

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

SUELI DE FÁTIMA DE OLIVEIRA MIRANDA SANTOS

**MODELO AMBIENTAL E ECONÔMICO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO
VEGETAL**

TESE

**PONTA GROSSA
2017**

SUELI DE FÁTIMA DE OLIVEIRA MIRANDA SANTOS

MODELO AMBIENTAL E ECONÔMICO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO
VEGETAL

Tese apresentada como requisito à obtenção do título de Doutora em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Braghini Júnior
Coorientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco

PONTA GROSSA
2017

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa
n.20/18

S237 Santos, Sueli de Fátima de Oliveira Miranda

Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal. / Sueli de Fátima
de Oliveira Miranda Santos. 2017.

144 f.; il. 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Aldo Braghini Junior

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco

Tese (Doutorado em Ensino de Ciência e Tecnologia) - Programa de Pós-
Graduação em Ensino de Ciência e Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Ponta Grossa, 2017.

1. Carvão vegetal. 2. Sustentabilidade. 3. Ciclo de vida do produto. I. Braghini
Junior, Aldo. II. Francisco, Antonio Carlos de. III. Universidade Tecnológica Federal do
Paraná. IV. Título.

CDD 507



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa**

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título da Tese Nº 12/2017

MODELO AMBIENTAL E ECONÔMICO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

por

Sueli de Fátima de Oliveira Miranda Santos

Esta tese foi apresentada às 08h30min de 02 de outubro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Gestão Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Angélica de Cássia Oliveira
Carneiro (DEF/UFV)

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho
(DCF/UFLA)

Profa. Dra. Cássia Maria Lie Ugaya
(UTFPR)

Prof. Dr. Antonio Vanderley Herrero Sola
(UTFPR)

Prof. Dr. Aldo Braghini Júnior
(UTFPR) – *Orientador*

Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco
(UTFPR)
Coordenador do PPGEP

**A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR – CÂMPUS PONTA GROSSA**

Dedico este trabalho ao meu pai,
Fontinele Pereira de Oliveira que, por
muitos anos sustentou sua família abrindo
estradas em meio às matas de Minas
Gerais para escoamento da produção de
carvão vegetal;
à minha mãe Etelvina Xavier de Oliveira
(*in memoriam*) pelos valores de união e
perseverança ensinados carinhosamente
aos seus onze filhos;
aos meus irmãos e aos seus por
compreenderem minhas longas ausências
e ainda assim torcerem por mim;
aos meus filhos e netas por
compreenderem quando a atenção que
lhes era devida, fora tantas vezes adiada.
Dedico, especialmente, ao meu marido
Thadeu Eduardo de Miranda Santos, pelo
incentivo, apoio incondicional e paciência
durante as infindáveis horas de
ensinamento.

AGRADECIMENTOS

Durante essa longa jornada, muitos foram os momentos de solidão em que a concentração e o trabalho árduo foram necessários. Contudo, na maior parte desse tempo, contei com a atenção, disponibilidade, carinho, envolvimento e comprometimento de muitas pessoas. Certamente que não consegui nomear todos e, assim, agradeço de coração, em especial:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aldo Braghini Júnior, por toda a atenção e apoio na orientação desta pesquisa;

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco, pelos pertinentes conselhos dados na coorientação deste trabalho;

Aos produtores de carvão vegetal que disponibilizaram suas plantas e recursos próprios para que todos os experimentos pudessem ser realizados e que, pacientemente, responderam a todos os meus questionamentos: Srs. Toni Basso e Toniel Basso (Paraná) e Sr. Sidoneo Claus Lamb (Brochier-RS), meu eterno agradecimento.

Incluo todos os produtores que me receberam nas inúmeras visitas técnicas, em particular: no Vale do Caí – Sr. Claudir Henrique Musskopf, Sr. Aldair Musskopf e seus filhos Cleiton e Ana Ketlin (Carvão Ivoti); na Zona da Mata Mineira – Sr. José Alves de Magalhães.

Ao Engenheiro Sérgio Wilibaldo Garcia Scherer, pela companhia durante as visitas técnicas no Vale do Caí, mas, especialmente, pelas inúmeras trocas de informações que muito enriqueceram esta pesquisa;

Aos governantes da cidade de Brochier, em especial ao Sr. Fábio Wertz e ao Sr. Airtton Prass, Vice-Prefeito e Secretário do Meio Ambiente à época, que gentilmente me conduziram aos produtores da região, numa demonstração clara de união e envolvimento do poder público em prol do desenvolvimento e bem-estar da comunidade;

À EMATER-RS/ASCAR, pela parceria firmada com a UTFPR, em especial ao Sr. Fábio André Encarnação, Engenheiro Agrônomo, Supervisor Regional e Coordenador Regional da Área de Carvão Vegetal; à Miriam Trevisan, Engenheira Agrônoma e ao Fabiel Kamphorst, pelo apoio na realização da pesquisa com o processo de carbonização da madeira com condensação dos gases e utilização do licor pirolenhoso;

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Alves de Oliveira, Departamento de Química da UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, pelo apoio na realização das análises das amostras de licor pirolenhoso e pela atenção e presteza nas respostas aos meus inúmeros questionamentos;

Ao LAPEM – Laboratório de Painéis e Energia da Madeira da UFV – Universidade Federal de Viçosa-MG, em especial a Lawrence Pires de Oliveira pela realização das análises das amostras de madeira e carvão vegetal dos experimentos desta pesquisa; agradecimentos a Danilo Barros Donato, doutorando à época, pelo compartilhamento dos dados de sua pesquisa do processo de carbonização da madeira com queima dos gases; a Wellinton Lelis Cândido por me permitir acompanhar e mapear este processo durante sua pesquisa de mestrado; e a todos os amigos que fiz na UFV, em especial, Larissa Carvalho, Juliana Ceccato, Leila Lopes, Sálvio Teixeira (Moiado), Mateus Magalhães, Deborah Nava, Fabiana Paiva, Edna Mendes, Éder, entre tantos.

Ao Gilvan Galdereto, Gerente da Fazenda Guaxupé, em Divinésia-MG, pela recepção calorosa e explanação do processo de carbonização em fornos retangulares com câmaras para combustão dos gases, durante visita técnica realizada em novembro de 2015.

Ao Prof. Dr. Kazuo Hatakeyama, pelo carinho de sempre e pelo apoio na apresentação de trabalho num evento internacional, com recursos próprios.

Ao Prof. Dr. Aylson Costa Oliveira, UFMT – Universidade Federal do Mato Grosso, pela atenção e desprendimento nas respostas às muitas das minhas dúvidas.

Aos Professores da UTFPR, pelos ensinamentos, e aos colegas do Grupo de Pesquisa em PDP – Projeto e Desenvolvimento de Produtos, Thaísa Rodrigues, Guilherme Fernando Ribeiro, Rosana Travessini, Simone Beinlich e Suzana Moro, todo meu carinho.

Ao Centro de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (GYRO) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/Campus Curitiba) e ao Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski (UTFPR/Campus Ponta Grossa), pelos ensinamentos e ajuda na avaliação do Ciclo de Vida dos processos mapeados nesta pesquisa, meu mais profundo agradecimento.

Ao amigo Henrique Holzmann, pelos desenhos do modelo desta pesquisa, feitos com “muito gosto”.

Aos amigos de jornada, em especial, Adriano Soares, Wilson Ramos e Regina Negri Pagani.

Às amigas, Andréia Antunes da Luz, Rosângela Stankowitz e Claudinéia Conceição (no Paraná), Juliana Jardim e Marcinha (em Viçosa), que me proporcionaram hospedagem e conforto durante essa jornada, meu reconhecimento e gratidão.

À Regina Beninca, pela revisão do texto desta tese.

Ao Luiz César, Secretário do PPGE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, pela costumeira atenção e profissionalismo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES, pela bolsa de fomento à pesquisa.

Ao Criador, por ter me socorrido nos momentos de maior aflição e cansaço.

Enfim, a todos que, por algum motivo, contribuíram para a realização desta pesquisa.

“Ninguém é capaz de fazer algo melhor
do que o melhor que sabe fazer”.

Thadeu Eduardo de Miranda Santos (nos
muitos momentos em que me via
angustiada).

RESUMO

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

A importância do carvão vegetal se manterá na vida de bilhões de pessoas no mundo, assim como os esforços na busca por fontes de energia capazes de suprir as necessidades com o menor impacto ambiental, maior retorno econômico e maior valorização do trabalho. Esta pesquisa propõe um modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal e, para tanto, mapeou os processos produtivos de três rotas tecnológicas de produção, a partir de madeiras de reflorestamento, em três diferentes unidades de produção localizadas nos Estados de Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul. Análises de valor ambiental e de valor econômico foram aplicadas no processo de produção de carvão vegetal em fornos circulares com liberação direta para a atmosfera dos gases gerados durante a carbonização (Processo 1); no processo com combustão dos gases em fornos-fornalha (Processo 2); e no processo com condensação dos gases (Processo 3). Na análise de valor ambiental, utilizando a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) verificou-se que o Processo 1 foi altamente impactante em 94% das categorias de impacto avaliadas. Na comparação com o Processo 1, em relação aos danos à saúde humana, o Processo 2 apresentou significativas reduções de impacto nas categorias toxicidade humana (42pp) e formação fotoquímica oxidante (61pp); em relação aos danos ao ecossistema reduções foram verificadas nas categorias ecotoxicidade terrestre (67pp), ecotoxicidade de água doce (47pp) e ecotoxicidade marinha (53pp) e quanto aos danos aos recursos o Processo 2 contribuiu com uma redução na depleção de metal (10pp) e depleção de fósseis (10pp). O Processo 3 apresentou reduções de impacto em todas as categorias quando comparado com o Processo 1 e na categoria formação de material particulado apresentou-se como o melhor dos três com uma redução de (14pp) em relação ao Processo 1 e redução significativa (45pp) ao se comparar com o Processo 2. A análise de valor econômico destaca que a viabilidade econômica da produção de carvão vegetal em processos de baixa tecnologia e baixo investimento tem se mostrado cada vez mais dependente da redução do custo operacional e, portanto, dependente da eficiência da operação. As sugestões do modelo trazem contribuições para a eficiência operacional e do desempenho ambiental.

Palavras-chave: Carvão vegetal. Produção sustentável. Avaliação do ciclo de vida. ACV carvão vegetal.

ABSTRACT

SANTOS, Sueli de Fátima de Oliveira Miranda. **Environmental and economic model of charcoal production**. 2017. 144 p. Thesis (Doctorate Degree in Production Engineering) - Federal University Technology of Parana, Ponta Grossa, 2017.

Charcoal will remain important in the lives of billions of people around the world, as well as in the efforts towards finding energy sources that are capable of meeting energy demands while having the lowest environmental impact, greater economic returns and better appreciation of work. This research proposes an environmental and economic model of charcoal production and, to achieve that, it has mapped the productive processes of three technological production routes, employing reforestation wood, in three different production units located in the states of Minas Gerais, Paraná, and Rio Grande do Sul. Analyses of environmental and economic value were conducted in the process of charcoal production in circular kilns with direct release of the combustion gases generated during carbonization to the atmosphere (Process 1); in the process with combustion of the gases in furnaces (Process 2); and in the process with condensation of the gases (Process 3). In the analysis of environmental value, employing the Life-Cycle Assessment (LCA) methodology, it was found that Process 1 was highly impactful in 94% of the impact categories assessed. In comparison with Process 1, regarding damages to human health, Process 2 presented significant impact reductions in the categories of human toxicity (42pp) and photochemical oxidant formation (61pp); regarding damages to the ecosystem, reductions were found in the categories of terrestrial ecotoxicity (67pp), drinking water ecotoxicity (47pp), and marine ecotoxicity (53pp); concerning damages to resources, Process 2 contributed with a reduction in metal depletion (10pp) and fossil depletion (10pp). Process 3 presented impact reductions in all of the categories in comparison with Process 1 and, in the category of particulate matter formation, it presented itself as the best process among the three with a reduction of (14pp) in relation to Process 1 and a significant reduction (45pp) in comparison with Process 2. The analysis of economic value highlights that the economic viability of charcoal production in low-technology and low-investment processes has been increasingly more dependent on the reduction of operational costs and, therefore, on the efficiency of the operation. The suggestions of the model bring contributions to the operational efficiency and environmental performance.

Keywords: Charcoal. Sustainable production. Life-cycle assessment. Charcoal LCA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do delineamento da tese	26
Figura 2 - Cadeia produtiva da madeira	27
Figura 3 - Polos consumidores de carvão vegetal no Brasil em 2016.....	28
Figura 4 - Etapas do processo de produção de carvão vegetal.	34
Figura 5 - Fornos convencionais circulares (da esquerda para a direita, acima): Encosta; Rabo-Quente; (da esquerda para a direita, abaixo): Superfície; JG.....	42
Figura 6 - Fluxo de produção do carvão vegetal e as destinações de produtos e resíduos.....	54
Figura 7 - Fluxo da metodologia da pesquisa.....	57
Figura 8 - Fluxo do documento A3	61
Figura 9 - Fluxo para ACV, segundo ISO 14040 e 14044.	64
Figura 10 – Sistema do produto	66
Figura 11 - Processo 1: Carbonização sem aproveitamento dos gases	76
Figura 12 - Processo 2: Carbonização com combustão dos gases.....	77
Figura 13 - Processo 3: Carbonização com condensação dos gases.....	79
Figura 14 – Fatores de influência, por etapas, no processo de carbonização da madeira.	89
Figura 15 - Fluxo do Processo 1	91
Figura 16 - Fluxo do Processo 2	93
Figura 17 - Fluxo do Processo 3	95
Figura 18 - Visão macro do modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal.....	120

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Participação percentual do extrativismo vegetal e da silvicultura no valor da produção primária florestal - Brasil - 2008-2016.....	29
Gráfico 2 - Contribuições para impactos ambientais no Processo 1	110
Gráfico 3 - Contribuições para impactos ambientais no Processo 2	111
Gráfico 4 - Contribuições para impactos ambientais no Processo 3	113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos do tempo de permanência em temperatura, por fase, no processo de carbonização da madeira.....	32
Quadro 2 - Justificativas para as características desejáveis do carvão vegetal para uso siderúrgico.....	48
Quadro 3 - Itens de controle observados para o processo de produção de carvão vegetal (resumo)	49
Quadro 4 - Estrutura do Relatório A3 Resolução de Problemas	60
Quadro 5 - Análise SWOT da cadeia produtiva do carvão vegetal	86
Quadro 6 - Descrição das etapas do modelo	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtos da Carbonização por tonelada de madeira em % Base Seca...	30
Tabela 2 – Processo Linha de Base para estimativa de Emissões por tonelada de madeira em % Base Seca	68
Tabela 3 - Análise da qualidade dos dados via Matriz Pedigree	71
Tabela 4 - Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização da madeira	77
Tabela 5 - Propriedades das madeiras, do carvão produzido e rendimentos gravimétricos, por Processo	96
Tabela 6 - Balanço de Massa Estimado do Processo 1	98
Tabela 7 - Balanço de Massa Estimado do Processo 2	100
Tabela 8 - Balanço de Massa Estimado do Processo 3	101
Tabela 9 - Emissões para 1tCV produzido, por Processo (Kg)	103
Tabela 10 - Balanço de Energia dos Processos Avaliados	105
Tabela 11 - Inventário do Ciclo de Vida (ICV), por Processo mapeado.	106
Tabela 12 - Caracterização do impacto (%) por categoria e por Processo	108
Tabela 13 - Premissas-base para análise econômica, por Processo	114
Tabela 14 - Fluxo de Caixa Anual (em R\$1.000), por Processo	116
Tabela 15 - Indicadores econômicos, por Processo.....	116

LISTA DE ABREVIATURAS

BS	Base Seca
C ₂ H ₆	Etano
CF	Carbono Fixo
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
H ₂	Hidrogênio
Há	Hectare
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
Km ²	Quilômetro quadrado
M	Metro
m ³	Metro cúbico
Mdc	Metro de carvão
Mt	Milhões de toneladas
N	Nitrogênio
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
°C	Grau centígrado
°C/h	Grau centígrado por hora
RG	Rendimento Gravimétrico
RGCV	Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal
GG	Rendimento Gravimétrico em Gases
RGT	Rendimento Gravimétrico em Atiços
S	Enxofre
SO ₂	Dióxido de Enxofre
st	Estéreo
TWh	Terawatts hora
UPC	Unidade de Produção de Carvão

LISTA DE SIGLAS

ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Assistência Rural
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
LAPEM	Laboratório de Painéis e Energia da Madeira
MDIC	Ministério do desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente
SENAR	Serviço Nacional de Aprendizagem Rural
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa

LISTA DE ACRÔNIMOS

ACV	Análise do Ciclo de Vida
C2G	<i>Cradle-to-Gate</i>
C2Gv	<i>Cradle-to-Grave</i>
CV	Carvão Vegetal
G2G	<i>Gate-to-Gate</i>
G2Gv	<i>Gate-to-Grave</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
LI	Licença de Instalação
LO	Licença de Operação
LP	Licença Prévia
PCS	Poder Calorífico Superior
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Act</i>
RV	Rendimento Volumétrico
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UA	Unidade de Análise
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS.....	20
1.1.1 Objetivo Geral.....	20
1.1.2 Objetivos Específicos.....	20
1.2 JUSTIFICATIVA.....	21
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	25
2 SEGMENTO DO CARVÃO VEGETAL.....	27
2.1 O SETOR FLORESTAL	28
2.2 O PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA	30
2.2.1 Parâmetros de Controle da Qualidade da Madeira.....	34
2.2.2 Parâmetros de Controle dos Fornos de Carbonização	39
2.2.3 Parâmetros de Controle do Carvão Vegetal	48
2.2.4 Parâmetros de Controle das Emissões do Processo Produtivo.....	53
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	56
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	56
3.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	57
3.2.1 Levantamento das Informações.....	58
3.2.2 A3 Report: Resolução de Problemas.....	59
3.2.3 Elaboração dos Fluxos dos Processos Produtivos	62
3.2.4 Análise de Valor Ambiental dos Fluxos dos Processos	64
3.2.4.1 Definição do objetivo e escopo.....	65
3.2.4.1.1 <i>Unidade de análise (UA)</i>	65
3.2.4.1.2 <i>Sistema do produto</i>	65
3.2.4.1.3 <i>Alocação</i>	66
3.2.4.1.4 <i>Seleção do método de avaliação de impacto</i>	67
3.2.4.2 Inventário do ciclo de vida (ICV).....	68
3.2.4.2.1 <i>Coleta de dados</i>	68
3.2.4.2.2 <i>Estimativa de emissões</i>	68
3.2.4.2.3 <i>Validação dos dados</i>	69
3.2.4.2.4 <i>Análise da qualidade dos dados</i>	71
3.2.5 Análise de Valor Econômico dos Fluxos dos Processos	72
3.2.6 Identificação das Oportunidades de Melhoria nos Fluxos Produtivos.....	74
3.2.7 Elaboração do Modelo.....	74

3.3 COLETA DE DADOS	75
3.3.1 Processo de Produção de Carvão Vegetal Sem Aproveitamento dos Gases (Processo 1).....	75
3.3.2 Processo de Produção de Carvão Vegetal com Combustão dos Gases (Processo 2).....	76
3.3.3 Processo de Produção de Carvão Vegetal com Condensação dos Gases (Processo 3).....	78
3.3.4 Determinação das Propriedades Físico-Químicas da Madeira e do Carvão Vegetal.....	79
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1 A3 REPORT.....	81
4.1.1 Cenário e Indicadores.....	81
4.1.2 Análise da Situação Encontrada.....	84
4.1.3 Análise da Matriz SWOT.....	85
4.1.4 Indicadores-Alvo	87
4.1.5 Meta/Objetivo.....	87
4.1.6 Recomendações/Situação-Alvo.....	88
4.1.7 Planos de Ação.....	88
4.1.8 Follow-Up.....	88
4.2 FLUXOS DOS PROCESSOS PRODUTIVOS MAPEADOS	89
4.2.1 Características dos Processos	90
4.2.2 Carbonização da Madeira.....	96
4.3 ANÁLISE DE VALOR DOS FLUXOS PRODUTIVOS	106
4.3.1 Análise do Fluxo de Valor Ambiental	106
4.3.2 Análise do Fluxo de Valor Econômico	114
4.4 OPORTUNIDADES DE MELHORIAS NOS FLUXOS PRODUTIVOS	118
5 PROPOSTA DE MODELO AMBIENTAL E ECONÔMICO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL	119
5.1 ETAPAS DA PROPOSTA DO MODELO	119
5.2 ATIVIDADES PERTINENTES ÀS ETAPAS DO MODELO PROPOSTO.....	121
6 CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E SUGESTÕES	126
6.1 CONCLUSÕES E LIMITAÇÕES.....	126
6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	128
ANEXO A - Desenho Esquemático do Modelo.....	143

1 INTRODUÇÃO

A produção de carvão vegetal no Brasil é de grande importância econômica para o país, uma vez que tem uma participação significativa na indústria siderúrgica nacional. O carvão vegetal é utilizado na produção de ferro gusa e ferroligas, que são utilizados na fabricação de aço e peças de ferro fundido, sendo, ainda, componente importante na produção do silício metálico. Além disso, abastece churrasqueiras comerciais e domésticas; gaseificadores para produção de energia elétrica em áreas rurais, indústrias químicas e de cimento.

Atribui-se ao carvão vegetal as propriedades de adsorvente, corretor do solo, combustível renovável e termorreduzidor (ANTAL; GRØNLI, 2003). Para um terço da população mundial dependente deste tipo de energia é uma questão de subsistência (IEA, 2015), principalmente em países da África e Sudeste Asiático, devendo perpetuar-se por muitos anos, salvo mudanças na matriz energética e no acesso a ela (KITUYI, 2004).

No Brasil, em 2016, foram produzidas 5,5 milhões de toneladas de carvão vegetal com madeira originada da silvicultura (90,1%) e da extração vegetal (9,9%) para abastecer a produção de 5,7 milhões de toneladas (Mt) de ferro gusa (IBGE, 2017), 1,9 Mt de fundidos de ferro e 0,3 Mt de ferroligas (MME, 2017). Do total de ferro-gusa a carvão vegetal produzido, em 2016, os produtores independentes (também denominados guseiros) produziram 3,5 milhões de toneladas de ferro gusa, consumindo cerca de 2,6 milhões de toneladas de carvão vegetal. Historicamente, o ferro gusa a carvão vegetal representava em torno de 30% do total de ferro gusa produzidos no Brasil. Ressalta-se que, no período de 2005-2016, o país produziu 6,4 milhões de toneladas de ferro gusa a carvão vegetal por ano, em média (SINDIFER, 2016). Em 2016, a retração da economia brasileira provocou queda de aproximadamente 63% nessa produção, em relação a 2008.

A produção nacional de carvão vegetal continua, em sua grande maioria, sendo feita de maneira artesanal e pulverizada entre milhares de produtores, em fornos de alvenaria de pequena capacidade de produção e baixa tecnologia, sem recuperação dos gases da carbonização e, esta produção é, principalmente, destinada aos produtores do ferro gusa (VITAL; PINTO, 2009). A produção de carvão vegetal com estes tipos de fornos representa mais de 70% do sistema de produção de carvão vegetal no Brasil (RAAD; MELO; OLIVERIA, 2014). Nesta

pesquisa, a referência a pequeno produtor ou produção em pequena escala está ligada ao uso de fornos de pequena capacidade produtiva.

Estes tipos de fornos apresentam baixo rendimento gravimétrico (RG) em carvão vegetal (massa de carvão obtida em relação à massa de madeira enforada, ambos em base seca), obtendo em sua maioria aproximadamente $\frac{1}{4}$ de conversão da madeira em carvão vegetal.

Além de emitirem quantidade significativa de gases poluentes e particulados na atmosfera, causando danos ambientais e desperdício de energia no processo (CARNEIRO et al., 2013; SANTOS et al., 2012), estes fornos apresentam carvão de qualidade variável (LATORRE, 2014), porque durante o processo o controle da carbonização é realizado de maneira subjetiva, baseado na coloração dos gases e na temperatura externa do forno e percebida empiricamente pelos operadores.

Não há recuperação dos subprodutos presentes nos gases da carbonização, nem controle de medida de emissões ou aproveitamento da energia contida, o que permitiria ganho ambiental com a redução das emissões de gases de efeito estufa, além do aumento na conversão da madeira em carvão vegetal, pelo aproveitamento do calor gerado na combustão dos gases emitidos para secagem prévia da madeira a ser carbonizada, entre outros usos.

A realidade dos pequenos produtores de carvão vegetal, no Brasil, difere da realidade das grandes empresas produtoras de ferro gusa e aço. Estas grandes empresas são detentoras de modelos mecanizados de produção que incluem grandes florestas plantadas e grandes unidades produtoras de carvão vegetal em escala industrial, a maioria com fornos retangulares de alvenaria de grande porte.

As emissões de gases oriundas do processo de carbonização são significativas, tanto no tocante ao nível de perda dos componentes presentes nos gases do processo, que deveriam ser aproveitados economicamente, quanto aos benefícios ambientais que adviriam desse aproveitamento, contribuindo, assim, com a sustentabilidade da atividade.

A cobrança da sociedade tem sido crescente quanto às questões ambiental, social e econômica das atividades humanas, seja no âmbito das organizações empresariais de produção ou serviço, seja no âmbito individual, independentemente do nível de renda. Essas cobranças abrem caminhos e oportunidades para inovação e vantagens competitivas nas organizações, ao invés de entraves e novos custos

para as atividades (IBGC, 2007), criando valor para o negócio, permitindo sua longevidade e contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

No entanto, constatou-se a falta de um trabalho que identificasse e comparasse o grau de sustentabilidade das rotas tecnológicas empregadas na produção de carvão vegetal.

Diante do exposto, uma pergunta necessita ser respondida: Que modelo de produção de carvão vegetal seria mais eficiente do ponto de vista da sustentabilidade ambiental e econômica para a realidade do produtor de carvão vegetal, a partir de fornos de pequena capacidade, no Brasil?

Nesse desafio de implementar modelos mais eficientes para a conversão da madeira em carvão vegetal, esta pesquisa tem por objetivo propor um modelo de produção, compatível com a realidade dos produtores que utilizam fornos de pequena capacidade e que agregue valor à atividade quanto aos aspectos ambiental e econômico.

1.1 OBJETIVOS

Visando atender a demanda por modelos que possam aumentar a rentabilidade do processo de conversão de madeira em carvão vegetal, atendendo aos apelos ambientais, esta pesquisa tem os seguintes objetivos:

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Mapear os processos de produção de carvão vegetal;
2. Analisar o valor ambiental e econômico dos processos mapeados;

3. Identificar as oportunidades de melhoria dos processos de produção de carvão vegetal;
4. Apresentar modelo de produção de carvão vegetal sob os aspectos ambiental e econômico.

