é aplicado de forma mecanizada, através de um trator 4x2. E, 55 dias após o plantio, essa operação é repetida.

Entre 90 e 100 dias após o plantio, novamente é realizado o tratamento com herbicida, porém dessa vez o herbicida pós-emergente é utilizado. São consumidos os produtos Touchdown®, Missil, composto por Haloxifope-P-metilico e Óleo Joint, óleo mineral que funciona como adjuvante quando adicionado à calda dos herbicidas pós-emergentes. Ainda na fase de desenvolvimento, entre 160 e 180 dias após plantio, é realizada a adubação mecanizada com Agrosilício S e com Cloreto de Potássio (KCL) com 1% de boro. Ao longo de toda a fase de desenvolvimento das mudas, diesel é consumido pelos maquinários agrícolas.

Após o plantio e formação, quando a floresta já está implantada, inicia-se a etapa de manejo ou manutenção da floresta que dura até a primeira colheita. Novamente, é aplicado no solo herbicida pós-emergente. O consumo do herbicida, entretanto, só ocorre duas vezes durante os anos iniciais da fase de manutenção. São consumidos, novamente, os produtos Touchdown[®], Missil e Óleo Joint.

Durante a manutenção também é realizada a adubação com Boro, que ocorre no ano 1 e 2 de manutenção da floresta. O controle das formigas ocorre de forma mais frequente, pelo menos uma vez por ano e, no pré-corte das árvores (anos 5 e 6 da manutenção), o combate as formigas se intensifica. Ao longo dos anos de manutenção, são consumidos aproximadamente 39,6 kg/ha de Iscas AttaMex-S[®]. Além do combate as formigas, é feito o controle biológico com parasitóides, através da liberação de pupas parasitadas em plantios de eucalipto, visando o controle de pragas desfolhadores. Por ser um controle biológico, essa atividade não está incluída no inventário.

Outras atividades que se repetem anualmente são a manutenção de aceiros com patrol e a manutenção de caixas e camalhões. E, no último ano, é realizada a roçada mecanizada para corte de pequenas plantas que crescem nas entrelinhas das árvores. Durante essa etapa, maquinários agrícolas são utilizados e, portanto, diesel é consumido.

As florestas de eucalipto, através da fotossíntese, sequestram dióxido de carbono presente na atmosfera e o estocam, acumulando carbono em sua biomassa. Baseada na metodologia adotada por Silva (2012), que se baseia em Reis *et al.* (1994) e no relatório de *Forest Absorbing Carbon Dioxide Emission* (1993), estima-se que, para produzir 1m³ de madeira de eucalipto, 970,81 kg de CO₂ são sequestrados.

A primeira colheita ocorre 7 anos após o plantio, são colhidas aproximadamente 201,06 m³ de madeira por hectare de floresta, de forma mecanizada, com a utilização de tratores (*Feller-buncher*). A colheita é realizada por uma empresa terceirizada.

Após o corte, as árvores cortadas são acumuladas no chão, a ponteira da árvore, galhos e folhas são removidos e deixados na floresta para decomposição, além de parte da casca que se desprende no processo. As toras

são carregadas até o carreador do talhão, através da máquina *Skidder*, e são empilhadas para secagem natural.

Após a primeira colheita, aos 7 anos, as árvores de eucalipto podem brotar novamente, podendo ocorrer até no máximo 3 rebrotas. O aproveitamento das novas brotas das cepas de eucalipto é muito vantajoso, pois a área de plantio já está pronta e as mudas são aproveitadas, entretanto, segundo Leme (2016) é esperado uma diminuição da produtividade das colheitas de cerca de 10% para a segunda e 20% para a terceira colheita, em relação à primeira aos 7 anos.

Neste trabalho, são consideradas duas colheitas, ou seja, um ciclo de 14 anos, e, as atividades realizadas anteriormente no desenvolvimento das mudas, na manutenção da floresta e na colheita são basicamente repetidas para a condução da rebrota. A segunda colheita, no ano 14, é realizada novamente por empresa terceirizada, de forma mecanizada, através dos tratores *Feller-buncher*. São colhidas aproximadamente 180,96 m³ de madeira, por hectare de floresta.

A Tabela 11 reúne todos os insumos consumidos para produção de 1 m³ de madeira de eucalipto, bem como as saídas do processo. A Tabela 11 apresenta as variações que ocorrem no Cenário 4, quando o extrato pirolenhoso (EP) é utilizado no cultivo de eucalipto, além do processamento e transporte dos resíduos da biomassa que serão aproveitados.

Tabela 11 – Entradas e saídas para a produção de 1m³ de madeira de eucalipto

(*Continua*)

Saídas	Quantidade	
Madeira de Eucalipto	1 m ³	
Entradas	Quantidade	Quantidade (Cenário 4)
Mudas	0,1595 kg	0,1595 kg
MAP	0,00039 kg	0,00039 kg
Superfosfato simples	1,047 kg	1,047 kg
Cloreto de Potássio (KCL)	1,047 kg	1,047 kg
Touchdown (Glifosato)	0,0735 l (ou 0,0455 kg de Glifosato)	0,0367 l (ou 0,227 kg de Glifosato)^b
Isca Attamex-S (Sulfluramida)	0,22 kg	0,11 kg^b
Sulfurgran	0,26 kg	0,26 kg
Actara (Tiametoxam)	0,00013 kg	0,000065 kg^b

Tabela 11 – Entradas e saídas para a produção de 1m³ de madeira de eucalipto

Entradas	Quantidade	Quantidade (Cenário 4)
K-otrine (Deltametrina)	0,0000014 kg	0,0000007 kg^b
Fordor (Isoxaflutole)	0,00094 kg	0,00047 kg^b
Missil (Haloxifope-P- metílico)	0,00169 kg	0,00084 kg^b
Óleo Joint	0,01413 l	0,00706 kg
Agrosilício S	8,37 kg	8,37 kg
Boro	0,2617 kg	0,2617 kg
Diesel	1,67 kg	1,92^a kg
Água	15,26 l^c	14,17 l^d
Dióxido de carbono – CO2	970,81 kg	970,81 kg
Ocupação, Floresta, Intensivo	0,0366 ha.ano	0,0366 ha.ano
Saídas	Quantidade	Quantidade
	(Sem utilização do EP)	(Com utilização do EP)
Amônia – NH3	0,00000376 kg	0,00000376 kg
Óxido Nitroso – N2O	0,0000047 kg	0,0000047 kg
Nitrato – NO3-	0,0000141 kg	0,0000141 kg
Pentóxido de Fósforo – P2O5	0,01939 kg	0,01939 kg
Glifosato	0,0001276 kg	0,0000638 kg

^a consumo de diesel maior devido ao processamento e transporte dos resíduos da biomassa.

^b consumo de agroquímicos reduzido pela metade, devido a sua utilização juntamente ao EP.

^c Consumo de água na irrigação durante o plantio e no preparo das caldas. No Cenário 4 o valor é reduzido, já que a quantidade de agroquímicos utilizada é menor.

Conforme apresentado no item 3.3, existem diversas pesquisas a respeito da utilização do extrato pirolenhoso, inclusive como pesticida, já que ele possui ação herbicida comprovada por autores como Cardoso (2004) e Zeferino *et al.* (2018). Zeferino *et al.* (2018) indicam que 2 L de EP por hectare, diluídos em água (4ml/L), são suficientes para reduzir em 50% a quantidade aplicada de herbicidas e, Cardoso (2004) afirma que, quando o EP é adicionado em defensivos químicos ácidos, age como catalisador, podendo reduzir em até 50% o volume desses produtos. Esses valores são reafirmados pelas empresas que fabricam e vendem o extrato pirolenhoso, com é o caso da EPB – Extrato Pirolenhoso do Brasil, que afirma que a utilização de agroquímicos junto ao EP pode reduzir entre 5% a 50% o consumo de agroquímicos (EPB, 2021).

Desse modo, no Cenário 4, o consumo do Glifosato, contido no herbicida Touchdown, do Haloxifope-P-metílico, contido no Missil, e do Isoxaflutole, contido no produto Fordor, são reduzidos pela metade, o que reduz também o volume da calda necessário (água e Óleo joint).

Além do uso como adjuvante do herbicida, o efeito do EP contra formigas cortadeiras foi analisado por Silva (2003) e Neto *et al.* (2017). Com base nesses estudos, foi identificado que o EP i) causa mortalidade em formigas cortadeiras e sua mortalidade é acelerada, em comparação ao tratamento testemunha, e ii) reduz o forrageamento de fragmentos foliares.

Um grande volume de formicida é consumido no cultivo de eucalipto, desse modo, torna-se interessante a utilização do EP no combate as formigas. A isca AttaMex-S é um produto sólido, aplicado em trilhas próximos aos olheiros ativos, para que as formigas possam carregá-lo para dentro do formigueiro. De acordo com Zanetti *et al.* (2004) as iscas AttaMex-S causam mortalidade de 73% nas formigas *Atta sexdens rubropilosa* e o tempo de paralização das atividades do formigueiro é, em média, 31 dias.

Neto *et al.* (2017) identificou a mortalidade de 62,33% de formigas *Atta sexdens L.* após 96 h de exposição ao Extrato Pirolenhoso (1% v/v) e, a partir de seu estudo, verifica-se a eficácia da aplicação do EP no combate as formigas cortadeiras em um curto intervalo de tempo. Assim, o EP pode ser usado juntamente as iscas AttaMex-S, para garantia do combate efetivo as formigas.

O EP pode ser aplicado diretamente nos formigueiros ou nas trilhas por onde as formigas passam e, assim, será considerado neste estudo, para o Cenário 4, uma redução de 50% do consumo de Iscas AttaMex-S, quando o tratamento com o EP é realizado de forma adjunta.

Em relação aos outros inseticidas aplicados no cultivo de eucalipto, Actara é um inseticida, na forma líquida, aplicado nas mudas durante o plantio, e o K-otrine, também líquido, é pulverizado diretamente nos formigueiros. Conforme já mencionado o EP age como um potencializador de defensivos químicos, e sua aplicação aumenta a eficácia dos pesticidas químicos, quando usados de forma conjunta (GREWAL *et al.*, 2018). Desse modo, é considerado para o Cenário 4, novamente, uma redução em 50% no consumo desses produtos.

O preparo do EP para ser utilizado no cultivo de eucalipto é relativamente simples: a temperatura para coleta e condensação dos gases condensáveis

deve estar entre 80 a 120°C, de acordo com as normas adotadas pela Associação dos Produtores de Agricultura Natural – APAN e o EP deve ser decantado por, pelo menos, 6 meses para que ocorra a separação entre o alcatrão insolúvel e óleos leves (SILVA *et al.*, 2017; PORTO *et al.*, 2007).

O uso de fertilizantes nitrogenados e fosfatados para a produção de eucalipto tem consequências negativas para a atmosfera e para a água. Os fertilizantes nitrogenados aplicados na agricultura não são 100% aproveitados pelas plantas, apenas uma parcela é assimilada, resultando em perdas e prejuízos ambientais. A lixiviação, por exemplo, é um processo comum que ocorre quando o nitrogênio que não é absorvido pelas plantas é transportado para camadas mais profundas do solo, chegando até a água dos lençóis freáticos, na forma de nitrato (NO_3^-). Outros processos comuns são a transformação de nitratos no conhecido GEE, óxido nitroso (N_2O), produzido no solo durante o ciclo do nitrogênio e a volatilização, processo de perda do nitrogênio, na forma de amônia (NH_3), para a atmosfera (VIEIRA, 2017). Assim, o consumo de fertilizantes nitrogenados contribui com emissões de N_2O , NH_3 e NO_3^- .

Existem ainda emissões, na forma de pentóxido de fósforo, para a água superficial provenientes da aplicação de fertilizantes à base de fósforo. Além disso, o herbicida Glifosato é também emitido para a água.

5.2.2 Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC)

Esta etapa inclui todas as operações que ocorrem dentro da UPC, desde a movimentação da madeira, sua carbonização, a movimentação do carvão, até a combustão dos gases não condensáveis, do alcatrão e dos resíduos florestais para geração de eletricidade. Para esse processo, serão elaborados 4 inventários diferentes, devido às modificações que cada um dos cenários avaliados apresenta.

Na UPC da Plantar, em Curvelo - MG, são necessários maquinários para transporte da madeira e do carvão, nas operações de carregamento e descarregamento, portanto há o consumo de diesel nesta etapa. A queima de diesel libera emissões na atmosfera, que foram contabilizadas no ICV. Há

também o consumo de eletricidade, na iluminação geral e nos escritórios da UC. O consumo médio mensal de eletricidade é cedido pela Plantar e, para produção de cada tonelada de carvão vegetal, é estimado que o consumo seja de 1,393 kWh/ton.

A carbonização ocorre em fornos retangulares que produzem, em média, 9.286,56 toneladas de carvão, 60.931 kg de GNC, 17.186 kg de GC. Os gases condensáveis e não condensáveis foram medidos e caracterizados através de medições e análises realizadas em um forno da UPC, em 2019, e esses resultados foram disponibilizados a autora e são apresentados no ANEXO A. As entradas e saídas para a produção de 1 tonelada de carvão vegetal são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 12 - Insumos para a produção de 1 tonelada de carvão vegetal

(Continua)

Saída de produtos	Quantidade (Cenário 1)	Quantidade (Cenário 2)	Quantidade (Cenário 3)	Quantidade (Cenário 4)
Carvão Vegetal	1000 kg	1000 kg	1000 kg	1000 kg
Eletricidade	0	0	0,1923 MWh	0,2617 MWh
Entradas				
Madeira de eucalipto	5,635 m ³	5,635 m ³	5,635 m ³	5,635 m ³
Diesel	0,06 kg	0,06 kg	0,06 kg	0,06 kg
Eletricidade	1,39 kWh	1,39 kWh	1,39 kWh	1,39 kWh
Saídas				
Gases Não Condensáveis	6561,2 kg	656,12 kg	656,12 kg	656,12 kg
Gases Condensáveis	1850,63 kg	1850,63 kg	1850,63 kg	0 kg
Resíduos Florestais	166,28 kg	166,28 kg	166,28 kg	0 kg
Material Particulado	72,19 kg ^a	2,03 kg ^a	2,03 kg ^a	5,02 kg
Óxidos de nitrogênio ^b	0 kg	0,45 kg	0,45 kg	0,45 kg
Dióxido de Carbono ^b	0 kg	1988,279 kg	1988,279 kg	2148,14 kg

Tabela 13 - Insumos para a produção de 1 tonelada de carvão vegetal

Saídas				
COVNM ^b	0 kg	0,082 kg	0,082 kg	5,402 kg
Água ^b	0 kg	402,53 kg	402,53 kg	418,67 kg
Monóxido de Carbono ^b	0 kg	0 kg	0 kg	5,32 kg
Metano ^b	0 kg	0 kg	0 kg	1,99 kg

^a Material particulado emitido nos fornos de carbonização e, com a combustão do GNC, são reduzidos; ^b Emissões adicionais, poluentes emitidos na queima do GNC, alcatrão e resíduos da biomassa.

No cenário 1, todo o gás produzido (GNC + GC) é liberado na atmosfera. O GNC é composto por 60,67% de nitrogênio, 14,31% de oxigênio, 17,02% de dióxido de carbono, 7,05% de monóxido de carbono, 0,157% de hidrogênio e 0,77% de metano, enquanto a composição do GC já é muito mais complexa. Tanto a composição do GNC quanto a do GC podem ser encontradas no Anexo A.

Os Cenários 2, 3 e 4 incluem a queima dos gases não condensáveis da carbonização e, nesse processo, considera-se que parte do GNC gerado no forno acaba se perdendo, devido a vazamentos no sistema. Assim, estima-se que 90% dos gases GNC são queimados e o restante, ou seja, 10% são emitidos para a atmosfera, baseando em Leme (2016).

A queima completa dos gases do GNC e do Alcatrão libera CO₂, H₂O e N₂ na atmosfera, valores estimados pelo balanço da reação da combustão. A queima real de combustíveis, entretanto, emite outros poluentes como monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, particulados e compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM). Ademais, a combustão dos resíduos da biomassa florestal também emite poluentes.

Nos Cenários 3 e 4, eletricidade está sendo gerada no equipamento de conversão de energia, sendo considerado o Ciclo Rankine convencional, com 12% de eficiência. No Cenário 3, onde apenas o GNC está sendo queimado, a produtividade de eletricidade por tonelada de carvão vegetal produzida no cluster é de 0,1923 MWh/tcarvão, os cálculos são apresentados no Anexo B.

Sabe-se que a queima dos GNC's é desafiadora, devido à grande variação na composição dos gases e a concentração de gases combustíveis que pode

estar abaixo do limite inferior de inflamabilidade, mesmo em um sistema de *cluster*. Por isso, a combustão dos resíduos da biomassa se torna muito vantajosa, além da geração de eletricidade adicional, os resíduos da biomassa tornam a combustão do GNC constante, principalmente nas horas iniciais do funcionamento do *cluster*, quando os gases ainda não possuem poder calorífico suficiente para manter a combustão. Em Castro (2014), por exemplo, a queima de biomassa ocorre por um período aproximado de cinco horas, sendo que nas primeiras 2 horas a quantidade de biomassa queimada é maior e, com o aumento poder calorífico dos gases, a quantidade de resíduos injetada no queimador diminui.

Sendo assim, para garantir que o sistema de cogeração de energia funcione adequadamente e mais energia elétrica seja produzida, no Cenário 4, o alcatrão insolúvel e os resíduos da biomassa são queimados e isso proporciona uma geração de eletricidade de 0,0173 MWh/tcarvão e 0,05217 MWh/tcarvão, respectivamente. No total, é estimada a geração de, em média, 0,2617 MWh para cada tonelada de carvão produzida.

5.2.3 Considerações sobre o Inventário

- ICV da Unidade Florestal:

As mudas são cultivadas pela própria empresa e as entradas de insumos para o cultivo são fornecidos por eles. Porém, devido à falta de informações referentes ao consumo de água para a irrigação e dissolução de químicos no cultivo das mudas e ao consumo de diesel por tratores que transportam insumos dentro do viveiro, essas entradas são baseadas no estudo de Silva (2012), que constrói um ICV para um viveiro de mudas de clones de eucalipto, localizado no estado de São Paulo. A fabricação dos tubetes, recipiente das mudas, é desconsiderada no estudo.

É considerado nesse trabalho que uma muda produz, em média, 96,45 kg de madeira (fuste) (CASTRO, 2014) e, para transformação para m³ de madeira, é considerada a densidade de 524,24 kg/m³, conforme dados fornecidos pela UPC.

A cadeia produtiva do fertilizante nitrogenado MAP (Fosfato Monoamônico) não está disponível na base de dados do *Ecoinvent v.3*, porém, como sua composição é majoritariamente Nitrogênio e Fósforo, o insumo é incluído como “*Nitrogen fertiliser, as N {GLO}, market for*” e “*Phosphate fertiliser, as P₂O₅ {GLO}, market for*” baseando-se novamente no mesmo procedimento adotado pela autora Barrantes (2016). O mesmo procedimento é adotado para os fertilizantes NPK PGmix e Oscomote, porém é também feita a inclusão do componente Potássio como “*Potassium fertiliser, as K₂O {GLO}, market for*”. As cadeias produtivas do nitrato de cálcio, do cloreto de potássio (KCL), sulfato de magnésio e do ácido bórico são obtidas através da base de dados do *Ecoinvent 3*, o inventário da produção de Sulfato de Amônio e da Ureia são retirados de Ribeiro (2009), para a cadeia produtiva do Superfosfato Simples, o inventário tem como fonte Monteiro (2008).

Para elaboração do inventário, é considerada a seguinte proporção de nutrientes nos fertilizantes:

- Uréia: 46% de N;
- Sulfato de Amônio: 21,2% de N;
- Fosfato Monoamônico purificado (MAP): 60,5% de P₂O₅ e 11,5% de N;
- Fosfato Monoamônico (MAP): 52% de P₂O₅ e 12% de N;
- PGmix: 14% de N, 16% de P e 18% de K;
- Oscomote: 15% de N, 9% de P e 12% de K;
- Nitrato de Cálcio: 15% de N e 19% de Ca.

Não foram encontrados na base de dados do *SimaPro* a cadeia produtiva do fertilizante a base de ferro (Kellus Iron), de fertilizante similar ao Agrosilício-S e do Sulfurgran, do sulfato de manganês, do sulfato de zinco, do sulfato de cobre e do boro e, sendo assim, não estão incluídos no inventário. Além disso, macroconstituintes secundários presentes nos fertilizantes também não estão incluídos no inventário.

As Tabelas 14 e 15 reúnem informações sobre a fonte de cada dado de entrada para o cultivo de 1.000 mudas e para a produção de 1m³ de madeira, bem como a origem dos inventários utilizados.

Tabela 13 - Fonte dos dados de entrada e do inventário: Produção de mudas

	Fonte dos dados	Fonte do inventário – cadeia produtiva
<i>Produção de 1.000 mudas</i>		
Superfosfato simples	Primária	Monteiro (2008)
PGmix (Fertilizante NPK)	Primária	Ecoinvent v.3
Oscomote (Fertilizante NPK)	Primária	Ecoinvent v.3
Nitrato de cálcio	Primária	Ecoinvent v.3
Cloreto de Potássio (KCL)	Primária	Ecoinvent v.3
MAP purificado	Primária	Ecoinvent v.3
Sulfato de magnésio	Primária	Ecoinvent v.3
Uréia	Primária	Ribeiro (2009)
Sulfato de amônio	Primária	Ribeiro (2009)
Kellus Iron	Primária	Não encontrado
Sulfato de manganês	Primária	Não encontrado
Sulfato de Zinco	Primária	Não encontrado
Sulfato de Cobre	Primária	Não encontrado
Ácido bórico	Primária	Ecoinvent v.3
Diesel	Secundária – Silva (2012)	Sugawara (2012) para cadeia produtiva e CETESB (2020) para emissões da queima
Água	Secundária – Silva (2012)	Ecoinvent v.3

Para os pesticidas, é considerado que o Glifosato está presente em 620g/L do produto Touchdown aplicado, conforme bula do fabricante. E, é considerado que o inseticida K-otrine contém 2 g/kg de Deltametrina.

Para a cadeia produtiva do herbicida à base de Glifosato é utilizada a base de dados do Ecoinvent, porém o consumo de eletricidade e o transporte são ajustados para as condições brasileiras. A cadeia produtiva do formicida à base de Sulfloramida, não está presente na base de dados do Ecoinvent, em razão disso, para não excluir totalmente esse insumo do ciclo de vida, ele será adicionado como “*Pesticide, unspecified {GLO}, market for*”. A mesma coisa é feita para o Herbicida à base de Isoxafluotol (Fordor), os formicidas Actara, a base de Tiametoxam, adicionados também como “*Pesticide, unspecified {GLO}, market for*” no SimaPro, baseando-se no mesmo procedimento adotado pela autora Barrantes (2016). O K-otrine, inseticida a base de Deltametrina, é adicionado como “*pyreteroid-compounds*”, conforme recomendação de Nemecek e Kagi (2007).