1.2 JUSTIFICATIVA

Na produção de carvão vegetal, a rota tecnológica é definida pelo tipo de forno de carbonização utilizado e pela destinação dada aos gases do processo. Modelos produtivos que utilizam fornos de monte de terra, considerados primitivos, ainda são usados no continente africano para produzir 60% do volume total de carvão vegetal no mundo e, no continente asiático, para produzir outros 17%, destinando os gases do processo diretamente para a atmosfera (FAO, 2017).

Enquanto isso no Brasil, maior produtor mundial de carvão vegetal com 14% do total em 2014 (FAO, 2017), os modelos que utilizam fornos circulares de alvenaria, do tipo rabo-quente, ainda prevalecem a cargo de milhares de produtores (VITAL; PINTO, 2009), liberando os gases do processo para a atmosfera, ainda que melhorias tecnológicas consolidadas tenham sido implementadas neste tipo de forno nas últimas quatro décadas (BASTOS FILHO, 2016).

No modelo com viés industrial utilizando fornos retangulares de alvenaria, grandes melhorias foram implementadas, quanto à capacidade volumétrica, quanto à instrumentação, otimização do processo e da mão de obra, por meio da mecanização e melhoria no layout das plantas e no aproveitamento dos gases do processo (geração de calor pela combustão dos gases) para secagem da madeira e/ou na cogeração de energia elétrica (CGEE, 2015). Outras linhas de fornos têm sido desenvolvidas no país, tais como os fornos metálicos e as retortas contínuas, capazes de aproveitar os gases do processo na secagem da madeira e na cogeração de energia, com diminuição de tempo no ciclo de produção.

O grau de sustentabilidade destes modelos industriais de produção está diretamente relacionado aos aspectos ambientais, econômicos e sociais da atividade. (IBÁ, 2016) enfatiza o ganho ambiental de cerca de 3tCO₂/t de ferro gusa a carvão vegetal produzido com madeira originada de florestas plantadas, se

comparado com o ferro-gusa produzido a carvão mineral, por representar um ciclo fechado de emissão e resgate do CO₂ (dióxido de carbono), além de evitar a emissão de outros gases tóxicos como o SO₂ (dióxido de enxofre), responsável pela chuva ácida, quando da produção do ferro gusa a partir de carvão mineral.

A busca pela sustentabilidade é importante para a cadeia de valor do carvão vegetal, de forma a garantir que, tanto a obtenção da madeira quanto a etapa de carbonização, a logística de distribuição de insumos/produtos e o uso do carvão vegetal obedeçam a critérios sustentáveis.

A literatura apresenta, dentro da cadeia produtiva do carvão vegetal, alguns estudos direcionados para a sustentabilidade da atividade referentes:

a) ao manejo e à gestão dos recursos florestais (ARROCHA; VILLENA, 2012; IYAMA et al., 2014);

b) aos sistemas (tecnologias/equipamentos) de produção (ADAM, 2009; SANTOS; HATAKEYAMA, 2012; OLIVEIRA, 2012);

c) à redução das emissões atmosféricas pela queima dos gases (LANA, 2014; DONATO, 2017) ou pela condensação dos gases (FROELICH, 2011); ao aproveitamento dos gases para cogeração de energia elétrica (DE MIRANDA; BAILIS; VILELA, 2013; VILELA et al., 2014; CASTRO, 2014);

d) ao aproveitamento dos finos na produção de briquetes (ROUSSET et al., 2011), do licor pirolenhoso (ALMEIDA, 2012; SCHNITZER et al., 2015); e,

e) à viabilidade econômica de processos produtivos (GUIMARÃES et al., 2007; SANTOS; HATAKEYAMA, 2012; SILVA et al., 2014).

Encontra-se em curso no Brasil um projeto de subvenção a modelos eficientes e competitivos para produção de carvão vegetal, envolvendo PNUD-Brasil (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento), Departamento de Mudanças Climáticas do MMA (Ministério do Meio Ambiente), MCTIC (Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações), MDIC (Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços) e o Governo do Estado de Minas Gerais, com recursos em torno de US\$44 milhões e prazo de execução em 2019 (ESSER, 2016).

Em relação à obtenção da madeira, o setor de produção de carvão vegetal brasileiro utilizou eucalipto em 98,8% do total de carvão vegetal produzido com madeira originária de plantios florestais em 2016, segundo IBGE (2017). Essa prática diminui a pressão sobre as florestas nativas, o que não ocorre na África

Subsaariana, por exemplo, onde a obtenção da madeira originária de florestas plantadas não alcança 5% (GAZULL; GAUTIER, 2015)

O volume de emissões de carbono varia de acordo com a rota tecnológica de carbonização escolhida (BAILIS, 2009). No entanto, é prática comum o lançamento dos gases da pirólise da madeira na atmosfera (BAILIS et al., 2013)

Grandes empresas brasileiras com processos dependentes do carvão vegetal têm investido em pesquisa e desenvolvimento na busca por outras tecnologias que sejam capazes de obter maior rendimento da madeira, maior homogeneidade do carvão, menor tempo no processo de produção e ganho de escala, além do aproveitamento dos gases da pirólise para cogeração de energia (VILELA et al., 2014) e são consideradas tecnologias emergentes. Estas tecnologias, que surgiram da evolução dos fornos metálicos, em muitos casos, têm caráter industrial e ainda estão em fase de consolidação.

Da mesma forma, pesquisadores brasileiros acoplaram fornalhas aos fornos de alvenaria dos tipos circulares e retangulares, para combustão dos gases da carbonização, buscando: reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (LANA, 2014; PEREIRA et al., 2016); identificar as potencialidades de utilização do calor gerado para secagem da madeira (CARDOSO, 2015); avaliar a influência deste processo na qualidade e no rendimento gravimétrico do carvão vegetal (CARDOSO et al., 2010; COELHO, 2013; OLIVEIRA, 2012); e, a obtenção de créditos de carbono (COSTA, 2012). Esse sistema forno-fornalha que tem como característica o custo acessível (OLIVEIRA et al., 2013) é também considerado emergente, em fase de consolidação e com potencial para alcançar a maioria dos produtores brasileiros, com possibilidade de aplicação em qualquer parte do mundo.

O destaque para as diferenças entre as tecnologias utilizadas em outros estudos apresentados nesta pesquisa, e para as tecnologias emergentes está no aproveitamento dos gases da pirólise no próprio ciclo, para secagem da madeira e na cogeração de eletricidade, em escala industrial, conforme mostrado no estudo de Bailis et al. (2013) e Vilela et al. (2014). Considerando o volume histórico anual de produção de carvão vegetal no Brasil, entre 6-9 Mt, há um potencial anual de geração de energia elétrica de 3–5 TWh (DE MIRANDA; BAILIS; VILELA, 2013).

Numa recente e minuciosa revisão da literatura a respeito do estado da arte das tecnologias empregadas para queima dos gases da carbonização, Pereira et al. (2016) mencionam estudos que comprovaram a redução nas emissões de monóxido

de carbono (CO) e metano (CH₄) como maneira de mitigação dos GEE e melhoria das condições de trabalho nas unidades de produção.

Outra rota tecnológica capaz de reduzir o volume de emissões de carbono é pela condensação dos gases da pirólise. Considerando o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) de 33%, essa parte condensável é o licor pirolenhoso que representa 42% do balanço de massa do processo e é composto por 35,5% de ácido pirolenhoso e 6,5% de alcatrão insolúvel (GOMES; OLIVEIRA, 1980), dependendo da temperatura final.

Estudos recentes a respeito do uso do ácido pirolenhoso, também conhecido por extrato pirolenhoso, revelam a ação antibacteriana em coliformes (CHIAMENTI et al., 2016); a influência no desenvolvimento de plantas como as orquídeas (SCHNITZER et al., 2015); uso como eletrólito na anodização de titânio (SANDER et al., 2014); como agente conservante de cosméticos e saneantes (ALMEIDA, 2012) e como substituto do cromo em tratamentos anticorrosivos em ligas de alumínio (SILVA et al., 2012).

Ainda relacionado ao aspecto ambiental, com a melhoria da eficiência de conversão da madeira em carvão vegetal estimada em 26% de média nacional em 2014 para 32% até 2020, espera-se reduzir a necessidade de florestas plantadas. Com isto, diminuir o impacto sobre as florestas nativas e reduzir as emissões de CO₂ para além dos 8-10 milhões de toneladas projetadas para o Plano Setorial de Reduções de Emissões da Siderurgia a Carvão Vegetal, lançado em 2010 pelo Governo Federal (CGEE, 2015).

Quanto ao aspecto econômico, no modelo artesanal, o baixo custo e simplicidade construtiva têm sido as principais razões para sua prevalência, apesar da baixa produtividade. A disseminação dos modelos industriais que utilizam tecnologias mais avançadas esbarra no alto investimento exigido e na falta de consolidação tecnológica que tem inviabilizado a sua implantação até mesmo para grandes produtores.

Uma forma de verificar se a produção do carvão vegetal está sendo conduzida de maneira sustentável, do ponto de vista ambiental, é pela avaliação do seu impacto sobre as mudanças climáticas (FAO, 2017). Do ponto de vista econômico, pela análise de viabilidade da atividade e do ponto de vista social, pela avaliação do ambiente de trabalho.

Um estudo mais recente sobre sustentabilidade da produção de carvão vegetal engloba a disponibilidade da madeira, a eficiência de tecnologias de produção, o enquadramento legal da atividade, a utilização dos finos na produção de novos carvões e a importância da avaliação econômica da atividade (MARTINS; ATANASSIV; MIRIRA, 2016). Entretanto, este estudo não avaliou as emissões nem o fluxo energético do processo, apesar de considerá-los necessários.

No entanto, percebeu-se a ausência de estudos que analisassem as rotas tecnológicas em operação no Brasil, utilizando fornos circulares de alvenaria, amplamente difundidos entre os produtores de pequena escala, que contemplassem, desde o processo de carbonização até a destinação final das saídas desse processo. Assim sendo, a presente pesquisa objetiva preencher essa lacuna, apresentando um modelo de produção de carvão vegetal sob os aspectos ambientais e econômicos.

Considerando todos os aspectos expostos e enfatizando que 70% do carvão vegetal brasileiro são produzidos por produtores em pequena escala, o desenvolvimento de um modelo de produção de carvão vegetal que agregue valor ambiental e econômico se justifica.

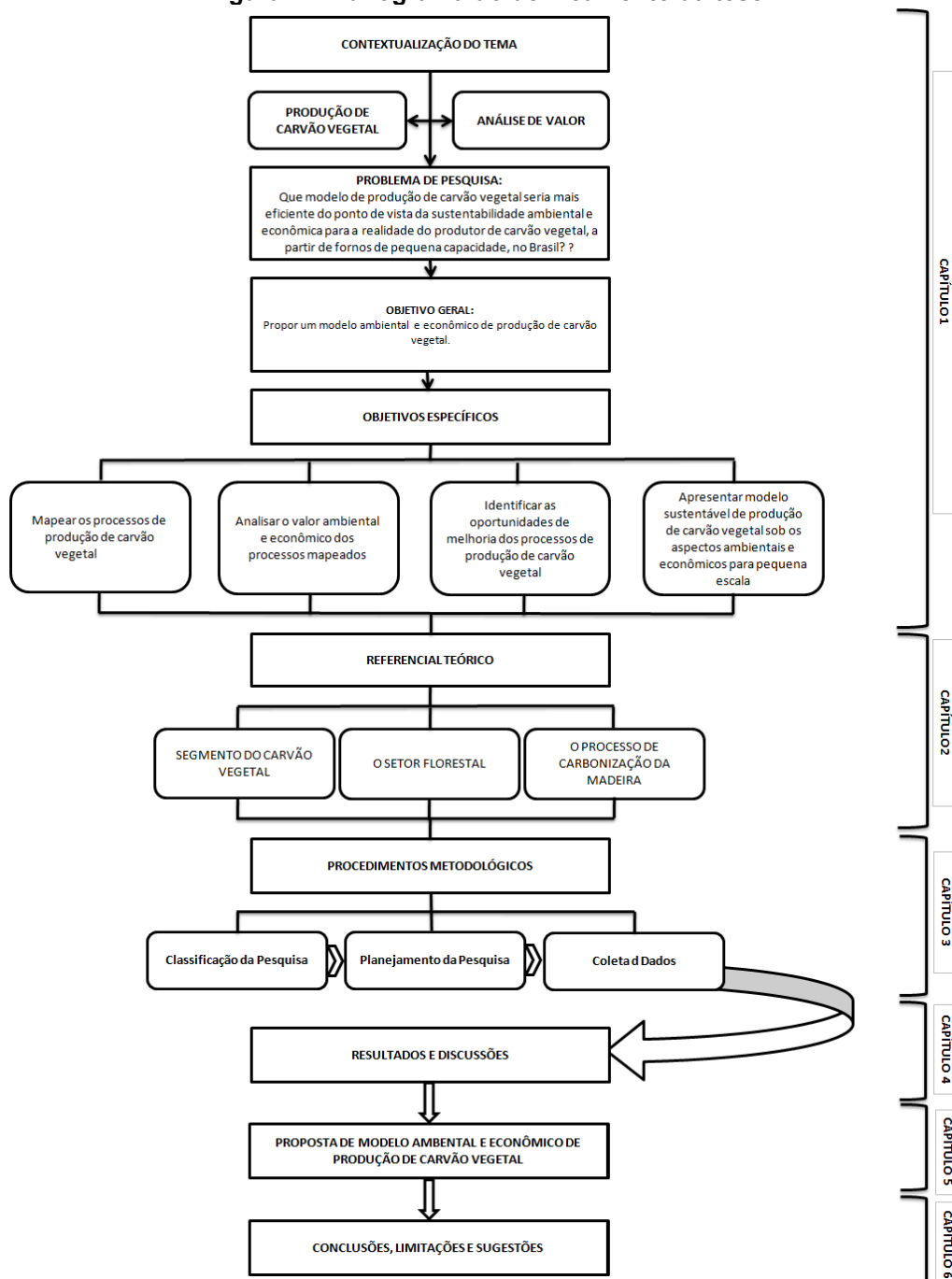
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O Capítulo 1 apresenta a contextualização do tema; a problemática do estudo; os objetivos, a delimitação e a justificativa que o orientam. A literatura que embasa esta pesquisa se encontra no Capítulo 2 e apresenta os aspectos relacionados à cadeia produtiva do carvão vegetal, mostrando as características de influência no processo. A metodologia está presente no Capítulo 3 que reúne ferramentas utilizadas para a organização e compreensão do contexto no qual a atividade está inserida; para avaliação dos impactos ambientais; da viabilidade econômica de cada rota tecnológica mapeada. O Capítulo 4 abriga os resultados encontrados e as discussões em torno da análise desses resultados. O Capítulo 5 apresenta o modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal e, por fim, no Capítulo 6 encontra-se a conclusão da pesquisa com a apresentação do

objetivo principal do estudo, assim como suas limitações e sugestões para pesquisas futuras.

O fluxograma apresentado na Figura 1 mostra, de forma geral, como este estudo foi conduzido. O tema da pesquisa foi contextualizado na sustentabilidade da produção de carvão vegetal e análise de valor da atividade, levando à pergunta de partida.

Figura 1 - Fluxograma do delineamento da tese

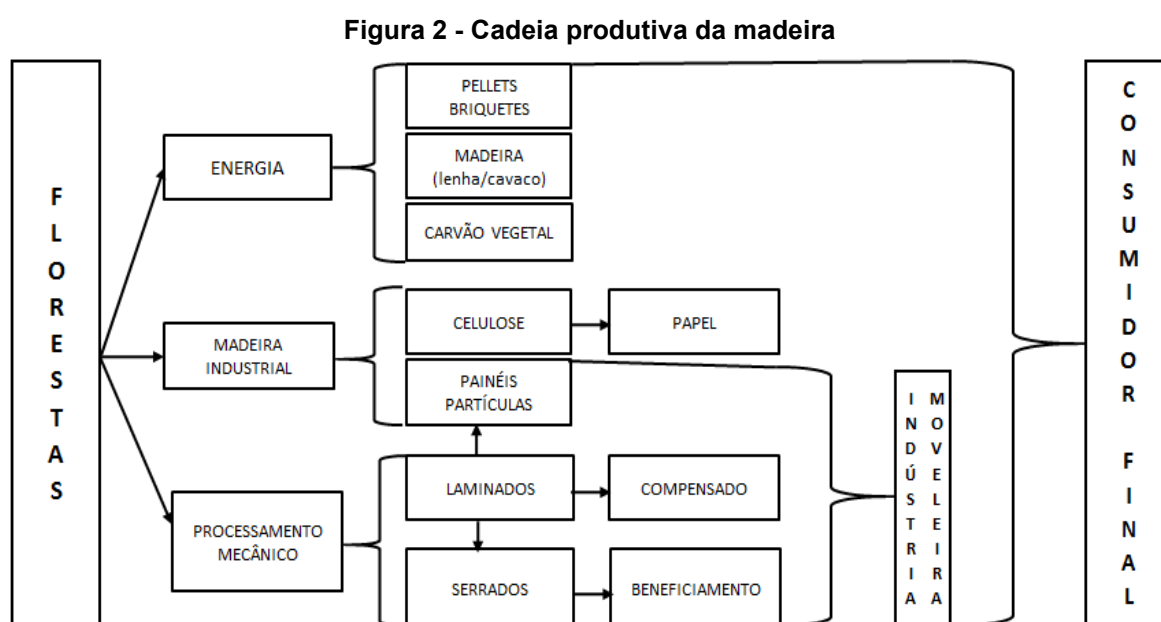


Fonte: Autoria própria

2 SEGMENTO DO CARVÃO VEGETAL

O segmento do carvão vegetal é formado por dois agentes principais: o setor florestal e o setor de energia.

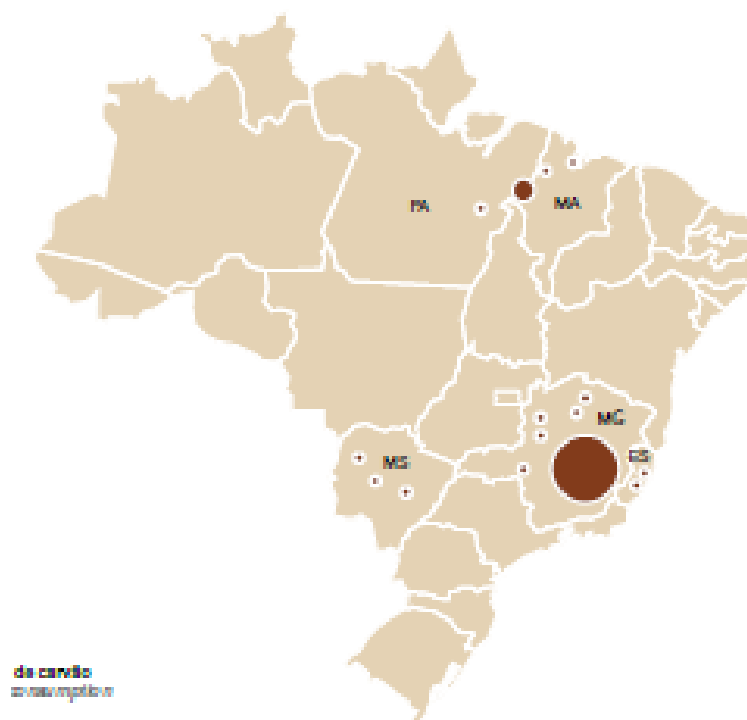
A Figura 2 indica o posicionamento do segmento do carvão vegetal na organização do setor florestal.



Fonte: Adaptado de Carvalho; Soares; Valverde (2005)

Dentro da cadeia produtiva da madeira, o carvão vegetal se destaca como fonte de energia renovável. O percentual de madeira, originada de florestas plantadas, utilizado na produção brasileira no ano de 2016 foi de 90,1%, enquanto os 9,9% restantes vieram da extração vegetal (IBGE, 2017).

O Estado de Minas Gerais é o maior produtor nacional de carvão vegetal oriundo da silvicultura (79,8% em 2016), seguido pelo Estado do Maranhão (8,0%), Mato Grosso do Sul e Bahia. Os Estados do Maranhão (29,6%) e Bahia (9,0%) lideram a produção de carvão vegetal oriundo da extração vegetal, seguidos do Mato Grosso do Sul, Piauí e Tocantins. Minas Gerais, no entanto, abriga a maioria das indústrias consumidoras desse insumo (IBÁ, 2017), como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Polos consumidores de carvão vegetal no Brasil em 2016

Fonte: IBÁ (2017)

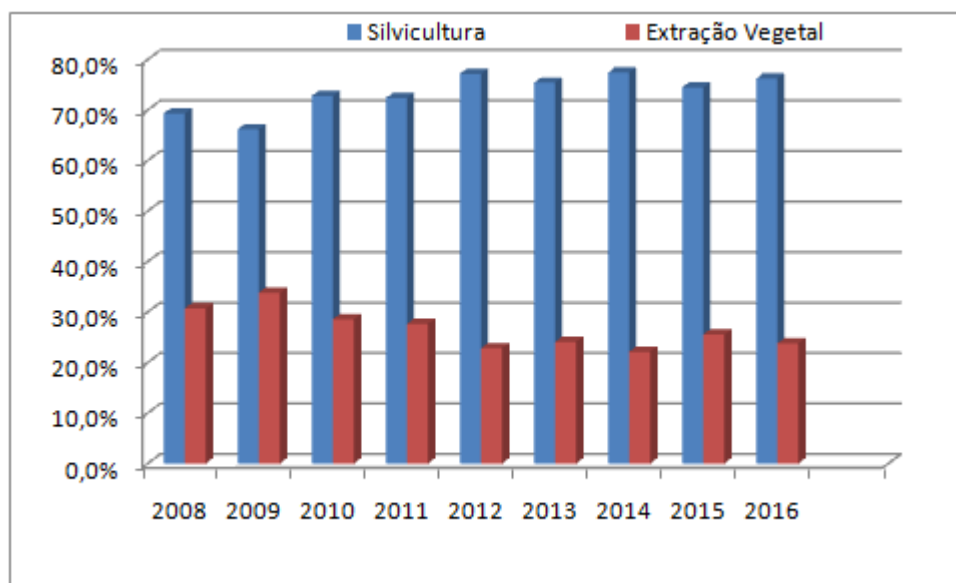
Os principais consumidores de carvão vegetal no Brasil estão concentrados nos pólos siderúrgicos dos Estados de Minas Gerais, Maranhão, Mato Grosso do Sul e Pará. Cabe salientar que, além do uso da madeira, outras biomassas têm sido pesquisadas para a produção de carvão vegetal, como os resíduos (casca e torta) da produção de biodiesel a partir do fruto do pinhão manso (VALE et al., 2011); da casca do coco babaçu (PROTÁSIO et al., 2014); do processamento do coco macaúba (EVARISTO et al., 2016), entre outros.

2.1 O SETOR FLORESTAL

A ocupação do solo brasileiro, em 2016, estava distribuída em áreas de formações de florestas naturais (58,1%); pastagens (18,1%); agricultura (5,3%); infraestrutura urbana (0,4%), silvicultura (0,6%) e outros (17,5%), segundo Observatório do Clima (2017).

Os produtos de base florestal no Brasil, disponibilizados para os mercados interno e externo, movimentaram R\$ 18,5 bilhões em 2016, dos quais R\$ 14,1 bilhões da silvicultura e R\$ 4,4 bilhões da extração vegetal, cuja evolução se apresenta no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Participação percentual do extrativismo vegetal e da silvicultura no valor da produção primária florestal - Brasil - 2008-2016.



Fonte: IBGE (2017)

Desde 2002, quando a produção de carvão vegetal utilizou aproximadamente 50% de madeira de origem nativa, esse percentual vem diminuindo continuamente, atingindo 9,9% em 2016 (IBGE, 2017).

No ano de 2016, da demanda total de energia, as fontes renováveis participaram com 43,5% na matriz energética brasileira, superior ao ano de 2015 (41,3%), em parte justificado pela diminuição no consumo da madeira usada na produção de ferro gusa a carvão vegetal (EPE, 2017). O plantio de florestas ocupou cerca de 7,84 milhões de hectares. Destes, aproximadamente 34% pelas empresas produtoras de papel e celulose; 29% pelos pequenos e médios produtores independentes e fomentados; 14% pelo setor de siderurgia a carvão vegetal, 10% por investidores financeiros; 6% pelo setor de painéis e laminados de madeira e 7% pelo setor de serrados, móveis e outros (IBÁ, 2017).

O eucalipto ocupou 72,7% da área total de floresta plantada e é a madeira mais usada na produção do carvão vegetal. Entre os principais Estados produtores de carvão vegetal, Minas Gerais se destaca pela produção a partir de florestas

plantadas e o Maranhão se destaca pela produção a partir do extrativismo vegetal (IBÁ, 2017; IBGE, 2017).

2.2 O PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

A carbonização é um processo em que a madeira é submetida a aquecimento entre 450°C e 550°C em ambiente fechado, com pequena quantidade ou exclusão total de oxigênio, durante o qual são liberados gases, vapores de água e líquidos orgânicos, permanecendo como resíduos, o alcatrão e o carvão vegetal, principalmente (PINHEIRO et al., 2006).

O processo de decomposição térmica pode resultar em destilação seca, quando realizado sob a completa ausência de oxigênio, recuperando-se todos os produtos oriundos da carbonização e obtendo-se carbono fixo em forma de carvão vegetal (FAO, 1985a; GOMES; OLIVEIRA, 1980), conforme discriminado na Tabela 1.

Tabela 1 - Produtos da Carbonização por tonelada de madeira em % Base Seca

Produtos da Carbonização	% Base Seca
Carvão (80% Carbono Fixo)	33,0
Gases Condensáveis	42,0
Ácido Pirolenhoso	35,5
CH ₃ OH (Ácido Acético)	(5,0)
H ₃ CCOOH (Metanol)	(2,0)
(Alcatrão Solúvel)	(5,0)
(Água e Outros)	(23,5)
Alcatrão solúvel	(5,0)
Alcatrão insolúvel	(6,5)
Gases Não-Condensáveis (GNC)	25,0
CO ₂ (Dióxido de Carbono – 62%)	(15,5)
CO (Monóxido de Carbono – 34%)	(8,5)
H ₂ (Hdrogênio – 0,63%)	(0,16)
CH ₄ (Metano – 2,43%)	(0,61)
C ₂ H ₆ (Etano – 0,13%)	(0,03)
(Outros)	(0,20)
TOTAL	100,0

Fonte: Adaptada de Alves (2003); Ferreira (2000); Gomes; Oliveira (1980).

A Tabela 1 identifica os produtos da carbonização, separados em frações, sendo 33% referentes ao carvão (sólida), 42% referentes à fração condensável (líquida) e 25% referentes à fração não condensável (gasosa).

Outras composições, no entanto, podem ser encontradas em outros autores, dependendo da madeira utilizada e de variáveis das reações, tais como: taxa de aquecimento, temperatura, tempo de residência dos gases e tipo de atmosfera do forno (oxidante, redutora ou neutra), segundo Alves (2003).