Tabela 14 - Fonte dos dados de entrada e do inventário: Produção de madeira

	Fonte dos dados	Fonte do inventário – cadeia produtiva
<i>Produção de 1 m³ de madeira</i>		
MAP	Primária	Ecoinvent v.3
Superfosfato simples	Primária	Monteiro (2008)
Cloreto de Potássio (KCL)	Primária	Ecoinvent v.3
Touchdown (Glifosato)	Primária	Ecoinvent v.3
Isca Attamex-S (Sulfluramida)	Primária	Ecoinvent v.3
Sulfurgran	Primária	Não encontrado
Actara (Tiametoxam)	Primária	Ecoinvent v.3
K-otrine (Deltametrina)	Primária	Adicionado como Pyrethroid-compound, retirado de Ecoinvent v.3
Fordor (Isoxaflutole)	Primária	Ecoinvent v.3
Missil (Haloxifope-P-metílico)	Primária	Ecoinvent v.3
Óleo Joint	Primária	Não encontrado
Agrosilício S	Primária	Não encontrado
Boro	Primária	Não encontrado
Diesel	Primária	Sugawara (2012) para cadeia produtiva e CETESB (2020) para emissões da queima
Água	Primária	Ecoinvent v.3

A aplicação de fertilizantes resulta em emissões (saídas) dentro do sistema. O uso de fertilizantes nitrogenados resulta em emissões para a água e atmosfera, e os fatores de emissão da sua aplicação foram retirados de IPCC (2006), Nemecek e Schnetzer (2012) e WRI Brasil (2020). Nemecek e Schnetzer (2012) fornecem taxas de emissões para atmosfera, na forma de Amônia (NH₃), proveniente de alguns tipos de fertilizantes minerais nitrogenados. De acordo com os autores, 8% da quantidade de N contido no fertilizante Sulfato de Amônio, 15% da quantidade de N contida na Uréia, 2% de N contido no nitrato de cálcio e 4 % de N contido nos fertilizantes NPK (ou N-P e N-K) são emitidos para a atmosfera na forma de NH₃, portanto essas taxas de emissão são adotadas na construção do inventário florestal de Curvelo. Para calcular a emissão de Nitrato (NO₃-) para a água, através de lixiviação, é adotada a taxa de emissão proposta por IPCC (2006), que sugere a taxa de 0,3 kg de NO₃- para cada kg de N aplicado.

As emissões de N₂O são baseadas na ferramenta de cálculo do GHG Protocol Brasil para a Silvicultura no Brasil, desenvolvida pelo WRI Brasil e um

conjunto de especialistas. As emissões de N₂O relativas ao uso de fertilizantes nitrogenados podem ser diretas ou indiretas, devido a deposição atmosférica de N volatilizado e da lixiviação e deposição de N no solo. Para as emissões diretas, é estimado que, para a aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos a emissão seja de 0,0113 kg de N₂O para cada kg de N aplicado e, para a aplicação da Uréia, é estimado um fator de emissão de 0,0088 kg de N₂O para cada kg de N aplicado (WRI, 2020).

As emissões indiretas decorrentes da deposição atmosférica são calculadas com a seguinte fórmula, com base em WRI Brasil (2020):

$$N_2O_G = (N_{FERT} + FRAC_{GASF}) \times EF_3$$

Sendo que:

N₂O_G são as emissões associadas a deposição atmosférica, em kg N₂O-N;

N_{FERT} a quantidade de N aplicado na forma de fertilizantes sintéticos, em kg N/ano;

FRAC_{GASF} a fração de N do fertilizante sintético que volatiliza como NH₃ e NO_x, em kg NH₃-N e kg NO_x – N emitido, sendo que o valor adotado é de 0,1 (IPCC, 2006);

EF₃ o fator de emissão para a deposição atmosférica, em kg N₂O–N/kg NH₃ e NO_x-N emitido, sendo que o valor adotado é de 0,01 (IPCC, 2006).

Enquanto as emissões indiretas de N₂O por lixiviação ou escoamento superficial são calculadas com a seguinte fórmula, com base novamente em WRI Brasil (2015):

$$N_2O_L = N_{FERT} \times FRAC_{LI} \times EF_4$$

Sendo que:

N₂O_L são as emissões associadas à lixiviação ou escoamento superficial, em kg N₂O-N;

N_{FERT} a quantidade de N aplicado na forma de fertilizantes sintéticos, em kg N/ano;

FRAC_{LI} a fração de N do fertilizante sintético adicionado ao solo que são perdidos por lixiviação e escoamento, em kg N lixiviado ou escoado/kg de fertilizante, sendo que o valor adotado é de 0,3 (IPCC, 1996);

EF₄ o fator de emissão de N₂O por lixiviação/escoamento, em kg N₂O–N/kg N lixiviado ou escoado, sendo que o valor adotado é de 0,025 (IPCC, 1996).

Para as emissões a partir da utilização de fertilizantes fosfatados, o autor Shigaki (2006), sugere que 10% do total aplicado são emitidos para a água superficial como pentóxido de fósforo, e essa é a taxa de emissão adotada neste trabalho. Conforme Silva (2012) e Barrantes (2016) as emissões para ar, água ou solo referentes a aplicação de zinco, boro, cobre e outros microconstituintes dos fertilizantes NPK não são incluídos no inventário, pois parte da quantidade aplicada é absorvida pela planta e o restante permanece no solo.

A aplicação de pesticidas também resulta em emissões para o sistema e, de acordo com Barrantes (2016), estas emissões podem ser estimadas de duas formas: através da modelagem do *PestLCI* ou através do cálculo padrão utilizado pelo *Ecoinvent*. O *PestLCI* é uma modelagem que estima as emissões pontuais de pesticidas para o ar, águas superficiais e subterrâneas. Já o cálculo do *Ecoinvent* considera que 100% do pesticida aplicado fica no solo. Como o *PestLCI* não é modelado para as condições de clima e solo do Brasil, é adotada a recomendação do *Ecoinvent* para este trabalho. Porém, a única exceção será para as emissões resultantes da aplicação do herbicida Glifosato, o qual é considerado que 0,28% da quantidade aplicada é encaminhada para água, através de lixiviação, e essa taxa é baseada em Jabbar *et al.*, (2008), que avaliam a sorção e a lixiviação do herbicida Glifosato em solos agrícolas.

Para a cadeia produtiva do diesel, os dados são obtidos em Sugawara (2012), que elabora o inventário da produção brasileira. As emissões da queima do diesel são retiradas do relatório de emissões veiculares da CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, do ano de 2020, relatório que apresenta as estimativas das emissões de poluentes e de gases do efeito estufa para o estado. São considerados no ICV os fatores de emissão de caminhões, categoria média, que seguem a nova fase do Proconve P7 (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), em vigor desde 2012. Os valores de emissão para cada kg de diesel queimado são apresentados na Tabela 16.

Tabela 15 - Emissão de poluentes a partir da queima de 1 kg de diesel

CO	HC	NO_x	MP	CO₂	NH₃	SO₂
0,00140 kg	0,00006 kg	0,0057 kg	0,000059 kg	3,17727 kg	0,04181 kg	0,000444 kg

A quantidade de diesel consumida é transformada em kg utilizando a densidade relativa 0,834 kg/l (20 °C), obtida através da Ficha de Informações de Segurança de Produto Química (FISPQ) do Diesel S10 disponibilizada pela Petrobras Distribuidora S.A.

No ano 7, são colhidas da unidade florestal 201,067 m³ de madeira/ha (já considerando o índice de falhas de 1,5%). No ano 14, é esperado uma redução de 10% na colheita, portanto 180,96 m³ de madeira/ha são colhidas.

A colheita é realizada por empresa terceirizada, portanto, o consumo de diesel não foi fornecido. Para não excluir esse importante dado de entrada, e com base nas informações fornecidas no trabalho de Nascimento *et al.* (2011), a respeito da produtividade do *Feller-buncher*, são feitos os cálculos do consumo de diesel na colheita de eucalipto. A máquina tem capacidade de cortar e acumular 48,8 m³ de árvores em 1 hora. Para realizar as duas colheitas (382,02 m³/ha), são necessárias cerca de 7,83 horas e, sabendo que a máquina consome 21,58 L/h, o consumo aproximado de diesel nas colheitas é 168,97 litros de diesel/ha.

A operação que segue a colheita é o transporte das árvores até a estrada. Para isso, é utilizado o trator *Skidder*. O *Skidder* tem capacidade de transportar cerca de 32 m³ de madeira por hora, com consumo de 21,1 L/h de diesel (SILVA, 2012). A última operação é o transporte até o pátio da unidade produtora de carvão vegetal. É considerado que o transporte é feito por caminhão, que consome 3 litros de diesel por km, com capacidade para carregar 60 m³ por viagem. Portanto, será considerado que o caminhão realiza 7 viagens (ida e volta), para transportar toda a madeira (382,02 m³/ha). A Unidade produtora está dentro da Unidade de florestal, a distância do transporte da madeira até o pátio da UPC considerado nesse estudo é de 5 km de distância, de acordo com as informações fornecida pela Plantar. A Tabela 17 apresenta os maquinários usados em cada etapa da produção florestal, com seu respectivo consumo de diesel. Esses dados são utilizados para calcular a quantidade total de diesel consumida durante a produção florestal de eucalipto.

Tabela 16 - Consumo de diesel em cada operação florestal

Atividade	Maquinário	Consumo de diesel	Requerido
Preparo do solo	Trator 4x4	16 litros/hora	1,32 h
Plantio*	Trator 4x2	7 litros/hora	0,32 h
Manutenção de aceiros	Trator 4x4	10 litros/hora	1h
Roçada Mecanizada	Roçadeira de arraste	6 litros/hora	1 h
Aplicação de Fordor	Trator 4x2	7 litros/hora	0,33 h
Aplicação de Touchdown + Missil + Óleo Joint	Trator 4x2	7 litros/hora	0,66 h
Aplicação de Touchdown	Trator 4x2	7 litros/hora	0,35 h
Adubação (KCL)	Trator 4x2	7 litros/hora	0,42 h
Adubação (Agrosilício)	Trator 4x2	7 litros/hora	0,42 h
Adubação (Boro)	Trator 4x2	7 litros/hora	0,3 h
Derrubada das árvores	<i>Feller-Buncher</i>	21,58 litros/hora	4,12 h**
Extração	<i>Skidder</i>	21,10 litros/hora	6,28 horas**
Transporte para UPC***	Caminhão	3 litros/km	70 km

*Inclui transporte das mudas do viveiro até a floresta, transporte de insumos e aplicação do MAP e Acatara.

**Para derrubar e extrair 1.093 árvores (quantidade estimada de árvores para primeira colheita)

***Requerido para 7 viagens (ida e volta) de 5 km, transporte das duas colheitas.

Os resíduos da biomassa gerados desde a colheita até a carbonização da madeira não são contabilizados pela UPC. Portanto, são estimados com o auxílio da pesquisa de Castro (2014) que quantifica o estoque de biomassa total da parte aérea de uma floresta de Eucalyptus em idade de corte e quantifica a perda de biomassa deste o corte até a transformação da madeira em carvão vegetal. A colheita avaliada pela autora é também mecanizada, são utilizados o *Feller-buncher* para derrubada e o *Skidder* para extração, portanto se assemelham ao cenário deste estudo.

De acordo com a autora, uma árvore de eucalipto possui em média, 8 kg de casca, 2,43 kg de galhos, 1,92 kg de folhas, 0,39 kg de ponteira e a madeira possui 96,45 kg. Os galhos, folhas e ponteira são removidos logo após a derrubada, e são geradas cerca de 5,18 toneladas de resíduos por hectare na primeira colheita e, 4,66 toneladas por hectare na segunda colheita. Já em relação a casca, é considerado que 25,7% da casca se desprende durante a colheita, extração, secagem, transporte e entrada no forno, baseando-se no

estudo de Castro (2014). Sendo assim, estima-se que durante as duas colheitas, e as movimentações da madeira até a entrada no forno de carbonização, são geradas 14,096 toneladas de resíduos por hectare. Os galhos, as ponteiros, e as folhas representam 9,843 ton, e as cascas 4,253 ton.

Os resíduos da biomassa possuem potencial de geração de energia elétrica e térmica e, a grande quantidade de resíduos gerados nas florestas energéticas podem ser muito vantajosos e serão avaliados neste trabalho. Entretanto, a retirada total de resíduos da floresta pode acarretar em custos adicionais de fertilização (CASTRO, 2014), já que os resíduos da biomassa deixados no solo da floresta possuem um papel importante na ciclagem de nutrientes, retenção de água, prevenção da erosão, contribuindo com a qualidade do solo e no rendimento total de biomassa da floresta (NOGUEIRA *et al.*, 2021). Apesar disso, esses resíduos podem ser retirados da floresta para serem reaproveitados sem causar prejuízos, desde que uma quantia seja deixada no solo da floresta (NOGUEIRA *et al.*, 2021). Sendo assim, é considerado que 20% dos resíduos gerados são deixados na floresta, e o restante é aproveitado para geração de eletricidade adicional (Tabela 18), valor semelhante ao adotado por Nogueira *et al* (2021) e recomendado por Pincelli *et al* (2017).

Tabela 17 - Resíduos da biomassa gerados

Ciclo de vida de 14 anos (kg/ha)				
galhos	folhas	ponteira	casca	total
5046,38	3987,26	809,91	4253,08	14096,63
Para produzir 1 ton de carvão (kg)				
galhos	folhas	ponteira	casca	Total
74,41	58,79	11,94	62,71	207,85
Quantidade de resíduos que serão aproveitados (kg)				
galhos	folhas	ponteira	casca	Total
59,53	47,03	9,55	50,17	166,28

No Cenário 4, os resíduos da biomassa são utilizados para geração de eletricidade adicional ao sistema e, para isso, os resíduos precisam ser transportados da floresta até a UPC, porém, o transporte da biomassa é um desafio devido ao seu volume elevado. Por isso, para facilitar seu transporte, os resíduos devem ser cortados em tamanhos menores, em local próximo a floresta. Para o Cenário 4, é considerado que 3 equipamentos (Tabela 19) são utilizados

para o processamento e transporte dos resíduos. O *Fowarder* realiza a coleta e empilha os resíduos, o *Roadside chipper* transforma os resíduos em cavacos no próprio local da colheita e, por último, o mesmo caminhão que transporta a madeira a ser carbonizada irá transportar os resíduos da biomassa após seu processamento em cavacos. Os cavacos de resíduos possuem densidade de, em média, 193 kg/m³, de acordo com Pincelli *et al.* (2017).

Tabela 18 – Maquinários utilizados e consumo de diesel no processamento e transporte dos resíduos

Atividade	Maquinário	Produtividade/Capacidade	Consumo de diesel
Processamento e transportes dos resíduos da biomassa	<i>Fowarder</i> *	20 ton/h	30 L/h
	<i>Roadside Chipper</i> *	100 ton/h	85 L/h
	Caminhão	60 m ³	3 L/km

*Dados sobre *Fowarder* e *Roadside chipper* retirados de Thakur *et al.* (2014)

Para estimar a absorção de CO₂ pelas florestas de eucalipto é realizado o mesmo procedimento adotado por Silva (2012), que se baseia em Reis *et al.* (1993) e no relatório anual Forest Absorbing Carbon Dioxide (1993), que para calcular a quantidade de carbono fixado na biomassa, multiplica a densidade básica da madeira de eucalipto (524,24 kg/m³) e o volume da madeira (382,02 m³ de fuste do ciclo total) por 50%, pois é considerado que o carbono sequestrado na madeira corresponde a 50% da sua massa. Por fim, para obter a quantidade de CO₂ absorvido pelas árvores, o teor de carbono fixo é dividido por 0,27 (1 tonelada de CO₂ é equivalente a 0,27 toneladas de C).

Por último, este estudo inclui a ocupação da terra, ou seja, considera o tempo e a quantidade de terra que está ocupada para o uso atual, estando impedida de mudar para seu estado mais natural (sem ação humana) (WEIDEMA *et al.*, 2013). De acordo com Weidema *et al.* (2013), florestas com finalidade extrativista, com menos de três espécies no plantio e com idade média do povoamento <30 anos se encaixam na classificação “forest, intensive”. Para o cálculo da ocupação da terra, 1 hectare é dividido pelo total produzido (382,02 m³ para as duas colheitas) e, por fim, multiplicado por 14 (duração do ciclo, em anos). Assim, neste estudo, para obtenção de 1m³ de madeira de eucalipto a ocupação da terra é de 0,0366 ha.ano.

- ICV da Unidade Produtora de Carvão Vegetal:

Segundo colaboradores da UPC, o resfriamento do forno ocorre de forma natural, sem a utilização de água. O consumo de eletricidade mensal médio é de 2.400 kWh, para calcular o consumo de eletricidade médio por tonelada de carvão vegetal produzido é considerada a produção mensal média de 6677,88 mdc/mês da UPC em 2020, além da densidade (base úmida) do carvão de 257,96 kg/m³. Para a eletricidade, é utilizado a base de dados Ecoinvent v3 (2013), que possui um processo que considera a matriz elétrica brasileira aproximada. O consumo de diesel dentro da UPC não foi disponibilizado, e por isso os dados são baseados em Leme (2016).

A Tabela 20 reúne informações sobre a fonte de cada dado de entrada para a produção de 1 tonelada de carvão vegetal, bem como a origem dos inventários utilizados.

Tabela 19 - Fonte dos dados de entrada e do inventário: Produção de carvão vegetal

Fonte dos dados		Fonte do inventário – cadeia produtiva
<i>Produção de 1 ton de carvão vegetal</i>		
Eletricidade	Primária	Matriz elétrica brasileira - Ecoinvent v.3
Diesel	Secundária – Leme (2016)	Sugawara (2012) para cadeia produtiva e CETESB (2020) para emissões da queima

Em relação aos dados de saída, a composição dos gases emitidos nos fornos de carbonização foi obtida através de medições realizadas em um forno da UPC de Curvelo – MG, em 2019, que foram disponibilizados a autora. A composição mássica média do GNC é: 60,67% de nitrogênio, 14,31% de oxigênio, 17,02% de dióxido de carbono, 7,05% de monóxido de carbono, 0,157% de hidrogênio e 0,77% de metano (Anexo A).

A composição dos Gases Condensáveis já é muito mais complexa, aproximadamente 20% dos compostos presentes no extrato pirolenhoso não foram identificados em laboratório e esses compostos são apresentados como “outros” na Tabela 25 do Anexo A. Além disso, durante a entrada de dados no

SimaPro®, grande parte dos componentes do extrato pirolenhoso não foram encontrados na base de dados disponível do *software*, devido à complexidade de sua composição. Assim, uma simplificação teve de ser feita e esses compostos tiveram de ser incluídos no *software* como “hidrocarbonetos, sem especificação”.

A composição apresentada no Anexo A mostra apenas a composição do extrato pirolenhoso, não considerando a água nem o alcatrão insolúvel. A quantidade de água e alcatrão teve de ser estimada através de revisão da Literatura, pois os dados não constavam nas análises feitas no local e, baseado em Leme (2016), 84,57% do líquido pirolenhoso é água, e 1,38% é alcatrão insolúvel.

A quantidade de material particulado emitida nos fornos de carbonização é baseada no estudo de Cardoso (2010), que mediu, com base na NBR 12019, a emissão de material particulado em um forno retangular em escala reduzida e em um sistema forno-fornalha.

Sabe-se que a queima completa dos gases da carbonização (GNC e alcatrão) libera CO₂, H₂O e N₂ na atmosfera e, como não foi realizada uma medição direta dos gases liberados na queima, para elaboração do inventário do ciclo de vida esses valores tiveram de ser estimados pelo balanço da reação da combustão. O cálculo do balanço estequiométrico da combustão do GNC pode ser visto no Apêndice A.

O cálculo estequiométrico considera uma combustão completa, sem emissão de outros poluentes. Entretanto, a queima real de combustíveis emite outros poluentes, por ser uma combustão incompleta, como monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, particulados e compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM). Da mesma forma que os produtos da combustão completa são estimados, esses poluentes também são calculados, através de fatores de emissão obtidos na literatura. Para o NO_x e os COVNM's, a emissão é baseada nas emissões de poluentes de Barcellos *et al.*, (2004), também adotadas por Leme (2016). E, para a emissão de particulados, os cálculos são baseados em Cardoso (2010) e Bailis *et al.* (2013). Sendo assim, a Tabela 21 apresenta a quantidade de poluentes emitidos no processo de combustão de toda quantidade de GNC, Alcatrão e dos resíduos da biomassa produzidos para cada tonelada de carvão vegetal produzida.

Tabela 20 - Poluentes emitidos (kg/ton de carvão produzido) para a combustão do GNC, alcatrão e resíduos da biomassa

Combustão	CO ₂	N ₂	Água	COVNMs	NO _x	Material Particulado	CH ₄	CO
GNC	1998,28 ^a	2353,53 ^a	402,54 ^a	0,082 ^b	0,45 ^b	2,03 ^c	0	0
Alcatrão insolúvel	38,99 ^a	106,22 ^a	16,14 ^a	0	0	2,03 ^c	0	0
Resíduos da biomassa	120,88 ^d	0	0	5,32 ^d	0	2,99 ^d	1,99 ^d	5,32 ^d

^a calculado pela autora através do balanço estequiométrico

^b baseado em Barcelos *et al.* (2004) e Leme (2016)

^c cálculo baseado em Cardoso (2010)

^d cálculo baseado em Bailis *et al.* (2013)

Nos Cenários 3 e 4, eletricidade está sendo gerada no equipamento de conversão de energia, sendo considerado o Ciclo Rankine convencional, com 12% de eficiência. O cálculo da produtividade de eletricidade por tonelada de carvão vegetal produzida no cluster pode ser encontrada no Anexo B.

No Cenário 4, o alcatrão insolúvel e os resíduos da biomassa são queimados para geração de eletricidade adicional ao sistema e isso proporciona uma geração de eletricidade de 0,0173 MWh/tcarvão e 0,0521 MWh/tcarvão, respectivamente.

Para o cálculo do potencial de geração de eletricidade a partir da queima do alcatrão (Tabela 22), considera-se que 10% do alcatrão fica nos tubos de transporte, devido a sua maior viscosidade. O PCI a 25° do alcatrão, temperatura na qual os compostos presentes nos GCs estão no estado líquido, é retirado de Leme (2016).

Tabela 21 - Potencial de geração de eletricidade a partir da queima do alcatrão

	Quantidade ton/ton de carvão vegetal	PCI 25°C GJ/ton	Potencial energético GJ	Eficiência	Saída de eletricidade kWh
Alcatrão	0,02297	22,412	0,514	12%	17,30

Como mencionado, 20% dos resíduos gerados são deixados na floresta para reposição dos nutrientes no solo e o restante é utilizado para garantir a

estabilidade da queima e para a geração de eletricidade adicional. A Tabela 23 apresenta os resultados do potencial de geração de eletricidade a partir da queima dos resíduos da biomassa. Os valores do PCS, PC líquido e umidade dos resíduos da biomassa foram retirados de Castro (2014).

Tabela 22 - Potencial de geração de eletricidade a partir da queima dos resíduos da biomassa

Resíduos	Casca	Galho	Ponteira	Folha	
PCS kJ/kg	18.409,6	19.614,59	19.196,19	21.263,09	
Umidade %	18	50	30	60	
PC Líquido kJ/kg	13.551,98	7.874,28	11.736,12	6.455,91	
Massa de resíduo (kg de resíduos/ton de carvão vegetal)	50,17	59,53	9,55	47,03	
Potencial energético kWh	256,67	324,48	50,96	277,93	
Energia térmica kJ	679872,92	468.719,21	112.103,41	303.636,52	
Eficiência 12%	Energia elétrica kWh/ton carvão vegetal	22,67	15,63	3,74	10,13
			Total kWh	52,17	

5.3 Metodologia de Avaliação dos Impactos Ambientais

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é realizada no *software* Simapro®, versão 8.0.3.14. A metodologia de Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida adotada para este trabalho é a metodologia CML-IA Baseline v.3.01 - *Chain Management by Life Cycle Assessment* - que é uma ferramenta de *software* que se destina a apoiar as etapas técnicas do procedimento de avaliação do ciclo de vida. O CML-IA *baseline* é uma metodologia ACV desenvolvida pelo Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, na Holanda, cujo método enfatiza a abordagem orientada para o problema (*mid-point*) (CML, 2020).

A primeira etapa para a seleção da metodologia de Avaliação de Impactos é a identificação das categorias de impacto relevantes aos processos de carbonização. Por exemplo, sabe-se que a queima dos gases da carbonização apresenta reduções nas emissões de CH₄ então, nesse caso, é importante escolher categorias que avaliem os impactos na mudança climática global.

Para este trabalho, considerando os fatores acima, as seguintes categorias de impacto são selecionadas: Depleção de Recursos, Aquecimento Global, Depleção da camada de ozônio, Toxicidade humana, Oxidação fotoquímica, Acidificação e Eutrofização. Sendo assim, o método CML-IA *Baseline* v.3.01 é escolhido por incluir todas essas categorias de impacto. A Tabela 24 descreve cada categoria de impacto selecionada.

Tabela 23 - Categorias de impactos selecionadas

Categoria	Unidade	Descrição
Depleção de Recursos Abióticos	kg Sb _{eq} /depleção abiótica fósseis em MJ	Representa a diminuição dos recursos disponíveis no mundo, devido a atividade humana.
Aquecimento Global (GWP 100a)	kg de CO _{2 eq}	Variação do clima global ao longo do tempo, trazendo consequências para o equilíbrio de sistemas e ecossistemas. Ocorre devido ao acréscimo na concentração de GEE na atmosfera, causado pelas atividades humanas
Depleção da Camada de Ozônio	kg de CFC-11 eq	A depleção, ou redução da camada de ozônio estratosférico, permite que haja um aumento no fluxo de radiação ultravioleta (UV), atingindo a atmosfera terrestre.
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	Esta categoria está relacionada aos efeitos que substâncias tóxicas podem causar nos seres humanos.
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H _{4 eq}	Oxidantes fotoquímicos são formados em consequência de reações químicas que ocorrem na atmosfera, envolvendo compostos orgânicos, óxidos de nitrogênio, oxigênio e radiação solar, sendo o ozônio um exemplo deste poluente.
Acidificação	kg SO _{2 eq}	As substâncias ácidas causam uma série de impactos no solo, nas águas subterrâneas e superficiais, nos organismos e nos ecossistemas, até mesmo em construções.
Eutrofização	em kg PO _{4 eq}	Ocorre devido a níveis excessivos de macronutrientes, como fósforo e nitrogênio, no meio ambiente, causada por emissões para o ar, a água e o solo, e pode ocasionar em desequilíbrio ecológico de ecossistemas aquáticos.

CAPÍTULO 6: RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida para a produção de 1 tonelada de carvão vegetal (unidade funcional), através do método CML-IA baseline V3.01.

6.1 Resultados da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A Figura 18 apresenta o resultado geral da caracterização, para todas categorias de impacto avaliadas, e mostra o potencial de impacto causado por cada cenário avaliado.

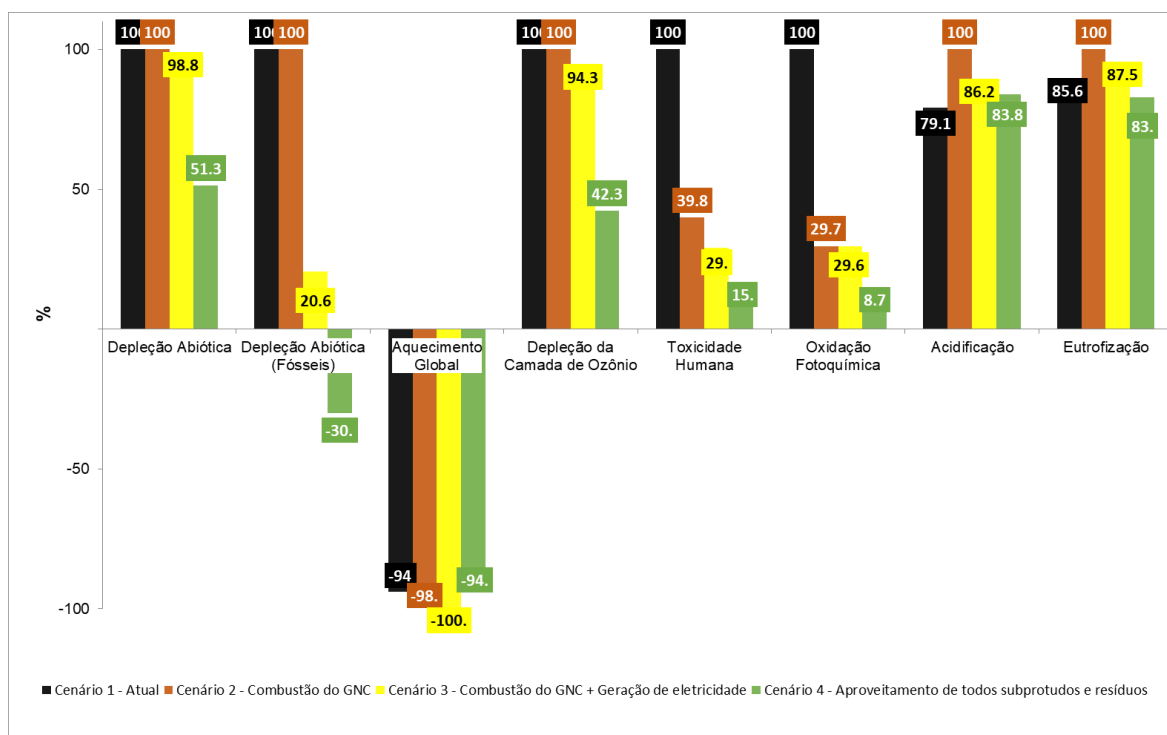


Figura 18 - Resultado AICV: Caracterização geral

Observando o resultado geral da caracterização, ao se comparar todos os cenários avaliados, é possível identificar que o Cenário 4, onde há a recuperação do GNC, do alcatrão insolúvel e dos resíduos da biomassa para geração de eletricidade e do extrato pirolenhoso para o cultivo de eucalipto, possui o melhor desempenho na maioria das categorias de impacto avaliadas. Há apenas duas exceções a serem observadas, para as Categorias de Aquecimento Global e Acidificação. No Cenário 4, uma maior quantidade de gases de efeito estufa está

sendo emitida na atmosfera, devido a queima dos resíduos florestais e do alcatrão insolúvel e, mesmo com a energia adicional gerada (0,069 MWh), não é suficiente para compensar totalmente essas emissões, tornando o Cenário 3 o cenário com maior potencial de reduzir as emissões de GEE. Para a categoria de acidificação, o Cenário 1 apresenta o melhor desempenho, já que não emite óxidos de nitrogênio (NO_x), gerados principalmente na queima dos GNCs e de diesel.

O Cenário 1, situação atual da UPC de Curvelo, obtêm o pior desempenho, com destaque para as categorias de Toxicidade Humana e Oxidação Fotoquímica. No Cenário 1, todas os gases estão sendo eliminados na atmosfera e isso significa que uma grande quantidade de gases de efeito estufa, em especial o metano (CH₄), está sendo eliminado na atmosfera. Monóxido de carbono (CO) é emitido nos fornos de carbonização, prejudicando a categoria de Oxidação Fotoquímica. No aspecto da saúde humana, a emissão de material particulado no Cenário 1 é prejudicial, devido a sua toxicidade. Com a combustão do GNC no Cenário 2, o Metano é convertido em dióxido de carbono (CO₂), além disso, a emissão de monóxido de carbono e de material particulado é reduzida consideravelmente.

O Cenário 2, apesar de ter demonstrado melhor desempenho nas categorias Aquecimento Global, Oxidação Fotoquímica e Toxicidade Humana, se destacou negativamente nas categorias de Acidificação e Eutrofização, devido, principalmente, as emissões de óxidos de nitrogênio geradas na combustão do GNC.

Para entender a magnitude dos impactos da produção de carvão vegetal, a Figura 19 mostra os resultados normalizados. Na normalização, os resultados são apresentados comparando os valores obtidos a partir de uma referência, assim, é possível entender a magnitude e significância dos resultados para cada categoria avaliada. Para a situação de referência deste estudo, são utilizadas as emissões globais do ano 2000, baseando-se nas informações presentes na base de dados do *software* SimaPro. Desse modo, é possível identificar que a categoria com maior magnitude de impacto, em termos globais, é a Oxidação Fotoquímica, sendo que o Cenário 1 obteve o pior desempenho, devido principalmente as emissões de monóxido de carbono dentro da UPC. É notável,

portanto, os benefícios de se realizar a combustão dos gases da carbonização ao observar a redução do impacto entre os cenários 1 e 2.

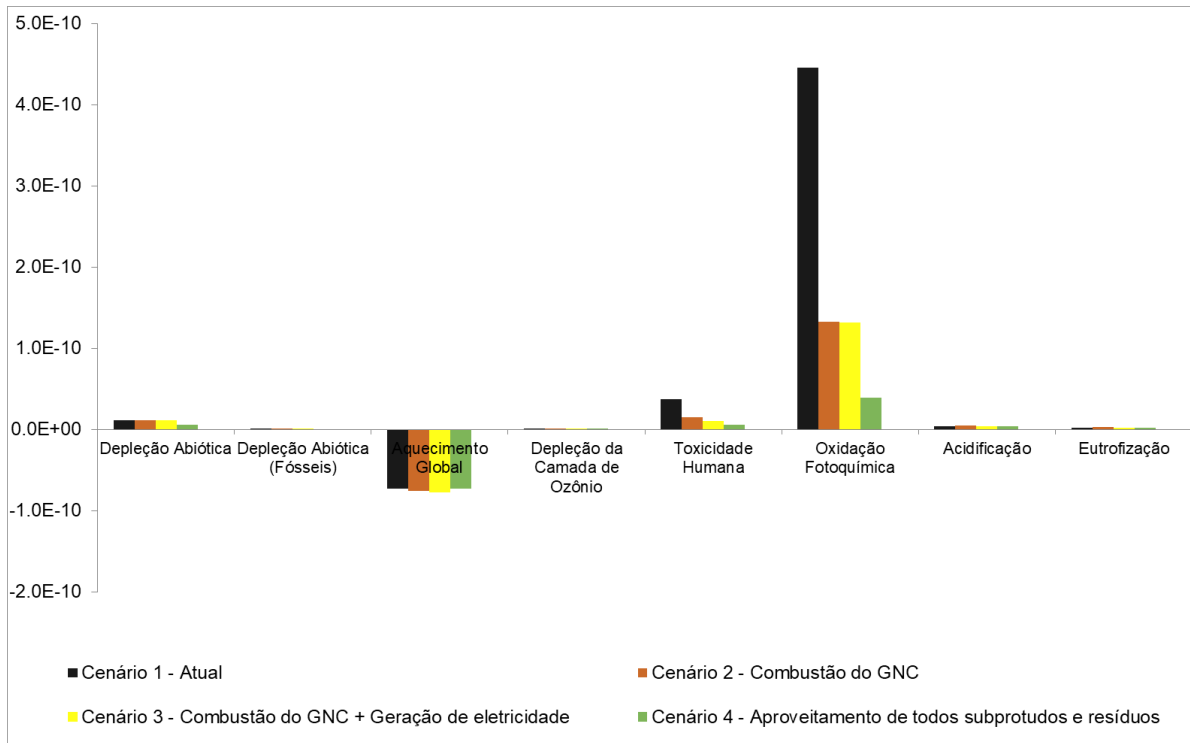


Figura 19 - Resultado AICV: Normalização

Para a categoria de Toxicidade Humana, apesar do impacto ser menos expressivo, o Cenário 1 possui o pior desempenho, devido as emissões de material particulado dentro da UPC, com a combustão dos gases e a geração de eletricidade o resultado é melhorado consideravelmente.

Para a categoria de aquecimento global, nota-se que os resultados são negativos, o que indica que o ciclo de vida da produção de carvão vegetal pode trazer reduções importantes na presença de gases de efeito estufa na atmosfera. O que reforça os benefícios da utilização do carvão vegetal na indústria siderúrgica, que pode ser um aliado no abatimento das emissões de GEE do ciclo de vida da produção do aço, por exemplo.

A seguir, serão apresentados os resultados da Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) para cada categoria de impacto, de modo individualizado.

6.1.1 Depleção de Recursos Abióticos

A depleção de recursos abióticos ocorre, majoritariamente, durante a produção florestal de eucalipto, atividade que consome 99,99% dos recursos abióticos de toda a cadeia produtiva do carvão vegetal (Cenário 1). Os principais responsáveis pelos impactos dessa categoria são a produção do pesticida Sulfluramida, produto consumido em grande quantidade durante o combate das formigas e, em segundo lugar, a cadeia produtiva do fertilizante Superfosfato Simples (18,5% P₂O₅), que possui como matéria prima o enxofre, por exemplo.

A Figura 20 compara os dois modos de produção de eucalipto: o modo atual de produção e o modo de produção no qual o extrato pirolenhoso é reaproveitado no cultivo e, também, onde ocorre o processamento da biomassa florestal para posterior utilização dentro da UPC. Quando o EP é utilizado no cultivo de eucalipto, a necessidade da aplicação dos pesticidas é reduzida, em especial do Sulfluramida, produto consumido em grandes quantidades no combate às formigas cortadeiras e, desse modo, observa-se uma redução de 46,98% do consumo de recursos abióticos.

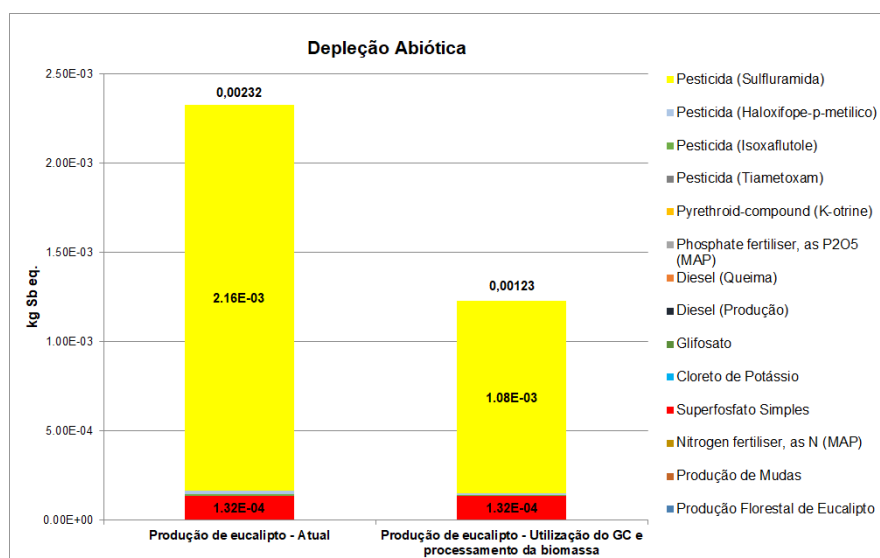


Figura 20 - Resultado AICV: Depleção abiótica, durante a produção florestal

Em relação a depleção de recursos abióticos fósseis, novamente, 99% da depleção desses recursos ocorre dentro da produção florestal de eucalipto. Para o cenário atual de produção, o consumo de recursos fósseis ocorre principalmente (55,2%) na cadeia produtiva do Sulfluramida e, em seguida, pela cadeia produtiva do diesel (42,18%), consumido nos maquinários agrícolas, como pode ser visto na Figura 21. A cadeia produtiva do pesticida consome

carvão mineral, gás natural e petróleo bruto, enquanto a cadeia produtiva do diesel consome petróleo bruto. Durante o cultivo do eucalipto, o diesel é consumido principalmente durante as operações de colheita (82,22% do diesel total consumido), mais especificamente na derrubada de árvores, com o *Feller-buncher*, na extração, com o *Skidder*, e no transporte para a UPC, através do caminhão.

No outro modo de produção, que representa a alternativa proposta, os resíduos da biomassa são processados para facilitar seu transporte até a UPC e, para isso, são utilizados o *Fowarder*, o *Roadside chipper* e o caminhão, para transportar os cavacos e, desse modo, há um incremento no consumo de diesel, havendo um maior consumo de recursos abióticos fósseis. Todavia, o consumo de recursos abióticos ainda é menos intensivo, se comparado com o modo atual de produção de eucalipto, pois com a redução do consumo dos pesticidas, evita-se o consumo de combustíveis fósseis em sua cadeia produtiva. Assim, observa-se uma redução em 22,03% do consumo de recursos fósseis em base energética (MJ) em comparação ao modo atual de produção de eucalipto.

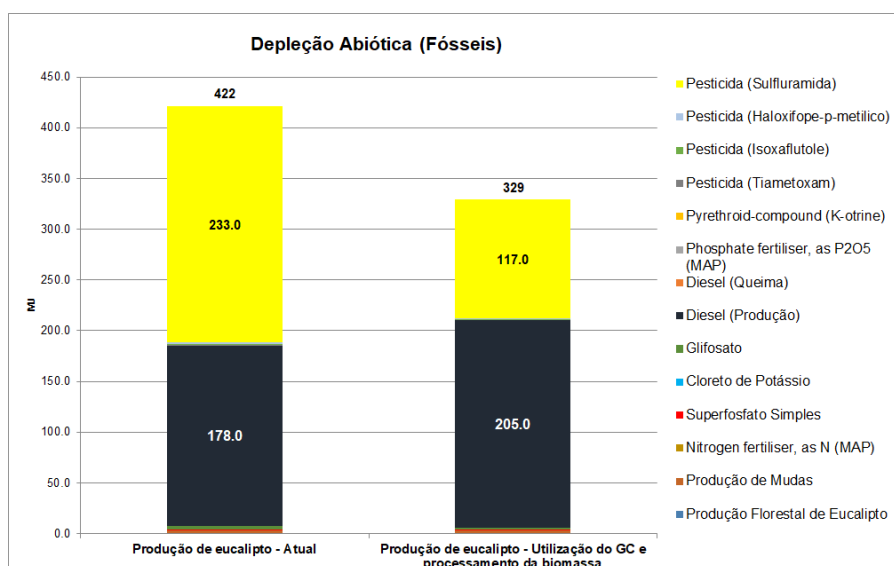


Figura 21 - Resultado AICV: Depleção abiótica de fósseis, durante a produção florestal

Agora, focando em todo o ciclo de vida da carbonização da madeira, a Figura 22 apresenta os resultados para os 4 cenários avaliados. É possível notar que quase não ocorrem mudanças entre os Cenários 1, 2 e 3 para nenhuma das duas categorias, visto que a depleção de recursos abióticos ocorre majoritariamente dentro da atividade da produção florestal de eucalipto e não

ocorrem mudanças dentro dessa atividade para esses cenários. Entretanto, com a modificação no modo de cultivo do eucalipto no Cenário 4, diminui-se a quantidade de recursos abióticos consumida e, assim, o cenário obtém o melhor desempenho da categoria.

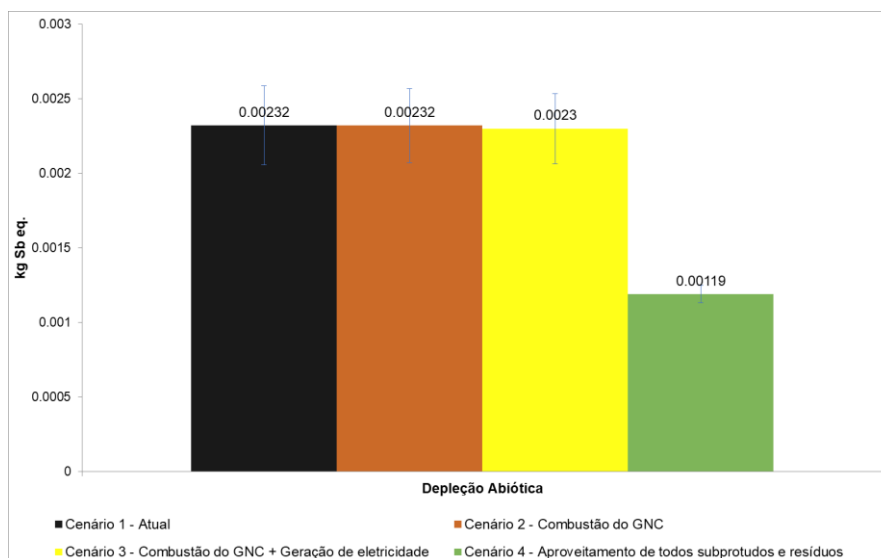


Figura 22 - Resultado AICV: Depleção de Recursos Abióticos

A Figura 23 apresenta o resultado da categoria de Depleção de Recursos Abióticos Fósseis para os 4 cenários avaliados, sendo possível notar que a combustão do GNC aliada a geração de eletricidade diminui consideravelmente o consumo de recursos fósseis no ciclo de vida da produção de carvão vegetal, pois a geração de 0,1923 MWh/ton de carvão vegetal evita o consumo de 308 MJ de recursos fósseis.

Para o Cenário 4, é possível notar um resultado negativo, significando que, mesmo com o consumo mais elevado de diesel na floresta, a eletricidade gerada compensa o consumo de combustíveis fósseis e, ainda, envia-se eletricidade para o Sistema Interligado Nacional (SIN), evitando o consumo de recursos para geração de energia. A geração de 0,2617 MWh de eletricidade a partir do GNC, alcatrão insolúvel e dos resíduos da biomassa evita o consumo de 460 MJ de recursos fósseis. Para o cálculo da compensação, é considerada a contribuição aproximada de cada fonte energética para geração de eletricidade no Brasil que, para esta análise, foi retirada da base de dados Ecoinvent v3 (2013). Sendo assim, para gerar eletricidade no Brasil ocorre a depleção de Recursos Abióticos Fósseis, porém, com a geração de eletricidade dentro da UPC, evita-se o

consumo destes recursos, fazendo com que o Cenário 4 tenha um potencial impacto positivo indireto na categoria.

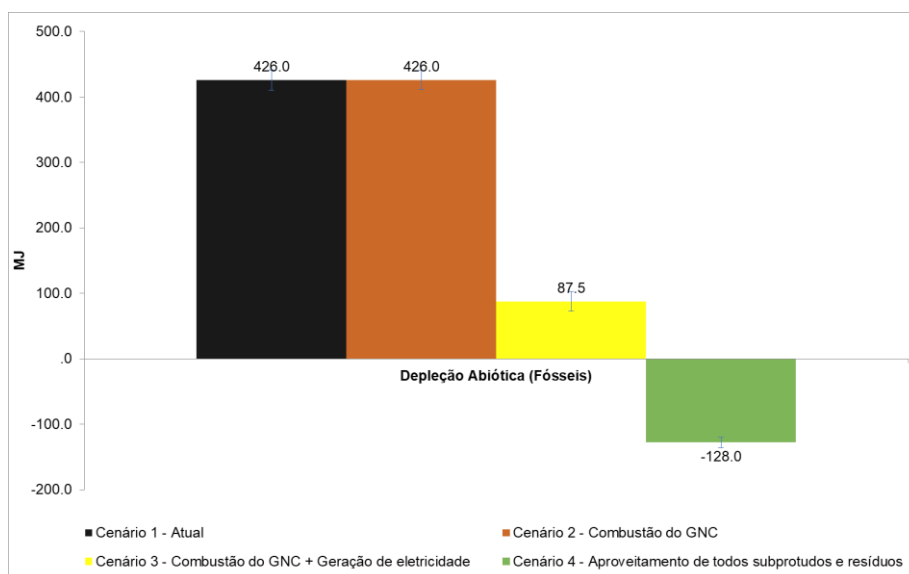


Figura 23 - Resultado AICV: Depleção de Recursos Abióticos Fósseis

6.1.2 Aquecimento Global

No ciclo de vida da produção do carvão vegetal, as emissões brutas de Gases de Efeito Estufa – GEE ocorrem, majoritariamente, dentro da Unidade Produtora de Carvão Vegetal, mais especificamente nos fornos de carbonização (Cenário 1), sendo emitidos 2431,067 kg de CO₂ eq/ton de carvão. Assim, cerca de 97,9% das emissões ocorrem nos fornos, 2,08% das emissões durante a produção florestal de eucalipto e o restante, que representa apenas 0,02% das emissões, são provenientes do consumo de diesel e de eletricidade dentro da UPC (Figura 24).