Em condições de campo, deste processo resultam na sequência, a liberação de vapor resultante da secagem da água contida na madeira enforada, liberação dos gases condensáveis e dos gases não condensáveis contidos na fumaça. Após resfriamento do forno, a retirada do carvão vegetal, dos atiços (tiço, atiço ou pré-carvão é a parte da madeira que não atingiu todas as fases do processo de carbonização ou que não ultrapassou a fase de torrefação – 100-275°C) e dos finos.

O processo de pirólise ou carbonização depende do tempo de exposição da madeira à ação do calor a que foi submetida (PIMENTA; BARCELLOS; OLIVEIRA, 2001). Quando mantidas as condições adequadas de aquecimento do forno, ocorre a decomposição térmica da madeira, resultando na eliminação dos seus componentes voláteis e a concentração de carbono (BRITO, 1990). A taxa de aquecimento (°C/h) e o tempo de residência dos vapores no processo definem se a pirólise é lenta ou rápida, com objetivo principal de obtenção de carvão vegetal ou bioóleo, respectivamente (GOMÉZ et al., 2000).

Quanto ao aquecimento do forno, Pimenta; Barcellos; Oliveira (2001) apontam os processos autotérmicos (aquecimento direto) e alotérmicos (aquecimento indireto) como fontes de calor. Brito; Barrichelo (1981) descrevem que a ignição feita diretamente na carga, consome parte da madeira na geração de calor para iniciar a carbonização. Este ainda é o processo de aquecimento prevalente (TACCINI, 2010). No processo alotérmico, o calor é originado nas câmaras externas, adotadas principalmente em fornos retangulares de alvenaria. Essas câmaras provêm o calor a partir da queima de resíduos florestais e servem para controlar o fluxo de oxigênio para os fornos (OLIVEIRA, 2009).

Quanto à temperatura e ao tempo de exposição da madeira à ação do calor, estudos mostram faixas de temperatura em escala de laboratório (ALMEIDA, 1982; REZENDE, 2006; SANTOS, 2010b) e de tempo de manutenção das faixas em condições de campo (OLIVEIRA et al., 2013), conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Estudos do tempo de permanência em temperatura, por fase, no processo de carbonização da madeira.

Referência Escala	Fase I Secagem (Temperatura e Tempo)	Fase II Torrefação (Temperatura e Tempo)	Fase III Carbonização (Temperatura e Tempo)	Fase IV Fixação Carbono (Temperatura e Tempo)
ALMEIDA (1982) (Laboratório)	110°C – 200°C –	180°C – 200°C –	250°C – 300°C –	Acima de 300°C –
REZENDE (2006) (Laboratório)	Até 110°C –	110°C – 250°C –	250°C – 350°C –	A partir de 350°C –
SANTOS (2010) (Laboratório)	25°C – 100°C –	200°C – 300°C –	300°C – 400°C –	400°C – 500°C –
OLIVEIRA et al. (2013) (Campo)	100°C – 150 °C 15h – 16h	150°C – 275°C 11h – 12h	275°C – 400°C 23h – 24h	400°C – 470°C 17h – 18h

Rezende (2006) identificou os seguintes fenômenos em quatro fases da carbonização da madeira:

Fase I: a água presente na madeira é evaporada, denominada fase endotérmica, quando parte da madeira enfiada é queimada, se a fonte de calor usada for interna. Almeida (1982) identificou que até 110°C ocorre a evaporação da água presente nas fibras da madeira; de 110°C a 150°C ocorre a evaporação da água das paredes das células e, de 150°C a 200°C, a água quimicamente ligada ou água de constituição é evaporada.

Fase II: entre 110°C e 250°C ocorre a torrefação da madeira, sendo que na temperatura de 180°C tem início a liberação da água de constituição pela decomposição principalmente das hemiceluloses, e pouca massa é perdida até 250°C, formando a madeira torrada ou atijo.

Fase III: entre 250°C e 350°C, com a intensificação da decomposição da celulose, ocorre expressiva perda de massa, formando-se gás, óleo e água. Ao atingir a temperatura de 350°C o carvão tem 75% de carbono fixo e se considera que a carbonização está praticamente pronta.

Fase IV: a partir de 350°C ocorre redução gradual na liberação dos voláteis, principalmente gases combustíveis, continuando a fixação do carbono.

No experimento com madeira de *Eucalyptus pellita* com 5 anos de idade, em escala de laboratório, Oliveira et al. (2010) identificaram 450°C como a

temperatura final de carbonização que apresentou maior RGCV e elevados PCS e teor de CF, considerando taxa de aquecimento de 1,25° C/min.

Dessa forma, todos os processos práticos estão baseados nesse princípio, porém de maneira empírica. As variações que porventura possam existir entre as temperaturas e os tempos de permanência ficam por conta dos aspectos técnicos do processo, tais como: tamanho e capacidade dos equipamentos e instalações, dos níveis de controle do processo, da origem do calor para aquecimento do forno (BRITO, 1990) e da qualidade da madeira.

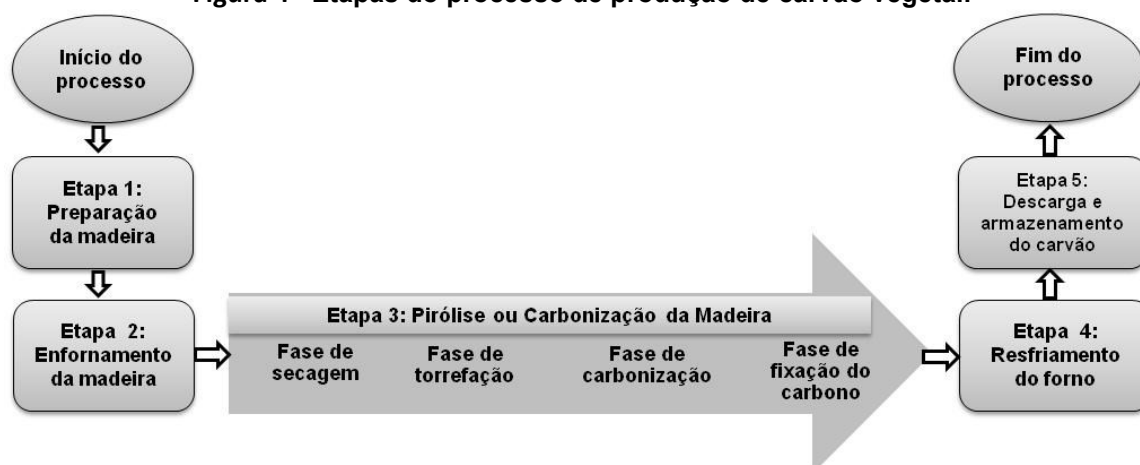
Oliveira et al. (2013) determinaram o tempo de residência de cada faixa de temperatura, conforme mostrado no Quadro 1, a partir do experimento com madeira *Eucalyptus* spp de 10–30 cm de diâmetro, de 1,5–2,20 m de comprimento, idade de sete anos, originária de espaçamento entre plantas de 3 x 3m de comprimento e com umidade média de 42,5% (base seca).

Terminado o processo de carbonização, inicia-se o processo de resfriamento do forno com a vedação de todas as entradas de ar e com o barrelamento das paredes do forno, se este for construído em alvenaria. Santos (2013) justifica a pulverização de uma mistura de barro e água nas paredes do forno, ou barrelamento, como alternativa para o resfriamento do forno. Oliveira et al. (2015) afirmam que o barrelamento acelera o resfriamento do forno e compara esta técnica com outros sistemas de troca de calor.

O processo de carbonização da madeira requer controle e para que isto ocorra é necessário identificar as etapas do processo e os parâmetros a serem controlados.

A definição do modelo de produção de carvão vegetal está relacionada principalmente à disponibilidade da madeira e ao grupo em que o produtor se enquadra. No entanto, como o custo de transporte da madeira é um fator limitante na cadeia de produção do carvão vegetal (MOTA, 2013), influencia a escolha do modelo. Definido o modelo de produção do carvão vegetal (tipo de forno) e a origem da madeira (própria ou de terceiros), o processo compreende, em geral, as seguintes etapas e fases mostradas na Figura 4.

Figura 4 - Etapas do processo de produção de carvão vegetal.



Fonte: Autoria própria

A Figura 4 sintetiza em cinco etapas o processo de produção de carvão vegetal e mostra a existência de quatro fases distintas na Etapa 3. A eficiência do processo depende do controle efetivo desta etapa.

No caso da madeira própria, a etapa de preparação inicia com o plantio. No caso da madeira adquirida de terceiros, a preparação inicia com a disposição desta nas dependências da Unidade de Produção de Carvão Vegetal (UPC). A etapa de pirólise da madeira é composta por quatro fases que não são facilmente distinguidas, cabendo ao carbonizador a tarefa de controle do processo. As fases são distinguíveis, não empiricamente quando o processo é instrumentado. Cada uma das etapas apresenta parâmetros de controle.

2.2.1 Parâmetros de Controle da Qualidade da Madeira

O planejamento da floresta destinada à produção de carvão vegetal contempla a busca por material genético e técnicas de plantio e manejo que sejam capazes de responder em produtividade e qualidade da madeira com finalidade energética (OLIVEIRA et al., 2010). A qualidade da madeira varia entre espécies, em indivíduos de mesma espécie, no próprio indivíduo, de acordo com a idade de corte (PIMENTA; BARCELLOS; OLIVEIRA, 2001). As espécies do gênero *Eucalyptus* têm sido amplamente utilizadas na produção de carvão vegetal no Brasil. Com as pesquisas de melhoramento genético tem sido possível plantar espécies selecionadas visando a homogeneização da madeira para produção de carvão

vegetal de forma a permitir a regularidade no funcionamento dos altos-fornos a carvão vegetal (CAMPOS, 2008).

Segundo a classificação botânica, o gênero *Eucalyptus* pertence à família *Myrtaceae*, subfamília *Leptospermoideae*. A família *Myrtaceae* possui em torno de 140 gêneros com cerca de 3.000 espécies. De maioria originária da Austrália, das cerca de 700 espécies do gênero *Eucalyptus* (MONTAGU; KEARNEY; SMITH, 2003), aproximadamente 20 espécies são extensivamente cultivadas no mundo. Destas, as principais espécies de *Eucalyptus* utilizadas no Brasil para a plantação de florestas energéticas são: *E. grandis*, *E. saligna*, *Corymbia citriodora*, *E.camaldulensis* e *E. urophylla*, assim como seus híbridos (SANTOS, 2010b).

A qualidade da madeira apropriada à produção de carvão é influenciada por vários fatores. O controle dessa qualidade leva em conta a avaliação das características da madeira para carbonização durante a etapa de preparação da madeira.

Trugilho (2014) enfatiza que a madeira apropriada à produção de carvão deve possuir as seguintes características: alta produtividade florestal, alta densidade básica, alta produção de massa seca, alto teor de lignina, baixo percentual de inorgânicos, alto poder calorífico, alta densidade energética, além de baixo teor de umidade.

A escolha da espécie do gênero *Eucalyptus* adaptada ao clima e solo é de suma importância na implantação de uma floresta de boa produtividade e com as características desejadas. O Brasil é líder mundial no ranking de produtividade florestal e com a menor rotação. Em 2016, a produtividade média das florestas de eucalipto no Brasil foi de 35,7m³/ha.ano (IBÁ, 2017). Nas plantações destinadas à produção de carvão vegetal, o corte da madeira é realizado entre seis e sete anos. Devido à facilidade de rebrotação, em média são realizados três cortes em cada floresta e, após o terceiro corte, é plantada uma nova muda (PINHEIRO et al., 2006).

Colocada como um parâmetro de referência na escolha das espécies florestais para o planejamento de produção de energia e para qualificação da madeira de acordo com a atividade a ser aplicada, a densidade da madeira varia entre espécies, na mesma espécie, com a idade, genética, clima, localização, manejo, entre outras (SANTOS, 2010b).

Além disso, quanto maior a densidade da madeira, maior a produção em massa de carvão, influenciando a capacidade produtiva da UPC e proporcionando

um carvão de maior densidade, (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013; CARNEIRO et al., 2014) e de maior resistência mecânica (SANTOS, 2010b), qualidades desejáveis, tanto para a indústria quanto para o consumo doméstico. Esses autores enfatizam a importância dessas correlações na tomada de decisão sobre que espécie de madeira utilizar na produção do carvão, mas alertam que outros fatores podem influenciar no rendimento do carvão.

O estudo de Santos (2010b), com clones híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis* e *E. camaldulensis* x *E. grandis* aos sete anos de idade, apresentou densidades variando entre 0,50 e 0,55 g/cm³, consideradas apropriadas para a produção de carvão. Pereira (2012) avaliou clones de *Eucalyptus spp* aos 7,5 anos de idade com resultados entre 0,531 e 0,585 g/cm³, valores superiores aos 0,500 g/cm³ recomendados (SANTOS et al., 2011). Quanto maior a densidade da madeira menos custos com transporte (SANTOS, 2010b).

Caracteriza-se a composição química elementar da madeira quando se identifica o quanto há de massa percentual nos elementos nela contidos. A madeira é composta basicamente por 50% de carbono, 44% de oxigênio, 6% de hidrogênio, além de teores de enxofre, nitrogênio e cinzas (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013).

Na composição química estrutural da madeira estão presentes a celulose, hemiceluloses e lignina. A celulose responde pela maior parte das emissões de voláteis inflamáveis (CO, CH₄, C₂H₆); as hemiceluloses respondem pela maior parte do ácido acético e a lignina contribui, em grande parte, pela formação do carvão e alcatrão (MARTINS, 1980).

O maior poder calorífico da madeira está relacionado ao maior teor de lignina presente na madeira e o poder calorífico refere-se à quantidade liberada de energia durante a queima da madeira, determinando a sua capacidade energética. Segundo estudo de Carneiro et al. (2014), a quantidade armazenada de energia, por metro cúbico, é influenciada pela densidade básica em função da idade da espécie lenhosa.

Outra característica importante na madeira apropriada à produção de carvão é o teor de umidade quando do seu enforamento. Quanto menor o teor de umidade da madeira a ser enforada maior a sua eficiência energética (QUIRINO, 2013) e maior o RG em carvão vegetal (SANTOS et al., 2012), enfatizando que quanto maior

a quantidade de água presente na madeira mais energia e tempo serão necessários para sua evaporação.

Oliveira (2012) acrescenta que o uso de madeiras com teor de umidade acima de 30% aumenta a exigência de energia (fase endotérmica) necessária à evaporação da água e que, para isto, uma parte maior da madeira enfiada será consumida. Em seu estudo, utilizou madeiras com teores de umidade entre 41% e 45%, exigindo 23% do tempo total de carbonização para a evaporação da umidade da madeira. Oliveira (2015) atribui à secagem da madeira como sendo uma das mais importantes etapas da produção de carvão.

Após o corte, a madeira em forma de toras é empilhada para secagem ao ar livre. Esta atividade é amplamente utilizada por ser de baixo custo. As toras de madeira permanecem ao ar livre entre 90 e 150 dias e, segundo o que se pratica no campo, podem apresentar umidade entre 35% e 45%. Normalmente, as toras de madeira são cortadas no tamanho apropriado ao forno onde serão carbonizadas.

No entanto, Zanúncio (2013) enfatiza que o tempo de secagem depende das características da madeira e das condições do ambiente no que se refere à temperatura, umidade relativa do ar e circulação do ar.

Em relação às características da madeira, num processo de secagem natural, Pinheiro (2013) afirma que quanto menor a relação cerne/alburno da madeira, mais permeável e mais rápido o processo de secagem; que quanto menor o diâmetro da madeira ausente de casca, mais rápido atinge os 30% de umidade. Ao pesquisar a secagem da madeira utilizando o calor gerado pela combustão dos gases da carbonização, Cardoso (2015) concluiu que a secagem por classe de diâmetro tende à menor variação no teor de umidade por proporcionar maior homogeneidade da carga de madeira em processo de secagem, se comparada à secagem de madeira com diferentes diâmetros.

Rezende et al. (2010) estudaram o clone do *E.urophylla* com oito anos de idade, mostrando que toras de menor diâmetro e sem casca atingem maiores perdas de umidade do que aquelas com casca e diâmetros maiores, comprovado por Zanúncio (2013). Pinheiro (2013) afirma que as madeiras mais densas, com o mesmo teor de umidade, exigem mais tempo de secagem e, ainda, que quanto maior o diâmetro da madeira mais lenta deve ser a carbonização, sob o risco de produzir carvão mais friável.

A secagem prévia da madeira, aproveitando o poder calorífico dos gases após sua queima em câmara de combustão (queimador), propõe-se como caminho para o aumento no RG em carvão. A queima dos gases possibilita a geração de um adicional de calor suficiente para a secagem da madeira, além de reduzir substancialmente as emissões atmosféricas. No estudo de Cardoso (2015), a redução média na umidade inicial após secagem foi de 36,5%, pela utilização do calor gerado pela combustão dos gases em um sistema protótipo de forno-fornalha.

Vale ressaltar que entre as madeiras apropriadas à produção de carvão, as espécies do gênero *Acacia*, cultivadas principalmente para uso do tanino presente em sua casca, responde por 27% da área ocupada com outros cultivos florestais no Brasil (IBÁ, 2016); apresenta produtividade com amplitude em torno de 10-25 m³/ha.ano (REMADE, 2005) e se situa como a madeira mais utilizada na produção de carvão no Estado do Rio Grande do Sul.

Cumprida a etapa de preparação da madeira, a próxima etapa é o seu enforamento. O enforamento depende das características do forno e da madeira. Estas características influenciam o tempo de enforamento da carga e, principalmente, o comportamento da carbonização.

Esta é uma etapa decisiva da operação, quando a disposição da madeira dentro do forno conduzirá à maior utilização do espaço e à permeabilidade da carga (MARRI et al., 1982), bem como à produtividade (DIAS et al., 2002). As particularidades do forno – formato, altura e largura –, ditam as características da madeira quanto ao comprimento e diâmetro, bem como a maneira como o enforamento deve ser conduzido.

Os fornos convencionais circulares acomodam a madeira na vertical, conforme Brito (1990). Todos os orifícios do forno (também chamados de baianas, tatus ou respiros) devem ficar desimpedidos. A porta é fechada com tijolos de tal modo que permita o acendimento da carga por ela (MARRI et al., 1982; OLIVEIRA, 2012).

Nos fornos convencionais retangulares, essa tarefa é mecanizada, com uso de pá carregadeira e acoplamento de implementos. A madeira é empilhada horizontalmente, no sentido da largura do forno e o enchimento se inicia do centro do forno em direção às paredes (PICANCIO, 2011), com possibilidade de aproveitamento de destocas ou raízes de árvores (REIS, 2014).

Nos fornos metálicos semicontínuos do tipo cilíndrico, a madeira é acondicionada no sentido vertical (BAILIS et al., 2013; SANTOS; HATAKEYAMA, 2012), e, no sentido horizontal no forno DPC (CGEE, 2014).

O processo de carbonização da madeira se inicia após o carregamento do forno, fechamento da porta e posterior acendimento da carga pela abertura deixada na porta, nos fornos convencionais circulares.

Em relação à origem do calor para acendimento da carga, a fonte pode ser por combustão parcial ou fonte interna de energia em que a ignição é iniciada pela queima da madeira contida na carga, quando 10-20% desta carga é queimada (BRITO, 1990), como forma de proporcionar a secagem da madeira e elevação da temperatura do forno (FAO, 1985a). As aberturas do forno permanecem abertas durante a etapa de acendimento da carga (OLIVEIRA, 2012). No caso de possuírem câmaras externas, como nos fornos retangulares, utilizam madeira e resíduos florestais.

A operação de carbonização, principalmente nos fornos circulares de alvenaria, predominantes no país, é altamente dependente da prática do carbonizador e o controle ainda é feito de maneira empírica, com baixa eficiência na conversão da madeira em carvão vegetal. Aumentar essa eficiência, a partir do controle dos fornos, é um desafio.

2.2.2 Parâmetros de Controle dos Fornos de Carbonização

A produção de carvão vegetal ocorre em dois cenários definidos por Pimenta; Barcellos; Oliveira (2001). O primeiro cenário ocorre nas grandes produções – aquelas a serviço de empresas do setor siderúrgico, com extensas áreas de florestas plantadas e plantas de carbonização, muitas delas mecanizadas, com fornos de grande capacidade produtiva para suprimento de suas necessidades individuais em carvão vegetal; o segundo, nas pequenas produções – aquelas que ocorrem em propriedades de terceiros ou áreas individuais próprias, em sua maioria utilizando fornos de pequena capacidade e baixo investimento, responsáveis pelo suprimento, principalmente, das empresas de produção independente de ferro-gusa, bem como empresas produtoras de ferroligas e silício metálico.

O meio utilizado para a realização da carbonização é considerado como sistema ou processo, sujeito a fatores, a saber: temperatura, pressão, taxa de aquecimento e fluxo gasoso, e que necessitam de efetivo controle (ZANÚNCIO, 2013). Portanto, o enforamento, ou disposição da madeira, dependerá do sistema utilizado, que pode ser artesanal ou em escala industrial.

Na prática, independentemente dos equipamentos utilizados para a obtenção do carvão vegetal, faz-se necessário o controle dos parâmetros da carbonização, tais como: o tempo, a temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento. Estes fatores atuam sobre o rendimento do processo de carbonização podendo influenciar de forma significativa os rendimentos dos produtos e as características físicas e químicas do carvão obtido (COLOMBO; PIMENTA; HATAKEYAMA, 2006). O controle dos parâmetros se dá durante a etapa de carbonização da madeira.

Brito (1992) ressalta que a obtenção do produto desejado da transformação da madeira em carvão depende da temperatura, tempo de permanência dela, velocidade de aquecimento, atmosfera, pressão e teor de umidade da madeira.

A temperatura final da carbonização influencia diretamente no rendimento dos produtos do processo (COSTA et al., 2016). Os efeitos desta temperatura e da taxa de aquecimento foram estudados por vários autores, em carbonizações de vários tipos de biomassa (TRUGILHO; SILVA, 2001; BOAS et al., 2010; COSTA, 2012). Quanto maior a temperatura final de carbonização, menor o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) e maior o rendimento gravimétrico em gases (RGG). Em contrapartida, aumenta o teor de carbono fixo e o poder calorífico do carvão (TRUGILHO; SILVA, 2001).

Pinheiro; Figueiredo; Seye (2005) enfatizam a dificuldade do controle preciso da taxa ou velocidade de aquecimento durante a operação em campo e atribui isso às muitas variáveis intervenientes do processo, como a área do forno, o fluxo dos gases e a temperatura no seu interior, além das características da madeira. Afirmam, ainda, que “a taxa de aquecimento é função da temperatura interna do forno”.

Carneiro et al. (2013) afirmam os autores que a pressão exerce pouca influência no processo de carbonização, dado que é usada a pressão atmosférica e que o controle desse parâmetro é de interesse restrito aos experimentos laboratoriais.

Ainda, que o aumento da taxa de aquecimento tende a reduzir o RGCV e pode tornar o carvão mais friável e que o aumento de pressão no processo aumenta o RGCV, diminuindo o rendimento em alcatrão.

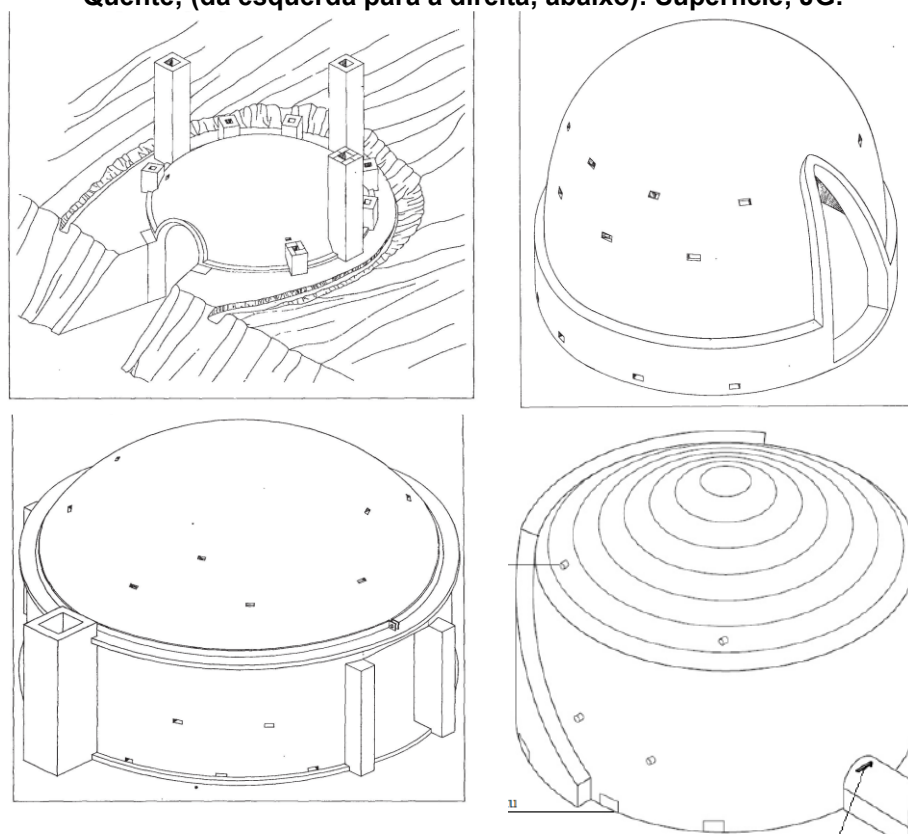
Evolução dos fornos de carbonização

Os fornos primitivos, também denominados de sistemas ou processos de carbonização parcial, desenvolvidos há milhares de anos, ainda são encontrados em muitos países. Utilizando a terra para isolamento da madeira na superfície – chamados de Meda –, podendo se apresentar na forma circular, balão e retangular; em valas ou buracos – chamados de forno poço, caieira ou trincheira –, estes fornos apresentam ciclos produtivos muito longos, custo mínimo e baixíssimo RG (FAO, 1985a; PINHEIRO et al., 2006).

Bastos Filho (2016) apresentou melhorias tecnológicas e sistemas alternativos de produção para pequenas e médias escalas, implementadas nas últimas quatro décadas. No entanto, durante auditoria técnica realizada entre jan/2011 e jul/2015 junto a 822 produtores de carvão com madeira de eucalipto, localizados nos Estados de Minas Gerais e Bahia, Araújo (2016) verificou no início da auditoria que 80% dos fornos eram do tipo rabo quente, 12% de encosta e somente 8% eram de superfície do tipo JG (este último forno desenvolvido em 2008).

Na sequência, e ainda dentro do processo de combustão parcial, vieram os fornos de tijolos, também denominados fornos convencionais, nos formatos circulares e retangulares. Dentre os convencionais circulares estão os fornos de encosta e os de superfície. Estes fornos de superfície vêm recebendo modificações ao longo do tempo, tanto na sua forma, tamanho, altura, diâmetro, capacidade de enforamento, número de aberturas, posição de chaminés, câmara de combustão externa, entre outros. O resultado se apresenta nos fornos meia-laranja argentino, colmeia brasileiro, rabo-quente, JG, mineirinho (BRITO, 1990; BRITO; BARRICHELO, 1981). Essas diferenças são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Fornos convencionais circulares (da esquerda para a direita, acima): Encosta; Rabo-Quente; (da esquerda para a direita, abaixo): Superfície; JG.



Fonte: (MARRI et al., 1982)¹⁻³; (LANA, 2014)⁴

Ainda dentro dessas modificações, surgiram os fornos convencionais retangulares de alvenaria (PINHEIRO et al., 2006), a partir do forno Missouri americano e do Schwartz europeu; este último, com compartimento externo de fornecimento de calor para o interior do forno ou câmara externa. Estes fornos deram origem aos fornos retangulares brasileiros (BRITO; BARRICHELO, 1981; FAO, 1985b) concebidos para suportar grandes volumes de madeira enfiada e mecanização das operações de carga e descarga.

A maioria das grandes empresas produtoras de aço possui plantas de carbonização utilizando fornos retangulares, cuja capacidade de processamento alcança 450 m³ de madeira ou 250 toneladas de madeira em base seca, como no modelo RAC 700 (CGEE, 2015).

A partir dos anos 1990, os fornos metálicos industriais evoluíram como visto nas tecnologias dos fornos container (BARCELLOS, 2002b; VILELA et al., 2014); Ondatec; DPC (CGEE, 2015), Bricarbrás (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012); Carbonex (TANNEAU, 2017) e Macro-ATG (ANDRADE, 2015). No entanto, algumas

dessas tecnologias não foram comercialmente comprovadas ou não estão consolidadas.

Cabe mencionar os esforços contínuos na busca por aprimoramentos empreendidos, principalmente, por pesquisadores da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e da Universidade Federal de Lavras, por empresas e pessoas ligadas à cadeia produtiva do carvão vegetal. O sistema de carbonização vem evoluindo de forma gradativa e sua adoção depende exclusivamente da sua viabilidade econômico-financeira.

Quanto mais rudimentar o processo de produção do carvão vegetal, mais rudimentares serão os equipamentos utilizados, como ferramentas manuais do tipo, enxadas, garfos, colher de pedreiro, cintel e pás, por exemplo, para construção e operação dos fornos convencionais (MARRI et al., 1982). A mecanização está presente nas grandes produções, em fornos retangulares de grande capacidade e nos fornos metálicos, e é utilizada para carga e descarga. Ainda, balança para pesagem das cargas, porém raramente encontrada nas plantas de médias e pequenas capacidades.

A característica mais marcante na evolução do processo de produção de carvão vegetal está na adoção de equipamentos periféricos, com função de auxiliar o processo de produção, visando aumento da produtividade, da qualidade e organização das plantas, com aumento dos investimentos, mas com possibilidades de agregar valor final ao setor. Entre eles estão:

a) sistemas supervisórios para controle térmico dos fornos de carbonização:

(1) aplicados em fornos convencionais retangulares de grande capacidade, consiste de instrumentação por sensores distribuídos em diferentes zonas do forno, com envio das informações dos sensores, via rádio, para a central de monitoramento e uso de *software* para análise das informações recebidas dos sensores (CARVALHO et al., 2012); e na instalação de termopares distribuídos nas paredes e cúpula dos fornos, tendo as informações enviadas por sinais elétricos a um painel de controle e tratadas via *software* por um navegador de internet (ARRUDA et al., 2011);

(2) aplicado em fornos convencionais circulares, de forma mais simples, consiste na instalação de dispositivos cilíndricos metálicos nas paredes e cúpula do forno que possibilitam a medição da temperatura interna pelo medidor infravermelho (OLIVEIRA et al., 2013; DAMÁSIO et al., 2015);

b) sistemas de condensação dos gases, acoplados a fornos de alvenaria de pequena capacidade, do tipo rabo quente, para recuperação do licor pirolenhoso:

(1) utilizando tubo coletor em chapa de zinco, em Minas Gerais (GONÇALVES et al., 2010);

(2) utilizando tubo coletor em pvc, num sistema desenvolvido para pequenos produtores de carvão vegetal, denominado Sistema Brochier, no Rio Grande do Sul (FROEHLICH, 2011; GOMES; ENCARNAÇÃO, 2012);

(3) e, em escala industrial, também utilizando tubo coletor em pvc, em Atibaia-SP (ALMEIDA, 2012).

c) câmaras de combustão dos gases da carbonização da madeira, tecnologia desenvolvida e empregada em sistemas industriais:

(1) no processo *Drying, Pyrolysis, Cooling* (DPC) a combustão dos gases da carbonização ocorre num reator e resulta em gases quentes que são usados na secagem da madeira;

(2) ONDATEC produz carvão vegetal em módulo experimental num processo contínuo por micro-ondas, com fases distintas de secagem, carbonização e resfriamento (RAAD; MELO; OLIVEIRA, 2014);

(3) no sistema Bricarbras a combustão dos gases é feita numa fornalha retangular construída em alvenaria que fornece gases quentes para secagem da madeira (SANTOS, 2007);

(4) Forno Container RIMA (FCR) que utiliza exaustão forçada obtendo energia para o processo pela combustão dos gases da carbonização com projeto de cogeração de energia elétrica (VILELA, 2016);

(5) Fornos Retangulares (FR) com combustão dos gases da carbonização que utilizam fornalha cilíndrica construída em alvenaria que fornece gases quentes para secagem da madeira (RAAD; MELO; OLIVERIA, 2014); e a

(6) Retorta Contínua (RT), forno cilíndrico metálico, verticalmente posicionado, onde a carbonização da madeira é feita sem presença de ar, utilizando os gases quentes do sistema de combustão dos gases, com cogeração de energia elétrica. O processo é controlado por sistema supervisor (CGEE, 2015);

d) câmaras de combustão dos gases da carbonização da madeira, tecnologia em desenvolvimento para utilização em sistemas de pequena e média escalas:

(1) construídas em alvenaria (BARCELLOS, 2002; CARDOSO, 2010; OLIVEIRA, 2012);

(2) compostas por peças metálicas (COELHO, 2013; COSTA, 2012; LANA, 2014);

e) para o resfriamento de fornos, de modo artificial, forçado ou induzido, o uso de tecnologia que emprega trocadores de calor (SANTOS, 2013; OLIVEIRA et al., 2015) e vapor de água injetados nos fornos (REIS, 2009; OLIVEIRA FILHO et al., 2010), se fazem presentes como forma de diminuir o ciclo de carbonização.

Usando trocadores de calor, o estudo de Santos (2013) obteve redução de até 63% no tempo de resfriamento do forno, enquanto Oliveira et al. (2015) identificaram reduções entre 12,5% e 43% em diferentes modelos de trocadores de calor, quando comparados com o resfriamento natural dos fornos de alvenaria.

Usando o método de injeção de vapor de água para acelerar o resfriamento dos fornos retangulares de alvenaria, Reis (2009) obteve um aumento de 21% no número de fornadas por ano, em função do aumento da disponibilidade dos fornos.

A maioria dos fornos de alvenaria requer barrelamentos, tão logo ocorra o fechamento de todos os orifícios (tatus, baianas, chaminé e porta), uma vez constatado o avanço da carbonização da carga. Esta prática impede a entrada de ar, iniciando o resfriamento do forno (MARRI et al., 1982). No barrelamento ou vedação dos fornos é usada uma mistura de areia, solo argiloso e água (OLIVEIRA et al., 2013) e normalmente é feito de forma manual. Experimentos em revestimentos internos e externos dos fornos retangulares industriais foram feitos com material refratário de avançada tecnologia e de forma mecanizada, por meio de bombas jateadoras (JUSTE, 2014).

O resfriamento ocorre, na maioria dos casos, de forma natural pela troca de calor com o ambiente. Nos fornos circulares, o resfriamento está completo a uma temperatura interna $\leq 40^{\circ}\text{C}$; ao abrir o forno não haverá possibilidade de reacendimento da carga (OLIVEIRA et al., 2013). De forma rudimentar, a avaliação se dá pelo toque de mãos nas paredes e porta do forno (MARRI et al., 1982).

O tempo de resfriamento dos fornos depende do tipo de material construtivo, do tamanho ou capacidade de carga, das condições climáticas e da presença de periféricos. No estudo de Oliveira et al. (2013), o tempo médio de 50 horas em condições de baixas temperaturas, representou cerca de 42% do tempo total desde o acendimento da carga. No estudo de Arruda et al. (2011), do tempo médio total de

225 horas de duração do processo, 50% foram utilizados no resfriamento dos fornos com capacidade volumétrica de 160 m³.

Com relação ao uso dos equipamentos periféricos, Martins (2014) aponta os trocadores de calor como um dos responsáveis pela redução de 50% no tempo de resfriamento dos fornos retangulares, passando de oito para três dias, aumentando a produtividade dos fornos retangulares. Assis et al. (2008) verificaram, a partir de protótipo composto por uma caçamba metálica, uma unidade isolante em alvenaria e instrumentados por termopares, redução em torno de 73% no tempo de resfriamento da carga, quando a caçamba foi posicionada fora da unidade de isolamento. Carvalho et al. (2012), ao estudarem a instrumentação por sensores térmicos e sistema supervisorio em fornos retangulares de 220 m³ de capacidade, identificaram o início da fase de resfriamento dos fornos depois da 130^a hora da carbonização, entre outros resultados do estudo.

Oliveira Filho et al. (2010) estudaram o resfriamento da carga pela introdução intercalada de vapor de água, em um forno do tipo container de escala laboratorial, instrumentado com termopares e sistema supervisorio, além de queimador de gases e caldeira acoplados. Obtiveram como resultado a diminuição do tempo de resfriamento em dois dias, comparado ao resfriamento natural.

f) estufa para secagem da madeira, com utilização do calor proveniente da queima dos gases da carbonização:

(1) construída em alvenaria, faz parte dos estudos de Barcellos (2002); Santos; Hatakeyama (2012), mas não há evidências de que esteja em operação;

(2) construída em estrutura metálica, como mostra o estudo de Cardoso (2015);

g) o desenvolvimento e implantação de tecnologias para cogeração de energia elétrica, a partir do aproveitamento dos gases da carbonização, são emergentes e promissores (DE MIRANDA; BAILIS; VILELA, 2013), recentes no Brasil, seguem em avanço contínuo. O estudo destes autores revisa a situação técnica destas tecnologias e aponta o uso da aglomeração em vários conjuntos de fornos como forma de alcançar sequência e estabilidade da saída de energia do processo, agregando renda aos produtores, reduzindo emissões atmosféricas e adicionando energia renovável. Syred et al. (2006) desenvolveram o sistema denominado CHaP – Charcoal, Heap and Power, no qual os gases do processo são utilizados na propulsão de uma turbina; a exaustão forçada é uma característica do

sistema em fornos metálicos RCK – Rima Container Kiln, com capacidade de 40 m³ e potência térmica de 3.000 KW, mostrados no estudo de Vilela et al. (2014).

A última etapa do processo de carbonização da madeira se refere ao desenformamento da carga acompanhado do acondicionamento, armazenagem e transporte do carvão vegetal.

O desenformamento ou descarregamento dos fornos se efetua após certificação de que a entrada de oxigênio não provocará a ignição da carga. Dias et al. (2002) descrevem a atividade de desenformamento dos fornos, tipo rabo quente, como sendo a mais crítica do processo, quando o trabalhador fica exposto a temperaturas ainda elevadas dentro do forno e às partículas em suspensão, também evidenciado por Pimenta et al. (2006). Porém, isto só ocorrerá se a abertura do forno for feita antes do seu completo esfriamento.

O processo de desenformamento ou descarregamento do forno se completa com a limpeza do seu interior (varrição) e desobstruções (porta, chaminé e tatus, incluindo as baianas, no caso de pequenos fornos), ocasionados pelo acúmulo de material condensado (MARRI et al., 1982).

Nos processos que utilizam fornos convencionais retangulares, essa tarefa segue a mesma rotina, mas é feita de forma mecanizada (PINHEIRO et al., 2006), assim como nos processos com fornos metálicos que usam equipamentos auxiliares como pórticos, talhas ou pontes rolantes (CEMIN, 2010; SANTOS, 2007), no auxílio ao descarregamento do carvão produzido.

O armazenamento do carvão vegetal, logo após o seu desenformamento, cumpre duas fases principais: a primeira delas, ao ar livre, tanto para o caso dos fornos convencionais circulares quanto para os retangulares. Seleccionada e segregada a madeira não carbonizada (atiços), o carvão é uniformemente distribuído e encoberto (PICANCIO, 2011). No caso de algumas plantas com fornos metálicos, o carvão é despejado numa grelha posicionada em cima do silo de armazenagem (MAIA, 2008).

A segunda fase, quando da sua expedição, dependendo das características do transporte, o produto é armazenado em sacos de ráfia, em *bigbags*, ou diretamente em gaiolas/*containers*, segundo Reis (2014), e em sacos de papel se a produção for dedicada ao consumo doméstico.

A logística de transporte na cadeia produtiva do carvão vegetal tem evoluído e cada vez mais são inseridos equipamentos de alta tecnologia, desde a plantação,

manejo e derrubada de florestas, passando pelo transporte da madeira até a planta de carbonização, culminando com o descarregamento dos fornos até o transporte do carvão vegetal para seu destino.

2.2.3 Parâmetros de Controle do Carvão Vegetal

Com base na demanda do setor siderúrgico, em virtude do maior consumo do carvão vegetal, fatores como as características da madeira, dos equipamentos utilizados para o processamento, da condução e controle do processo de carbonização por mão de obra qualificada, as condições de tempo e temperatura, a estocagem, manuseio e transporte, influenciam diretamente a qualidade do carvão vegetal esperado (LATORRE, 2014).

Santos et al. (2011) e Latorre (2014) justificam, resumidamente, as características físico-químicas do carvão vegetal para uso siderúrgico, conforme apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Justificativas para as características desejáveis do carvão vegetal para uso siderúrgico.

Características do Carvão Vegetal	Justificativa dos autores
Físicas	
Granulometria	Permite maior permeabilidade da carga e melhor fluxo dos gases. O peneiramento do carvão estabelece o tamanho mínimo das peças.
Densidade	Quanto mais densa a madeira, mais massa de carvão produzida e maior resistência mecânica.
Resistência mecânica	Quanto menos friável, maior a manutenção da granulometria, menor a geração de finos e menores as perdas.
Químicas	
Umidade	Quanto menor o teor de umidade do carvão, maior a regularidade do ritmo de operação e maior a produtividade do equipamento.
Carbono fixo	Quanto maior o teor de carbono fixo no carvão, menor o volume exigido na composição da carga.
Materiais voláteis	Quanto menor o teor de materiais voláteis no carvão, maior o teor de carbono fixo, menor a incidência de fissuras, menor redução do tamanho do carvão e menor geração de finos na carga.
Cinzas	Quanto menor o teor de cinzas no carvão, menor o volume de escória no ferro gusa.

(continua)	
Características do Carvão Vegetal	Justificativa dos autores
Alcatrão	Quanto menor o teor de alcatrão no carvão, menor a sobrecarga do “sistema de limpeza dos gases”.
Reatividade	Quanto menor a reatividade do carvão, menor a necessidade de consumo de carbono.
Poder calorífico	Quanto maior o poder calorífico do carvão menor o consumo de insumo redutor.

Fonte: Adaptado de Brito (1993); Santos et. al (2011) e Latorre (2014)

O estudo de Picancio (2011) mostra os parâmetros da qualidade do carvão vegetal exigido pela indústria siderúrgica nacional, por item de controle, conforme visto no Quadro 3.

Quadro 3 - Itens de controle observados para o processo de produção de carvão vegetal (resumo)

Item de controle	Limite inferior de especificação	Limite superior de especificação	% dos dados fora do limite de especificação
Densidade a granel	220 kg/mdc	280 kg/mdc	83
Densidade aparente	480 kg/m ³	560 kg/m ³	100
Resistência mecânica	70%	100%	10
Umidade do carvão	0%	8%	0
Materiais voláteis	19%	25%	49
Carbono fixo	75%	80%	46
Cinzas	0%	1%	20
Percentual de finos (% do Peso)	0%	16%	39
Percentual de finos (% do Volume)	0%	12%	52

Fonte: Picâncio (2011)

Os resultados de Picâncio (2011) na aplicação de ferramentas de gestão da qualidade a um processo de carbonização numa UPC composta por fornos retangulares de alvenaria, verificaram que 89% dos itens de controle estudados não atendiam às características esperadas pela usina siderúrgica cliente.

Dentre os itens de controle avaliados neste estudo, o carbono fixo apresentou 49% dos dados fora dos limites de especificação, dos quais cerca de 44% estavam acima do limite superior de 80% estipulado pela usina siderúrgica.

Neste contexto, quanto maior a taxa de aquecimento e maior a temperatura final de carbonização, maior o teor de carbono fixo e menor o RG em carvão vegetal (OLIVEIRA et al., 2010; COSTA, 2013)

É de se esperar o maior RG em carvão vegetal num processo de carbonização, o que significa obter mais massa em carvão vegetal em relação à massa de madeira enfiada, o que resulta maior produtividade do sistema ou processo utilizado. A obtenção deste RG está sujeita às variações da matéria-prima e do sistema ou processos utilizados (CARNEIRO et al., 2013), assim como do teor de carbono fixo na faixa aceitável de 75-80% (SANTOS, 2010a).

As características da madeira influenciam diretamente no RG e no teor de carbono fixo no carvão vegetal, conforme resultados apontados nos estudos a seguir:

a) em escala laboratorial, a carbonização de três diferentes diâmetros (8,1 cm, 11,4 cm e 14,2 cm) de um clone *E. grandis* W. Hill ex Maiden x *E. urophylla* S. T. Blake, taxa média de aquecimento 1,67°C/min e temperaturas de 150°C min e 450°C máx., com tempo total de carbonização de quatro horas, obtiveram RG médio igual a 33,8%, em base seca. Porém, das três classes diamétricas, a de 14,2 cm proporcionou o maior RG (34,2%), segundo estudo de Arantes et al. (2013);

b) em escala laboratorial, idades de três, cinco e sete anos e do mesmo local de origem de híbridos do *E. grandis* x *E. urophylla*, nas mesmas condições de taxa de aquecimento e temperatura utilizada por Arantes et al. (2013), com RG de 31,61%, 30,55% e 33,06%, em base seca, respectivamente (SOARES et al., 2014);

c) em escala laboratorial, híbridos do *E. grandis* x *E. urophylla* com idades de 34, 48, 61, 74 e 86 meses, em espaçamentos e locais de plantio diferentes, nas mesmas condições de taxa de aquecimento, temperatura e tempo de carbonização estudadas em alínea "a" (ASSIS et al., 2012) com RG de 32,22%, 32,97%, 31,79%, 30% e 31,19%, em base seca, respectivamente.

O controle adequado da temperatura de carbonização influencia diretamente no RG e no teor de carbono fixo no carvão vegetal, conforme resultados apontados nos estudos a seguir:

a) em um forno circular de superfície com 9 m³ de capacidade de carga, carbonizações orientadas por faixas teóricas de temperatura e controle por instrumentação interna do forno, RG médio igual a 33,18% e uma carbonização subjetiva, sem intervenção nas temperaturas medidas, apontou RG de 26,40%, ambas com 72 horas de carbonização e temperatura máxima de 480°C (DAMÁSIO et al., 2015);

b) em três fornos circulares de superfície com 12 st (1 estéreo é igual ao volume de uma pilha de madeira de um metro cúbico) de capacidade de carga, instrumentado, com controle de entrada de ar pelos “tatus” (refere-se ao espaço ocupado por um tijolo em uso, posicionado na base do forno rente ao solo), obedecendo as faixas de tempo e temperatura definidas em Pereira (2012), foram realizadas carbonizações com 70h de duração da pirólise, umidade média da madeira de 42%, resultando RGCV médio de 33%. Ajustes no controle de entrada de ar foram feitos a cada carbonização, resultando na melhoria do RG. Estas carbonizações foram realizadas com os fornos acoplados a uma fornalha de queima dos gases (OLIVEIRA et al., 2013).

c) em escala laboratorial, amostras de madeira de *Eucalyptus* spp, 0% de umidade, foram carbonizadas a temperaturas de 400°C, 550°C e 700°C, taxa média de aquecimento 1,67°C.min⁻¹, com tempo total de carbonização de 3,5h, 5h e 6,5h, respectivamente, resultando RG de 36,18%; 30% e 27,72%, em base seca, respectivamente (COSTA, 2012);

d) este mesmo autor realizou experimentos em um protótipo de forno retangular com 10 m³ de capacidade de carga. Usando madeira de *Eucalyptus* spp, sistema de combustão interna, monitoramento do tempo e temperatura (definidos por Oliveira, 2012) e conectado a uma fornalha para queima dos gases, resultaram em carbonizações com e sem queima dos gases, apontando RGCV de 30,86% e 32,49%, respectivamente (sem indicação da umidade da madeira).

Fatores ligados à composição anatômica da madeira, disposição da carga no forno, sistema de combustão (interna ou externa), faixas de tempo e temperatura de carbonização, controle da entrada de ar na carga, velocidade da frente de carbonização, entre outros, contribuem para a maior ou menor geração de atíços numa determinada carga. A geração de atíços impacta negativamente no RG em carvão vegetal, como visto nos seguintes estudos:

a) o estudo de Arruda et al. (2011) aponta rendimento gravimétrico em atíços (RGT) de 8,7% no experimento com controle de entrada de ar nos “tatus” e “câmaras externas” em temperatura máxima de 238°C e RGT de 3,7% no experimento, com controle de entrada de ar apenas nas câmaras externas, em temperatura máxima de 302°C. A explicação para a melhora no percentual do segundo experimento se deve ao menor teor de umidade da madeira e ao não uso dos “tatus”, responsável pela aceleração da carbonização no primeiro experimento.

b) na mesma linha, o estudo de Damásio et. al (2015), no experimento sem monitoramento da temperatura, apontou 21,60% de RGT, enquanto 8,85% de RGT com monitoramento.

c) Costa (2012) aponta no experimento com queima dos gases 2,91% de RGT e 2,29% de RGT no experimento sem queima dos gases.

d) Oliveira et al. (2013), a partir de um sistema composto por três fornos convencionais circulares acoplados a uma fornalha para queima dos gases, experimentou uma carbonização subjetiva, ou seja, aquela observada pela coloração dos gases e acompanhada por instrumentação. Outras três carbonizações foram monitoradas por instrumentos de medição e por faixas de tempo e temperatura. Observou na primeira carbonização uma geração de 21,6% de atíços, atribuindo o fato ao longo período em que a madeira ficou exposta às temperaturas menores que 300°. Além disso, as peças não carbonizadas tinham diâmetro entre 30-45 cm e se encontravam no centro e perto da porta do forno. Apesar do controle da temperatura por monitoramento das faixas, por instrumentação e pelos controladores de ar (“tatus”), na última carbonização, em que o percentual de atíço caiu para 3,28%, o atíço médio gerado nas três carbonizações monitoradas foi de 8,85%, considerado ainda muito alto para o sistema.

Os atíços são reaproveitados na alimentação da câmara externa (ARRUDA et al, 2011), na composição da carga da próxima carbonização, na alimentação da fornalha para queima dos gases da carbonização (OLIVEIRA et al., 2013), principalmente no acendimento dos fornos convencionais circulares e das câmaras de ignição do processo de produção em cilindros metálicos, mas alta geração de atíços é indesejável por contribuir para a diminuição do RG em carvão vegetal.

Brito (1990) define o carvão vegetal como naturalmente friável e que os vários manuseios necessários, desde o desenformamento até sua aplicação final,

agravam sua degradação. Daí, a justificativa para a produção de um carvão resistente.

Coutinho; Ferraz (1988) concluíram que quanto maior o diâmetro da madeira e maior a temperatura de carbonização, mais friável será o carvão produzido. Latorre (2014) indica que o carvão desejado para consumo siderúrgico tenha alta resistência à compressão e densidade a granel maior que 250 kg/m³.

Atribui-se a qualidade do carvão produzido à temperatura máxima da carbonização. O RG percentual em finos nos experimentos de Costa (2012) em escala de campo foi de 3,15% e 1,99%, com queima e sem queima dos gases, respectivamente, com 450°C de temperatura final. O experimento de Oliveira et. al (2013) atribui ao controle da temperatura, por instrumentação, o baixo percentual de finos (5%), quando a temperatura máxima não ultrapassou 480°C.

Os finos gerados no processo são aproveitados na produção de briquetes (TEIXEIRA; PENA; MIGUEL, 2010), para injeção nas ventaneiras dos altos fornos na produção do ferro gusa, como biochar na agricultura orgânica (terra preta de índio) e em sistemas de filtragem.

Latorre (2014), citando Cetec (1979), informa que quanto maior a temperatura de carbonização, menor o teor de voláteis, maior o teor de carbono fixo, porém menor o RG em carvão vegetal, corroborado por Costa (2012) e Trugilho; Silva (2001).