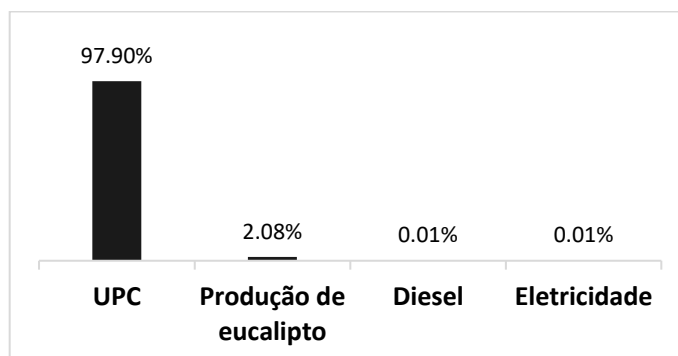


Figura 24. Balanço de emissões de GEE (Cenário 1 – Atual)

Durante o processo de fotossíntese, as árvores de eucalipto sequestram dióxido de carbono da atmosfera, fixando e estocando carbono em sua

biomassa. A Figura 25 mostra as emissões líquidas de GEE, e é possível notar um resultado negativo para a categoria de Potencial de Aquecimento Global em todos os cenários avaliados, o que indica que o cultivo de florestas plantadas de eucalipto para produção de carvão vegetal abate as emissões originadas no ciclo de vida produtivo do carvão vegetal, especialmente dos fornos de carbonização e, ainda, pode contribuir com a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa presentes na atmosfera. É estimado que 5470,53 kg de CO₂/ton de carvão vegetal sejam sequestrados pelas árvores de eucalipto.

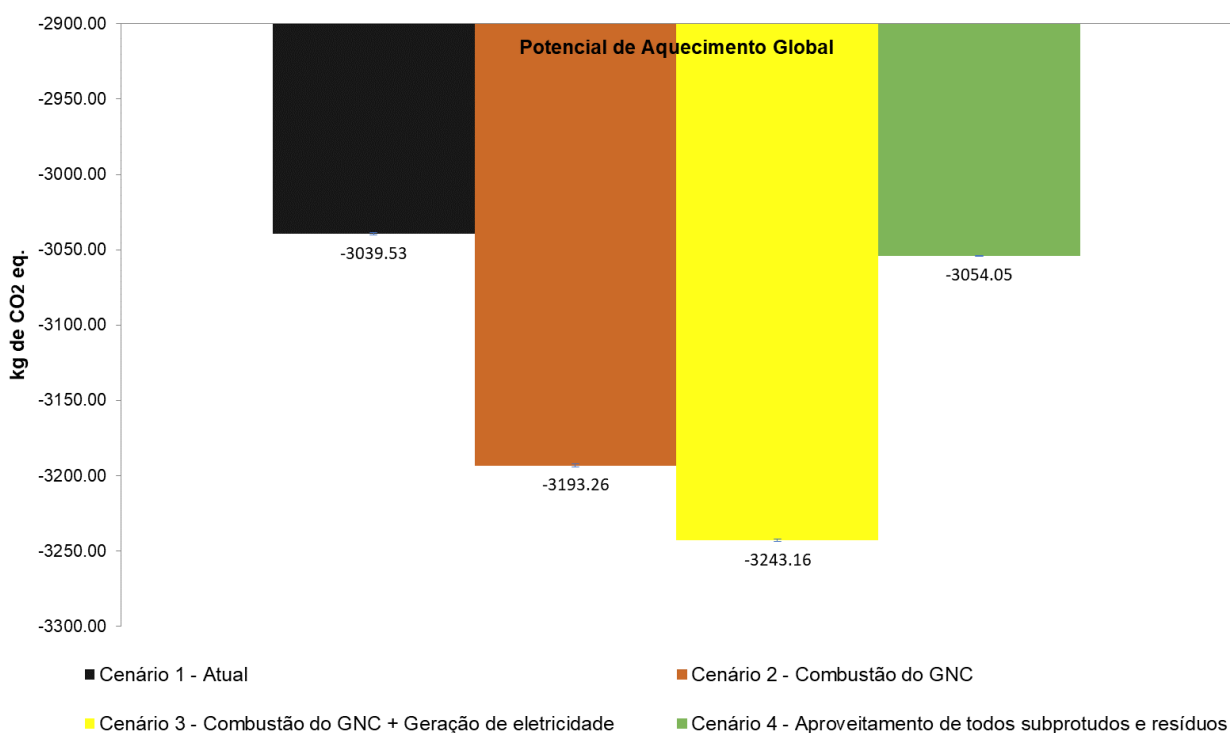


Figura 25 - Resultado AICV: Aquecimento Global (GWP 100a), em kg CO_{2eq}/tcarvão

É possível notar um valor muito pequeno de desvio padrão para essa categoria de impacto, calculado a partir da análise de Monte Carlo presente no software SimaPro[®], mostrando a confiabilidade dos dados obtidos no resultado da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida.

O gás metano (CH₄), emitido nos fornos de carbonização, é o principal responsável pelas emissões de GEE no Cenário 1, além do metano, dióxido de carbono também é emitido. Com a combustão do GNC no Cenário 2, CH₄ é convertido em CO₂, gás com menor potencial de aquecimento global, o que pode

resultar em um aumento na quantidade de CO₂ eq. que deixa de ser emitida na atmosfera, em 5,06% em comparação ao Cenário 1.

No Cenário 3, cenário com o melhor desempenho da categoria, a geração de eletricidade pode contribuir com uma redução de emissões ainda maior, de 6,7%. A geração de eletricidade dentro da UPC abate emissões de GEE geradas no ciclo de vida da produção de carvão vegetal, pois, indiretamente, evita-se emissões na geração de eletricidade a partir da matriz elétrica brasileira que consome uma parcela de fósseis. A emissão de, aproximadamente, 49,9 kg de CO₂ eq. é evitada em consequência da geração de 0,1923 MWh (Cenário 3).

No Cenário 4, a quantidade de CO₂ eq. que deixa de ser emitida na atmosfera é 0,48% maior, em comparação as emissões de GEE do Cenário 1. Analisando o Cenário 4, é possível observar um incremento das emissões de GEE, e o principal responsável por isso é a adição das emissões de CO₂ eq. dentro da UPC decorrentes da queima do alcatrão e dos resíduos da biomassa para geração da eletricidade. Embora ocorra a geração de 0,2617 MWh e, conseqüente, 68 kg de CO₂ eq., deixam de ser emitidos, essa quantidade não é suficiente para compensar as emissões que foram incrementadas no cenário, com a combustão do alcatrão e dos resíduos da floresta que eliminam na atmosfera 209,57 kg de CO₂ eq/ton de carvão vegetal produzido.

Analisando apenas um recorte dos resultados, mais especificamente o processo de produção de eucalipto, no modo atual da produção as emissões brutas totalizam 50,6 kg CO₂ eq., para produção de 5,635 m³ de madeira de eucalipto (volume necessário para produção de 1 tonelada de carvão vegetal). E, conforme pode ser observado na Figura 26, a maior parcela das emissões, 59,09% delas, é oriunda da queima de diesel nos maquinários agrícolas, atividade que emite CO₂ na atmosfera. Em seguida, a cadeia produtiva do pesticida Sulfloramida, que emite principalmente CO₂, é responsável por 27,47% das emissões.

Comparando os dois modos de produção de eucalipto, modo atual e modo proposto com a utilização do EP, nota-se uma redução de cerca de 2,4 kg de CO₂ eq. Essa redução ocorre devido, principalmente, a redução do consumo do Sulfloramida e, mesmo com o aumento do consumo de diesel e, conseqüentemente, o aumento das emissões de CO₂, o novo modo de produção

proposto possui o melhor desempenho ambiental dentro da atividade da produção de eucalipto.

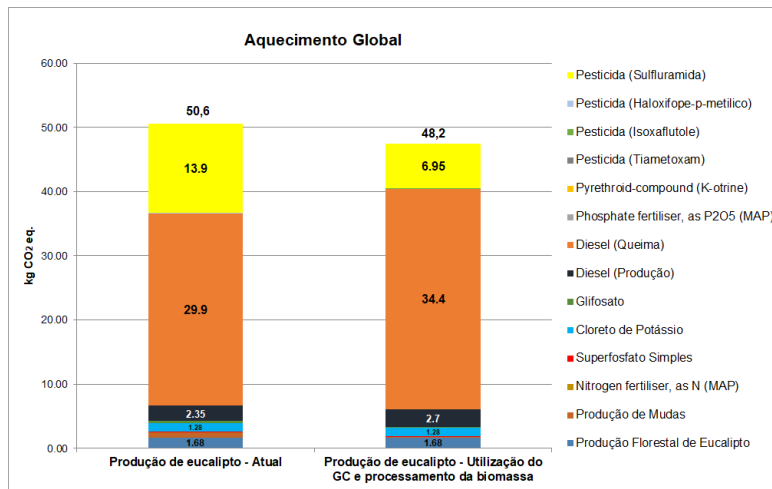


Figura 26 - Resultado AICV: Aquecimento Global, durante a produção florestal

6.1.3 Depleção da Camada de Ozônio

A emissão de substâncias que causam a depleção da camada de ozônio não é significativa ao longo da cadeia produtiva do carvão vegetal. No Cenário 1 são emitidos $2,27 \times 10^{-5}$ kg CFC-11 eq., ao longo de toda cadeia produtiva de carvão vegetal, mesma quantidade emitida para o Cenário 2, onde ocorre a queima do GNC (Figura 26). A geração de eletricidade nos Cenários 3 e 4 evita a emissão de clorofluorcarbonetos equivalentes para a atmosfera, sendo evitados a emissão de, respectivamente, $1,3 \times 10^{-6}$ kg CFC-11 eq. e $1,77 \times 10^{-6}$ kg CFC-11 eq.

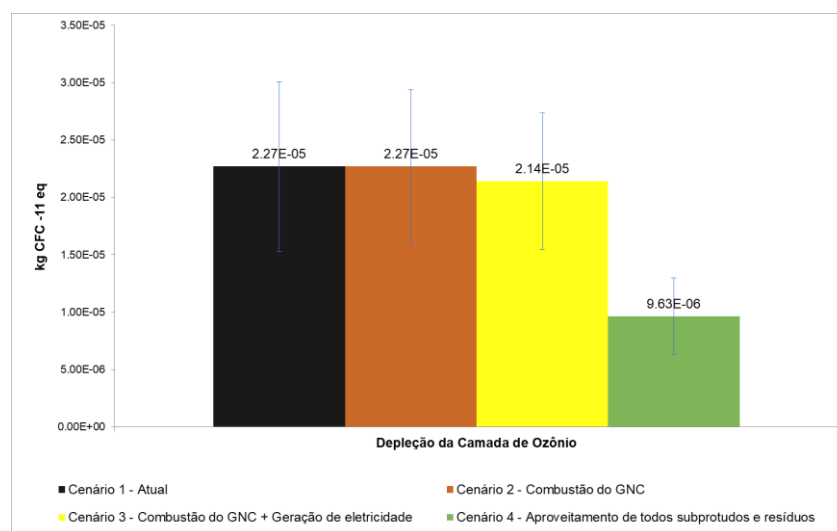


Figura 27 - Resultado AICV: Depleção da Camada de Ozônio, em kg CFC-11eq/tcarvão

Apesar de pequenas, as emissões ocorrem, e elas estão concentradas principalmente na atividade de produção do eucalipto, responsável por mais de 99% das emissões em kg CFC-11 eq., ao longo de todo o ciclo de vida do carvão vegetal.

A cadeia produtiva do pesticida Sulfluramida é a maior responsável pelas emissões clorofluorcarbonetos (CFC's) na atmosfera, como pode ser observado na Figura 27, que compara os dois modos de produção do eucalipto.

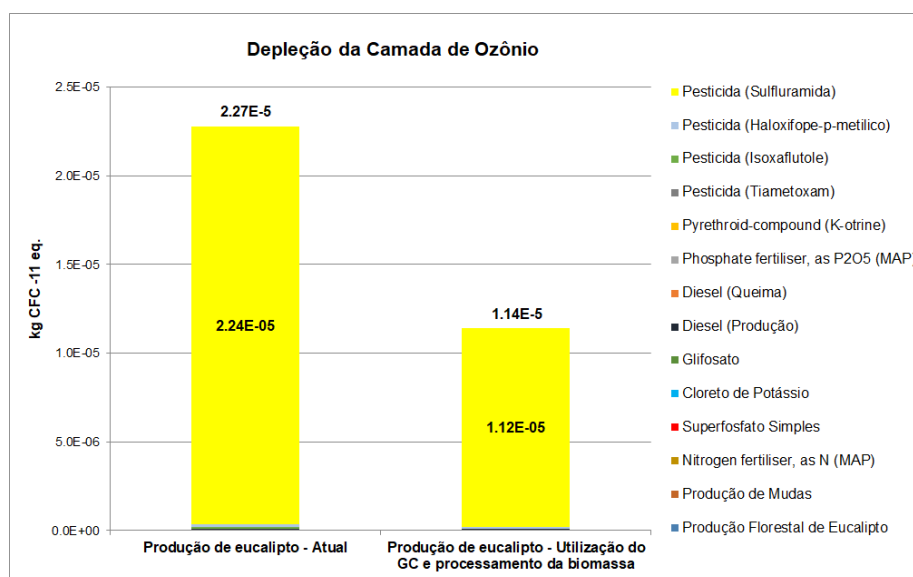


Figura 28 - Resultado AICV: Depleção da Camada de Ozônio, durante a produção florestal

6.1.4 Toxicidade humana

Ao longo do ciclo de vida da produção de carvão vegetal, são emitidas 94,7 kg 1,4-DB eq. (Cenário 1), substâncias tóxicas que podem ser prejudiciais aos seres humanos. Cerca de 65,68% das substâncias tóxicas emitidas estão concentradas nos fornos de carbonização, outra fração das emissões, 34,21% delas, são emitidas durante a atividade de produção do eucalipto. O restante das emissões ocorre devido o consumo de diesel e de eletricidade dentro da UPC.

Em se tratando das emissões dos fornos de carbonização, o material particulado emitido é o principal responsável pelo impacto da categoria, representando 59,2 kg 1,4-DB eq. Segundo Sousa (2018), material particulado presente no ar atmosférico, principalmente de menor tamanho, é associado a incidência de doenças respiratórias, cardiovasculares, neurológicas e até câncer, principalmente em crianças e idosos. Outro poluente, emitido nos fornos

de carbonização, é o Fenol, composto altamente tóxico contido no GC e eliminado na atmosfera no Cenário 1, sendo responsável por 3,04 kg 1,4-DB eq. das emissões.

É possível observar, na Figura 28, a redução da emissão de substâncias tóxicas em 60,19% para o Cenário 2 e, mesmo com a emissão de óxidos de nitrogênio durante a combustão do GNC, a combustão do GNC reduz a emissão de material particulado e, no balanço final, a emissão de substâncias tóxicas é reduzida consideravelmente. Para o Cenário 3, a geração de eletricidade evita a emissão de 10,3 kg 1,4-DB eq. e, assim, há uma redução das emissões em 70,96% para esse Cenário. No Cenário 4, há uma redução de 85%, pois, além da geração de eletricidade adicional devido ao aproveitamento da biomassa florestal e pelo alcatrão insolúvel, que evita a emissão de 14 kg 1,4-DB eq., o Fenol contido no GC está sendo coletado, não sendo mais emitido para a atmosfera. As emissões do Cenário 4 não são completamente neutralizadas pois as emissões da combustão dos gases, material particulado e óxidos de nitrogênio, continuam ocorrendo.

Para a categoria de Toxicidade Humana, é possível notar o valor do desvio padrão mais elevado, sendo o mais alto obtido entre as categorias de impacto avaliadas.

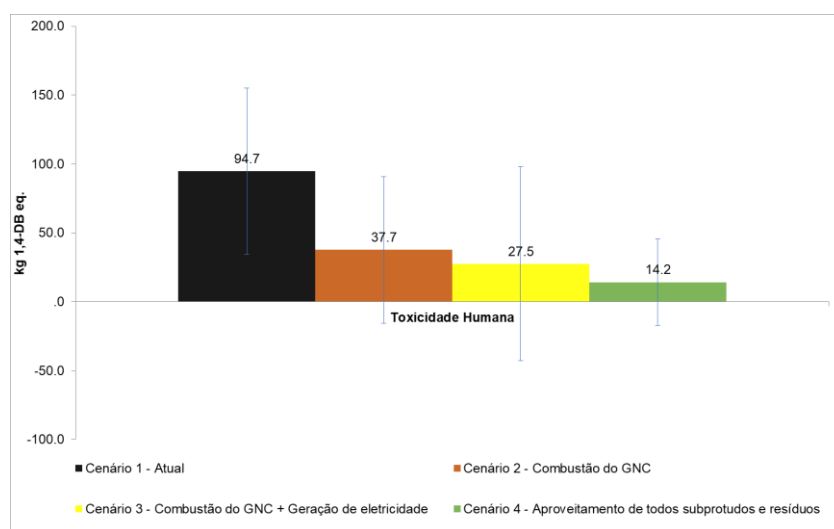


Figura 29 - Resultado AICV: Toxicidade Humana, em kg 1,4-DBeq/tcarvão

Dentro da atividade da produção do eucalipto, quando o modo atual de produção é avaliado, a cadeia produtiva do pesticida Sulfluramida é responsável

pela maior parte dos impactos desta categoria, com 64,50% das emissões de substâncias tóxicas, seguida da cadeia produtiva do diesel, 33,64% das emissões, como mostra a Figura 29. A produção do pesticida libera na água e na atmosfera benzeno, principal responsável pela toxicidade de sua cadeia produtiva, enquanto a cadeia produtiva do Diesel emite Bário para água, elemento químico altamente tóxico a saúde humana.

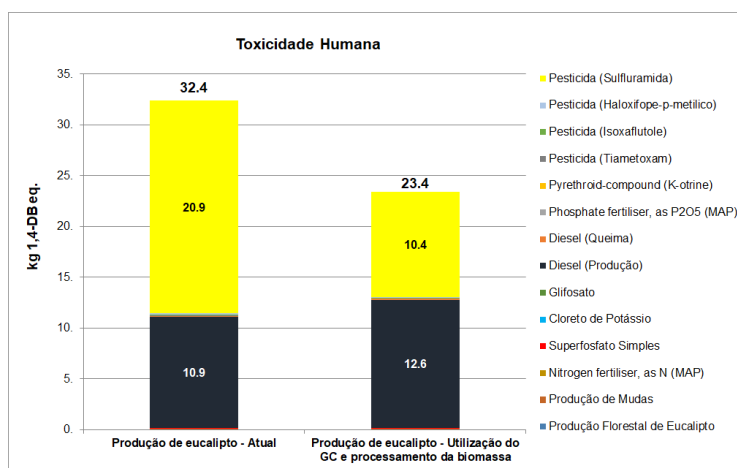


Figura 30 - Resultado AICV: Toxicidade Humana, durante a produção florestal

Ao comparar os dois modos de cultivo de eucalipto, atual e o modo onde o GC é utilizado, observa-se uma redução em 27,77% de emissões de substância tóxicas para o novo modo proposto. Com a redução do consumo de pesticidas e, conseqüentemente, a redução das emissões de sua cadeia produtiva, a cadeia produtiva do diesel se torna a principal responsável pela toxicidade da produção de eucalipto.

6.1.5 Oxidação Fotoquímica

Em todo ciclo de vida do carvão vegetal, quando o Cenário 1 é analisado, são emitidos 16,4 kg de C_2H_4 eq. Essas emissões ocorrem quase que completamente (99,93%) dentro da UPC, devido, principalmente, as emissões de Monóxido de Carbono (CO) nos fornos de carbonização. Além do Monóxido de Carbono, Metano e outros dois componentes presentes no GC (Isobutanol e 2-Butene) emitidos na atmosfera também afetam essa categoria, porém com menor relevância.

Devido a queima do GNC nos Cenários 2 e 3, a emissão do Monóxido de Carbono é reduzida consideravelmente, o que reduz entre 70,3% e 70,4% as

emissões da categoria, como pode ser observado na Figura 30. As emissões não são totalmente neutralizadas pois, no Cenário 2 e 3 o extrato pirolenhoso ainda está sendo emitido, já que não é queimado. É possível observar ainda que a geração de eletricidade possui pouca influência nas emissões de C_2H_4 , tornando o resultado do Cenário 3 semelhante ao Cenário 2 para essa categoria de impacto.

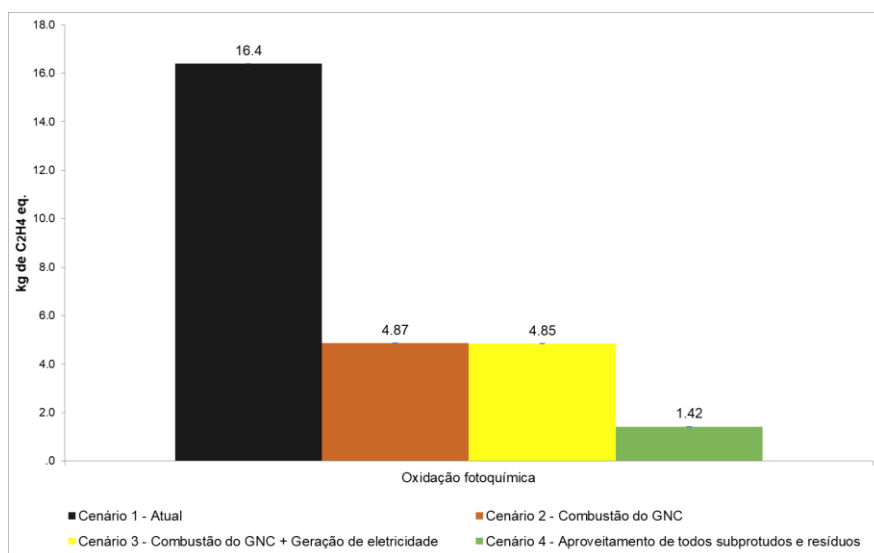


Figura 31 - Resultado AICV: Oxidação Fotoquímica, em kg de C_2H_4 eq/tcarvão

O Cenário 4, novamente, apresenta o melhor desempenho para a categoria de Oxidação Fotoquímica pois, com o aproveitamento do GC no cultivo de eucalipto, evita-se a emissão de Isobutanol e de 2-Butene na atmosfera, restando apenas, em sua maioria, as emissões fugitivas de CO e CH_4 que ocorrem nos fornos de carbonização.

6.1.6 Acidificação

No ciclo de vida do carvão vegetal, é na atividade de produção do eucalipto onde se concentra a maior, quase que total (99,29%), contribuição para a categoria de impacto Acidificação. A porcentagem restante refere-se as emissões da queima do diesel e de sua cadeia produtiva e da produção da eletricidade consumida dentro da UPC.