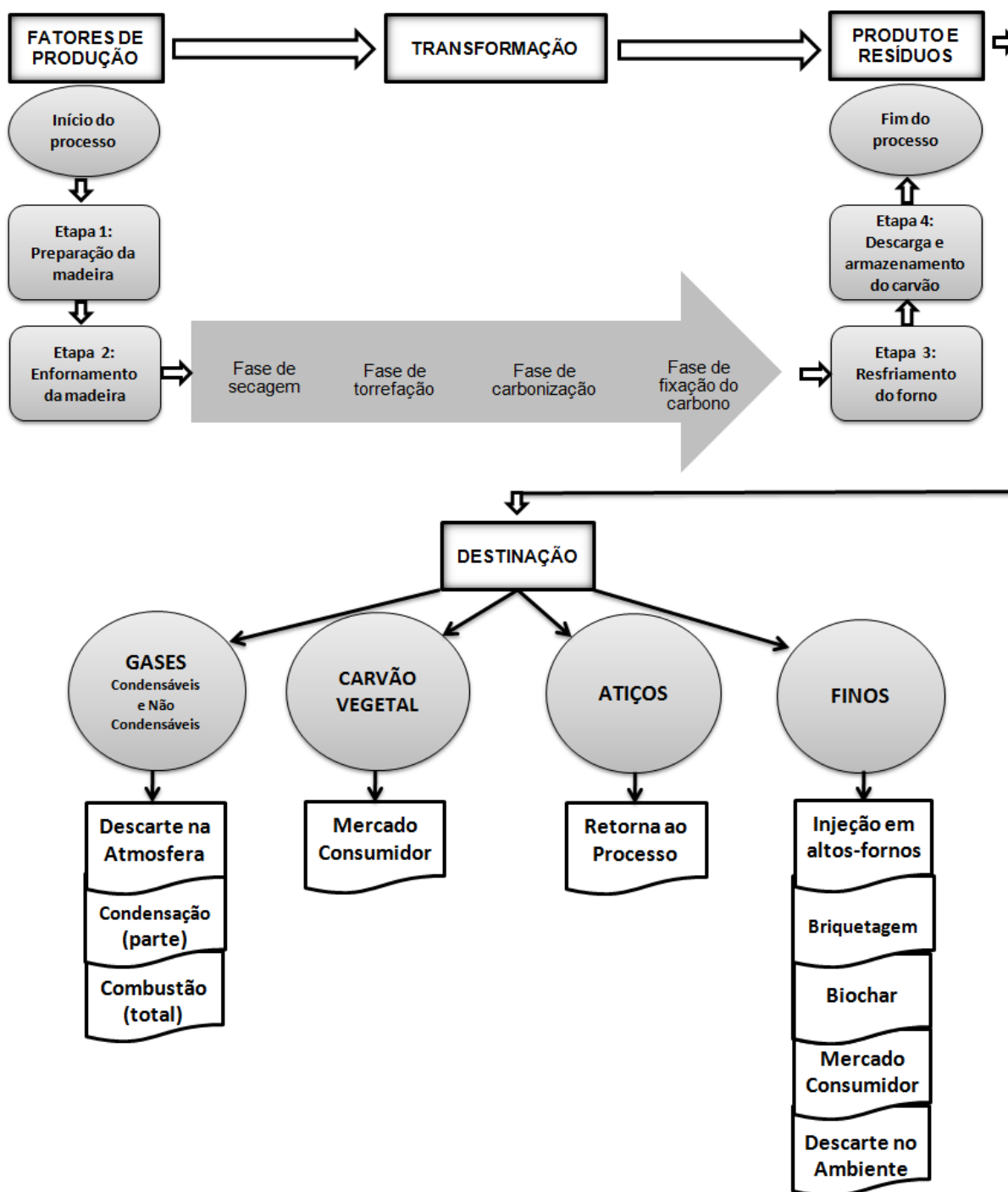
Em relação ao percentual de cinzas esperado pelo setor metalúrgico (<1%), os teores de cinzas encontrados nos experimentos de carbonização com queima e sem queima dos gases feitos por Costa (2012) foram considerados baixos (0,29% e 0,20%, respectivamente).

2.2.4 Parâmetros de Controle das Emissões do Processo Produtivo

Transformados os fatores que compõem a produção do carvão vegetal, independentemente da tecnologia empregada, os resultados se apresentarão na forma gasosa (fumaça) e na forma sólida (carvão, atíços e finos).

A Figura 6 mostra o fluxo de carbonização da madeira e as possibilidades de destinação dos gases.

Figura 6 - Fluxo de produção do carvão vegetal e as destinações de produtos e resíduos.



Fonte: Autoria própria

Percebe-se, na prática, a preocupação da maioria dos produtores de carvão vegetal no Brasil com o cumprimento da legislação, em função do acirramento da fiscalização pelos órgãos ambientais, principalmente quanto aos aspectos de emissões atmosféricas e desmatamento das florestas nativas. A exigência de emissão zero e a comprovação de origem da madeira têm sido o foco desses

órgãos, culminando, muitas vezes, com a interdição das UPCs de pequenos produtores, em sua maioria.

Com relação às grandes empresas que utilizam o carvão vegetal nos seus processos produtivos, que possuem grandes maciços florestais e plantas de carbonização em escala industrial, a prática de aproveitamento dos gases da pirólise tem viés econômico e as pesquisas avançam de acordo com os interesses próprios.

Nesse aspecto, Brito (1990) acreditava que seriam necessárias profundas mudanças na forma como a produção de carvão é vista no Brasil. Essa assertiva ainda continua atual. Quanto à literatura, percebe-se um aumento nas pesquisas e publicações quanto ao aproveitamento dos gases da pirólise, a maioria em escala laboratorial, com resultados factíveis.

Das três alternativas usadas pelas grandes empresas do setor metalúrgico para aproveitamento desses gases (BRITO et al., 2012), a condensação é a mais antiga, mas nem por isso, a mais utilizada. O extrato pirolenhoso é composto por 80-90% de água e 10-20% de compostos orgânicos. Esses autores consideram que a falta de definição e estabelecimento de uma cadeia produtiva e claramente econômica para os produtos desse processo, inviabilizam esta prática.

Os gases da carbonização, se condensados, resultam no licor pirolenhoso e nos gases não condensáveis. O resultado do processamento do licor pirolenhoso resulta em óleos leves, extrato pirolenhoso e alcatrão insolúvel. Estudos indicam a utilização do extrato pirolenhoso – ou vinagre de madeira – a partir da carbonização de madeiras da espécie *Eucalyptus* como agente conservante e saneante (ALMEIDA, 2012) e com ação antibacteriana (CHIAMENTI et al., 2016).

A segunda forma de tratamento dos gases está na queima direta durante a carbonização da madeira como forma de mitigar as emissões da carbonização, sem aproveitamento do calor gerado (CARDOSO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2013). Neste processo, apenas os gases combustíveis são queimados, resultando em CO₂ e H₂O liberados para o meio ambiente. A recirculação dos gases é a terceira alternativa em desenvolvimento nas plantas de carbonização das grandes empresas produtoras de carvão vegetal, segundo Brito et al. (2012).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo, são apresentados os aspectos relacionados à condução da pesquisa: classificação, o método aplicado para o alcance dos seus objetivos, a estruturação para a coleta e tratamento dos dados.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Do ponto de vista do objeto, classifica-se como pesquisa de campo, pois que a coleta dos dados foi efetuada enquanto ocorreram espontaneamente os fenômenos. Quanto aos objetivos, classifica-se como pesquisa exploratória por abranger levantamento bibliográfico e entrevistas não estruturadas com pessoas envolvidas em experiências práticas com o problema sob investigação. Dessa maneira, o levantamento bibliográfico tem como intuito o conhecimento do estado atual da produção de carvão vegetal – tema desta pesquisa.

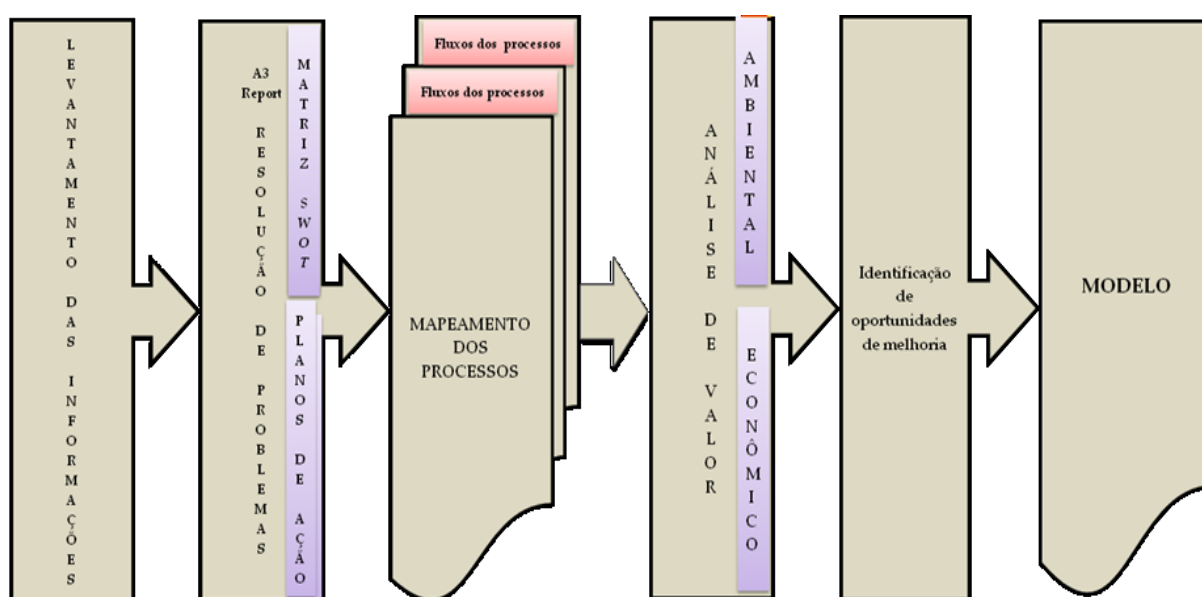
Quanto à forma de abordagem do problema, a pesquisa se caracteriza como quantitativa com nuances de qualitativa.

Em função da sua natureza, a pesquisa se classifica como aplicada, considerando que a aplicabilidade do modelo proposto objetiva a geração de novos conhecimentos úteis para o avanço da ciência. Em função dos procedimentos técnicos, a pesquisa se classifica como experimental – tendo em vista a manipulação direta das variáveis relacionadas com o objeto de estudo, com nuances de estudo de caso. Ainda, como documental, por utilizar dados de outros estudos (artigos de periódicos) e/ou dados coletados em parceria com outros pesquisadores. Quanto ao método, este se classifica como indutivo, uma vez que “pressupõe a observação de fatos particulares para elaboração de explicações gerais”, segundo Diniz; Silva (2008).

3.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

A pesquisa foi desenvolvida seguindo a metodologia sintetizada na Figura 7.

Figura 7 - Fluxo da metodologia da pesquisa



A necessidade de organização das informações encontradas a respeito da produção de carvão vegetal que levasse a um modelo de produção factível aos pequenos produtores conduziu à utilização da ferramenta A3 Report.

O uso dessa ferramenta exigiu a elaboração de uma matriz *SWOT* (sigla em inglês para os termos *Strengths* - Forças, *Weaknesses* - Fraquezas, *Opportunities* - Oportunidades e *Threats* - Ameaças). Essa matriz permitiu analisar em que contexto estava inserido o setor de produção de carvão vegetal no Brasil e possibilitou a elaboração de planos de ação. Os planos identificaram a necessidade do mapeamento dos processos conhecidos, dos processos desenvolvidos e dos processos em desenvolvimento, mas ainda não disseminados. Cada um desses processos foi analisado quanto ao seu valor ambiental e econômico, identificando-se melhorias em cada um desses processos, o que levou à elaboração de um modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal.

3.2.1 Levantamento das Informações

A procura por modelos de produção de carvão vegetal foi organizada através de Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), considerando as palavras-chave: “*charcoal production model*” e “*model charcoal production process*”, pesquisadas separadamente nas bases *Scopus*, *ScienceDirect*, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), excluindo os termos “*activated charcoal*” e “*biochar*”, para todos os anos e sem nenhum filtro inicial, como primeira busca, resultando 1.558 artigos. Na segunda busca, foi estabelecido como filtro, a palavra “*model*”, que deveria estar contida no título, resultando dessa busca 123 artigos que, após eliminação de duplicatas, resultou em 22 artigos. Os resumos desses artigos foram lidos e nenhum deles apresentou o resultado esperado. As abordagens referiam-se ao processo de gaseificação da madeira e outras biomassas, além de modelagem matemática de particularidades técnicas do processo de carbonização.

Com o intuito de verificar o estado da arte na produção de carvão vegetal, outra RBS foi organizada considerando as palavras-chave: “*charcoal production*”, “*wood carbonization*”, “*low emission of fume*” e “*gravimetric yield in charcoal*”, pesquisadas nas bases *Scopus*, *ScienceDirect*, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), excluindo o termo “*activated charcoal*” e “*biochar*” e limitando o período de 2005 até 2015 como primeira busca, resultando 6.245 artigos. Na segunda busca, foi utilizado como filtro, os periódicos qualificados em A1, A2 e B1 em Engenharias III, resultando 4.881 artigos. Na terceira busca, novo filtro utilizando somente títulos que contivessem a palavra “*charcoal*” resultou em 132 artigos, entre os quais 12 artigos eram duplicatas. Não foi identificado na literatura um modelo específico de produção de carvão vegetal. No entanto, 120 artigos foram selecionados para análise e composição do Referencial Teórico.

Buscou-se avaliar a sustentabilidade da produção de carvão vegetal que contemplasse, ao mesmo tempo, o conjunto matéria-prima/processo/produto, passando-se a excluir artigos que não apresentassem essas fases ao mesmo tempo. Ainda, bancos de teses e publicações oficiais foram utilizados para embasamento teórico.

3.2.2 A3 Report: Resolução de Problemas

O planejamento da pesquisa contou com a ferramenta *A3 Report* que possibilitou estruturar e determinar as demandas necessárias para a sua realização. Segundo Sobek; Jimmerson (2004), o Relatório A3 pode ser entendido como uma maneira ordenada e resumida de reportar uma situação de qualquer processo, em um determinado tempo, e propor ações ordenadas para melhorias neste mesmo processo, sob pontos de vista bem determinados e mensurados. Os alicerces desta forma de reportar as situações dos processos estão fortemente estruturados na abordagem PDCA, bem conhecida no âmbito das manufaturas e cuja aplicabilidade tem se estendido para diversas outras atividades. Assim, como a própria abordagem PDCA, o Relatório A3 pode e deve ser aplicado em ciclos sucessivos durante a evolução de um trabalho, para propiciar, de forma ordenada e controlada, a contínua melhoria deste mesmo trabalho e também dos que o sucederem na abordagem do tema em questão.

Adicionalmente, ao tempo da finalização de uma fase do trabalho, pode servir para explanar a visão deste mesmo trabalho naquele tempo. Para efeito de coerência com as origens que remetem à indústria manufatureira e à necessidade absoluta de se reduzir continuamente os desperdícios, o Relatório A3 apresentado deve: caber todo em uma folha A3; que toda a caracterização do problema deve caber em uma metade da folha; que as propostas e os correlatos planos de ação devem caber na outra metade; que deve ser conciso e ordenado; que deve, principalmente, fornecer ideia abrangente do problema e das soluções propostas.

Essa ferramenta é conhecida e amplamente utilizada em resolução de problemas, com bons resultados, por exemplo: em laboratórios de pesquisas de saúde humana (BASSUK; WASHINGTON, 2013, p. 3); para melhoria das operações de cuidados de saúde como uma técnica pragmática para criar mudanças organizacionais sustentáveis (GHOSH, 2012); e, como ferramenta de documentação e compartilhamento do conhecimento (KROGSTIE et al., 2014; SILVA FILHO; CALADO, 2013). No entanto, não foi verificada a aplicação dessa ferramenta para solução de problemas na produção de carvão vegetal.

Nesta pesquisa, o A3 foi composto por um Plano Mestre, que teve como objetivo orientar os rumos do estudo; de oito Planos de Ação, que buscaram identificar caminhos para a solução do problema da pesquisa e de um *Follow-up*,

que visou à apresentação do modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal com ênfase na pequena escala de produção, visto no Quadro 4.

Quadro 4 - Estrutura do Relatório A3 Resolução de Problemas

Relatório A3 Resolução de Problema	
<p><i>Cenário</i> As informações sobre o cenário do setor de produção de carvão vegetal foram buscadas em publicações oficiais; em relatórios de empresas especializadas do setor florestal; em acordos nacionais e internacionais sobre emissões atmosféricas e na literatura.</p>	<p><i>Recomendações / Situação alvo</i> Estabelecidos os objetivos, as recomendações para alcance da situação-alvo foram determinadas, suportadas pelos resultados encontrados em inúmeras pesquisas sobre o assunto</p>
<p><i>Análise da situação atual</i> Os aspectos relacionados à atividade de produção, aos impactos ambientais e econômicos foram identificados a partir de informações da literatura. Além disso, possibilitou a elaboração da análise SWOT.</p>	<p><i>Planos de ação</i> A definição dos planos de ação buscou a operacionalização das recomendações com vistas ao alcance da situação-alvo. Para tanto, os dados coletados nos mapeamentos dos processos visitados, foram utilizados.</p>
<p>Análise SWOT</p>	
<p>Pontos Fortes Oportunidades</p>	<p>Pontos Fracos Ameaças</p>
<p><i>Metas/Objetivos</i> A partir da identificação do cenário e da análise da situação atual da produção de carvão vegetal em pequena escala, foi possível identificar os objetivos específicos desta pesquisa em busca do modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal.</p>	<p><i>Follow-up</i> Finalizadas as fases anteriores, o modelo foi elaborado.</p>

Fonte: Autoria própria

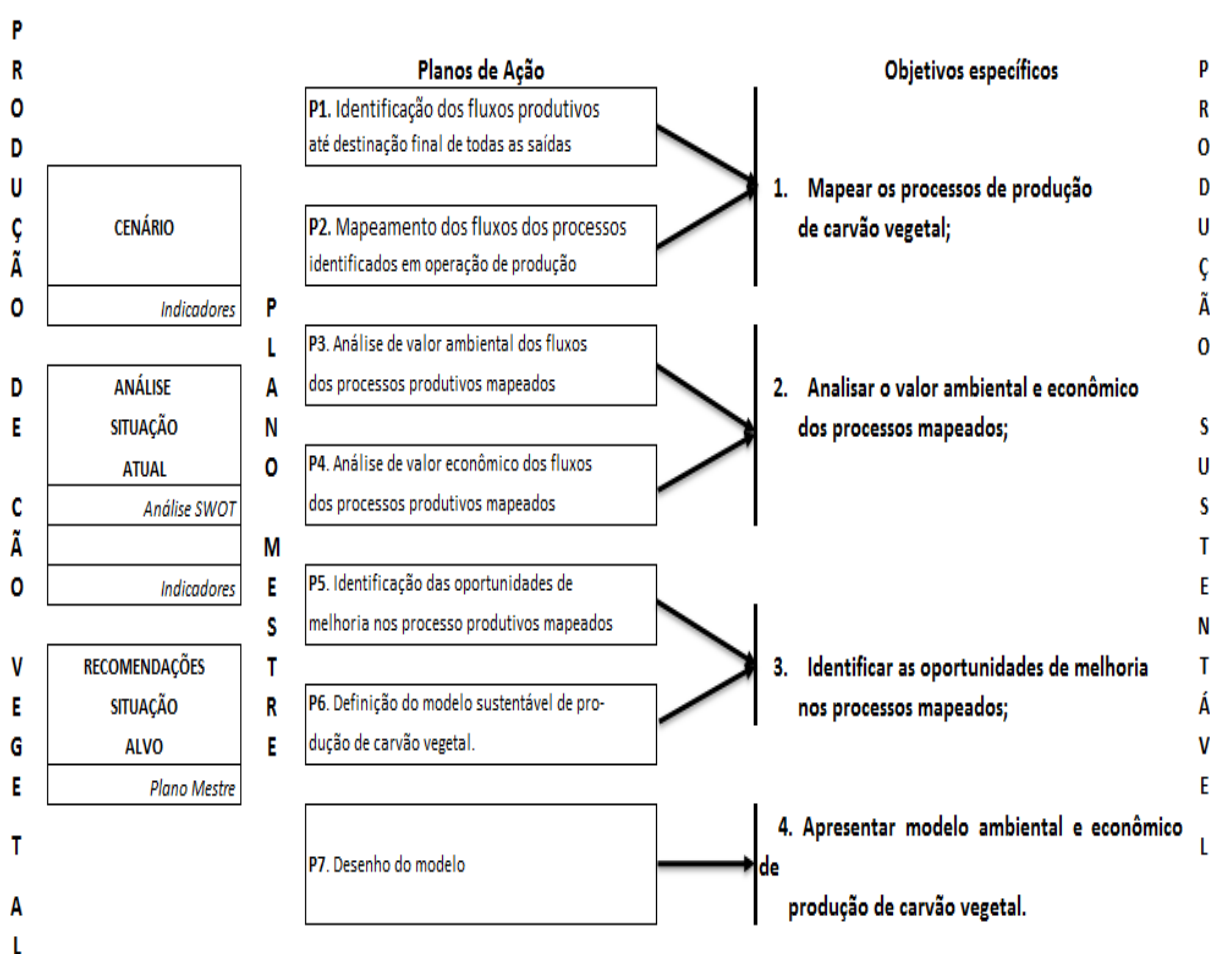
Para a análise da situação do setor de produção de carvão vegetal no Brasil utilizou-se a Matriz SWOT, a partir de dados da literatura, como forma de averiguar os impactos negativos ou positivos dos fatores e de que maneira os pontos fortes e as oportunidades ajudariam no alcance dos objetivos da pesquisa em relação aos fluxos produtivos mapeados.

Estudos recentes mostram a aplicabilidade da análise da Matriz SWOT na cadeia de valor do carvão vegetal, em estudos sobre produção sustentável de madeira na África Sub-Saariana e América Latina (MIRANDA et al., 2010); adoção de agrossilvicultura por pequenos produtores (STAINBACK et al., 2012); na avaliação de tecnologias de bioenergia (OKELLO et al., 2014); na identificação de projetos de criação de renda (KAROLI, 2013); na organização e legalização da

atividade de pequenos produtores (FANTINI; SCHLINDWEIN, 2014); na avaliação da implantação de melhorias em fornos (KATTEL, 2015); na avaliação do status da utilização das tecnologias de combustão dos gases da pirólise da madeira (PEREIRA et al., 2016) e na avaliação do uso do carvão vegetal em fogões para cozimento na África Sub-Saariana (NJOH, 2017).

O Relatório A3 foi elaborado de acordo com a Figura 8.

Figura 8 - Fluxo do documento A3



As informações contidas no Relatório A3 possibilitaram a elaboração dos fluxos dos processos produtivos, principalmente. Nesses fluxos foram identificadas as entradas, as etapas de transformação e as saídas do processo, bem como as possibilidades de destinação de cada uma dessas saídas do processo inicial. Para cada destinação possível um processo foi elaborado até a destinação final de todas as saídas.

3.2.3 Elaboração dos Fluxos dos Processos Produtivos

Os fluxos produtivos foram elaborados a partir do mapeamento dos processos consolidados e em fase de consolidação, durante as visitas técnicas a UPCs localizadas nos Estados do Paraná, Minas Gerais e Rio Grande do Sul, por meio de observações diretas nas propriedades, das instalações, equipamentos, processos e procedimentos operacionais. Para desenvolvimento do trabalho foram tomadas UPCs em três Estados: Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul. Minas Gerais por ser o maior produtor e consumidor brasileiro de CV e por abrigar instituições de pesquisas acadêmicas de referência, notadamente desenvolvimento de pesquisas em combustão dos gases da carbonização da madeira. Paraná pelo número significativo de pequenos produtores de carvão vegetal para consumo doméstico e pela proximidade da Instituição de ensino que abriga esta pesquisa. Rio Grande do Sul por abrigar a maior comunidade de produtores que praticam a carbonização da madeira com condensação dos gases.

Tanto a pesquisa bibliográfica, quanto as visitas técnicas, a observação direta e contato informal com as pessoas envolvidas na prática da carbonização, foram utilizados para a coleta de informações, para o entendimento do processo de produção do carvão vegetal e elaboração dos fluxos produtivos.

As visitas técnicas em campo, efetuadas durante o período compreendido entre os anos de 2013 e 2017, possibilitaram o mapeamento dos fluxos produtivos.

O mapeamento do fluxo produtivo sem aproveitamento dos gases (**Processo 1**) foi efetuado numa UPC Região dos Campos Gerais-PR. A propriedade possuía 200 ha, dos quais, 169 ha ocupados com floresta plantada de eucalipto das espécies *Dunnii Maiden* (70%) e *Saligna* (30%). O carvão vegetal era enviado para empacotamento e destinado ao comércio varejista para uso doméstico.

As visitas técnicas ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM/UFV-MG, entre os meses de outubro e novembro de 2015, possibilitaram o acompanhamento e coleta dos dados para mapeamento do fluxo produtivo com queima dos gases (**Processo 2**), durante experimentos de pesquisadores da Instituição, em protótipo do sistema forno-fornalha. Os resultados da carbonização foram compartilhados do estudo de Donato (2017). Uma visita técnica à UPC da Fazenda Guaxupé, no município de Divinópolis-MG, possibilitou a verificação do sistema de produção de carvão vegetal, com queima dos gases em escala industrial

em um sistema composto por fornos retangulares de grande capacidade e fornalha em alvenaria para combustão dos gases.

Para o mapeamento do fluxo produtivo com condensação dos gases (**Processo 3**), duas visitas ocorreram nos meses de dezembro de 2015 e maio de 2016 a três UPCs situadas, cada uma, em pequenas propriedades de agricultores rurais, que plantam grãos, frutas e hortaliças; criam aves e suínos em sistema de consórcio com grandes empresas e produzem carvão vegetal com coleta do licor pirolenhoso, para consumo ou venda. As instalações da UPC permitem que o proprietário decida por produzir o carvão vegetal com condensação dos gases ou não.

As propriedades estão localizadas na região do Vale do Caí, no Estado do Rio Grande do Sul. Esta região possui 19 municípios, ocupa uma área de 1.854,4 km² para uma população de 183.721 habitantes, segundo censo de 2015, onde 1.188 fornos do tipo descrito no item 3.3.3 produzem 112.260 t/ano de carvão vegetal, a partir da *Acacia mearnsii De Wild*, também conhecida por acácia negra. Os fornos visitados têm capacidade para 5, 7 e 10 st de madeira enfiada originada de reflorestamentos próprios, na maioria das vezes. O sistema de produção e coleta do licor pirolenhoso é feito no sistema conhecido por Sistema Brochier. Essa denominação, segundo Gomes; Encarnação (2012), é uma alusão à principal cidade produtora de carvão vegetal da região, cuja produção é destinada ao mercado de empacotamento para consumo doméstico.

A planta de carbonização mapeada estava localizada em uma pequena propriedade rural. O proprietário era agricultor familiar e a atividade de produção de carvão vegetal representava uma parcela importante na receita da família, além do cultivo agrícola e da criação de suínos consorciados com grandes empresas produtoras de carnes. As carbonizações foram efetuadas em março de 2017.

A mecanização da operação foi considerada adequada à capacidade produtiva da UPC e contava com uma carreta atrelada a um trator e um caminhão de pequeno porte.

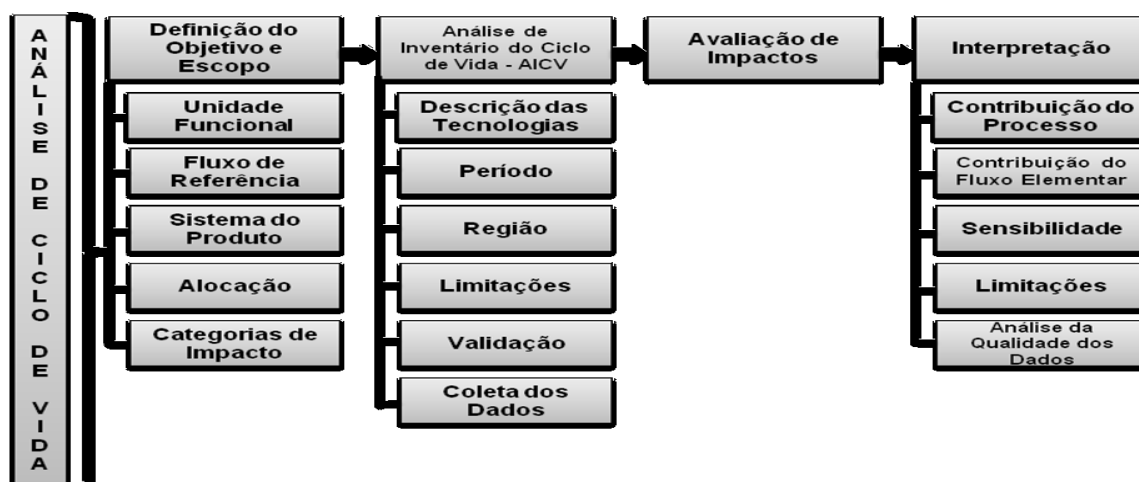
3.2.4 Análise de Valor Ambiental dos Fluxos dos Processos

Para a análise de valor ambiental dos fluxos produtivos mapeados foi utilizada a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Piekarski et al. (2017) consideram que entre a ampla gama de metodologias utilizadas para analisar o perfil ambiental dos produtos, a ACV é mais abrangente e extensiva. Khoo et al. (2008) consideram ainda, a aplicação da ACV para avaliação de desempenho de uma tecnologia de interesse em termos econômicos e sociais.