Para a produção de $5,635 \text{ m}^3$ de eucalipto, no modo atual de produção, são emitidos $0,843 \text{ kg}$ de $SO_2 \text{ eq.}$, sendo que a principal fonte de emissão é oriunda da queima de diesel nos maquinários agrícolas, atividade que emite óxidos de

nitrogênio, dióxido de enxofre e material particulado para a atmosfera, sendo responsável por 78,52% das emissões da categoria. Em seguida, a cadeia produtiva do pesticida Sulfluramida contribui com 17,08% das emissões, sendo a emissão de dióxido de enxofre em sua etapa produtiva o principal causador de impacto. A cadeia produtiva do diesel também emite óxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de enxofre para a atmosfera, e suas emissões contribuem com 2,18% dos impactos da categoria.

O resultado para a categoria de Acidificação é apresentado na Figura 31, onde são apresentadas as contribuições de cada atividade e o atual processo produtivo de eucalipto é comparado ao modo de produção de eucalipto onde o EP é utilizado e a biomassa florestal é utilizada como fonte de energia.

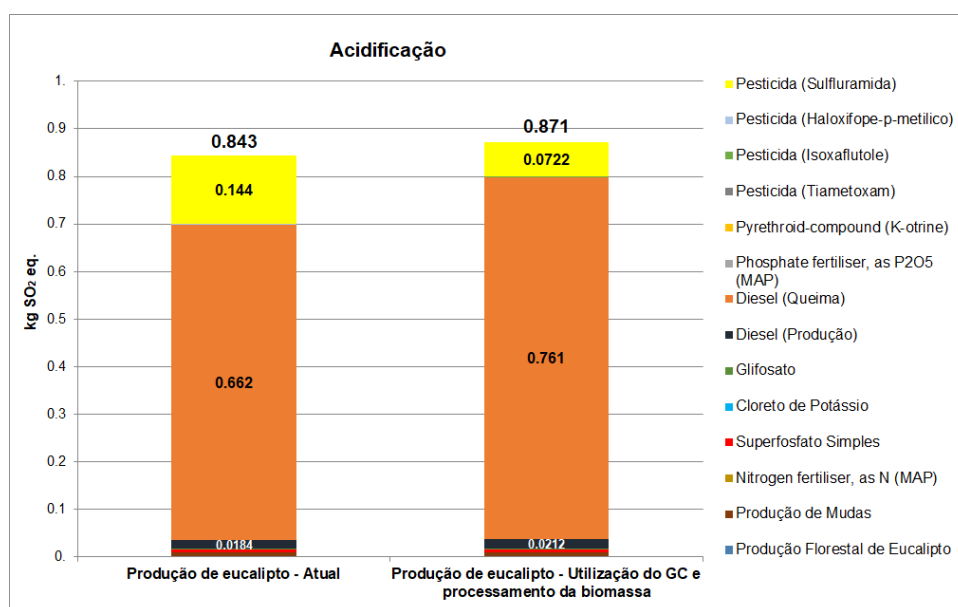


Figura 32 - Resultado AICV: Acidificação, durante a produção florestal

Como a queima do diesel é o principal causador do potencial de acidificação, o novo modo de produção de eucalipto proposto, onde ocorre o aproveitamento e utilização dos resíduos da biomassa, obtêm o pior desempenho ambiental, em comparação ao cenário atual, já que mais diesel é requerido para o processamento dos resíduos da biomassa.

Para a categoria de Acidificação, quando os Cenários 1, 2, 3 e 4 são comparados na Figura 32, é possível notar que o Cenário 2 possui o pior desempenho, pois a combustão do GNC gera um incremento nas emissões atmosféricas de 0,225 kg de SO₂ eq., basicamente óxidos de nitrogênio gerados.

A geração de 0,1923 MWh no Cenário 3 evita a emissão de cerca de 0,148 kg de SO₂ eq., sendo que os principais gases que seriam emitidos para a geração de eletricidade no Brasil seriam o dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio. Analisando o Cenário 4, cenário com o segundo melhor desempenho da categoria, a geração de 0,2617 MWh faz com que sejam evitadas a emissão de 0,202 kg de SO₂ eq, reduzindo em 15,88% as emissões de SO₂ eq. em comparação ao Cenário 2. Diferentemente das outras categorias de impacto avaliadas, o Cenário 1 obteve o melhor desempenho, visto que não possui emissões de NOx decorrentes da queima de GNCs.

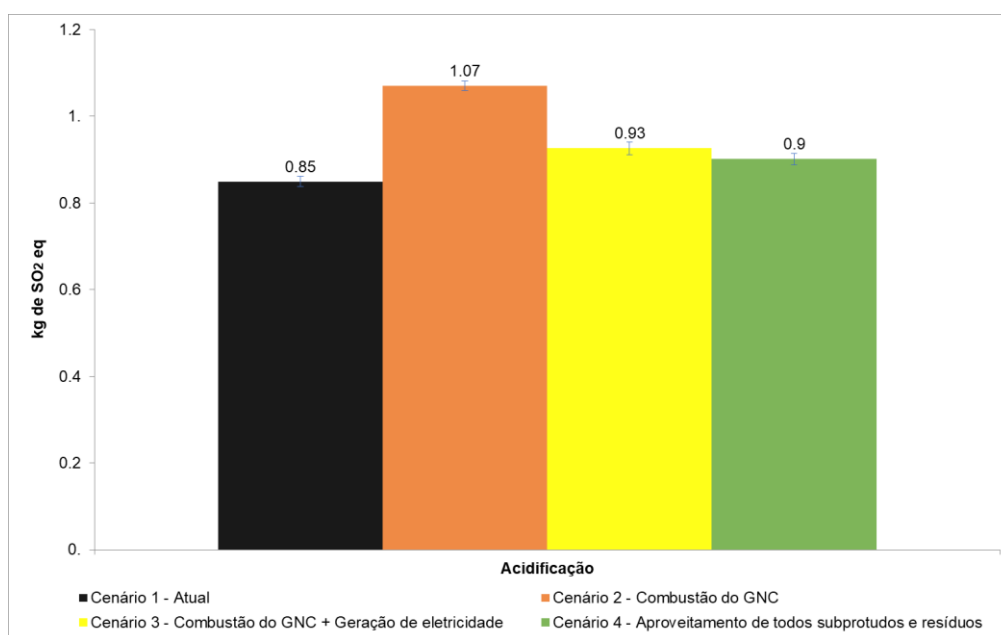


Figura 33 - Resultado AICV: Acidificação, em kg de SO₂eq/tcarvão

6.1.7 Eutrofização

Durante todo o ciclo de vida do carvão vegetal, são emitidos 0,348 kg de PO₄ eq. (Cenário 1), emissões que ocorrem quase que totalmente durante a produção florestal de eucalipto (99,7%).

A Figura 33 compara o atual processo produtivo de eucalipto ao novo modo de produção proposto. No modo atual de produção, a emissão devido ao uso de fertilizantes é o processo que mais contribui para a categoria de Eutrofização (42,65%), e isso ocorre, pois, a aplicação de fertilizantes fosfatados na floresta, MAP e Superfosfato Simples emite pentóxido de fósforo para a água (0,146 kg

de $\text{PO}_4 \text{ eq.}$), através da lixiviação, e a consequência é o aumento do potencial de eutrofização de corpos hídricos.

Além da emissão de pentóxido de fósforo proveniente da aplicação de fertilizantes fosfatados, a queima do diesel, utilizado nos maquinários agrícolas, também contribuem com a categoria, representando 41,78% das emissões. Em terceiro lugar, a cadeia produtiva do pesticida Sulfluramida contribui com 10,17% das emissões, e a cadeia produtiva do Glifosato contribui com 2,54% das emissões. A queima de diesel emite amônia e óxidos de nitrogênio para a atmosfera, a cadeia produtiva do pesticida Sulfluramida emite, principalmente, fosfato para a água e óxidos de nitrogênio para a atmosfera e, por último, a produção de Glifosato também emite, em sua maioria, fosfato para a água.

Para o novo modo de produção proposto, nota-se que ocorre o incremento nas emissões decorrentes da queima do diesel e a diminuição das emissões da cadeia produtiva do Sulfluramida e do Glifosato, entretanto, no balanço final das emissões, ambos modos de produzir o eucalipto emitem 0,347 kg de $\text{PO}_4 \text{ eq.}$

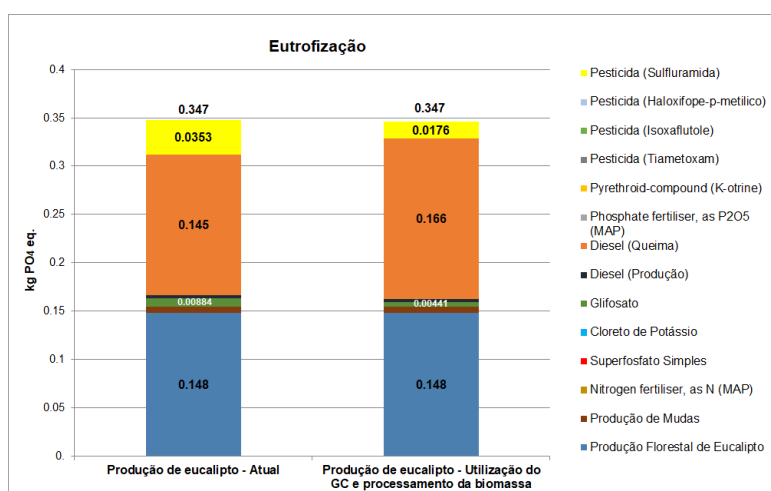


Figura 34 - Resultado AICV: Eutrofização, durante a produção florestal

Quando os 4 Cenários analisados são comparados (Figura 34), é possível observar que o Cenário 2 possui o pior desempenho para a categoria, pois a combustão do GNC emite óxidos de nitrogênio (0,0585 kg $\text{PO}_4 \text{ eq.}$), que afetam a categoria. Para o Cenário 3, mais uma vez a geração de eletricidade evita a emissão de 0,0506 kg $\text{PO}_4 \text{ eq.}$ Para o Cenário 4, com o incremento da geração de eletricidade, devido ao aproveitamento do alcatrão insolúvel e dos resíduos

da biomassa, evita-se a emissão de 0,0689 kg PO₄ eq e, portanto, obtém-se o melhor desempenho para a categoria.

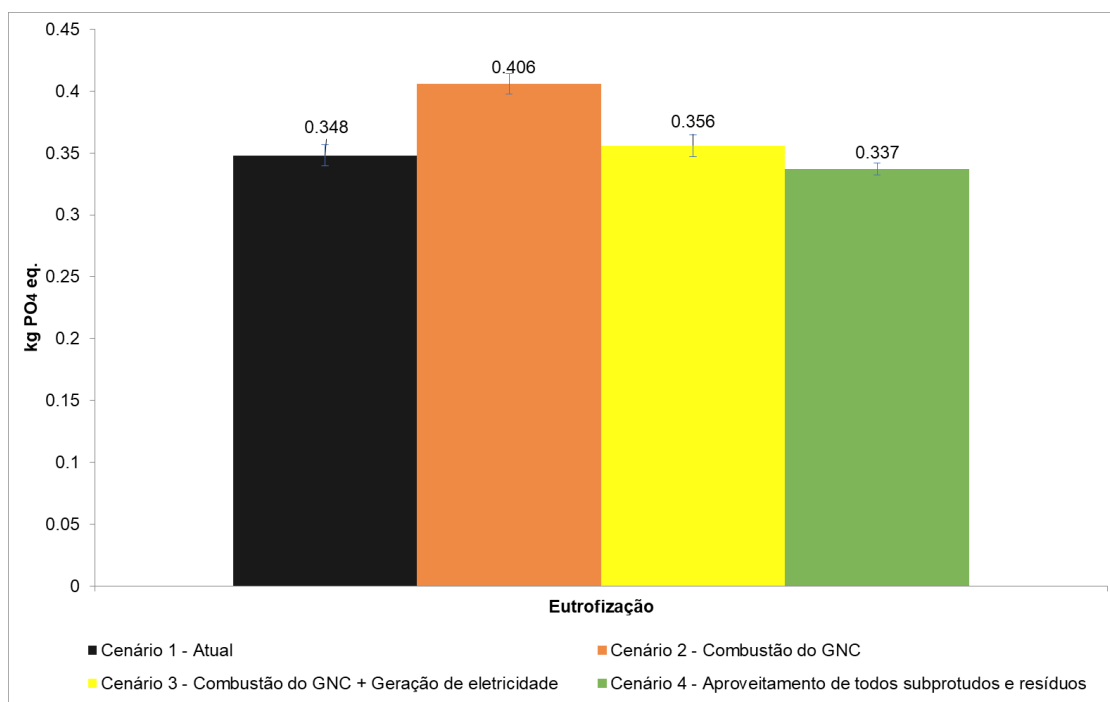


Figura 35 - Resultado AICV: Eutrofização, em kg de PO₄eq/tcarvão

6.2 Discussão dos resultados e recomendações

A partir da análise dos resultados obtidos na AICV é perceptível que, em termos de quantidade e relevância, a maior parte dos impactos ocorrem nos fornos de carbonização, diferentemente do processo de produção do biodiesel ou da cana de açúcar, por exemplo, onde os impactos estão concentrados no cultivo da matéria prima. Isso ocorre pois o processo de carbonização da madeira possui pouca eficiência e a madeira não é totalmente aproveitada.

No processo atual de carbonização, Cenário 1, a emissão nos fornos causa efeitos negativos principalmente em termos Oxidação Fotoquímica e Toxicidade Humana e, apenas com a combustão do GNC, esses impactos são mitigados consideravelmente, sendo possível reduzir entre 60% até 70,3% das emissões tóxicas. Ademais, se fosse implementado equipamentos para geração de eletricidade, apenas com o aproveitamento da energia térmica gerada pela queima do GNC, a redução das emissões para essas categorias variaria entre 70,42% e 70,96%. E, por fim, com as modificações propostas no Cenário 4, a

fim de alcançar mais sustentabilidade e promoção da economia circular em todo o ciclo de vida dentro da UPC, as reduções variariam entre 85% e 91,34%.

Olhando mais especificamente para dentro da atividade de produção do eucalipto, nota-se que a atividade possui maior potencial de impacto para as categorias de Eutrofização, Acidificação, Depleção da Camada de Ozônio, Depleção de Recursos Abióticos e Depleção de Recursos Abióticos Fósseis. O consumo de diesel e a cadeia produtiva do formicida Sulfluramida se destacaram como os principais causadores desses impactos, com exceção para a categoria de Eutrofização, onde a emissão de fertilizantes fosfatados é o principal causador, seguido das emissões da queima do diesel. De forma geral, com a redução do consumo dos pesticidas, devido a utilização do EP no cultivo do eucalipto, é possível obter reduções nos impactos entre 22,03% e 49,77%, com exceção para a categoria de Eutrofização, onde não ocorre diferença entre os dois modos de produção, e para a categoria de Acidificação, na qual ocorre uma piora em 3,32% das emissões, em decorrência do acréscimo no consumo de diesel.

Sabendo que a UPC de Curvelo produziu, no ano de 2020, uma média mensal de 2.067,15 toneladas de carvão de vegetal, poderiam ser retiradas da atmosfera, aproximadamente, 6.600,94 toneladas de CO₂ eq. no mês, considerando o Cenário 2 onde há a combustão do GNC aliado ao sequestro de carbono das árvores de eucalipto, e esse valor poderia ser de até 6.704,09 toneladas de CO₂ eq., quando o Cenário 3 é considerado. A Tabela 25, apresenta o potencial mensal de redução de impacto, com base nos cenários propostos.

Com a introdução de ciclos de potência dentro da UPC, poderiam ser gerados, aproximadamente, entre 397,51 MWh e 540,97 MWh de eletricidade ao mês. Se avaliado um cenário mais amplo, para todo o estado de Minas Gerais, é estimado a geração de 1.040,53, GWh a 1.416,05 GWh no ano, de acordo com a produção de carvão vegetal do estado em 2020 (5,411 milhões de toneladas no ano) (IBGE, 2021). Esse valor representa aproximadamente 9,45% e 12,87% do consumo elétrico residencial de Minas Gerais (11.001 GWh), em 2018 (EPE, 2019).

Tabela 24 - Potencial mensal de redução de impactos

Categoria de impacto	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Aquecimento Global	↓ 6.600,94 ton CO ₂ eq.	↓ 6.704,09 ton CO ₂ eq.	↓ 6.313,17 ton CO ₂ eq.
Eutrofização	↑ 0,119 ton PO ₄ eq.	↑ 0,016 ton PO ₄ eq.	↓ 0,022 ton PO ₄ eq.
Acidificação	↑ 0,454 ton SO ₂ eq.	↑ 0,165 ton SO ₂ eq.	↓ 0,103 ton SO ₂ eq.
Toxicidade Humana	↓ 117,49 ton 1,4-DB eq.	↓ 138,91 ton 1,4-DB eq.	↓ 166,39 ton 1,4-DB eq.
Oxidação Fotoquímica	↓ 23,83 ton C ₂ H ₄ eq.	↓ 23,87 ton C ₂ H ₄ eq.	↓ 30,96 ton C ₂ H ₄ eq.
Depleção da Camada de Ozônio	0 ton de Sb eq.	↓ 0,00000268 ton CFC -11 eq.	↓ 0,0000270 ton CFC -11 eq.
Depleção de Recursos Abióticos	0 ton Sb eq.	↓ 0,0000413 ton Sb eq.	↓ 0,00233 ton Sb eq.
Depleção de Recursos Abióticos	0 MJ	↓ 699.730,27 MJ	↓ 1.145.201,1 MJ

Em suma, as propostas de melhoria para a UPC de Curvelo reduzem os impactos para a maioria das categorias avaliadas, principalmente quando se trata dos Cenários 3 e 4.

Além das melhorias propostas em cada cenário, outras oportunidades de melhorias são identificadas, a partir dos pontos críticos apontados nos resultados da AICV, que podem auxiliar na neutralização dos impactos de forma mais expressiva.

- Substituição do diesel por biodiesel: A substituição do diesel pelo biodiesel pode ser vantajosa, sendo possível reduzir as emissões de CO₂, além de outros gases tóxicos à saúde humana. Segundo o estudo da FGV Energia, as emissões de GEE da produção do biodiesel da soja, produzida nos estados do Mato Grosso e no Mato Grosso do Sul, e do seu transporte até o consumidor final, localizado em Paulínia – SP, são 70% menores se comparadas ao diesel fóssil. Além disso, se não for possível ou viável a utilização do biodiesel (B100), apenas com o aumento do percentual de biodiesel contido no diesel é possível obter reduções das emissões de GEE. Por exemplo, a queima do diesel comum emite 85,2 g CO₂ eq/MJ, o diesel B5 emite 82,1 g CO₂ eq/MJ, B10 emite 79,61 g CO₂ eq/MJ enquanto o diesel B20 e B30 emitem, respectivamente, 72,8 g CO₂ eq/MJ e 66,51 g CO₂ eq/MJ (FGV, 2018).

- Substituição total de pesticidas químicos por produtos de origem natural: O uso de pesticidas químicos é prejudicial do ponto de vista ambiental e, dentre os pesticidas utilizados no cultivo de eucalipto, o formicida a base de Sulfluramida teve destaque, devido as grandes quantidades consumidas. Além do uso do Extrato Pirolenhoso, é possível encontrar na literatura outras alternativas ao tratamento químico e diversos estudos, por exemplo, relatam o potencial dos fungos entomopatogênicos no controle biológico de formigas cortadeiras (CANALI, 2017; AUGUSTIN *et al*, 2011; ALVES, 1998); outros estudos avaliam o controle cultural através do cultivo de plantas mais atraentes, como a mamona (BUENO & BUENO, 2011); e, por fim, a utilização do óleo essencial de *Eucalyptus* sp. no combate as formigas cortadeiras (BEZERRA *et al*, 2017), bem como óleos brutos de outras plantas tropicais (OLIVEIRA, 2006). Assim, esses diferentes métodos podem ser aplicados, de forma conjunta ou separada, visando a redução e/ou a substituição total dos pesticidas químicos.

- Substituição de fertilizantes industriais minerais por fertilização orgânica: A utilização de lodo de esgoto e dejetos de animais são uma das alternativas a aplicação de fertilizantes minerais, de forma a tornar o cultivo mais sustentável. Na literatura é possível encontrar diversos estudos que demonstram a eficácia

da aplicação da fertilização orgânica no cultivo de eucalipto, como em Nascentes *et al.* (2019), Silva *et al.* (2018), Soares *et al.* (2019).

Para todas propostas, é claro, cabe a realização de análises técnicas e econômicas para avaliar a viabilidade de implementar essas melhorias.

Um fator que pode facilitar a implementação de ações de sustentabilidade dentro de diversos setores da economia é o mercado de carbono, mecanismo de compra e venda de créditos de redução de emissões de gases de efeito estufa, que será capaz de mobilizar uma grande redução dessas emissões, além de fomentar o desenvolvimento de novas tecnologias. Apesar de não ser um mercado regulado no Brasil ainda, desde que os países assumiram seus compromissos de redução de emissões no âmbito do Acordo de Paris, o Brasil vendeu cerca de 5 milhões de toneladas de CO₂ eq. no mercado voluntário de carbono, em 2019, e foi o sétimo país no ranking de maior comercialização de créditos de carbono (WAYCARBON, 2021).

Empresas, ou até mesmo pessoas, que querem neutralizar suas emissões de gases de efeito estufa de forma voluntária podem adquirir créditos de carbonos certificados. No Brasil, os padrões de verificação mais aceitos são o Gold Standard e o Verified Carbon Standard (VCS) da Verra (WAYCARBON, 2021).

Com a crescente preocupação dos impactos advindos das mudanças climáticas, a sociedade demanda por ações de sustentabilidade e empresas buscam cada vez mais implementar estratégias de sustentabilidade, demonstrando compromissos com a agenda ESG (*Environmental, Social and Governance*) para valorizar suas marcas. Assim, existem expectativas de crescimento para esse mercado e, desse modo, com as emissões de GEE evitadas dentro de unidades produtoras de carvão vegetal, principalmente de CH₄, essas reduções poderiam ser comercializadas dentro do mercado de carbono voluntário, enquanto o mercado não é regulado.

CAPÍTULO 7: CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusão

Ao longo da elaboração desse trabalho, foi possível construir o Inventário do Ciclo de Vida para as etapas de produção de mudas, cultivo do eucalipto e produção de carvão vegetal. A construção de um ICV demanda uma coleta de dados extensa e espera-se que as informações contidas nesse documento possam contribuir de algum modo com os estudos de ACV no Brasil.

Esta pesquisa permitiu identificar que, em termos de relevância, a principal fonte dos impactos são os fornos de carbonização. É identificado que as emissões provenientes dos fornos de carbonização possuem potencial de impactar negativamente a saúde humana e o meio ambiente, a partir dos resultados obtidos no Cenário atual, principalmente, para as categorias de Toxicidade Humana e Oxidação Fotoquímica. A categoria de Oxidação Fotoquímica demonstrou ter o impacto de maior magnitude entre todas as outras categorias avaliadas na normalização, devido as emissões de, especialmente, monóxido de carbono nos fornos.

Olhando apenas para a atividade de produção do eucalipto, as categorias de impacto mais afetadas nesta etapa são Eutrofização, Acidificação, Depleção de Recursos Abióticos e Depleção de Recursos Abióticos Fósseis. O consumo de diesel nos maquinários agrícolas e a cadeia produtiva do formicida Sulfloramida, consumido em grande quantidade no cultivo do eucalipto, se destacaram como os principais causadores desses impactos.