A metodologia da ACV abrange uma análise do “berço-ao-túmulo” - *cradle-to-grave* (C2Gv), quando considera os impactos ambientais potenciais sujeitos a um produto ou processo, desde a extração dos insumos, transporte, produção e uso, até a destinação final, com a quantificação dos fluxos de materiais e de energia. No entanto, a análise pode ser feita em partes determinadas do ciclo de vida: do “berço-ao-portão” - *cradle-to-gate* (C2G), do “portão ao portão” - *gate-to-gate* (G2G) e do “portão-ao-túmulo” - *gate-to-grave* (G2Gv) (ELCOCK, 2007). Ainda assim, existem diversas escolhas na execução de um estudo de ACV (alocação, entre outros). Neste sentido, esta pesquisa adotou as diretrizes utilizadas em (SANTOS et al., 2017), com algumas adaptações.

A metodologia de ACV é normatizada pelas normas ISO 14040:2006 (Avaliação do Ciclo de Vida. Princípios e Estrutura.) e 14044:2006 (Avaliação do Ciclo de Vida. Requisitos e Diretrizes). De acordo com estas normas, as informações necessárias para a ACV são as identificadas na Figura 9.

Figura 9 - Fluxo para ACV, segundo ISO 14040 e 14044.



Fonte: ABNT, 2001

3.2.4.1 Definição do objetivo e escopo

Nesta ACV, foram analisados vários impactos ambientais relativos à produção artesanal em pequena escala, em fornos circulares de alvenaria, que representam cerca de 70% da produção brasileira (BRITO, 2010), considerando o carvão vegetal produzido por meio das tecnologias utilizadas nos Processos 1, 2 e 3. O escopo da ACV foi descrito nas subseções 3.2.4.1.1 a 3.2.4.1.4.

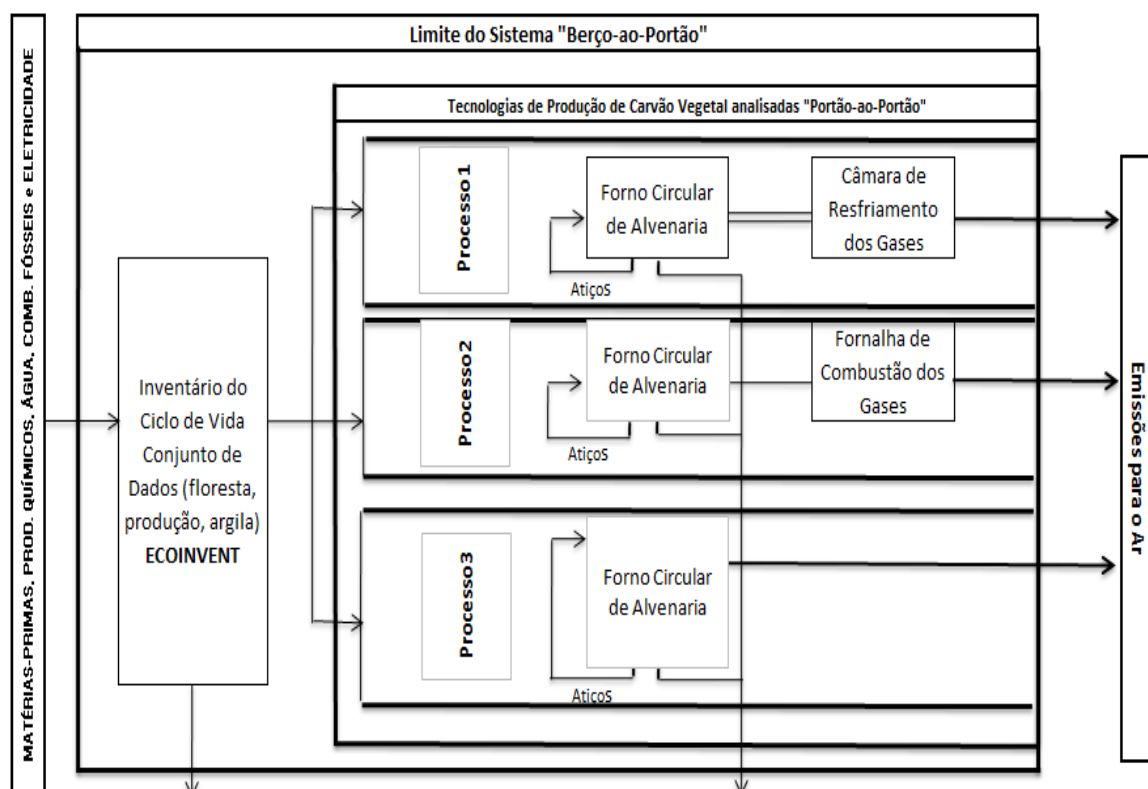
3.2.4.1.1 *Unidade de análise (UA)*

A UA definida para esta pesquisa foi de 1 kg de carvão vegetal, estabelecida como fluxo de referência. Autores como Khoo; Tan; Sagisaka (2008); Bailis et al. (2013) e Ekeh; Fangmeier; Müller (2014) utilizaram a massa de carvão como UA pela facilidade de comparação.

3.2.4.1.2 *Sistema do produto*

O limite do sistema se refere à análise das etapas do ciclo de vida do produto e esta pesquisa analisou a fronteira *cradle-to-gate* (C2G), escopo que engloba a extração dos insumos e a fabricação do produto, excluindo as fases subsequentes (CAMPOS, 2012), conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 – Sistema do produto



Fonte: autoria própria

Os dados de processos tecnológicos utilizados como cenário nesta pesquisa foram da base de dados ecoinvent. Para o consumo argila (Clay) utilizada no barrelamento e vedação dos fornos foi utilizado o dataset: "Clay {GLO}| market for | AllocDef, U". Para a madeira, o dataset utilizado foi: "Roundwood {GLO}| harvest, secondaryforest | AllocDef, U". Os dados dos processos produtivos foram obtidos por meio de experimentos, conforme 3.2.3.

Outros sistemas do produto foram definidos em estudos anteriores; G2G por Piekarski et al. (2017), C2G_v por e C2G por Bailis et al. (2013) e Santos et al. (2017).

3.2.4.1.3 Alocação

De acordo com Ramirez (2009), "a alocação consiste na divisão adequada dos fatores de impacto do processo entre o produto principal e os subprodutos do sistema. A sua utilização se faz necessária quando um sistema a ser estudado

apresenta um processo multifuncional que utilize uma ou mais funções para o ciclo de vida”.

A alocação é necessária no processo de carbonização, porque além do carvão vegetal também são produzidos os finos. Normalmente, as peças maiores são comercialmente valorizadas e os finos são desconsiderados (KAMMEN; LEW, 2005). Os finos possuem potencial para uso como insumo energético (PEREIRA et al., 2016; ROUSSET et al., 2011) e seu uso contribui para a redução das emissões de GEE (FAO, 2017). No entanto, esta pesquisa analisou o pior dos cenários (todo o impacto alocado no carvão), o que particularmente prejudica o Processo 3, dado que a alocação não é dividida com o licor pirolenhoso. O carvão vegetal foi considerado como fluxo principal, isto é, todo o impacto foi nele alocado.

3.2.4.1.4 Seleção do método de avaliação de impacto

Para selecionar o método de avaliação de impacto a ser aplicado nesta pesquisa, foram realizados dois passos:

(1) identificação das categorias de impacto relevantes para os processos de carbonização: as categorias de impacto foram selecionadas considerando a consulta feita aos especialistas Ugaya e Piekarski (2016).

(2) identificação do método de avaliação de impacto que continham essas categorias de impacto. Para a seleção do método de avaliação de impacto do ciclo de vida, foi realizada uma análise acerca de qual dos métodos contemplava as categorias de impacto, a saber: mudanças climáticas, material particulado, depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, acidificação, eutrofização e consumo de água. Além dessas, foram incluídas: energia fóssil, recursos abióticos e uso da terra, tendo em vista que são usualmente avaliadas quando se compara fontes de energia fósseis com energias renováveis, muito embora este estudo não tenha realizado essa comparação.

Identificou-se que o ReCiPe Endpoint contemplava todas estas categorias de impacto, justificando sua seleção. Foi considerada a versão (H/A) V.1.12, e os cálculos foram realizados com o auxílio do software SimaPro 8.2.3.0.

3.2.4.2 Inventário do ciclo de vida (ICV)

Os dados das tecnologias e processos utilizados, assim como a região e o período de execução dos experimentos, estão descritos nos itens 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3 e identificados nas Figuras 11, 12 e 13.

3.2.4.2.1 Coleta de dados

Os itens 4.2.1.1 a 4.2.1.3 apresentam as características e dados técnicos dos Processos mapeados. A Tabela 4, no item 4.2.2, apresenta os dados de entrada dos três Processos, indicando as propriedades das madeiras utilizadas e dos carvões obtidos, além dos parâmetros e RG das carbonizações efetuadas.

3.2.4.2.2 Estimativa de emissões

Nem todos os dados de emissões foram obtidos em laboratório, tendo sido necessário realizar cálculos. Assim, a composição química das diferentes substâncias foi estimada conforme as porcentagens apresentadas na Tabela 1 - item 2.2. Os compostos fenólicos dos alcatrões foram identificados e calculados conforme Alves (2003). Os dados encontrados foram considerados como Processo Linha de Base para o cálculo das emissões dos três Processos avaliados, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Processo Linha de Base para estimativa de Emissões por tonelada de madeira em % Base Seca

Produtos da Carbonização	% Base Seca
Carvão (80% CF)	33,00
Gases Condensáveis	42,00
Ácido Pirolenhoso	35,50
(Ácido Acético)	(5,00)
(Metanol)	(2,00)
(Alcatrão solúvel)	(5,00)
(Fenol - 0,2%)	(0,01)
(Guaiacol - 0,1%)	(0,005)
(Cresol - 0,1%)	(0,005)

(continua)

Produtos da Carbonização	% Base Seca	
(o-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%)	(4,0)	
(Água e outros)	(23,50)	
Alcatrão Insolúvel	6,50	
(Fenol – 6,00%)	(0,39)	
(Guaiacol – 6,00%)	(0,39)	
(2,6-Xilenol – 1,00%)	(0,065)	
(Cresol – 1,00%)	(0,065)	
(o-Cresol – 6,00%)	(0,39)	
(p,m-Cresol – 7,00%)	(0,45)	
(4-Etil-guaiacol – 1,00%)	(0,065)	
(4-Propil-guaiacol – 0,10%)	(0,0065)	
(3,5-Xilenol – 5,00%)	(0,325)	
(Siringol – 35,00%)	(2,275)	
(4-Metil-siringol – 11,00%)	(0,715)	
(4-Etil-siringol – 5,00%)	(0,325)	
(Água (16~20%) – 15,90%)	(1,0335)	
Gases Não-Condensáveis		25,00
(H ₂ – 0,63%)	(0,16)	
(CO – 34%)	(8,50)	
(CO ₂ – 62%)	(15,50)	
(CH ₄ – 2,43%)	(0,61)	
(C ₂ H ₆ – 0,13%)	(0,03)	
(Outros – 0,81%)	(0,20)	
Total		100,00

Fonte: Adaptada de Alves (2003); Ferreira (2000); Gomes; Oliveira (1980).

3.2.4.2.3 Validação dos dados

A elaboração dos balanços de massa e de energia contou com os dados técnicos dos três Processos e com os dados contidos nos estudos de Alves (2003); Gomes; Oliveira (1980); Ferreira (2000) e Soares et al. (2014).

Tomando como linha de base os estudos de Gomes; Oliveira (1980) e de Ferreira (2000), foram desenvolvidos os balanços de massa e energia dos Processos 1, 2 e 3. Para efeito de cálculo das massas foi utilizada, para cada Processo, uma razão entre o gás total de cada Processo mapeado e o gás total do Processo de base, denominada relação gás-gás.

Dessa forma, obtiveram-se os três fatores multiplicativos que possibilitaram a transferência dos dados da linha de base para os dados dos experimentos de campo nos Processos 1, 2 e 3, pela Equação 1.

$$\frac{\text{Massa de Gás Total do Processo Mapeado (kg)}}{\text{Massa de Gás Total do Processo Base (kg)}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Massa de Gás Total do Processo Mapeado = Massa da madeira em base seca (M_{adBS}) – (Massa do $CV_{produzido}$ + Massa do $Atiço_{gerado}$ + Massa dos $Finos_{gerados}$)

Massa de Gás Total do Processo Base = Massa dos Gases Condensáveis (GC) + Massa dos Gases Não-Condensáveis (GNC).

A Equação 1 retrata o pressuposto de que o carbono contido na madeira passa para o carvão ou para os gases e, portanto, aquele que não aparece na forma de CF deve estar presente nos gases. Sendo assim, na relação da Equação 1, o volume de gases é diretamente proporcional à massa enforada e inversamente proporcional ao CF e RGCV.

Adicionalmente ao Processo Linha de Base (ver Tabela 2), as massas de NO_2 e SO_2 foram estimadas como realizado em Soares et al. (2014). Os percentuais foram de 0,03% para N e 0,27% para S, gerando 1,0 kg de NO_2 e 5,4 kg de SO_2 para o Processo Linha de Base. Os valores referentes de dióxido de nitrogênio (NO_2) e de dióxido de enxofre (SO_2) foram obtidos considerando a transformação destes óxidos decorrente da diferença entre o enxofre e o nitrogênio presentes na madeira com seis anos de idade e no carvão vegetal obtido. Os valores de N (0,205%) e S (0,325%) para a madeira e N (0,170%) e S (0,030%) para o carvão vegetal, obtidos de (SOARES et al., 2014), foram calculados pela média dos seus valores em madeira de cinco e de sete anos de idade.

No Processo 2, com a queima dos gases, o balanço de massa sofreu alterações. Foi assumido que todos os gases foram reduzidos na mesma proporção da redução do CH₄ (66,5%), menos para o CO (70%) e para o H₂ (100%).

Com relação às emissões de material particulado (MP), um dos mais impactantes para a saúde humana (vias respiratórias), a estimativa foi calculada tomando como base o conceito de Lora (2002) que considera qualquer substância na atmosfera, na forma líquida ou sólida, exceto água pura, com dimensões superiores às moleculares e de origem primária ou secundária. Os particulados de origem secundária são aqueles formados por reações químicas (fase gasosa) na atmosfera gerando compostos condensáveis. Nesta pesquisa foram avaliadas as partículas classificadas como finos, com diâmetro $d_p < 2,5 \mu$.

Entre os estudos anteriores apontados, a validação dos dados foi especificada apenas por Ekeh; Fangmeier; Müller (2014).

3.2.4.2.4 Análise da qualidade dos dados

Os critérios para análise da qualidade dos dados utilizados nesta pesquisa foram baseados na Matriz Pedigree de Weidema; Wesnaes (1996) e mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise da qualidade dos dados via Matriz Pedigree

Critério	Informação desejada	Informação obtida		
		Processo 1	Processo 2	Processo 3
Tecnologia	Em uso	Sistema forno circular de alvenaria sem aproveitamento dos gases da pirólise	Sistema forno circular de alvenaria, câmara de combustão dos gases e chaminé em alvenaria.	Sistema forno circular de alvenaria e condensadores
Temporal	2017	Dados de 2017	Dados de 2015: dois anos de diferença em relação ao ano deste estudo.	Dados de 2017
Regional	MG, PR e RS	Dados de uma área representativa do setor, por unidade (forno).	Dados de uma área similar, em escala protótipo.	Dados de uma área representativa do setor, por unidade (forno).

(continua)

Critério	Informação desejada	Informação obtida		
		Processo 1	Processo 2	Processo 3
Completeza	100% dos casos	Os dados representam 70% do setor	Se considerada a combustão dos gases, os dados representam alguns locais. Se considerada sem combustão dos gases, os dados representam cerca de 70% do setor.	Se considerada a condensação dos gases, dados com representatividade conhecida e localizada. Se considerada sem condensação dos gases, os dados representam cerca de 70% do setor.
Consistência	Coleta de dados e método para cálculo das emissões	Balança para pesagem da madeira e dos produtos. Sistema sem instrumentação.	Termopares tipo K para medidas de temperaturas; tubos de cobre para coleta dos gases no duto de condução e na chaminé; <i>gasboard</i> 9030 <i>Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. Ltda</i> , filtros de precisão - FIT1 e FIT2; <i>gasboard</i> 3100 <i>Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. Ltda</i> , para procedimentos de coleta e leituras da composição porcentual base volume dos gases.	Tubos cilíndricos e leitor de temperatura no interior do forno; tubos de PVC para resfriamento dos gases.

Fonte: Baseado em Weidema; Wesnaes (1996)

3.2.5 Análise de Valor Econômico dos Fluxos dos Processos

A análise de valor econômico para cada um dos processos contou com ferramentas preconizadas de Engenharia Econômica, a partir da elaboração dos fluxos de caixa do tipo convencional, como sendo, segundo Müller; Antonik (2012) “aqueles que apresentam apenas uma variação de sinal no decorrer do tempo analisado”.

Para isto, foram utilizados os dados referentes às entradas de cada processo produtivo: os custos das instalações (construção da planta de carbonização: fornos, fornalhas, chaminés e condensadores); os custos dos equipamentos (maquinário e utensílios) e o capital de giro; os custos operacionais (matéria-prima; mão de obra; manutenção de instalações e equipamentos; combustíveis e embalagens); dados técnicos referentes ao processamento (carbonização, combustão e condensação dos gases); resultados operacionais (rendimentos gravimétricos); os resultados das análises das propriedades físico-químicas da matéria-prima e dos produtos finais e as informações para geração de receitas. Estes dados compõem a Tabela 12, item 4.3.2.

Parte desses dados teve origem nos experimentos descritos nos itens 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3, outros dados foram calculados, adotados integralmente ou de forma proporcional, dependendo do caso e aplicação. Partindo dos dados levantados no Processo 1, foi calculada a quantidade de fornos necessários para ter a mesma capacidade produtiva para os Processos 2 e 3.

Os preços da madeira, mão de obra e insumos gastos na distribuição do carvão gerado nos processos foram considerados iguais, uma vez que se está avaliando o desempenho econômico de cada processo e, neste caso, não é importante considerar variações regionais de mercado.

Os fluxos de caixa foram montados projetando-se valores anuais para as receitas e despesas, considerando-se volumes de produção e vendas iguais para os três Processos. Dois métodos práticos foram utilizados na análise dos fluxos de caixa, o da Taxa Interna de Retorno (TIR) e o do Valor Presente Líquido (VPL).

A TIR é a taxa de retorno do empreendimento, considerando o valor do dinheiro no tempo. É a taxa de desconto que zera o valor presente líquido dos fluxos de caixa de um projeto, ou seja, faz com que todas as entradas igualem todas as saídas de caixa do empreendimento (Müller; Antonik, 2012). Como a TIR não possui uma fórmula algébrica para ser calculada diretamente, ela pode ser encontrada por algoritmos computacionais. No cálculo da TIR foi utilizada a função disponível no software Microsoft® Excel®, sobre os fluxos de caixa montados.

O VPL retorna o valor líquido atual de um investimento utilizando uma taxa de desconto (no caso a Taxa Mínima de Atratividade - TMA) e uma série de futuros pagamentos (valores negativos) e receita (valores positivos) no “instante zero” (Müller; Antonik, 2012), indicado na Equação 2.

$$\text{VPL} = \text{FC}_0 + \text{FC}_1 \times (1+\text{TMA}) + \text{FC}_2 \times (1+\text{TMA}) + \dots + \text{FC}_n \times (1+\text{TMA}) \quad \text{Equação 2}$$

O termo FC_0 representa o fluxo de caixa do período zero, isto é, o investimento inicial. Normalmente, este termo entrará com sinal negativo na equação do VPL. Para cálculo do VPL foram utilizadas planilhas eletrônicas do Microsoft® Excel®, usando as funções de fluxo de caixa. A TMA adotada foi de 12% ao ano num horizonte de 10 anos para o planejamento.

Neste estudo, foi adotado o método do *payback* (período de retorno) como outro indicador para a análise de viabilidade. Para Müller; Antonik (2012), o método do *Payback*, definido como a quantidade (em períodos) necessária para devolver ao investidor o montante aplicado, não considera qualquer taxa de juro incidente, mas é de fácil aplicação e isto justifica sua utilização, porém não deve ser o único instrumento para decisão. O cálculo do *Payback* é indicado na Equação 3.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento Total}}{\text{Receita Líquida}} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

O prazo de recuperação do investimento é utilizado como referência para julgar a atratividade relativa das opções de investimento e implica que, quanto mais longo o prazo de repagamento do valor investido/emprestado, menos interessante ele se torna para o investidor/financiador (MOTTA; CALÔBA, 2002).

3.2.6 Identificação das Oportunidades de Melhoria nos Fluxos Produtivos

A partir do resultado das análises de valor ambiental e de valor econômico de cada um dos fluxos produtivos, foram identificadas as oportunidades de melhoria.

3.2.7 Elaboração do Modelo

Para a elaboração do modelo foram considerados os fatores de influência nas etapas do processo de carbonização da madeira e nos cenários encontrados na literatura (Figura 14) e nos fluxos produtivos mapeados (Figuras 15 a 17), considerando a análise de valor ambiental e econômica.

3.3 COLETA DE DADOS

Os dados foram coletados em três experimentos distintos e estão descritos nos itens 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3. As análises das propriedades físico-químicas da madeira e do carvão vegetal de cada experimento foram realizadas no LAPEM. Outros dados específicos estão identificados, descritos e posicionados de forma pontual nos itens em que foram exigidos ao longo da pesquisa.

3.3.1 Processo de Produção de Carvão Vegetal Sem Aproveitamento dos Gases (Processo 1)

O processo foi mapeado em fevereiro de 2017, numa UPC situada na região dos Campos Gerais do Estado do Paraná, composta por 29 fornos circulares de alvenaria com capacidade nominal de 16 st de madeira enfiada por forno.

O proprietário da UPC possui uma área de 169 hectares das espécies *E.dunnii* Maiden (70%) e *E. saligna* (30%), mas a madeira da espécie *E.dunnii*, utilizada na carbonização, foi adquirida de terceiros em função do excesso de oferta no mercado. A madeira exposta à secagem natural por 7 a 8 meses apresentava diâmetros entre 10 e 20 cm e cerca de 1 m de comprimento. Enfiados o equivalente a 11 m³ de madeira na posição vertical, pesando 6.240 kg e umidade média de 15,7% (base seca). Para a etapa de aquecimento (ignição) do forno foram utilizados 193 kg de atíços.

Saber o teor de umidade, mesmo que apenas uma estimativa, é importante para que o carbonizador seja capaz de direcionar as intervenções no processo de carbonização de forma pontual, de modo a possibilitar uma carbonização eficiente em termos de tempo e rendimento do processo. Em plantas que possuem equipamentos de medição de temperatura (pirômetro) para controle do processo, mas não têm acesso antecipado ao resultado de análise do teor de umidade da madeira, essa estimativa possibilita ao carbonizador fazer o planejamento e acompanhamento da carbonização, conforme mostrado no Quadro 1, item 2.2.

Nesta pesquisa, a carbonização foi feita num forno circular de alvenaria tipo rabo quente com três anos em operação; diâmetro de 4 m e altura de 2,5m; 3 entradas de ar na porta do forno; 11 baias distribuídas na cúpula; 3(três) suspiros

de base e 3 (três) suspiros de meio ao redor do forno (nome dado ao respiro), conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 - Processo 1: Carbonização sem aproveitamento dos gases



Fonte: A autoria própria

Uma balança modelo Filizola com capacidade para 200 kg foi utilizada para pesagem da madeira e do carvão. Um trator Valtra BM125i com Munck CF780 Hegeza e carreta “Julieta” com capacidade para 12 st de madeira, além de cavadeira, martelo, picão, motosserra, balaio e garfo foram utilizados durante o processo. Dos nove funcionários da UPC, um motorista disponibilizou a madeira na porta do forno, três executaram as atividades de carregamento e descarregamento do forno e um carbonizador controlou o processo de carbonização.

3.3.2 Processo de Produção de Carvão Vegetal com Combustão dos Gases (Processo 2)

O processo foi mapeado a partir do compartilhamento dos dados dos experimentos realizados por Donato (2017). No período entre julho e novembro de 2015, foram realizadas três carbonizações na planta-protótipo localizada no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM, da Universidade Federal de Viçosa, no Estado de Minas Gerais, composta por um forno circular em alvenaria com capacidade para 12 st de madeira enforada, acoplado a um sistema fornalha-chaminé também em alvenaria, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 - Processo 2: Carbonização com combustão dos gases



Fonte: cedida pelo LAPEM – UFV

Para as carbonizações, utilizou-se madeira de *Eucalyptus* sp., com idade aproximada de 6 anos, comprimento de 1,5 m e classe de diâmetro de 13 - 18 cm e umidade média de 39,35% (base seca). Apenas nesse processo foi possível identificar a umidade da madeira, antes do início da carbonização, tendo em vista que o experimento foi feito nas dependências do LAPEM. Conhecido o teor de umidade da madeira, as faixas de controle de tempo e temperaturas foram estabelecidas, considerando as faixas teóricas de temperatura propostas por Oliveira et al. (2013) para madeiras com umidade entre 30 e 40%, descritas na Tabela 4, para temperaturas tomadas na copa do forno.

Tabela 4 - Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização da madeira

Fase	Faixa de temperatura	Tempo de temperatura	Fenômeno
I	100 – 150 °C	15 – 16 horas	Liberação de valor de água – secagem da madeira, fase endotérmica
II	150 – 270 °C	11 – 12 horas	Degradação das hemiceluloses, eliminação dos gases, fase endotérmica
III	270 – 380 °C	23 – 24 horas	Degradação da celulose, grande produção de gases, fase exotérmica. Formação do carvão vegetal
IV	380 – 400 °C	17 – 18 horas	Redução da emissão de gases, fase exotérmica. Aumento da concentração de carbono no carvão vegetal
Tempo total planejado		66 – 70 horas	

Fonte: Donato (2017), adaptado de Oliveira et al (2013)

A temperatura interna do forno e da fornalha foi monitorada por sensor de infravermelho, pirômetro, marca Minipa modelo “MT-350”, com capacidade de medir

temperaturas entre 30 e 550°C. As leituras foram efetuadas em 8 (oito) tubos metálicos posicionados na cúpula e ao redor do forno.

Para caracterização e quantificação dos gases emitidos nesse processo foram utilizados equipamentos do tipo *Gasboard 9030 e 3100 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. Ltd.*

3.3.3 Processo de Produção de Carvão Vegetal com Condensação dos Gases (Processo 3)

O processo foi mapeado em março de 2017, numa UPC localizada na região do Vale do Caí – Rio Grande do Sul, de propriedade de um pequeno produtor, em parceria com a EMATER/RS-ASCAR (Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Governo do Rio Grande do Sul - Associação Sulina de Crédito e Assistência Rural). A UPC é composta por 4 fornos circulares de alvenaria do tipo rabo quente com capacidades para 11 st de madeira enfornada cada.

A madeira de eucalipto da espécie *Grandis* utilizada na carbonização foi adquirida de terceiros, transportada por caminhão próprio de uma distância de cerca de 130 km da UPC. A madeira exposta à secagem natural por 2 meses apresentava diâmetros entre 5 e 16 cm e cerca de 1,10 m de comprimento. Enfornados o equivalente a 6 m³ de madeira na posição vertical, pesando 4.060 kg e com 42,4% de umidade (base seca). A temperatura interna do forno e da fornalha foi verificada por sensor de infravermelho, pirômetro, marca Minipa modelo “MT-320”, com capacidade de medir temperaturas entre 20 e 400°C. As leituras foram efetuadas nos 8 (oito) cilindros metálicos posicionados na cúpula e ao redor do forno.

O sistema forno-condensador é do Modelo Brochier (GOMES; ENCARNAÇÃO, 2012) e funciona por meio da inserção de canais na base do forno, de maneira que os gases sejam conduzidos para as três câmaras localizadas no entorno do forno. Dessas câmaras, que servem para pré-resfriamento dos gases, saem tubos de PVC com cerca de 8 metros de comprimento, tendo um coletor em sua base para coleta do líquido da condensação, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13 - Processo 3: Carbonização com condensação dos gases



- | | |
|---|--|
| A. Forno circular de alvenaria; | B. Câmaras de pré-resfriamento; |
| C. Tubos de resfriamento em PVC; | D. Tubo direcionador do licor pirolenhoso; |
| E. Recipiente coletor do licor pirolenhoso. | |

Fonte: Cedida pelos extensionistas da Emater-RS

3.3.4 Determinação das Propriedades Físico-Químicas da Madeira e do Carvão Vegetal

As análises das propriedades físico-químicas da madeira e do carvão vegetal de todos os processos foram realizadas no LAPEM/UFV, à exceção das análises do teor de umidade e densidade básica da madeira utilizada no Processo 3, realizada no Laboratório de Ecofisiologia Vegetal e Sementes da Universidade de Caxias do Sul – UCS.

Para análise de teor de umidade da madeira, utilizou-se o método gravimétrico, a partir da secagem da madeira em estufa com circulação de ar forçado e temperatura de $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, até massa constante. A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 1194.

Em relação às propriedades do carvão vegetal, a densidade a granel foi determinada conforme a norma ABNT NBR 6922. A preparação das amostras foi baseada na norma ABNT NBR 6923, com homogeneização e quarteamento de uma amostra de carvão vegetal representativa do forno e retirada de uma alíquota de 20

litros. A densidade relativa aparente foi determinada conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 9195.

Para determinação do PCS e da composição química imediata, as amostras de carvão vegetal foram preparadas de acordo com a norma NBR 6923. O PCS foi determinado por meio da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma ABNT NBR 8633. Na determinação dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) foram seguidos os procedimentos constantes na norma NBR 8112.

A determinação da friabilidade do carvão vegetal foi realizada por meio do teste de tamboramento, que consistiu em dispor uma amostra de 0,5 kg de carvão, classificado entre 60 e 20 mm, em um tambor rotativo de aço com 30 cm de diâmetro e aplicar 500 rotações a 30 rpm. A massa final da amostra no intervalo entre 60 e 20 mm foi medida. Após o teste, obteve-se a porcentagem com granulometria inferior a 20 mm, que foi comparada à escala de classificação sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), para carvão vegetal, citado por Oliveira et al. (1982).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados estão apresentados, bem como a discussão acerca do mapeamento e análise de valor ambiental e econômico, na produção de carvão vegetal em três processos. Entre eles, dois processos com aproveitamento dos gases da carbonização e, 1 (um) processo sem esse aproveitamento. As oportunidades de melhoria identificadas propiciaram a criação do modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal em pequena escala, também estão apresentadas.

4.1 A3 REPORT

Ao longo do estudo, foram feitas cinco revisões no Relatório. O resultado de cada parte que compõe o Relatório foi descrito nas subseções 4.1.1 a 4.1.8.

4.1.1 Cenário e Indicadores

A partir das informações encontradas na literatura, o cenário encontrado ao longo deste estudo, mostrou:

a) o Brasil como o maior produtor mundial de CV e o único a utilizar este insumo na siderurgia;

b) que o percentual de utilização de madeira oriunda de florestas plantadas aumentou em relação ao percentual de florestas nativas. Isto pode ter sido influenciado principalmente pela redução da produção de ferro gusa a carvão vegetal (50,8%) e pela redução na produção total de ferro gusa (20,3%) no ano de 2016, em relação ao ano de 2007;

c) a produção pulverizada entre milhares de pequenos e médios produtores (PMP), responsáveis por mais de 70% do volume total de CV produzido, feita ainda de maneira artesanal, com processo controlado empiricamente em fornos de alvenaria de pequena capacidade e ausência tecnológica;

d) o aproveitamento dos gases da carbonização pelos PMP é localizado e ínfimo;

e) o rendimento gravimétrico (RG) nacional em CV de 26% na média;

f) que a produção aproximada de 2,6 Mt de CV, base 2016, pelos PMP destinadas aos guseiros, baseado no estudo de Santos (2007), por estimativa, consumiu aproximadamente 12,3 Mt de madeira lançando na atmosfera cerca de 8,5 Mt de poluentes;

g) que o controle de qualidade da madeira e do carvão vegetal pelo PMP é inexistente. A umidade da madeira é o mais importante dos dados para a condução do processo de carbonização e o seu desconhecimento coloca o resultado do processo em situação de aprendizagem por tentativa e erro.

Vale considerar que, na indisponibilidade da balança para a obtenção do RG, o rendimento volumétrico (RV) dado pela relação madeira/carvão em torno de 2:1 é o parâmetro de medida da produtividade mais usado por esses produtores. No Estado do Paraná, o RV é estipulado como medida de conversão da madeira para carvão vegetal pela Resolução Conjunta IBAMA/SEMA/IAP nº 047/2007 (IAP, 2007), para efeito de fiscalização da legalidade da atividade.

h) que em relação à legalidade da atividade, verificou-se a existência de legislação diferenciada entre os Estados onde as pesquisas se realizaram.

A Resolução Conjunta nº 047/2007 estabelece que só haja a comprovação da legalidade da atividade de produção de carvão vegetal quando o produtor possuir o documento de Licenciamento Ambiental emitido pelo IAP – Instituto Ambiental do Paraná. Para aparas contidas em até 5 fornos ou no máximo 100 mdc por mês (metro de carvão acondicionado num recipiente com volume igual a um metro cúbico), o produtor deverá possuir o documento LAS – Licenciamento Ambiental Simplificado. Acima de 5 fornos ou produção superior a 100 mdc por mês, o produtor deve solicitar ao IAP os documentos, por ordem:

(i) LP – Licença Prévia: tem prazo de validade de até cinco anos;

(ii) LI – Licença de Instalação: tem prazo de validade de até seis anos e

(iii) LO – Licença de Operação: tem prazo de validade mínima de quatro anos e máxima de 10 anos.

A obtenção da LI depende do cumprimento de todas as exigências da LP e o mesmo ocorre para a obtenção da LO que depende do cumprimento de todas as exigências da LI.

Para o Estado de Minas Gerais, a Deliberação Normativa COPAM nº 130, de 14 de Janeiro de 2009, “Altera os artigos 1º e 5º e a Listagem G - Atividades

Agrossilvipastoris do Anexo Único da Deliberação Normativa Copam nº 74, de 9 de setembro de 2004 [...]” (COPAM, 2009).

De acordo com essas instruções, a atividade de produção de carvão vegetal necessita licenciamento ambiental; as LP e LI dos empreendimentos “poderão ser solicitadas e, a critério do órgão ambiental, expedidas concomitantemente”; as LI e LO “poderão ser solicitadas e, a critério do órgão ambiental, expedidas concomitantemente, quando a instalação implicar a operação”.

As atividades são classificadas pelo potencial poluidor/degradador, com definição do porte de acordo com o volume de carvão produzido (mdc = metros de carvão, equivalente a um m³, por ano), como segue:

a) Produção de carvão vegetal oriunda de floresta plantada:

$50.000 \leq$ Produção Nominal ≤ 75.000 mdc/ano: Pequeno

$75.000 <$ Produção Nominal ≤ 100.000 mdc/ano: Médio

> 100.000 mdc/ano: Grande

b) Produção de carvão vegetal de origem nativa/aproveitamento do rendimento lenhoso.

$500 \leq$ Produção Nominal ≤ 5.000 mdc/ano: Pequeno

$5.000 <$ Produção Nominal ≤ 25.000 mdc/ano: Médio

> 25.000 mdc/ano: Grande

No caso da alínea (a), considerando o RV de 2:1, a capacidade do forno em 11 st de madeira enfiada em BS e 3,5 fornadas/mês.forno, equivale dizer que o produtor de carvão vegetal é considerado de pequeno porte no limite máximo de 325 fornos. E no caso da alínea (b), o limite máximo é de 22 fornos. Segundo Oliveira et al. (2017), a média mensal praticada por pequenos produtores de 65,45 mdc ou 785,4 mdc por ano é considerada normal.

Para o Estado do Rio Grande do Sul, a Resolução CONSEMA 315/2016, a legislação estabelece a obrigatoriedade que a propriedade está isenta só obtenha a licença de operação de até quatro fornos (CONSEMA, 2016), desde que alguns requisitos, entre eles a colocação de chaminé desde a base do forno, sejam cumpridos.

O pequeno produtor, agricultor familiar, está isento de apresentação da Anotação de Responsabilidade Técnica – ART e sua planta está autorizada a operar 4 (quatro) fornos com capacidade até 15 st cada, ou seja, 120 st de carvão vegetal

por mês, se considerada a relação 2:1 (madeira:carvão vegetal) e quatro fornadas por mês.

No grupo dos produtores de carvão vegetal estão inseridos os produtores profissionais (aqueles que produzem o carvão com madeira adquirida das florestas de fazendeiros e reflorestadores); os produtores eventuais (surgem na ocasião de alta dos preços do produto); os produtores independentes (grupo formado por plantadores de florestas para uso próprio que utilizam a madeira excedente para produção do carvão e por aqueles que utilizam a madeira oriunda de manejo florestal) e os produtores fomentados (aqueles que recebem incentivos de empresas consumidoras do carvão vegetal), segundo classificação de Barcellos (2016; Rezende; dos Santos (2010);

i) que a fiscalização ambiental tem, acirradamente, buscado o cumprimento da legalidade na produção de carvão vegetal, tanto no que se refere ao licenciamento da operação, quanto no uso de madeira e mão de obra legalizada, sob pena de prisão do responsável pelo descumprimento. A pena é de um a seis meses de detenção, de acordo com as leis ambientais do Estado do Paraná (NAKAKURA, 2017);

j) que o compromisso de redução de 37% até 2025 e em 43% até 2030 das emissões de GEE assumido pelo Brasil, levou o setor siderúrgico brasileiro a criar o Plano Siderurgia; e,

k) que as condições de trabalho dessa atividade têm provocado a escassez de mão de obra, principalmente pela baixa remuneração e êxodo rural.

4.1.2 Análise da Situação Encontrada

Na análise do cenário averiguou-se que na atividade Produção:

a) falta padronização no enforamento da madeira quanto a: percentual de umidade, densidade, espécies, dimensões, entre outros parâmetros;

b) o dimensionamento dos fornos é empírico, quanto a: diâmetro e altura do forno, número de tatus e baianas, posição e tamanho de chaminé;

c) empirismo no controle de parâmetros na carbonização, tais como: temperatura, tempo, entradas de ar, diferenças entre zonas internas do forno;

d) inexistência do controle do rendimento gravimétrico. Empirismo no controle volumétrico;

e) os gases são liberados para o meio ambiente sem qualquer controle e total desperdício;

f) a qualidade do carvão produzido é heterogênea, quanto à densidade, umidade e percentual de carbono fixo, parâmetros importantes para a siderurgia.

Em relação ao meio ambiente, percebeu-se:

a) a falta de controle e adequação da umidade da madeira enfiada impacta negativamente o rendimento gravimétrico e o volume gerado de gases liberados para a atmosfera;

b) o empirismo no controle da madeira enfiada e parâmetros de carbonização levam a uma maior necessidade de áreas florestais para produção de carvão;

c) a utilização estimada de 12,3 Mt de madeira para produção do CV para os guseiros representa cerca de 512.000 mil hectares de floresta plantada, considerando o estudo de Santos (2007);

d) em 2016, em torno de 8,5 Mt de gases foram liberados para a atmosfera, sem qualquer tratamento ou aproveitamento;

e) um aumento de rendimento gravimétrico de 26% para 32%, via melhorias no processo, representaria um aumento de 23 pontos percentuais no aproveitamento da madeira;

f) este maior aproveitamento da madeira significaria aproximadamente 1,7 Mt a menos de gases e 118.000 hectares a menos de consumo anual de florestas, para o mesmo carvão gerado;

g) o uso de madeira de espécie inadequada quanto à densidade e umidade, além da falta de condições de temperatura torna o carvão muito friável, gerando aumento na quantidade de finos gerados.

Em relação à viabilidade econômica, a análise apontou que a ineficiência do processo conduz a uma baixa rentabilidade econômica do processo.

4.1.3 Análise da Matriz SWOT

No Quadro 5 são apresentados os pontos principais da análise da cadeia

produtiva do carvão vegetal.

Quadro 5 - Análise SWOT da cadeia produtiva do carvão vegetal

	FORÇAS	FRAQUEZAS
F A T O R E S I N T E R N O S	<ul style="list-style-type: none"> - Carvão vegetal produzido com matéria-prima de fonte renovável e de menor potencial poluidor em relação ao carvão mineral. - A indústria brasileira de ferroligas é a segunda do mundo. - A indústria brasileira de fundição de ferro é a sétima do mundo. - A indústria brasileira de aço é a nona do mundo. - A indústria brasileira de ferro gusa a carvão vegetal é a única do mundo com histórico de 35% do total produzido no país. - A produtividade das florestas plantadas de eucalipto é a maior do mundo com 36m³/ha.ano e rotação <6 anos; - A produção brasileira de carvão mineral ocupa a 26^a posição mundial (0,1%), mas é considerado pobre em teor energético e com elevado teor de impurezas, tendo seu uso maior na geração de energia elétrica (acima de 80%). Ocupa a 21^a posição em termos de consumo mundial (0,4%). 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo elevado de insumos e maquinários empregados nos reflorestamentos e na produção do carvão. - Utilização de florestas nativas devido à falta de madeira de origem renovável. - Fornos sem padrão abaixam o rendimento da UPC, diminuem a qualidade do carvão e desgastam a força de trabalho; - Falta de controle dos parâmetros do processo de carbonização. - Falta conhecimento das possibilidades de aproveitamento dos gases da carbonização. - Falta definição e estabelecimento da cadeia produtiva econômica para produtos resultantes dos gases de carbonização. - Falta comprometimento dos produtores com as questões ambientais. - Falta informação sobre os benefícios da organização do fluxo produtivo.
	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
F A T O R E S E X T E R N O S	<ul style="list-style-type: none"> - Prestar assistência técnica sobre aproveitamento dos resíduos florestais agregando renda ao pequeno produtor - Melhorar o processo produtivo com implantação de tecnologias de baixo custo. - Aproveitar o calor gerado na queima dos gases para secagem da madeira. - Aumentar o rendimento gravimétrico pelo uso da madeira seca. - Gerar novos produtos com a condensação dos gases. - Agregar valor à atividade com a venda dos produtos gerados na condensação dos gases. - Mitigar os impactos das emissões de GEE. - Atender à legislação ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> - Carga tributária onera os custos de produção, transporte e comercialização. - Comercialização do carvão originário de matas nativas; - Dificuldade técnico-econômica na melhoria do processo produtivo para o pequeno produtor. - Dificuldade técnico-econômica da secagem da madeira para o pequeno produtor a partir do aproveitamento dos gases. - Desconhecimento das possibilidades para escoamento dos produtos gerados no aproveitamento dos gases condensáveis pelo pequeno produtor. - Acirramento da fiscalização ambiental. - Instabilidade política e econômica impacta no crescimento da cadeia produtiva do setor.

Fonte: Autoria própria

O Brasil está entre as dez primeiras posições mundiais na produção de insumos utilizando carvão vegetal em sua composição. Isto, por si só incentiva melhorias na sua cadeia produtiva. Adicionalmente, mostra que as fraquezas apontadas não apresentam empecilhos definitivos; as oportunidades identificadas são factíveis e dirimir as ameaças exige esforço conjunto da sociedade.

4.1.4 Indicadores-Alvo

Os principais indicadores-alvo apontados durante a elaboração do A3 Report foram: a diminuição do teor de umidade da madeira para enforamento para menos que 30%, rendimento volumétrico madeira:carvão melhor que 2:1, aumento da média nacional do RGCV para 32% e a diminuição das emissões do processo, de forma que torne a relação tCV:tGases menor do que 3:1. Esses indicadores são capazes de diminuir a necessidade de madeira e, conseqüentemente, diminuir o impacto sobre as florestas nativas, assim como melhorar o resultado econômico da atividade e condições de trabalho.

Segundo CGEE (2015), a diminuição das emissões de GEE pelo aumento da média nacional do RG poderá alcançar, até 2020, 14 Mt de CO₂eq.

4.1.5 Meta/Objetivo

Com os resultados da elaboração do A3 foi possível visualizar os objetivos específicos desta pesquisa, conforme descritos nos objetivos específicos, item 1.1.2.:

- a) Mapear os processos de produção de CV;
- b) Analisar o valor ambiental e econômico dos processos mapeados;
- c) Identificar as oportunidades de melhoria do processo de produção de CV;
- d) Apresentar modelo de produção de CV sob o aspecto ambiental e econômico.

4.1.6 Recomendações/Situação-Alvo

As recomendações para alcance da situação-alvo resultaram nas seguintes questões: (i) quais os processos de produção de carvão vegetal em operação? (ii) qual a destinação dos resíduos desses processos? (iii) qual o valor ambiental e econômico desses processos? e (iv) quais as oportunidades de melhoria estes processos indicam?

As respostas a estas questões resultaram nos planos de ação, consoantes com os objetivos específicos desta pesquisa.

4.1.7 Planos de Ação

1. Plano de ação para identificação dos fluxos dos processos produtivos até destinação final de todas as saídas;
2. Plano de ação para mapeamento dos fluxos dos processos identificados em operação de produção;
3. Plano de ação para análise de valor ambiental dos fluxos dos processos produtivos mapeados;
4. Plano de ação para análise de valor econômico dos processos produtivos mapeados.
5. Plano de ação para identificação das oportunidades de melhorias nos processos produtivos mapeados;
6. Plano de ação para definição do modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal em pequena escala;
7. Desenho do modelo.

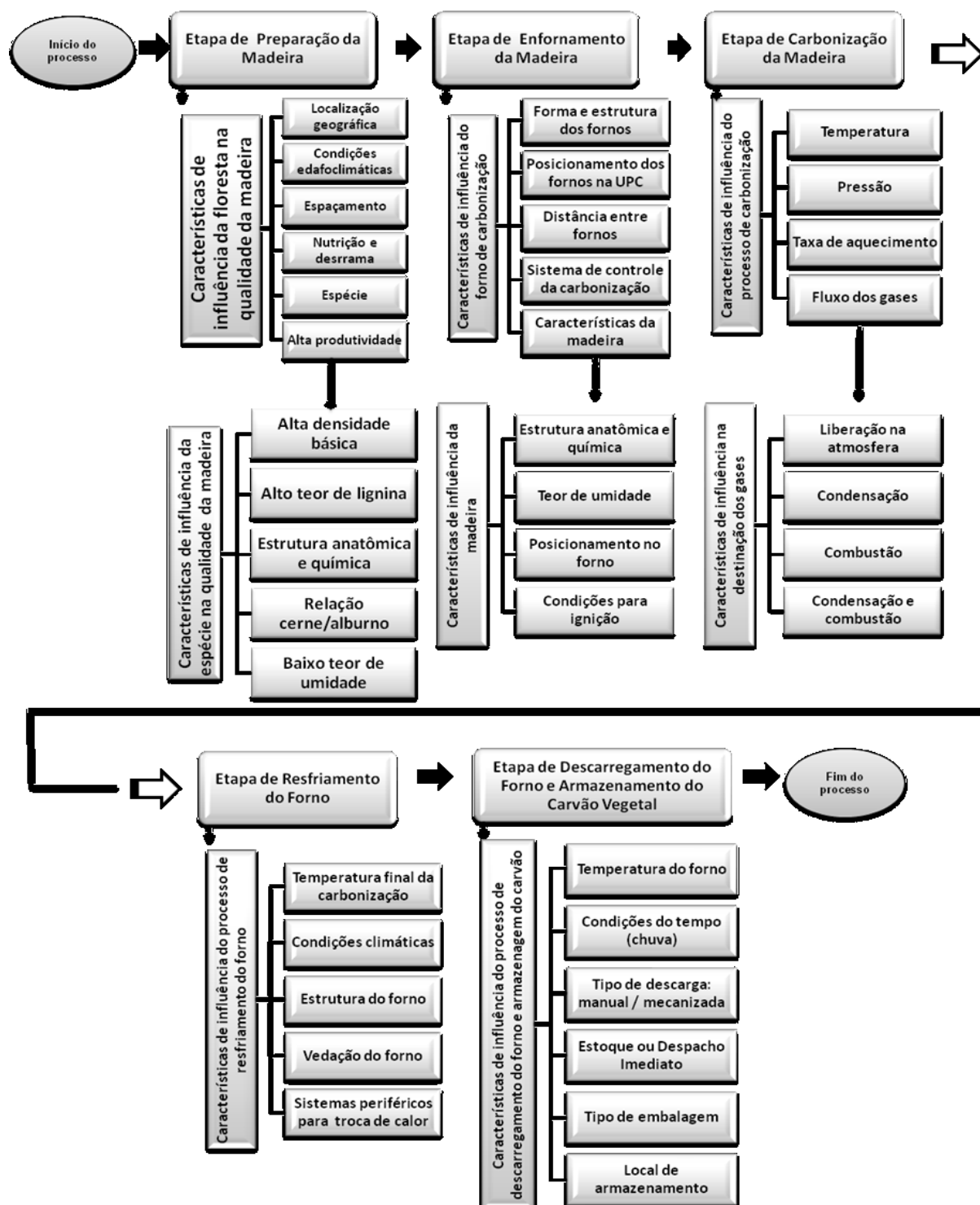
4.1.8 Follow-Up

Os resultados do acompanhamento dos fluxos produtivos mapeados nos experimentos de campo estão apresentados no item 4.2, a seguir.

4.2 FLUXOS DOS PROCESSOS PRODUTIVOS MAPEADOS

A revisão da literatura permitiu identificar fatores que influenciam as etapas do processo de produção do carvão vegetal, conforme fluxo apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Fatores de influência, por etapas, no processo de carbonização da madeira.



A síntese dos fatores de influência encontrados na literatura para cada etapa do processo de produção de carvão vegetal e mostrada na Figura 14 corrobora para a proposta do modelo apresentada nesta pesquisa.

4.2.1 Características dos Processos

Os dados coletados durante o mapeamento dos três processos foram utilizados nas análises ambiental e econômica dos três processos mapeados.

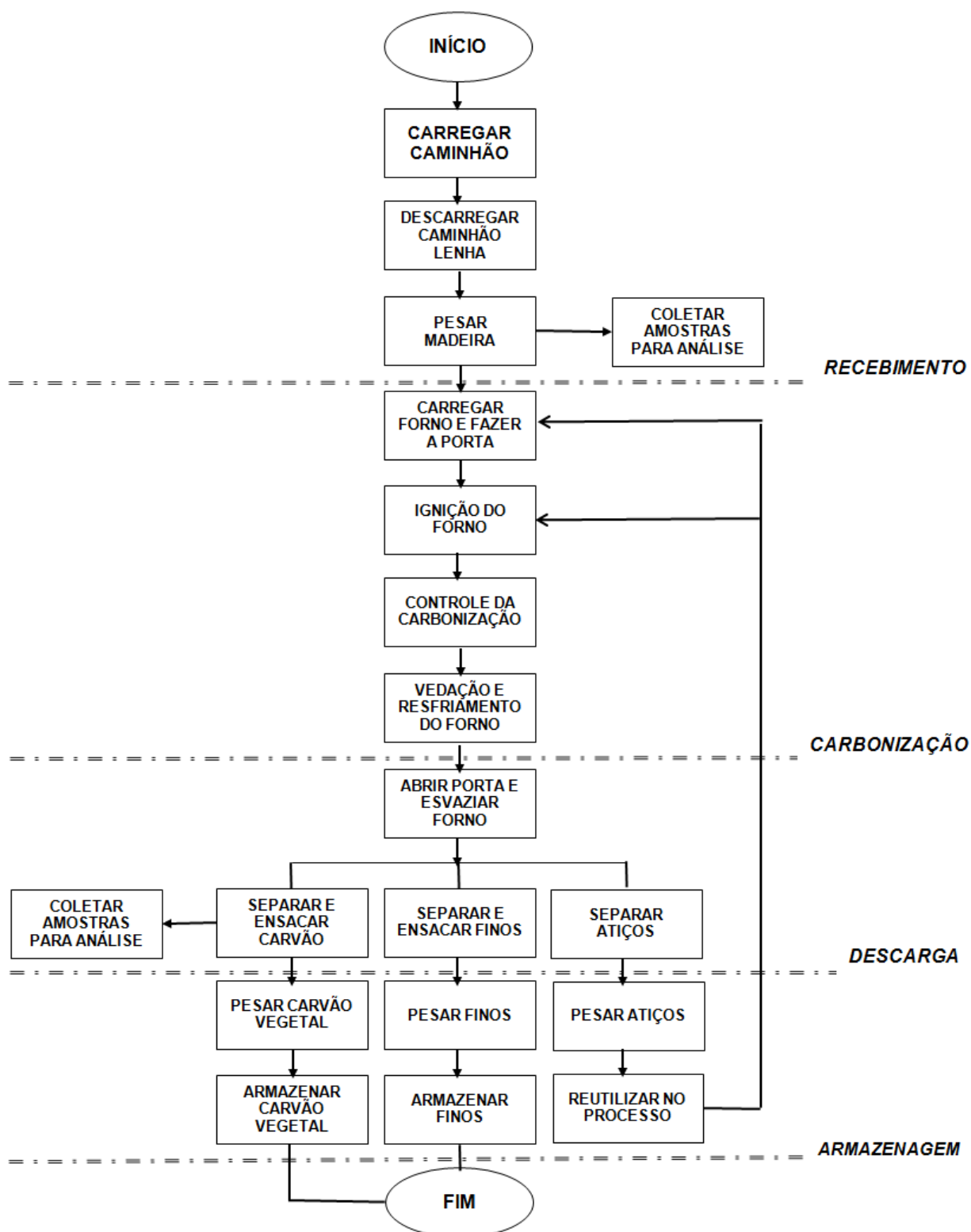
4.2.1.1 Processo 1

A UPC mapeada era obrigada a apresentar LO por operar mais de 5 fornos, de acordo com a legislação do Estado do Paraná. Os proprietários estão no ramo há 25 anos, em negócio familiar que iniciou como meio de subsistência, mas que, atualmente, representa o carro-chefe dos negócios e engloba agricultura, pecuária e silvicultura.