Além dos potenciais impactos ambientais e sociais, lançar gases da carbonização na atmosfera é um desperdício energético, é identificado que entre 22,1% a 35,3% da energia contida inicialmente na madeira se perde na forma de gases da carbonização na Unidade de Curvelo. Com o aproveitamento dos Gases Não Condensáveis para geração de eletricidade, estima-se a geração de 0,1923 MWh/ton de carvão vegetal e, com a adição do aproveitamento do Alcatrão Insolúvel e dos resíduos da floresta, 0,2617 MWh/ton de carvão vegetal poderiam ser gerados, diminuindo o desperdício energético e promovendo a circularidade do sistema.

A combustão dos Gases Não Condensáveis da carbonização, no Cenário 2, já é um avanço importante que pode ser obtido na cadeia produtiva do carvão vegetal pois, apenas com a combustão do GNC, a emissão de substâncias tóxicas a saúde humana é reduzida em 60,19%, há um ganho em 5,06% na quantidade de CO₂ equivalente que deixa de ser emitida para a atmosfera, além da redução em 70,3% da emissão do monóxido de Carbono, responsável por afetar a Oxidação Fotoquímica.

Aliar a combustão do GNC com o aproveitamento térmico para geração de eletricidade, no Cenário 3, auxilia na redução de impactos em comparação ao Cenário 1 para quase todas as categorias, podendo reduzir em 70,42%, 70,96, 6,69% e 79,46% os impactos das categorias de Oxidação Fotoquímica, Toxicidade Humana, Potencial de Aquecimento Global e Depleção de Recursos Abióticos Fósseis, respectivamente. Para as categorias de Acidificação e Eutrofização, a geração de eletricidade é capaz de reduzir, de forma indireta, em 13,08% e 12,31% os impactos, em comparação ao Cenário 2, cenário com o pior desempenho.

No Cenário 4, com a coleta dos gases condensáveis, há um incremento na para 91,34% na redução do impacto de Oxidação Fotoquímica. A coleta do GC também auxilia na redução de emissão de substâncias tóxicas e, com o auxílio da compensação das emissões devido a geração de eletricidade, as emissões de substâncias tóxicas a saúde humana são reduzidas em 85%.

Dentro da atividade florestal, os resultados demonstram que a utilização do Extrato Pirolenhoso no cultivo de eucalipto demonstra potencial para ação como formicida e possui efeito catalisador do herbicida, quando utilizado em conjunto, podendo reduzir o consumo desses produtos consideravelmente. Assim, o aproveitamento do EP pode trazer ganhos ambientais importantes no ciclo de vida do carvão vegetal. No Cenário 4, o consumo de recursos abióticos é reduzido em 48,7% e a emissão de substâncias causadoras da depleção da camada de ozônio é reduzida em 57,57%.

Todos os Cenários avaliados obtiveram melhores resultados em comparação ao Cenário 1, em termos de emissões de Gases de Efeito Estufa. As modificações propostas no Cenário 3, tornam o cenário com o maior potencial de sequestro de carbono da atmosfera, sendo capaz de capturar 3243,16 kg CO₂ equivalente. No Cenário 4, a queima dos resíduos de eucalipto e do alcatrão

insolúvel causa um aumento das emissões de CO₂ eq. em 9,42%, em comparação ao Cenário 3. Ainda assim, é estimado um potencial de capturar 3054,05 kg CO₂ eq./ton de carvão vegetal produzido da atmosfera.

A sociedade está passando por uma transformação, transitando de um modelo intensivo em carbono, caracterizado pelo consumo desenfreado de recursos, principalmente fósseis, para um modelo neutro em emissões e mais sustentável, nos âmbitos social, econômico e ambiental.

O carvão vegetal é uma opção muito interessante para a indústria siderúrgica, caracterizada por ser emissora de gases de efeito estufa, de difícil descarbonização e grande consumidora de recursos fósseis. Assim sendo, o carvão vegetal possui um importante papel na descarbonização e na promoção da sustentabilidade dentro da siderurgia e buscar formas de inovar seu ciclo de vida, visando torna-lo mais sustentável, é primordial para que o setor industrial possa contribuir com o compromisso do desenvolvimento sustentável e na construção de uma economia de baixo carbono.

7.2 Trabalhos futuros

- Elaboração de estudos de viabilidade econômica, a fim de demonstrar os impactos financeiros da implementação das alternativas propostas neste trabalho.
- Pesquisas e testes em campo para avaliar o efeito do líquido pirolenhoso como herbicida e formicida no cultivo de eucalipto, para tornar a base de informações sobre esse assunto mais sólida e facilitar sua implementação e disseminação.
- As alternativas de produção de carvão vegetal apresentadas neste trabalho podem ser transformadas em instruções práticas, para serem implementadas em outras UPCs do país.

CAPÍTULO 8: REFERÊNCIAS, APÊNDICES E ANEXOS

8.1 Referências bibliográficas

AFRANE, G. & NTIAMOAH, A. Analysis of the life-cycle costs and environmental impacts of cooking fuels used in Ghana. **Applied Energy**. Volume 98, pág 301-306. 2012.

AFREA - Africa Renewable Energy Access Program. **Wood-Based Biomass Energy Development for Sub-Saharan Africa: Issues and Approaches**, The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank Group, Washington, 1-46. Washington, DC, the World Bank. 2011.

AGUILAR, R. *et al.* Sprouting productivity and allometric relationships of two oak species managed for traditional charcoal making in central Mexico. **Biomass and Bioenergy**. Volume 36, pag 192-207, 2012.

ALFARO, J., JONES, B. Social and environmental impacts of charcoal production in Liberia: Evidence from the field. **Energy for Sustainable Development**. Volume 47, pag 124-132, Dezembro de 2018.

ALMEIDA, R. **Potencial do extrato pirolenhoso da madeira de eucalipto como agente conservante de cosméticos e saneantes**. 2012. 110f. Tese (Doutorado - Programa de Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz. Piracicaba, 2012.

ALVES, C. **Utilização de frações de alcatrão na síntese de resinas fenólicas para substituição parcial de fenol e formaldeído**. 2003. 106f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

ALVES, S. B. Fungos entomopatogênicos. In (Ed.) ALVES, S. B. Controle Microbiano de Insetos. São Paulo, 1998.

AMS - ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. Anuário estatístico 2009. Belo Horizonte: AMS, 2009.

ANTAL, M. *et al.* Review of Methods for Improving the Yield of Charcoal from Biomass. **Energy Fuels**. Volume 4, 3, p. 221–225. 1990.

ANTAL, M. and GRØNLI, M. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. Volume 42, pág, 1619-1640. 2003.

ANTAL, j., *et al.* High-yield biomass charcoal. **Energy & Fuels**. Volume 10, p. 652 - 658. 1996.

ARAÚJO, Eduardo de Souza. **Potencial antibacteriano e antifúngico do extrato pirolenhoso**. 2018. 49f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais, Macaíba, RN, 2018.

AUGUSTIN, J. O.; DIEHL, E.; SAMUELS, R. I.; ELLIOT, L. Fungos parasitas de formigas cortadeiras e de seu fungo mutualístico. In: DELLA LUCIA, T. M. C. (Ed.) Formigas cortadeiras: da bioecologia ao manejo. Viçosa: Ed. UFV, 2011.

BAILIS, R., *et al.* Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. **Energy for Sustainable Development** 2013;17(2):189–201.

BARRANTES, L. **Avaliação do desempenho ambiental da produção de biomassa florestal com finalidades energéticas no Brasil: caso de Itapeva**.

2016. 182 f. Dissertação de mestrado (Engenharia mecânica e de materiais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFP, Curitiba, 2016.

BARCELLOS D. **Forno container para produção de carvão vegetal: Desempenho, perfil térmico e controle da poluição**. 2002. 85f. Dissertação de mestrado (Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa – UFV. 2002.

BARCELLOS D.; et al. Cellular Furnace as a Pollution and Energy Generation Control Source in Carbonization Using Container Oven. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 4, p. 335-342, Dezembro de 2004.

BATISTA, C.P. et al. **Obtenção do ácido pirolenhoso proveniente da combustão da madeira de eucalipto, sua aplicação como bioestimulante e influência no solo de cultivo do feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*)**. 2013. 77p. Dissertação (Tecnologia em Processos Químicos) - Faculdade Pentágono, Santo André. 2013.

BEN, 2020. Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019. EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2020.

BENITES, V. et al. **Utilização de carvão e subprodutos da carbonização vegetal na agricultura: Aprendendo com as terras pretas de Índio**. Capítulo em livro científico. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, I. W. (Ed.). As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Manaus: EDUA/Embrapa Amazônia Ocidental, p. 286-297. 2010. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/888681>. Acesso em 02 de Julho de 2020.

BEZERRA, J.C., NETO, E., SILVA, S. C., RIBEIRO, M. S., OLIVEIRA, G. T. Avaliação da atividade formicida do óleo essencial de eucalyptus sp. sob diferentes dosagens. In: II Congresso Internacional das Ciências Agrárias – COINT, 2017.

BLACKADDER, W. RENSFELT, E. A pressurized thermo balance for pyrolysis and gasification studies of biomass, wood and peat. **Fundamentals of thermochemical biomass conversion**. p. 747 - 759. 1985.

BOND, J. **Sources of ignition: Flammability characteristics of chemicals and products**. Butterworth-Heinemann, Abril, 1991.

BOUCHER, D. et al. **The root of the problem: What's driving tropical deforestation today?**. Union of Concerned Scientists. 2011.

BORCHARD, N. et al. Black carbon and soil properties at historical charcoal production sites in Germany. **Geoderma**. Volumes 232-234, pag. 236-242. Novembro, 2014.

BRIDGWATER, A.V; CARSON, P.; COULSON, M. A comparison of fast and slow pyrolysis liquids from mallee. [International Journal of Global Energy Issues](#), v. 27, n.2, p. 204 – 216, 2007.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012.

BRITO, J. O., BARRICHELO L. G. Considerações Sobre a Produção de Carvão Vegetal com Madeiras da Amazônia. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Departamento de Silvicultura da E.S.A.L.Q. – USP. IPEF – Sér. Téc. Piracicaba v.2, n.5, p. –25, 1981.

BRUNNER, P. Examination of the pyrolysis of cellulose for the production of activated carbon from wastes. **Int. Solid Wastes Assoc. Bull.** vol. 23, p. 2-11. 1977.

BUENO, O. C.; BUENO, F. C. Plantas inseticidas: perspectivas de uso no controle de formigas-cortadeiras In: DELLA LUCIA, T. M. C. (Ed.) Formigas-cortadeiras: da bioecologia ao manejo. Viçosa: Ed. UFV, 2011.

BURIVALOVA, Z., Sekercioğlu, C., KOH, L. Thresholds of Logging Intensity to Maintain Tropical Forest Biodiversity. **Current Biology**. Vol. 24, issue 16, P1893-1898, Agosto de 2014.

CALDEIRA, S. F. Práticas Silviculturais: Notas de aulas Teóricas. Universidade Federal de Mato Grosso - Faculdade de Engenharia Florestal - Cuiabá, 1999.

CAMPOS, A.D. **Técnicas para produção do extrato pirolenhoso para uso agrícola**. Embrapa. Circular técnica, nº 65, 8p. Pelotas, 2007.

CANAL, W. D. *et al.* Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa no processo de carbonização. **Scientia Forestalis**. V.44, n. 112 p.831-840, Dez. de 2016.

CANALI, M. C. **Prospecção de fungos entomopatogênicos para o controle biológico de formigas cortadeiras**. 2017. 117 p. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2017.

CANETTIERI, Thiago *et al.* A atividade de carvoejamento e o risco a saúde da população de Rancho Novo, Caeté-MG. **Revista Pegada**, v. 14, n. 1, 2013.

CARAZZA, F.; OKUMA, A. A.. **Alcatrão de Eucalyptus: Fonte de Aromas e Sabores**. In: **XXXI Seminário de Redução de Minério de Ferro**, XV Seminário de Controle Químico em Metalurgia, XI Seminário de Carboquímicos, Santos. São Paulo: Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda. v. VII. p. 271-279. 2000.

CARDOSO, M. *et al.* Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

CARDOSO, Marco Túlio. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira**. 2010. 89p. Dissertação de Mestrado (Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

CARDOSO, M. T. **Secagem de toras para produção de carvão vegetal utilizando a queima de gases da carbonização**. 2015. 76f. Tese de doutorado do Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa - MG, 2015.

CARDOSO, André. **Pirólise lenta de serragem de eucalipto para produção de bioóleo e carvão**. 2004. 68 p. Dissertação de mestrado (Mestre em química). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS, 2004.

CARRARI, E., *et al.* Effects of charcoal hearth soil on forest regeneration: Evidence from a two-year experiment on tree seedlings. **Forest Ecology and Management**. Vol. 427, pg 37-44. 2018.

CASTRO, Ana Flávia. **Potencial dos resíduos florestais e dos gases da carbonização da madeira para geração de energia elétrica**. 2014. 122f. Tese de doutorado (Ciência florestal) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2014.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. 33º. **Balanco energético do Estado de Minas Gerais: BEEMG 2018**. Belo Horizonte: CEMIG, 2018.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Potencial de energia da Biomassa em Minas Gerais**. Editora: Rona Gráfica e Editora, 380 pgs. Belo Horizonte, 2017. Disponível em: http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/Documents/chamada_publica_CEMI

G40/Livro_Potencial_Energia_Biomassa_Minas_Gerais.pdf. Acesso em 30 Set. de 2020.

CENCERRADO, A. et al. Assessing the environmental benefit of a new fertilizer based on activated biochar applied to cereal crops. **Science of the total Environment**. Volume 711, p.134668. 2020.

CETESB. Emissões veiculares no estado de São Paulo em 2019. São Paulo:

CETESB, 2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>> ISBN 978-65-5577-013-1>. Acesso em: 28/09/2021.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015.

CHAGAS, L. **Secagem natural da madeira no campo para produção de carvão vegetal**. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 2., 2010, Sete Lagoas: SIF, 2010. Disponível em: http://www.sif.org.br/arquivos_internos/downloads/Leonardo+Chagas.pdf.

CHAN, E.W.; FONG, C.; KANG, K.; CHONG, H. Potent antibacterial activity of wood vinegar from Matang Mangroves, Malaysia. **ISME/GLOMIS Electronic Journal, International Society for Mangrove Ecosystems (ISME)**, v. 10, n. 4, p. 10-12. 2012.

CHIAMENTI, L. et al. Ação antibacteriana do licor pirolenhoso sobre coliformes. **Revista Conhecimento Online**, v. 2, n. 0, p. 47–54, 31 dez. 2016.

CHIDUMAYO, E. & GUMBO, D. J. The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the world: A synthesis. **Energy for Sustainable Development**. vol.17, pag 86–94. Zâmbia, 2013.

CHIDUMAYO, E. et al. Charcoal potential in southern Africa (CHAPOSA) — report for Zambia. Stockholm: Stockholm Environment Institute; 2001.

Brasil importa mais madeira e produtos florestais dos EUA. CIFlorestas, 2008. Disponível em: <http://www.ciflorestas.com.br/conteudo.php?id=12>. Acesso em 02 de Março de 2021.

CML. CML-IA Characterisation Factors. Disponível em: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>. Acesso em 15 de Dez. 2020.

COELHO, M. P. **Desenvolvimento de metodologia para o dimensionamento de câmaras de combustão para gases oriundos do processo de carbonização de madeira**. 2013. 78p. Tese de Doutorado (Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2013.

COLOMBO, S. F.O.; PIMENTA, A.S.; HATAKEYAMA, K. 2006. Produção de Carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável. XIII SIMPEP – Bauru. Anais. São Paulo, 6 a 8 de novembro de 2006, 8p.

COSTA, L. J. et al. **Efeito da temperatura nos rendimentos da carbonização**. . In: IV FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: 8 nov. 2016

CZERNIK, S. e BRIDGWATER, A.V. Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil. **Energy & Fuels**, vol. 18, pag. 590-598, 2004.

DA COSTA, A.F.; DA SILVA G.F.; ESCUDERO, M.C. Estudo comparativo entre produtos químicos preservantes e licores pirolenhosos na inibição de fungos emboloradores. **Brasil florestal**, v.21, p. 23-29, 2003.

DALLAROSA, J. B. **Estudo da Formação e Dispersão de Ozônio Troposférico em Áreas de Atividade de Processamento de Carvão Aplicando Modelos Numéricos**. 2005. Dissertação de mestrado (Programa de

Pós Graduação em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DE MELO, R.M.; SILVA, R.M.; DE BARROS, R.O. MAZORCHE R.M; DE QUEIROZ, V.T.; POVOA, H.C.C. Estudo da atividade antimicrobiana do licor pirolenhoso em bactérias dos gêneros *Pseudomonas* e *Serratia*. **Revista Científica da FAMINAS**, v. 3, n. 1, supl 1, p. 47, 2007.

DONATO, Danilo Barros. **Desenvolvimento e avaliação de fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira**. 2017. 89f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017.

ECOINVENT, 2013. Ecoinvent Centre: data v3.01. Disponível em <http://www.ecoinvent.org>. Acesso em 15 de Dez. 2020.

EKEH, O., FANGMEIER, A., MULLER, J. Quantifying greenhouse gases from the production, transportation and utilization of charcoal in developing countries: a case study of Kampala, Uganda. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Volume 19, pages 1643–1652, Junho de 2014.

ELYOUNSSI, K., BLIN, J., HALIM, M. High-yield charcoal production by two-step pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, vol. 87, pp. 138–143. 2010.

EPB, 2021. EPB: Extrato pirolenhoso do Brasil, 2021. Disponível em: <https://epb.eco.br/>. Acesso em: 12/08/2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2019. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019 (Ano base 2018)**. Brasília: EPE, 2019. Disponível em https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2019_WEB_alterado.pdf Acesso em 05 de jan. 2021.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Simple Technologies for Charcoal Making In: Briquetting of Charcoal**, vol. (Chapter 11). FAO, Roma, p. 160. 1984.

FAO - Food and Agriculture Organization. **The charcoal transition: greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihoods**. Roma, 2017.

FAVA, James et al. **Conceptual Framework for Life-Cycle Impact Assessment**. Flórida, EUA. Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Fevereiro 1993.

FIORI, S.; CYBIS, L.; FERNANDES, V. Metodologia ACV para caracterizar impactos ambientais relacionados a diferentes cenários de uso de água em edificações. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 19, n.4, dezembro de 2014.

FGV. **RenovaBio: Próximos Passos e Perspectivas do Biodiesel com o RenovaBio**. FGV ENERGIA. Rio de Janeiro, fevereiro de 2018.

_____. **Forest Absorbing Carbon Dioxide Emission**. Annual Report: 1993. Arnheim: Netherlands, 1993.

GARCIA, M.; BOTELLA, L.; GIL-LALAGUNA, N.; ARAUZO, J.; GONZALO, A.; SANCHEZ, J. L. Antioxidants for biodiesel: Additives prepared from extracted fractions of bio-oil. **Fuel Process. Technol**, Vol. 156, p. 407– 414, 2017.

GOMES, I. **Desenvolvimento de um reator de carbonização pressurizado para resíduos agroindustriais**. 2011. 110f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Ciências Mecânicas) Universidade de Brasília. Brasília, 2011.

GREWAL, A., ABBEY, L. GUNUPURU, L. Production, prospects and potential application of pyroligneous acid in agriculture. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. Vol. 135, pag. 152 – 159, 2018.

HARDY, B. *et al.* The effect of pre-industrial charcoal kilns on chemical properties of forest soil of Wallonia, Belgium. **European Journal of Soil Science**. Volume 67, Issue 2. pag. 206–216. Março de 2016.

HAYKIRI-ACMA, H., YAMAN, S., KUCUKBAYRAK, S. Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. **Fuel Process Technology**. Vol. 91, issue 7, 759–64, Julho, 2010.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual Estatístico de 2017**. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acessado em 22 de Abril de 2020.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual Estatístico de 2019** (Ano Base 2018). Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf> Acessado em 30 de Setembro de 2020.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual Estatístico de 2020**: Ano Base 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acessado em Março de 2021.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual Estatístico de 2021**: Ano Base 2020. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatorios> . Acessado em Maio de 2022

IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**: ano-base 2016. Rio de Janeiro: IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em:

https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2016_v31.pdf. Acesso em 05 de Out. de 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. 2021. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura em 2020. Disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/291#resultado>. Acesso em: 28/10/2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. 2014. Extração Vegetal e Silvicultura. Rio de Janeiro, RJ. 54p. 2014.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. 2018. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2018_v33_informativo.pdf. Acesso em Outubro de 2020.

IBRAHIM, D.; KASSIM, J.; SHEH-HONG, L.; RUSLI, W. Efficacy of pyroligneous acid from *Rhizophora apiculata* on pathogenic *Candida albicans*. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**, v.3, p. 007-013, 2013.

IPCC. **Climate Change 2021**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. 2021.

IPCC. **Climate change 2007**: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Disponível em <http://www.ipcc.ch>. Acesso em 03 Set. 2020.

IPPC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Revised 1996. Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996.

IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Intergovernmental Panel on Climate Change, Hayama, Japan, 2006.

ISO 14040 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Brussels: International Organisation for Standardisation, 2006.

JABBAR, A., AMELLAL, S., SCHIAVON, M. Sorption and leaching of 14 C-glyphosate in agricultural soils. **Agronomy for Sustainable Development**. v. 28 (3), pp.419-428. 2008.

JAHIRUL, M.I.; RASUL, M.G.; CHOWDHURY. A.A.; ASHWATH, N. Biofuels Production through Biomass Pyrolysis – A Technological Review. **Energies**, 5, p. 4952-5001, 2012.

KAJINA, W. *et al.* Charcoal production processes: an overview. **Journal of Sustainable Energy & Environment**. Volume 10, pag.19-25. 2019.

KAMMEN, D. and LEW, D. Review of technologies for the production and use of charcoal. Renewable and Appropriate Energy Laboratory report - Energy and Resources Group & Goldman School of Public Policy. p. 1-19. Berkeley, CA, University of California; 2005.

KATTEL, R.R.. Improved charcoal production for environment and economics of blacksmiths: evidence from Nepal. **Journal of Agricultural Science and Technology**, B5: p.197–204, 2015.

KIRUKI, H., ZANDEN, E., NJURU, P., VERBURG, P. The effect of charcoal production and other land uses on diversity, structure and regeneration of woodlands in a semi-arid area in Kenya. **Forest Ecology and Management**. Vol. 391, pag. 282-295, 2017.

LACAUX, J., *et al.* Traditional charcoal making: An important source of atmospheric pollution in the African Tropics. **Journal of Atmospheric Research**. Volume 35, p. 71–76. 1994.

LARSON, R.; SHARMA, B; MARLEY, K.; KUNWAR, B.; MURALI, D.; SCOTT, J. Potential antioxidants for biodiesel from a softwood lignin pyrolyzate. **Industrial crops & Products**, v. 109, p. 476-482, 2017.

LEE, J. J.; SHON, T. K.; FURUYA, T.; JIN, II-D.; CHUNG, II K.; LEE, S. C. Effect of Different Kinds of Environmental Friendly Materials on the Growth of Rice. **J. Fac. Agr.**, v.52, n.1, p.39-42, 2007.

LEHMANN, J., JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. Edit: Earthscan. London. 2009.

LEME, M. *et al.* Electricity generation from pyrolysis gas produced in charcoal manufacture: Technical and economic analysis. **Journal of Cleaner Production** 194 219 e 242. 2018.

LEME, Márcio. **Estudo Técnico, Econômico e Ambiental da Utilização de Alternativas Tecnológicas para a Geração de Eletricidade na Cadeia Produtiva do Carvão Vegetal no Brasil**. 2016. 230p. Tese de Doutorado (Doutorado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

LOHRIA, C. R., RAJABUB, H. M., SWEENEYC, D. J., ZURBRÜGGA, C. Char fuel production in developing countries – A review of urban biowaste carbonization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 59, June 2016, Pages 1514–1530, 2016.

LUO, Z., WANG, S., LIAO, Y., *et al.* Research on biomass fast pyrolysis for liquid fuel. **Biomass Bioenergy**, vol. 26 , p. 455–62, 2004.

MACKAY, D.; ROBERTS, P. The Influence of Pyrolysis Conditions on Yield and Microporosity of Lignocellulosic Chars. **Carbon**. Volume 20, Issue 2, Pages 95-104. 1982.

MASHUGA, C., CROWL, D. Flammability zone prediction using calculated adiabatic flame temperatures. **Process Safety Progress**, v. 18, p. 127-134, 1999.

MAFIA, Reginaldo et al. Critério técnico para determinação da idade ótima de mudas de eucalipto para plantio. **Rev. Árvore**, Viçosa , v. 29, n. 6, p. 947-953, Dezembro 2005. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622005000600014&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 05 jan. 2021.

MANGRICH, A. S.; MAIA, C.M. B. F.; NOVOTNY, E. H. Biocarvão - As terras pretas de índios e o sequestro de carbono. **Rev. Ciência Hoje**, v. 47, 48-52, 2011.

MASTROLONARDO, G., FRANCIOSO, O. CERTINI, G. Relic charcoal hearth soils: a neglected carbon reservoir. Case study at Marsiliana forest, Central Italy. **Geoderma**. Volume 315, pgs 88–95. Abril, 2018.

MATUSTÍK, J. et al. Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review. **Journal of Cleaner Production**. Volume 259 p. 120998. 2020.

MELO, f. **Projeto, construção e avaliação de uma fornalha para aquecimento de ar utilizando combustíveis particulados finos**. 2003. 91f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

MENDES, N. BUENO, C., OMETTO, A. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida: Revisão dos principais métodos. Universidade de São Paulo - USP. São Carlos. 2013.

MIRANDA, R.C.; BAILIS, R.; VILELA, A.O. Cogenerating electricity from charcoaling: A promising new advanced technology. **Energy Sustainable Development**. Volume 17, p. 171–176, 2013.

MILBRANDT, A.. Assessment of biomass resources in Liberia. **National Renewable Energy Lab. (NREL)**, Golden, CO. 2009.

MIYASAKA, S.; OHKAWARA, T.; NAGAI, K.; YAZAKI, H.; SAKITA, M. N. Técnicas de produção e uso de fino de carvão e licor pirolenhoso In: I ENCONTRO DE PROCESSOS DE PROTEÇÃO DE PLANTAS: Controle ecológico de pragas e doenças. **Resumos...** Botucatu, SP, p.161-176, 2001.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Produção sustentável de carvão vegetal: Manual de operação de sistema fornos-fornalha**. Brasília, DF: MMA, 2019.

MOHAMMED, Y. BASHIR, N., MUSTAFA, M. Overuse of wood-based bioenergy in selected sub-Saharan Africa countries: review of unconstructive challenges and suggestions. **Journal of Cleaner Production**. Volume 96, pag 501-506, Oxford, 2015.

MOK, W. et al. Formation of charcoal from biomass in a sealed reactor. **Industrial & Engineering Chemistry Research**., vol. 31, p. 1162-1166. 1992.

MONTEIRO, M. F. **Avaliação do ciclo de vida do fertilizante superfosfato simples**. 2008. 179 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo). Universidade Federal da Bahia, Salvador. 2008.

MOREIRA, M. *et al.* The prospective use of biochar as adsorption matrix – A review from a lifecycle perspective. **Bioresource Technology**. Volume 246, p.135-141. 2017.

NASCIMENTO, A.; LEITE, A.; SOARES, T.; FREITAS, L. Avaliação Técnica e Econômica da Colheita Florestal Com Feller-Buncher. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 9-15. Março de 2011.

NASCENTES, A. L.; LENA, B. P.; FRANCISCO, J. P.; BARROS, F. da C.; SILVA, L. D. B. Utilização do lodo de esgoto para a produção comercial e mudas de eucalipto. **Applied Research & Agrotechnology**, v.12, n.3, p.151-160, dezembro de 2019.

NEMECEK, T.; KAGI, T. Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. **Ecoinvent Report** No. 15. Zurich e Dubendorf, 2007.

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J. Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems. **Ecoinvent Report**. Zurich e Dubendorf, 2012.

NETO, P.S., NEGRISOLI, A. S. e BARBOSA, C. R. C. Nematoides entomopatogênicos (Nemata: Rhabditidae) e inseticidas naturais para o controle de *Atta sexdens* L. (Hymenoptera: Formicidae) em cana-de-açúcar. **Nematropica**, vol. 47, No. 2., pag. 135-142. 2017.

NJENGA, M. et al. Additional cooking fuel supply and reduced global warming potential from recycling charcoal dust into charcoal briquette in Kenya. **Journal of Cleaner Production**. Volume 81, pág. 81-88. 2014.

NOGUEIRA, G., MCMANUS, M, LEAK, D., FRANCO, T., DIAS, M., CAVALIERO, C. Are eucalyptus harvest residues a truly burden-free biomass source for bioenergy? A deeper look into biorefinery process design and Life Cycle Assessment. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 299, p. 126956, 2021.

OLIVEIRA, A., et al. Optimization of charcoal production through control of carbonization temperatures. **Revista Árvore**. V.37, 557– 566p. Viçosa, 2013.

OLIVEIRA, A. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012, 74 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 2012.

OLIVEIRA, M. **Controle de formigas cortadeiras (hymenoptera: Formicidae) com produtos naturais**. 2006. 125 f. Tese (Doutorado), Instituto de Biociências do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Rio Claro – SP, 2006.

OLIVEIRA, A. *et al.* Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.38, n.87, p. 431-439, set. 2010.

OLIVEIRA, A. C., PEREIRA, B. L., SALLES, T. T., CARNEIRO, A, LANA, A.C. Análise de Risco Econômico de Dois Sistemas Produtivos de Carvão Vegetal. **Floresta Ambient**. vol. 24. Seropédica, Epub. 27 de abril de 2017.

OMS - Organização Mundial da Saúde. **The energy access situation in developing countries: A review focusing on the least developed countries and sub-Saharan Africa**. New York, 2009.

ONDATEC. Portal eletrônico da empresa. Disponível em: <www.ondatec.com. Acesso em: jul. 2020

PARTEY, S. *et al.* Comparative life cycle analysis of producing charcoal from bamboo, teak, and acacia species in Ghana. **International Journal of Life Cycle Assessment**. Volume 22, pag. 758–766, 2017.

PAULA, Germano. Siderurgia. In: JUNIOR, R. e PINHO, M. (orgs). **Economia de baixo carbono: Impactos de novos marcos regulatórios e tecnologias sobre a economia brasileira**. Ribeirão Preto, SP: FUNPEC Editora, 2014. p.153-181.

PENNISE, D., *et al.* Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal making in Kenya and Brazil. **Journal of Geophysical Research**. Vol. 106, no.D20, pages 24, 143-24, 155. Outubro de 2001.

PEREIRA, B., CARNEIRO, A., CARVALHO, A., COLODETTE, J., OLIVEIRA, A., FONTES, M. Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, v.8, n. 3, p.4574–4592, 2013.

PEREIRA, E. G. *et al.* Pyrolysis gases burners: sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.75, p. 592-600, 2017.

PINHEIRO, P. *et al.* A produção de carvão vegetal: teoria e prática. 1 a ed. Belo Horizonte: Autores, 2006a.

PINHEIRO, P. *et al.* **Proposta de uma nova organização da produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria**. In: **11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT**. 2006. Sociedade Brasileira de Ciências Mecânicas e Engenharia. Curitiba, Dez de 2006b.

PINCELI, A. L., MOURA, L. F., BRITO, J. B. Quantificação dos resíduos da colheita em florestas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**. Vol. 45, n. 115, p. 519-526, setembro de 2017.

PIRES, A., *et al.* Challenges and Opportunities for Bio-oil Refining: A Review. **Energy & Fuels**, vol. 33, pag. 4683-4720, 2019.

PNUMA. Concentração global de CO2 bate recorde mesmo durante crise do COVID-19. PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 11 de maio de 2020. Acesso em 19/08/2021. Disponível em <<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/concentracao-global-de-co2-bate-recorde-mesmo-durante-crise-do>>.

PORTO, P., SAKITA, A., NAKAOKA, M. Efeito da aplicação do extrato pirolenhoso na germinação e no desenvolvimento de mudas de *Pinus elliottii* var. *elliottii*. **IF Sér. Reg.**, São Paulo, n. 31, p. 15-19, jul. 2007.

PRAKASH, R., SINGH, R. K., MURUGAN, S. Experimental investigation on a diesel engine fueled with bio-oil derived from waste wood - biodiesel emulsions. **Energy**, vol. 55, page 610 - 618. 2013.

PRÉ SUSTAINABILITY. SimaPro database manual – Methods library 2020. Disponível em: <https://support.simapro.com/articles/Manual/SimaPro-Methods-manual>. Acesso em 18 dez de 2020.

PUGA, A. *et al.* Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. **Journal of environmental Management . Volume** 159, pág 86-93. 2015.

QI, Z., JIE, C., TIEJUN, W., YING, X. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. **Energy Conversion and Management**, 4vol. 8, p. 87–92, 2007.

RAAD, T. **Simulação do processo de secagem e carbonização do eucalytus spp.** 2004. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação e Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, 2004

REIS, M; *et al.* Sequestro e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. In: Seminário: Emissão X Sequestro de CO2, 1., 1996, p.157-195, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994.

RIBEIRO, P.H. **Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados**. 2009, 375p. Tese de

Doutorado (Engenharia Química). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo; 2009.

RODRIGUES, T., & JUNIOR, A. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. Volume 143, p. 104670. 2019.

ROMEIRO, C. D. **Estudo Paramétrico e Diagnóstico Preliminar do Esquema Atual da Usina Termelétrica de Barreiro**. 2008.139 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia da Energia), Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2008.

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

SAE-PR. Estudo Estratégico: Produção Nacional de Fertilizantes. SAE-PR Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos - Governo Federal. 2 de julho de 2020.

SANTOS, S. *et al.* Life Cycle Analysis of Charcoal Production in Masonry Kilns with and without Carbonization Process Generated Gas Combustion. **Sustainability**, 9, 1558. 2017.

SANTOS, Sueli de Fátima de Oliveira Miranda. **Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal**. 2017. 144f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SANTOS, S. **Produção De Carvão Vegetal em Cilindros Metálicos Verticais: Alguns Aspectos Referentes à Sustentabilidade**. 2007. 95f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade tecnológica federal do Paraná, Ponta grossa, Dezembro de 2007.

SANTOS, A. **Possibilidades e Impactos da Ampliação da Siderurgia a Carvão Vegetal Oriundo de Florestas Plantadas no Brasil**. 2011. 178f. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SCHUMACHER, Laura. **Obscure impacts demystified: Stratospheric ozone depletion. Pré Sustainability**. Artigo online. Disponível em: <https://pre-sustainability.com/articles/obscure-impacts-demystified-stratospheric-ozone-depletion/>. Acesso em 16 Dez. de 2020.

SCHNITZER, J. A.; SU, M. J.; VENTURA, M. U.; DE FARIA, R. T. Doses de extrato pirolenhoso no cultivo de orquídea. **Revista Ceres**, v. 62, n. 1, p. 101–106, 2015.

SEAPA – SECRETARIA DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DE MINAS GERAIS. **Silvicultura 2020: ano base 2018/2019**. Minas Gerais, Novembro, 2020.

SHIGAKI, Francirose. **Transporte de fósforo na enxurrada superficial em função do tipo de fonte de P e intensidade das chuvas: Relevância à gerência ambiental em sistemas de produção brasileiros**. 2006. 113 f. Tese de doutorado (Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SILVA, D. A. et al. Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014.

SILVA, D. L. A. **Avaliação do Ciclo de Vida da Produção do Painel de Madeira MDP no Brasil**. 2012. 207 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

SILVA, A. **Efeitos do extrato pirolenhoso sobre *Atta sexdens rubropilosa* Forel, 1908 (Hymenoptera: Formicidae), *Syntermes molestus* (Burmeister, 1839) (Isoptera: Termitidae) e mudas de eucalipto**. 2003, 80 p. Dissertação de mestrado (Agronomia/Entomologia). Universidade Federal de Lavras – UFLA. Lavras, Minas Gerais, 2003.

SILVA, M., PIMENTA, A., SOUZA, E., NÓBREGA, R., SILVA, S., LOURENÇO, Y., CAETANO, V., MEDEIROS, L. Produção, composição e utilização do extrato pirolenhoso na agricultura. In: III CBCTEM – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Florianópolis, 2017.

SILVA, F. A. M.; NUNES, G. M.; ZANON, J. A.; GUERRINI, I. A.; SILVA, R. B. Resíduo agroindustrial e lodo de esgoto como substrato para a produção de mudas de eucalyptus urograndis. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.28, n.2, p.827-828, 2018. Disponível em <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832101>.

SINDIFER. Anuário estatístico do setor de ferro gusa 2016. Belo Horizonte: Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (SINDIFER), 2017.

SINGH, P. *et al.* Environmental footprint of cooking fuels: a life cycle assessment of ten fuel sources used in Indian households. **Int J Life Cycle Assess.** Vol. 19, p.1036–1048. 2014.

SINDIFER – Sindicato da Indústria de Ferro no Estado de Minas Gerais. Anuário Estatístico 2020 – ano base 2019. Belo Horizonte – MG, 2020. 26p.

SMEBYE, A., *et al.* Life-cycle assessment of biochar production systems in tropical rural areas: Comparing flame curtain kilns to other production methods. **Biomass and Bioenergy**. Volume 101, p. 35-43. 2017.

SOARES, M. T. S.; MAEDA, S.; BELLOTE, A. F. J.; ANDRADE, G. de C.; GOMES, J. B. V.; FASSINA, S. H. Resposta inicial do eucalipto após aplicação de dejetos líquidos de suínos no oeste do Paraná. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS, 6., 2019, Florianópolis. Anais. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

SOUZA, Nara. Análise físico-química e toxicidade do material particulado (MP10) no ar atmosférico em Catalão – GO. 2018. 87 pag. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2018.

SOUZA, Rafael Machado et al. Sintomas respiratórios em trabalhadores de carvoarias nos municípios de Lindolfo Collor, Ivoti e Presidente Lucena, RS. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 36, n. 2, 2010.

SUGAWARA, E. T. **Comparação dos desempenhos ambientais do B5 etílico de soja e do óleo diesel, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. 2012. 240 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

TEIXEIRA, G; RODRIGUES, G. Silvicultura e Siderurgia a carvão vegetal: Implicações na organização territorial no vale do Jequitinhonha, Minas Gerais. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia - MG v. 19, n. 66 p. 297–312. Junho de 2018

THAKKAR, J. *et al.* Energy balance and greenhouse gas emissions from the production and sequestration of charcoal from agricultural residues. **Renewable Energy**. Volume 94, p. 558-567. 2016.

THAKUR, A., CANTER, C., KUMAR, A. Life-cycle energy and emission analysis of power generation from forest biomass. **Applied Energy**. Vol. 128, pag. 246–253, 2014.

TOMASSINI, Debora. **Caracterização dos produtos líquidos obtidos por pirólise de biomassas utilizando técnicas cromatográficas bidimensionais abrangentes**. 2015. 197 f. Tese de doutorado (Doutora em química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Setembro, 2015.

TRINDADE, R. C. P.; PALMEIRA, L. H.; SANT'ANA, A. E. G.; SOUSA, R. S.; COSTA, A. P. A.; AMORIM, E. P. R. Atividade do extrato pirolenhoso sobre lagartas de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Rev. Bras. de Agroecologia**. n. 9, v. 3, p. 84-89. 2014.

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

URNS, Stephen R. **Introdução à combustão: conceitos e aplicações**. AMGH Editora Ltda, 3ª ed. Porto Alegre, 2013.

UDDIN, S.M.M.; MURAYAMA, S.; ISHIMINE, Y.; TSUZUKI, E. Effect of Mixture of Charcoal with Pyrolytic Acid on cane and sugar yield of spring and ratoon crops of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Japan Journal Crop Science**, Tokyo, v. 38, n. 4, p. 281-285, 1994.

VIDAL, et al. Evaluation of lower flammability limits of fuel-air-diluent mixtures using calculated adiabatic flame temperatures. **Journal of Hazardous Materials**. Volume 130, Issues 1-2, 17, Pages 21-27, 2006.

VIEIRA, R. **Ciclo do Nitrogênio em sistemas agrícolas**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

VILELA, A., et al. A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration. **Biomass and Bioenergy**. Volume 69, pág 222-240, 2014.

WAN, J., et al. Experimental investigation and numerical analysis on flame stabilization of CH₄/air mixture in a mesoscale channel with wall cavities, **Combust. Flame**, 162, pp.1035-1045, 2015.

WAYCARBON. Os Mercados de Carbono Nacionais: perspectivas históricas e atuais. WayCarbon, 28 de abril de 2021. Disponível em: <https://blog.waycarbon.com/2021/04/mercados-de-carbono-nacionais/>. Acesso em: 28/09/2021.

WEIDEMA, B.P, et al. Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. St. Gallen: The ecoinvent Centre, 2013.

WRI. Greenhouse gas protocol calculation tool for forestry in Brazil. WRI Brasil: Nota Técnica. Janeiro de 2020.

YANG, J. et al. Chemical Composition, Antioxidant, and Antibacterial Activity of Wood Vinegar from *Litchi chinensis*. **Molecules**, v. 21, n. 9, p.1-10, 2016.

ZADEH, Z., ABDULKHANI, A., ABOELAZAYEM, O., SAHA, B. Recent Insights into Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: A Critical Review on Pretreatment, Characterization, and Products Upgrading. **Process**, vol. 8, pag 799. 2020.

ZAKARIA, S., LEMAN, A., FERIYANTO, D., NAZRI, A., SUNAR, N., e SALLEH, M. Burner Characteristics for Activated Carbon Production. MATEC Web of Conference, 87:02018. 2017.

ZANETTI, R., DIAS, N., REIS, M., SILVA, A., MOURA, M. Eficiência de iscas granuladas (sulfuramida 0,3%) no controle de *Atta sexdens rubropilosa* Forel, 1908 (Hymenoptera: Formicidae). **Ciência e Agrotecnologia**. vol. 28, n. 4, p. 878-882. Lavras, ago de 2004.

ZEFERINO, I, LIMA, E., VIEIRA, E. Uso do Extrato Pirolenhoso como adjuvante de herbicida. Comunicado Técnico 429 da Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Colombo, Paraná, dezembro de 2018.

ZILNIK, L., JAZBINŠEK, A. Recovery of renewable phenolic fraction from pyrolysis oil. **Separation and Purification Technology**. Vol. 86, pag. 157 – 170. 2012.

APÊNDICE A – QUEIMA DOS GASES DA CARBONIZAÇÃO

O cálculo estequiométrico da queima dos Gases Não Condensáveis (Tabela 26) foi realizado para estimar a quantidade de CO₂, H₂O e de N₂ que são liberados na atmosfera na queima do gás. O cálculo foi feito baseando-se na quantidade de GNC gerados para a produção de 1 tonelada de carvão vegetal (6561,2 kg), e retirando o total de gases perdidos na atmosfera (10%). Sabe-se que sua composição mássica é 60,67% de nitrogênio, 14,31% de oxigênio, 17,02% de dióxido de carbono, 7,05% de monóxido de carbono, 0,157% de hidrogênio e 0,77% de metano.

Tabela 25 - Cálculo estequiométrico da queima do GNC

GNC					Ar			Produtos		
CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	+	O ₂	N ₂	→	CO ₂	H ₂ O	N ₂
45,47	9,27	416,78	1005,34		714,58	2353,53		1988,28	402,54	2353,53

*unidade = kg/ton de carvão vegetal

Nota-se, portanto, que a quantidade de O₂ requerida para a queima estequiométrica do GNC é 714,58 kg/ton de carvão. Considerando um excesso de ar de 10%, a quantidade de O₂ requerida passa a ser 786,04 kg e a quantidade de O₂ presente no GNC é de 845,13 kg. Assim, a quantidade de O₂ presente é suficiente para a queima do GNC, resultando em um coeficiente de excesso de O₂ (λ) de 1,07.

Já para realizar a queima do alcatrão insolúvel, juntamente a queima do GNC, a quantidade de O₂ estequiométrica necessária é de 821,5 kg, e os cálculos podem ser vistos na Tabela 27. Para esse cenário, se considerado 10% de excesso de ar, a quantidade de O₂ presente também seria o suficiente para a queima. A Composição do Alcatrão apresentada na Tabela 27 é baseada em Romeiro (2008).

Tabela 26 - Cálculo estequiométrico da queima do Alcatrão

Alcatrão						Ar			Produtos		
C	H ₂	O ₂	H ₂ O	N ₂	+	O ₂	N ₂	→	CO ₂	H ₂ O	N ₂
10,63	1,18	5,53	5,51	0,087		32,24	106,13		38,99	16,14	106,22

APÊNDICE B – Inventários do Ciclo de Vida (ICV)

Ba. Inventário do Ciclo de Vida: Produção de 1.000 mudas de eucalipto

	Tipo	Qtd.	Comentários
Saídas de Produtos			
Mudas de eucalipto	Esfera Tecnológica	1.000 uni.	Ou 55,55 kg (considerando peso das mudas, tubetes e caixa)
Entradas			
Água, origem natural não especificada	Natureza (recursos)	540,54 L	Calculado, baseado em Silva (2012)
Superfosfato simples – 18,5% de P ₂ O ₅	Esfera tecnológica (materiais)	0,8 kg	Cadeia produtiva retirada de Monteiro (2008)
Nitrogen fertiliser, as N (MAP)	Esfera tecnológica (materiais)	0,20125 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa a % de N contida em MAP
Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ (MAP)	Esfera tecnológica (materiais)	1,05875 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa a % de P ₂ O ₅ contida em MAP
Cloreto de Potássio (KCL) – 60%	Esfera tecnológica (materiais)	3,4 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3
Sulfato de Amônio – 21,2% de N	Esfera tecnológica (materiais)	0,5 kg	Cadeia produtiva retirada de Ribeiro (2009)
Uréia – 46% de N	Esfera tecnológica (materiais)	3 kg	Cadeia produtiva retirada de Ribeiro (2009)
Nitrogen fertiliser, as N (PGmix)	Esfera tecnológica (materiais)	0,0084 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa a % de N contida no PGmix
Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ (PGmix)	Esfera tecnológica (materiais)	0,0096 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa a % de P ₂ O ₅ contida no PGmix
Potassium fertiliser, as K ₂ O (PGmix)	Esfera tecnológica (materiais)	0,0108 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa a % de K ₂ O contida no PGmix
Nitrogen fertiliser, as N (Oscomote)	Esfera tecnológica (materiais)	0,018 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa a % de N contida no Oscomote
Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ (Oscomote)	Esfera tecnológica (materiais)	0,0108 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa a % de P ₂ O ₅ contida no Oscomote
Potassium fertiliser, as K ₂ O (Oscomote)	Esfera tecnológica (materiais)	0,0144 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa a % de K ₂ O contida no Oscomote
Nitrato de cálcio	Esfera tecnológica (materiais)	5,3 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3.
Ácido bórico	Esfera tecnológica (materiais)	0,035 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3.
Sulfato de magnésio	Esfera tecnológica (materiais)	3,2 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3.
Diesel	Esfera tecnológica (combustíveis)	0,09168	Calculado baseado em Silva (2012). Cadeia produtiva do diesel obtido em Sugawara (2012) e emissões da queima de CETESB (2020)

Saídas - Emissões

Amônia – NH ₃	Emissões para o ar	0,240486 kg	Com base em Nemecek e Schnetzer (2012)
Óxido Nitroso – N ₂ O	Emissões para o ar	0,06979 kg	Com base em WRI Brasil (2020)
Nitrato – NO ₃ ⁻	Emissões para a água	0,75259 kg	Com base em IPCC (2006)
Pentóxido de Fósforo – P ₂ O ₅	Emissões para a água	0,122715 kg	Com base em Shigaki (2006)

Bb. Inventário do Ciclo de Vida: Produção de 1 m³ de madeira de eucalipto na floresta

	Tipo	Quantidade	Quantidade (UF)	Quantidade (UF) – Cenário 4	Comentários
Saída de Produtos					
Madeira de eucalipto	Esfera Tecnológica	382,02 m ³	1 m ³	1 m ³	
Entradas					
Água, origem natural não especificada	Natureza (recursos)	5831,67 L	15,26 L	14,17 L	

Dióxido de carbono – CO ₂	Natureza (recursos)	370870,67 ton	970,81 kg	970,81 kg	Calculado com base em Silva (2012)
Ocupação, Floresta, Intensivo	Natureza	-	0,0366 ha.ano	0,0366 ha.ano	
Superfosfato simples – 18,5% de P ₂ O ₅	Esfera tecnológica (materiais)	400 kg	1,047 kg	1,047 kg	Cadeia produtiva retirada de Monteiro (2008)
Cloreto de Potássio (KCL) – 60%	Esfera tecnológica (materiais)	400 kg	1,047 kg	1,047 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3
Mudas	Esfera tecnológica (materiais)	55,55 kg	0,1595 kg	0,1595 kg	
Nitrogen fertiliser, as N (MAP)	Esfera tecnológica (materiais)	0,018 kg	0,0000047 kg	0,000047 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa a % de N contida no MAP
Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ (MAP)	Esfera tecnológica (materiais)	0,078 kg	0,000204 kg	0,000204 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa a % de P ₂ O ₅ contida no MAP
Glifosato	Esfera tecnológica (materiais)	17,4096 kg	0,04557 kg	0,0227 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3 e adaptada para as condições brasileiras. Presente no herbicida Touchdown.
Pesticida, não especificado	Esfera tecnológica (materiais)	84,2 kg	0,22 kg	0,11 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa as iscas formicidas, a base de Sulfluramida.
Pesticida, não especificado	Esfera tecnológica (materiais)	0,05 kg	0,0001308 kg	0,000065 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa o inseticida Actara, a base de Tiametoxam.
Pesticida, não especificado	Esfera tecnológica (materiais)	0,36 kg	0,00094 kg	0,00047 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa o herbicida Fordor, a base de Isoxaflutole.
Pesticida, não especificado	Esfera tecnológica (materiais)	0,648 kg	0,00169 kg	0,00084 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa o herbicida Missil, a base de Haloxifope-p-metilico.
Pyrethoid-compound	Esfera tecnológica (materiais)	0,00054 kg	0,00000141 kg	0,00000070 kg	Cadeia produtiva retirada de ecoinvent v. 3. Representa o componente Deltametrina, contido no inseticida K-otrine.
Diesel	Esfera tecnológica (combustíveis)	639,869 kg	1,67 kg	1,92 kg	Cadeia produtiva do diesel obtido em Sugawara (2012) e emissões da queima de CETESB (2020)
Saídas - Emissões					
Amônia – NH ₃	Emissões para o ar	0,0054 kg	0,00000188 kg	0,00000188 kg	Com base em Nemecek e Schnetzer (2012)
Óxido Nitroso – N ₂ O	Emissões para o ar	0,001518 kg	0,001001 kg	0,001001 kg	Com base em WRI Brasil (2020)
Nitrato – NO ₃	Emissões para a água	0,0054 kg	0,0000141 kg	0,0000141 kg	Com base em IPCC (2006)
Pentóxido de Fósforo – P ₂ O ₅	Emissões para a água	7,4078 kg	0,01939 kg	0,01939 kg	Com base em Shigaki (2006)

Glifosato	Emissões para a água	0,04874 kg	0,0001276 kg	0,0000638 kg	Com base em Jabbar et al. (2008)
-----------	----------------------	------------	--------------	---------------------	----------------------------------

Bc. Inventário da UPC – Cenário 1

Cenário 1	Tipo	Quantidade (por tonelada de carvão produzido)
Saídas de Produtos		
Carvão Vegetal	Esfera tecnológica (materiais)	1000 kg
Entradas		

Madeira de Eucalipto	Esfera tecnológica (materiais)	5,635 m³	
Eletricidade	Esfera tecnológica (energia)	1,3932 kWh	
Diesel	Esfera tecnológica (combustíveis)	0,0602 kg	
Emissões para o ar - Gases Não Condensáveis (Carbonização)			
Ar		5591,18 kg	
Metano		50,521 kg	
Monóxido de carbono		463,09 kg	
Dióxido de carbono		1117,045 kg	
Hidrogênio		10,301 kg	
Emissões para o ar - Gases Condensáveis (Carbonização)			
Isobutanol	4,78 kg	2-Butene	1,61 kg
Ácido Isobutírico	4,11 kg	Formato de etila	4,16 kg
Álcool Furfuril	5,69 kg	Fenol	5,87 kg
Ácido 4-metilpentanóico	1,07 kg	1-4 butanediol	0,78 kg
Ácido oxálico	0,88 kg	O-Cresol	2,76 kg
m-Cresol	4,7 kg	Metoxibenzeno	1,77 kg
Ácido sórbico	12,87 kg	4-aminofenol	10,94 kg
Vanilina	1,66 kg	Ácido vanílico	24,85 kg
Resorcinol	1,22 kg	Hidrocarbonetos (Não especificados)	170,19 kg
Alcatrão	25,53 kg	Água	1565,08 kg
Emissões para o ar – Material Particulado (Carbonização)			
Particulados		72,19 kg	

Bd. Inventário da UPC – Cenário 2

Cenário 2	Tipo	Quantidade (por tonelada de carvão produzido)
Saídas de Produtos		
Carvão Vegetal	Material - Esfera Tecnológica	1000 kg
Entradas		

Madeira de Eucalipto	Material - Esfera Tecnológica	5,635 m³	
Eletricidade	Energia	1,3932 kWh	
Diesel	Energia - Não renovável	0,0602 kg	
Emissões para o ar - Perda dos Gases Não Condensáveis (10%)			
Ar		559,118 kg	
Metano		5,052 kg	
Monóxido de carbono		46,309 kg	
Dióxido de carbono		111,704 kg	
Hidrogênio		1,030 kg	
Emissões para o ar - Gases Condensáveis (Carbonização)			
Isobutanol	4,78 kg	2-Butene	1,61 kg
Ácido Isobutírico	4,11 kg	Formato de etila	4,16 kg
Álcool Furfuril	5,69 kg	Fenol	5,87 kg
Ácido 4-metilpentanóico	1,07 kg	1-4 butanediol	0,78 kg
Ácido oxálico	0,88 kg	O-Cresol	2,76 kg
m-Cresol	4,7 kg	Metoxibenzeno	1,77 kg
Ácido sórbico	12,87 kg	4-aminofenol	10,94 kg
Vanilina	1,66 kg	Ácido vanílico	24,85 kg
Resorcinol	1,22 kg	Hidrocarbonetos (Não especificados)	170,19 kg
Alcatrão	25,53 kg	Água	1565,08 kg
Emissões para o ar - Queima dos Gases Não Condensáveis			
Óxidos de Nitrogênio	0,45 kg	Material Particulado	2,03 kg
COVNM	0,082 kg	Dióxido de Carbono	1988,27 kg
Água		402,53 kg	

Be. Inventário da UPC – Cenário 3

Cenário 3	Tipo	Quantidade (por tonelada de carvão produzido)
Saídas de Produtos		
Carvão Vegetal	Material - Esfera Tecnológica	1000 kg

Eletricidade	Energia	0,1923 MWh	
Entradas			
Madeira de Eucalipto	Material - Esfera Tecnológica	5,635 m ³	
Eletricidade	Energia	1,3932 kWh	
Diesel	Energia - Não renovável	0,0602 kg	
Emissões para o ar - Perda dos Gases Não Condensáveis (10%)			
Ar		559,118 kg	
Metano		5,052 kg	
Monóxido de carbono		46,309 kg	
Dióxido de carbono		111,704 kg	
Hidrogênio		1,030 kg	
Emissões para o ar – Gases Condensáveis (Carbonização)			
Isobutanol	4,78 kg	2-Butene	1,61 kg
Ácido Isobutírico	4,11 kg	Formato de etila	4,16 kg
Álcool Furfuril	5,69 kg	Fenol	5,87 kg
Ácido 4-metilpentanóico	1,07 kg	1-4 butanediol	0,78 kg
Ácido oxálico	0,88 kg	O-Cresol	2,76 kg
m-Cresol	4,7 kg	Metoxibenzeno	1,77 kg
Ácido sórbico	12,87 kg	4-aminofenol	10,94 kg
Vanilina	1,66 kg	Ácido vanílico	24,85 kg
Resorcinol	1,22 kg	Hidrocarbonetos (Não especificados)	170,19 kg
Alcatrão	25,53 kg	Água	1565,08 kg
Emissões para o ar - Queima dos Gases Não Condensáveis			
Óxidos de Nitrogênio	0,45 kg	Material Particulado	2,03 kg
COVNM	0,082 kg	Dióxido de Carbono	1988,279 kg
Água		402,53 kg	

Bf. Inventário da UPC – Cenário 4

Cenário 4	Tipo	Quantidade (por tonelada de carvão produzido)
Saídas de Produtos		
Carvão Vegetal	Material - Esfera Tecnológica	1000 kg

Eletricidade	Energia	0,2617 MWh	
Entradas			
Madeira de Eucalipto (Cultivo com uso do EP)	Material - Esfera Tecnológica	5,635 m ³	
Eletricidade	Energia	1,3932 kWh	
Diesel	Energia - Não renovável	0,0602 kg	
Emissões para o ar – Perda dos Gases Não Condensáveis (10%)			
Ar		559,118 kg	
Metano		5,052 kg	
Monóxido de carbono		46,309 kg	
Dióxido de carbono		111,704 kg	
Hidrogênio		1,030 kg	
Emissões para o ar - Queima dos Gases Não Condensáveis, resíduos florestais e alcatrão			
Óxidos de Nitrogênio	0,45 kg	Material Particulado	5,02 kg
COVNM	5,402 kg	Dióxido de Carbono	2148,14 kg
Água	418,67 kg	Metano	1,99 kg
Monóxido de Carbono		5,32 kg	

ANEXO A – Resultado das análises *in loco* dos gases GNC e GC

As análises foram realizadas em 2019, no forno n. 30 da Unidade Produtora de Carvão Vegetal de Curvelo, em Minas Gerais. A autora não participou das medições.

Aa. Gases Não Condensáveis

Para determinar a composição dos gases não condensáveis da exaustão, foram coletadas amostras dos gases em intervalos médios de 10 minutos, a partir do momento da ignição do forno. As amostras foram condicionadas na temperatura 5 °C até a sua análise em laboratório. As Figuras 35, 36 e 37 apresentam a variação da composição do GNC ao longo da carbonização.

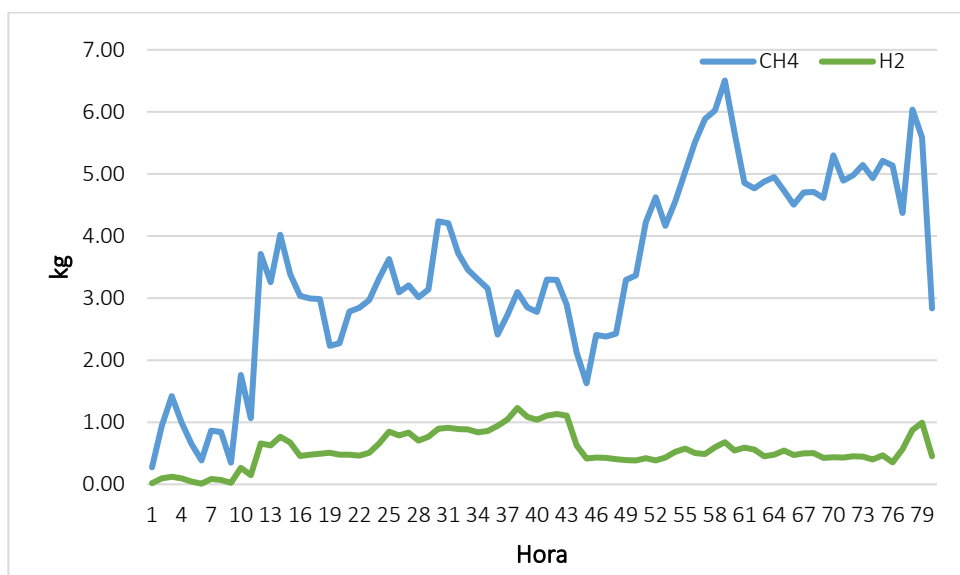


Figura 36 - Massa de CH₄ e H₂ ao longo do tempo (Forno 30)

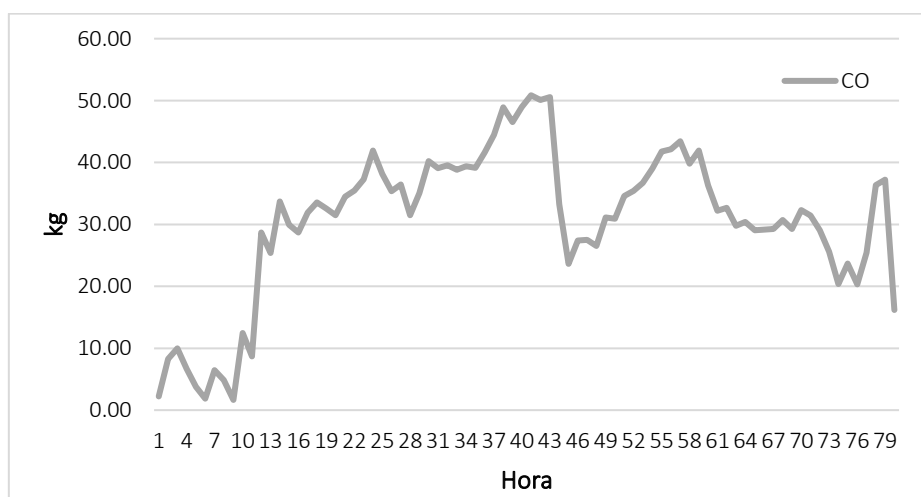


Figura 37 - Massa de CO ao longo do tempo (Forno 30)

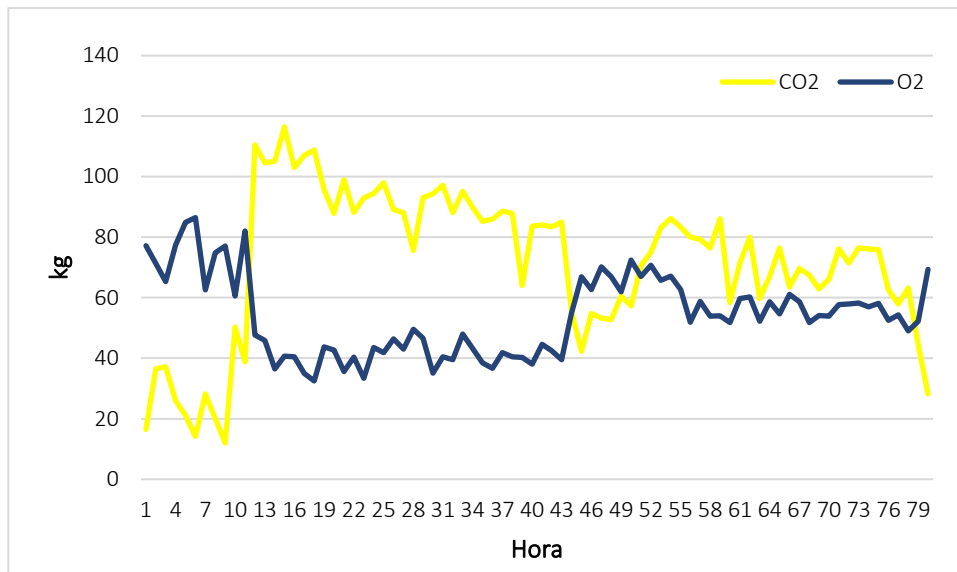


Figura 38 – Massa de CO₂ e O₂

A vazão mássica dos gases seria determinada através da pressão estática juntamente com a pressão dinâmica, entretanto, como a chaminé do forno apresenta baixa razão de aspecto (baixa altura e diâmetro interno grande), a velocidade de tiragem se manteve pequena ao longo de todo o processo, o que prejudicou a qualidade dos dados obtidos. Outro fator que prejudicou a qualidade dos dados foi um fluxo turbulento e com recirculação local, de baixa energia cinética, sendo facilmente interrompido pelos ventos constantes da região. Desse modo, para estimar a vazão mássica dos gases produzidos na carbonização foi recomendado a utilização de taxas de conversão obtidas na literatura.

Ab. Composição do Gás Condensável (GC)

Para a determinação da composição dos gases condensáveis, é utilizada a técnica de espectrometria de massa aliada a um cromatógrafo gasoso com coluna vaporizadora. Devido ao tipo de forno da UPC e das temperaturas do processo, uma boa parte dos vapores mais pesados gerados na carbonização condensam dentro do próprio forno, não saindo na chaminé.

Foram coletados cerca de 100 mililitros de condensados por amostra, a cada 15 horas de processo. As amostras foram analisadas pelo sistema GC/MS-Shimadzu QP2010 Ultra, usando coluna RTX-5MS e arraste por Hélio. Foram

identificadas 49 substâncias diferentes. O resultado da composição do ácido pirolenhoso pode ser visualizado na Tabela 28.

Tabela 27 - Composição do Gás condensável

Compostos	% mássica	Compostos	% mássica
Isobutanol	1,84%	4-hidroxibenzaldeído	0,48%
Ácido isobutírico	1,58%	4-aminofenol	4,21%
2-butene	0,62%	1-fenilbut-3-en-1-ol	0,35%
2,4-dimetilfurano	0,69%	5-metil-5-tert-butiltiofene-2-carboxilato	1,50%
2,3,3-trimetil-1,4-pentadieno	2,11%	(biciclo[2.2.1]heptan-2-il)metanol	1,03%
hidroxiacetato de metila	0,76%	ácido hex-3-enedióico	0,55%
1-metoxiciclohexa-1,4-dieno	1,70%	2,6-dimetilbenzeno--tiol	4,58%
ácido 2-oxo propanóico	0,33%	ácido (2-hidroxifenil)acético	1,53%
formato de etila	1,60%	vanilina	0,64%
álcool furfuril	2,19%	siringol	11,56%
butanoato de prop-2-en-1-ila	1,72%	metilhidroxi(4-hidroxifenil)acetato	0,45%
hex-3-en-2-one	0,81%	ácido 3-metilsalicílico	0,62%
Fenol	2,26%	ácido vanílico	9,56%
ácido 4-metilpentanóico	0,41%	resorcinol	0,47%
ácido 3-hidroxi-3-imino-2-metilpropanóico	0,51%	metil-hidroxi(4-hidroxifenil)acetato	0,39%
butane-1,4-diol	0,30%	ácido 3,4,5-trimetoxibenzenoacético	1,32%
ácido oxálico	0,34%	siringaldeído	1,85%
2-metilfenol	1,06%	dihidrocalcona	0,40%
3-metilfenol	1,81%	éster metílico de ácido mandélico	0,68%
ácido 5-oxohexanóico	0,56%	3-hidroxi-4-metóxido	
metoxibenzeno	0,68%	ácido 3,4-dimetoxifenilacético	0,35%
ácido 2-hidroxi-4-metilpentanóico	2,50%	acrilato de pentadecila	1,70%
ácido 2-aminobutanóico	0,33%	ácido palmítico	0,75%
ácido 2,4-hexadienóico	4,95%	ácido esteárico	0,54%
3-hidroxi-2-metil-piran-4-one	0,38%	ácido hexacosanóico	0,55%
		outros	21,90%

A composição apresentada mostra apenas a composição do extrato pirolenhoso e não considera a água nem o alcatrão. A quantidade de água e alcatrão teve de ser estimada através de revisão da literatura, pois os dados não constavam nas análises feitas no local.

ANEXO B – Clusterização e Geração de Eletricidade

Para geração de eletricidade de maneira constante e eficiente, é recomendado que a Unidade de Curvelo opere de forma *clusterizada*. Como é sabido, a composição dos gases da carbonização é muito variável ao longo do

processo todo, possuindo menor conteúdo energético durante as primeiras horas do processo, que vai aumentando ao longo da carbonização. Além disso, todo o ciclo dura 12 dias, porém só em 4 dias que ocorre a carbonização, ou seja, a produção dos gases ocorre apenas nesses dias.

Desse modo, é determinado a melhor sequência de operação dos fornos por outros autores. Os 60 fornos presentes na UPC devem ser iniciados com um intervalo de 29 horas entre cada um, desse modo os gases terão maior potencial energético. De acordo com os mesmos autores, o resultado do cálculo da potência térmica disponível no cluster para este Δt pode ser visualizado na Tabela 29.

Tabela 28 - Potência térmica disponível no Cluster

Potência Máxima	5486 kWt	Vazão média _{GNC}	761,6 kg/s
Potência Mínima	3382 kWt	Δt	29 h
Potência Média	4136 kWt	PCI Médio 98,9 °C	1170 kJ/kg
Desvio Padrão	531 kWt	PCS Médio 98,9 °C	1228 kJ/kg

A potência térmica varia entre 3.382 kWt e 5.486 kWt, ao longo das horas de carbonização. Para garantir a seguridade energética, e que o conversor de energia tenha um funcionamento constante, deve ser utilizado a potência disponível para geração o valor mínimo de 3.382 kWt. Além disso, é considerado o uso de apenas 90% da energia disponível, para contabilizar possíveis perdas dos gases e/ou caso algum forno esteja em manutenção. Assim, é certo que o equipamento de conversão de energia trabalhará sem interrupções.

Para o cálculo de geração de eletricidade, é considerado o Ciclo Rankine convencional, com 12% de eficiência. Assim, a potência de geração de eletricidade do equipamento é de 0,365 MWe. No intervalo de 12 dias, o cluster produz 105,19 MWh. O resultado dos cálculos e da produtividade de eletricidade por tonelada de carvão produzido são apresentados na Tabela 30.

Tabela 29 – Produtividade de eletricidade por ton de carvão

Potência Térmica Disponível no	3043,8 kWt.	Potência	0,365 MWe
---------------------------------------	-------------	-----------------	-----------

Cluster			
Eficiência	12%	Geração de eletricidade no Cluster	105,19 MWh
<i>Produtividade de eletricidade por tonelada de carvão vegetal produzida*</i>		0,1923 MWh/tcarvão	

**Calculada considerando a estimativa de produção de 547 toneladas de carvão vegetal no cluster, no período de 12 dias*