A mecanização da operação foi considerada alta se comparada com outras UPC de pequenos produtores. O manuseio da madeira, desde o corte até a disposição ao lado de cada forno, foi feito por equipamentos e mão de obra qualificada, diminuindo o tempo do processo. Zuchi (2000) atribui à mecanização a melhoria das condições de trabalho.

A Figura 15 mostra o fluxo do Processo 1.

Figura 15 - Fluxo do Processo 1



Em relação às atividades de coleta de amostras para análise; separação, ensacamento e armazenagem dos finos; pesagem do carvão vegetal, dos finos e

dos atíços, mostrados na Figura 15, observou-se, principalmente, que não tem como saber quais as propriedades físico-químicas da madeira enfiada e do carvão produzido, pela falta de equipamentos disponíveis para análise. Isto se explica muito mais pela falta de conhecimento da importância dessas análises para a gestão da atividade do que pela falta de recursos para aquisição de equipamentos para tal.

Ressalta-se que as pesagens efetuadas durante a carbonização só ocorreram durante o mapeamento do processo para esta pesquisa. Rotineiramente, o tempo total gasto com as atividades de retirada da madeira do pátio até o fim do enfiamento é em torno de 3h. No experimento o tempo total foi de 4h53' e a atividade de pesagem da madeira representou 34% desse tempo.

O tempo total de pirólise foi de 74 horas. O controle das carbonizações era baseado no conhecimento do proprietário, adquirido pela prática, e repassado para o carbonizador. Os parâmetros utilizados pelo carbonizador são cor e cheiro da fumaça, ruído e temperatura externa do forno.

O tempo total gasto entre o início do resfriamento até a abertura do forno foi de 70h. A decisão pelo desfiamento seguia o cronograma para carregamento do caminhão que levava o carvão para a empacotadora, em duas cargas semanais.

As etapas de desfiamento do carvão, acondicionamento em sacos de ráfia, costura dos sacos e armazenamento duraram 5h30', dos quais 36% foram gastos com a pesagem do carvão, dos atíços e dos finos. Rotineiramente, a massa do carvão é obtida no momento da chegada à empacotadora.

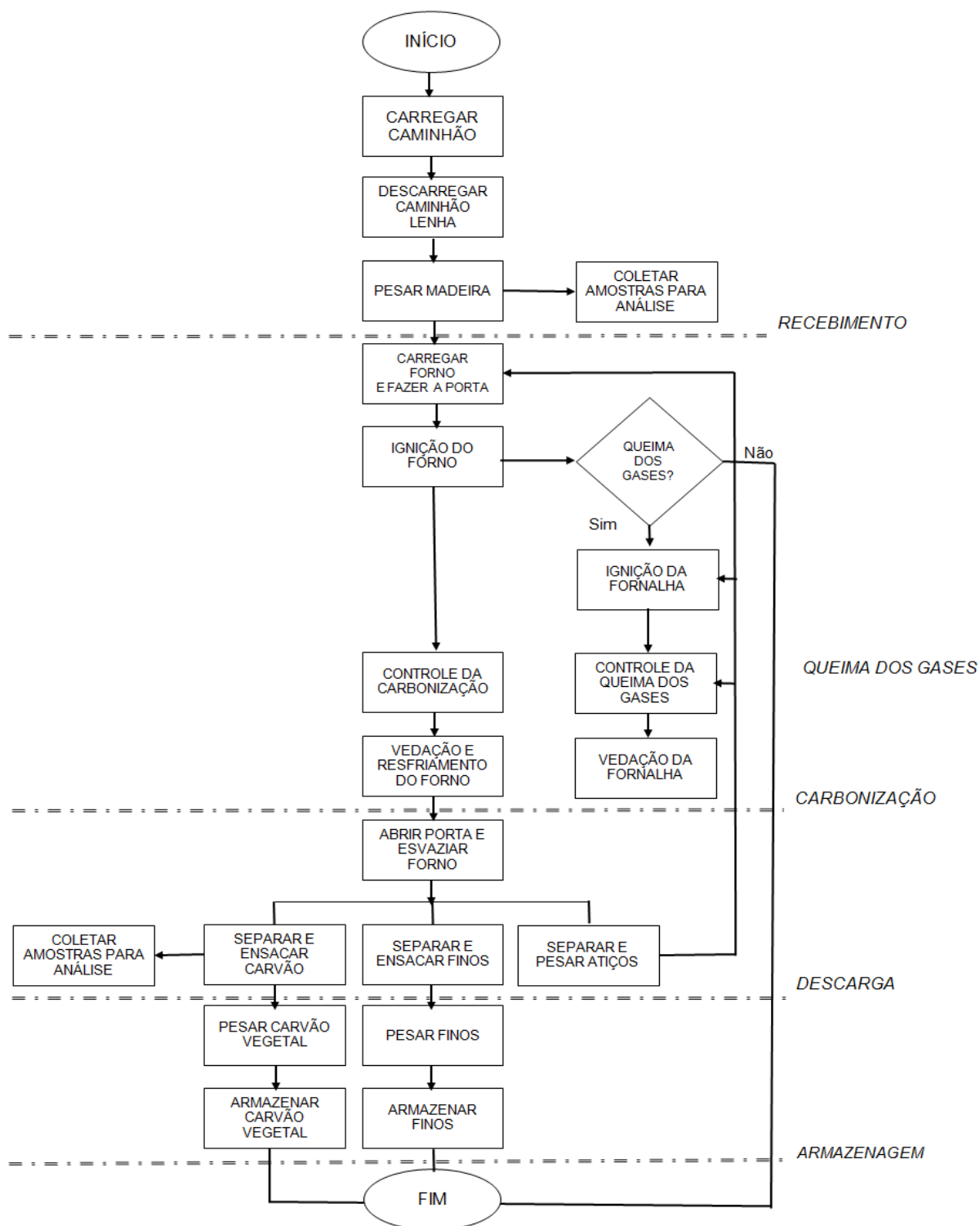
Observou-se a pouca importância dada aos finos gerados. A limpeza dos fornos no início de cada carbonização ocorria apenas com a retirada dos resíduos de alcatrão depositados nos "suspiros" para liberação do fluxo dos gases. A organização e limpeza da planta foi um dos itens de destaque. As tarefas eram passadas pelo proprietário no início da jornada diária. Ao carbonizador cabia a tarefa de controle dos fornos.

4.2.1.2 Processo 2

Este processo teve início com a aquisição da madeira em plantios comerciais situados na região de Viçosa-MG, distante cerca de 25 km da unidade de pesquisa. A madeira foi disposta no pátio próximo ao forno. Por se tratar de pesquisa acadêmica, a mão de obra para todas as etapas do processo foi formada

principalmente por acadêmicos, num sistema de cooperação, envolvendo pelo menos 4 (quatro) pessoas. Diferentemente dos Processos 1 e 3, todas as entradas (madeira), processamento (forno e fornalha) e saídas do processo (gases, carvão vegetal, atijos e finos) foram devidamente medidos e mencionados, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 - Fluxo do Processo 2



Na atividade de retirada da madeira do pátio, seguida da pesagem e enforamento foram dispendidas 2h40'. O tempo total de pirólise foi de 74h. O tempo total de queima dos gases foi de 25h42', dos quais aproximadamente 35% desse tempo não houve necessidade de abastecimento da fornalha para manter a chama acesa, pois nesse período a pirólise fornecia gases de alto poder calorífico. A temperatura máxima registrada na fornalha foi de 1.055°C. O tempo de resfriamento do forno não ultrapassou 72 horas e o tempo de descarregamento do forno, ensacamento, pesagem, coleta de amostra e armazenamento do carvão foi de 2h35'.

O controle da carbonização foi feito por meio da medição da temperatura interna do forno e as interferências no processo foram planejadas de acordo com a leitura dessa temperatura. A umidade da madeira influenciou o tempo de permanência numa faixa de temperatura, conforme estudo de Oliveira et al. (2013).

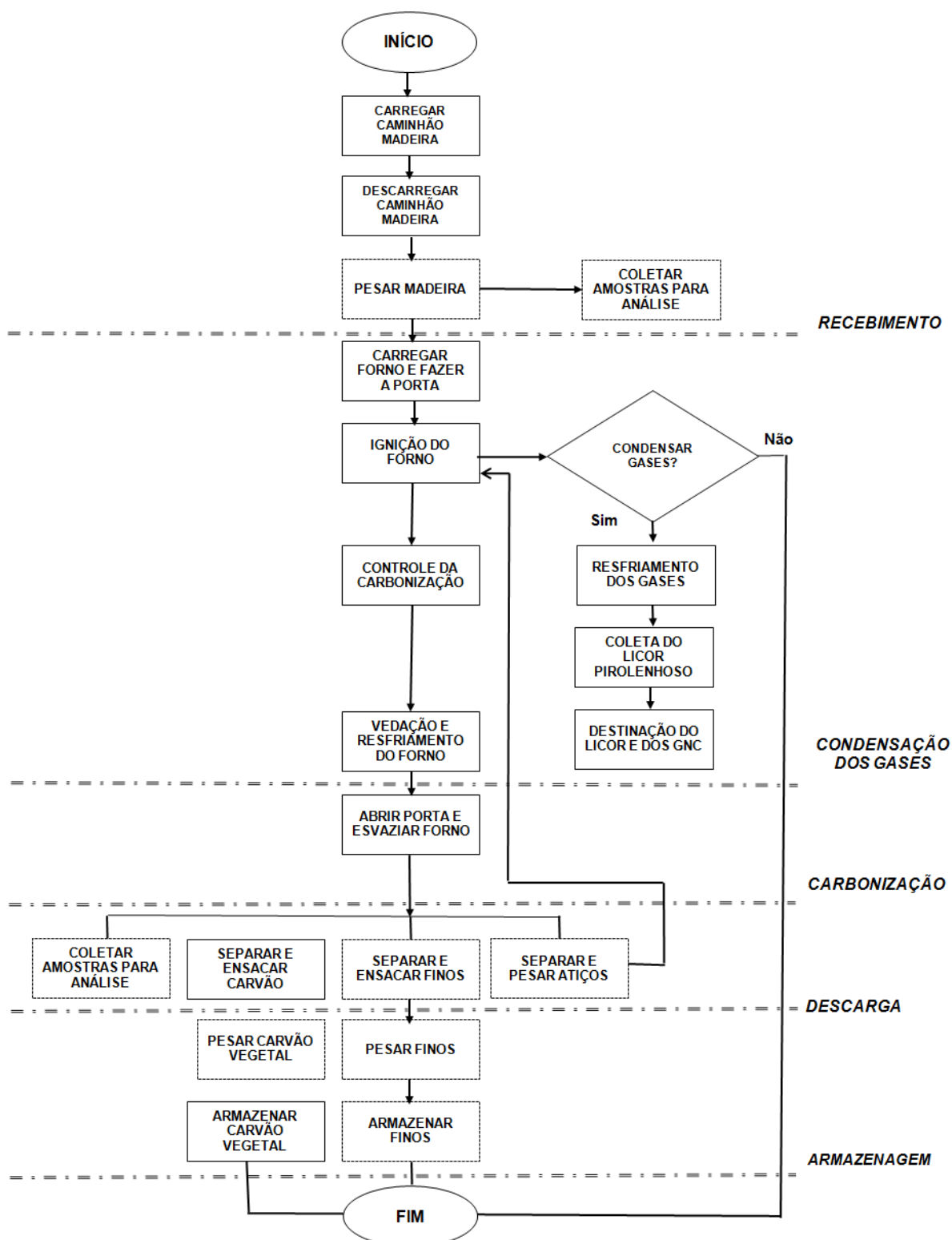
Segundo Oliveira et al. (2013), há a necessidade de sincronia entre os fornos de modo a possibilitar a diminuição da necessidade de biomassa auxiliar nas câmaras de combustão para manutenção da chama na fornalha, corroborada por Donato (2017).

Como o Processo 2 mapeado e possuindo apenas um forno não foi possível avaliar a influência do sincronismo entre os fornos no comportamento da fornalha.

4.2.1.3 Processo 3

Este processo também teve início com a aquisição da madeira de eucalipto da espécie *Grandis* em plantios comerciais situados na região de Brochier-RS, especialmente para este experimento. O carregamento e descarregamento da madeira foram feitos por mão de obra terceirizada e o transporte efetuado no caminhão do proprietário. O tempo total gasto com as atividades de desobstrução dos “suspiros”, limpeza da parte interna do forno, retirada da madeira do caminhão, pesagem e enforamento da madeira foi de 4h30'. A Figura 17 mostra o fluxo do Processo 3.

Figura 17 - Fluxo do Processo 3



Com relação às atividades de pesagem da madeira, do carvão vegetal dos finos e dos atíços e de coleta de amostras para análise da madeira enfiada e do carvão vegetal produzido, mostradas na Figura 17, assim como no Processo 1, não

há como saber quais as propriedades da madeira utilizada nem do carvão produzido. No entanto, a aquisição de novos equipamentos não parece fazer parte do planejamento desses produtores.

O controle da carbonização foi feito pelo proprietário, ajudado pelo filho. A coloração da fumaça, o ruído e temperatura externa do forno eram os parâmetros utilizados para controle da carbonização.

Neste experimento foram feitas medições de temperatura em tempos determinados como forma de verificação do comportamento do processo sob controle empírico. A coleta do licor pirolenhoso se deu a partir da 33^a hora do acendimento do forno à temperatura de 110°C até o fim do processo com temperatura final em torno dos 350°C.

O tempo total de carbonização desde o acendimento até o abafamento do forno foi de 96 horas, em função do teor de umidade da madeira enforada (42,4%) e das condições do tempo durante o experimento (chuvas intensas).

As etapas de desenforamento do carvão, acondicionamento em sacos de ráfia, costura dos sacos, pesagem e armazenamento duraram 2h30'. Rotineiramente, a massa do carvão só é obtida quando chega nas empacotadoras da região, no entanto, neste experimento as pesagens do carvão, atijos e finos foram efetuadas na UPC.

Da mesma forma que no Processo 1, o carbonizador diminuiu a “marcha” do forno durante a noite. A contratação de um carbonizador é uma prática comum entre os pequenos produtores da região, que pode operar vários fornos em diferentes localidades umas bem próximas das outras, com pagamento por operação efetuada.

4.2.2 Carbonização da Madeira

A partir dos resultados das carbonizações mapeadas nos três processos, a Tabela 5 apresenta os parâmetros e rendimentos gravimétricos, a média das análises das propriedades das madeiras utilizadas e as propriedades do carvão vegetal obtido.

Tabela 5 - Propriedades das madeiras, do carvão produzido e rendimentos gravimétricos, por Processo

Parâmetros e RG	Processo 1	Processo 2	Processo 3
Madeira úmida enforada (Kg)	6.240	5.283	4.060

(continua)

Parâmetros e RG	Processo 1	Processo 2	Processo 3
Massa seca enfiada (Kg)	15.453	3.204	2.339
Tempo de carbonização (horas)	74	74	96
Carvão vegetal (kg)	1.589	1.023	590
RG em carvão vegetal (%)	29,1	31,9	25,2
Atiços (kg)	435	9	260
RG em atiços (%)	8,0	0,3	11,1
Finos (kg)	20	60	30
RG em finos (%)	0,4	1,9	1,3
Propriedades da Madeira			
Espécie da Madeira	<i>E. dunni</i>	<i>E. spp</i>	<i>E. Grandis</i>
% Umidade	15,7	39,4	42,4
% Voláteis	86,2	-	-
% Cinzas	0,5	-	-
% Carbono Fixo	13,3	-	-
Densidade Básica (kg/m ³)	478	470	410
Propriedades do Carvão Vegetal			
% Umidade	0,7	-	-
% Voláteis	25,7	20,2	38,4
% Cinzas	1,5	0,7	1,6
% Carbono Fixo	72,8	72,0	60,0
Densidade aparente (kg/m ³)	381	355	321
Densidade granel (kg/m ³)	233	156	204
Finos (%)	10,4	12,3	5,0
PCS (cal/g)	7.535	6.916	6.970

¹ Foram adicionados 193 kg de atiços, assim Massa seca enfiada = (Massa úmida enfiada – Umidade da madeira) + Atiços adicionados.

Na comparação entre as carbonizações, em termos de RGCV o Processo 2 apresentou o melhor resultado (31,7%), seguido do Processo 1 (29,1%). O Processo 3 obteve o mais baixo dos rendimentos em carvão (25,2%) e o maior percentual de atiços gerados (11,1%), influenciados principalmente pelo teor de umidade da madeira.

Comparando os resultados das análises dos carvões obtidos nos três processos, os Processos 1 e 2 apresentaram maiores teores de CF e PCS em relação ao Processo 3. As medições de temperatura indicaram que, ao não

ultrapassar a temperatura de 300°C, a fase fixação do carbono não foi completada e pode explicar o baixo teor de CF (60%) do carvão obtido no Processo 3.

No cálculo dos Balanços de Massa dos Processos mapeados, usou-se uma relação entre a massa estimada dos gases formados durante a pirólise da madeira de cada Processo mapeado e a massa dos gases identificados na Tabela 2 (tabela adotada como Processo Linha de Base). Essa relação apresentada como **Equação 1** resultou nos fatores multiplicativos: 5,09 – 3,15 – 2,18 para os Processos 1, 2 e 3, respectivamente.

A Tabela 6 mostra o Balanço de Massa Estimado do Processo 1.

Tabela 6 - Balanço de Massa Estimado do Processo 1

Dados	Kg em BS
Massa de Madeira Úmida Enfornada	6.240
Massa Seca de Madeira Enfornada ¹	5.453
Água (Umidade da madeira)	980
Carvão	1.589
Atiço	435
Finos	20
Gás total	3.409
Gases Não Condensáveis (GNC)	
CO ₂	788,6
CO	432,4
CH ₄	31,0
C ₂ H ₆	1,5
H ₂	8,1
Outros GNC	10,2
Gases Condensáveis (GC)	
CH ₃ OH	101,8
H ₃ CCOOH	254,4
Água e Outros GC	1.195,6
Alcatrão solúvel	254,4
Fenol (0,2%)	0,5
Guaiacol (0,1%)	0,3
Cresol (0,1%)	0,3
o-Cresol (1,1%)	2,8
4-Etil-guaiacol (0,2%)	0,5
Siringol (1%)	2,5
4-Metil-siringol (1%)	2,5

(continua)	
Dados	Kg em BS
4-Etil-siringol (0,6%)	1,5
Água (80%)	203,5
Outros (15,7%)	39,9
Alcatrão insolúvel	330,7
Fenol (6%)	19,8
Guaiacol (6%)	19,8
2,6-Xilenol (1%)	3,3
Cresol (1%)	3,3
o-Cresol (6%)	19,8
p,m-Cresol (7%)	23,1
4-Etil-guaiacol (1%)	3,3
4-Propil-guaiacol (0,10%)	0,3
3,5-Xilenol (5%)	16,5
Siringol (35%)	115,7
4-Metil-siringol (11%)	36,4
4-Etil-siringol (5%)	16,5
Água (15,9%)	52,6
Gás total	3.409
Alcatrão Total (C contido - Ferreira 2006)	63,9%

Nota: ¹ Na massa seca de madeira enfiada foram considerados 193 kg de atijos adicionados à carga durante a pirólise, totalizando 5.453 kg de massa seca.

² Na base de dados utilizada para o cálculo dos impactos ambientais para a ACV, foram lançados: (a) guaiacol para guaiacol, 4-etil guaiacol e 4 propil guaiacol; (b) 3,5-Dimethoxyphenol para o Siringol; (c) 3,5,7,9 Tetr methyl-acetate para 4-etil-siringol e 4-metil Siringol; (d) Phenol 2,6 Dimethyl para 2,6 xilenol e (e) 3,5 Dimethyl Phenol para 3,5 xilenol, apesar de não serem os mesmos compostos, por ocuparem posições diferentes no anel, foram utilizados por apresentarem funções químicas similares.

A Tabela 6 mostra que 37,5% do total de madeira seca enfiada foram transformados em material sólido (29,1% carvão, 8% atijos e 0,4 finos) e que 62,5% resultaram em gases (dos quais 37% gases não condensáveis e 63% gases condensáveis) que foram lançados na atmosfera.

Considerando o exposto no item 3.2.4.2.3, estimou-se que foram emitidos 5,0kg de NO₂ e 27,5kg de SO₂ no Processo 1.

Na sequência dos Balanços, a Tabela 7 mostra o Balanço de Massa Estimado do Processo 2, antes e depois da queima dos gases na câmara de combustão. Os valores após a queima dos gases representam as emissões do Processo 2, de acordo com o exposto no item 3.2.4.2.3.

Tabela 7 - Balanço de Massa Estimado do Processo 2

Dados	Massa antes da Queima dos Gases (Kg) em BS	Massa Liberada após Queima dos Gases (Kg) em BS
Massa Úmida de Madeira Enfornada	5.283	5.283
Massa Seca de Madeira Enfornada	3.204	3.204
Água (Umidade da madeira)	2.079	2.079
Carvão	1.023	1.023
Atiço	9	9
Finos	60	60
Gás total	2.112	2.112
Gases não Condensáveis (GNC)		
CO ₂	488,5	1.596,1
CO	267,9	80,4
CH ₄	19,2	6,4
C ₂ H ₆	0,9	0,3
H ₂	5,0	0
Outros GNC ¹	6,3	n.d.
Gases Condensáveis (GC)		
CH ₃ OH	63,0	21,1
H ₃ CCOOH	157,6	52,8
Água e Outros GC	740,7	1.036,1
Alcatrão solúvel	157,6	136,6
Fenol (0,2%)	0,3	0,1
Guaiacol (0,1%)	0,2	0,1
Cresol (0,1%)	0,2	0,1
o-Cresol (1,1%)	1,7	0,6
4-Etil-guaiacol (0,2%)	0,3	0,1
Siringol (1%)	1,6	0,5
4-Metil-siringol (1%)	1,6	0,5
4-Etil-siringol (0,6%)	0,9	0,3
Água (80%)	126,1	126,1
Outros	24,7	8,3
Alcatrão insolúvel ²	204,9	90,3
Fenol (6%)	12,3	4,1

(continua)

(continuação) Dados	Massa antes da Queima dos Gases (Kg) em BS	Massa Liberada após Queima dos Gases (Kg) em BS
Guaiacol (6%)	12,3	4,1
2,6-Xilenol (1%)	2,0	0,7
Cresol (1%)	2,0	0,7
o-Cresol (6%)	12,3	4,1
p,m-Cresol (7%)	14,3	4,8
4-Etil-guaiacol (1%)	2,0	0,7
4-Propil-guaiacol (0,10%)	0,2	0,1
3,5-Xilenol (5%)	10,2	3,4
Siringol (35%)	71,7	24,0
4-Metil-siringol (11%)	22,5	7,5
4-Etil-siringol (5%)	10,2	3,4
Água (15,9%)	32,6	32,6
Gás total	2.112	3.020
Alcatrão Total (C contido Ferreira 2006)	63,9%	

Nota: ¹ Para 'Outros GNC' não foi possível determinar as quantidades de CO₂ e H₂O formados após a queima dos gases.

² Na combustão dos alcatrões não foi possível determinar a quantidade de água gerada.

A Tabela 7 mostra que 34,1% do total de madeira seca enforada foram transformados em material sólido (31,9% carvão, 0,3% atíços e 1,9 finos) e 65,9% em gases, dos quais 37% gases não condensáveis e 63% gases condensáveis.

O aumento na quantidade estimada de CO₂ (de 488,5 kg para 1.596,1 kg) e de Água e Outros GC (de 740,7 kg para 1.036,1 kg) liberados para a atmosfera após a queima dos gases é explicado considerando que essa queima resulta em CO₂, calor e vapor de água.

Considerando o exposto no item 3.2.4.2.3, estimou-se que foram emitidos 3,1kg de NO₂ e 17,0kg de SO₂ no Processo 2.

Continuando a sequência de Balanços, a Tabela 8 mostra o Balanço de Massa Estimado do Processo 3.

Tabela 8 - Balanço de Massa Estimado do Processo 3

Dados	Massa antes da Condensação dos Gases (Kg) em BS	Massa liberada após Condensação dos Gases (Kg) em BS	Massa Condensada: licor pirolenhoso obtido (Kg) em BS
Massa Úmida de Madeira Enforada	4.060	4.060	-

(continua)			
Dados	Massa antes da Condensação dos Gases (Kg) em BS	Massa liberada após Condensa- ção dos Gases (Kg) em BS	Massa Condensada: licor pirolenhoso obtido (Kg) em BS
Massa Seca de Madeira Enfornada	2.339	2.339	-
Água (Umidade da madeira)	1.721	1.721	-
Carvão	590	590	-
Atiço	260	260	-
Finos	30	30	-
Licor pirolenhoso	-	110	-
Gás total	1.459	1.349	-
Gases não Condensáveis (GNC)			
CO ₂	337,4	337,4	-
CO	185,0	185,0	-
CH ₄	13,3	13,3	-
C ₂ H ₆	0,7	0,7	-
H ₂	3,5	3,5	-
Outros GNC	4,4	4,4	-
Gases Condensáveis (GC)			
CH ₃ OH	43,5	38,3	5,2
H ₃ CCOOH	108,8	95,8	13,1
Água e Outros GC	511,6	450,0	61,5
Alcatrão solúvel	108,8	95,8	13,1
Fenol (0,2%)	0,2	0,2	0,03
Guaiacol (0,1%)	0,1	0,1	0,01
Cresol (0,1%)	0,1	0,1	0,01
o-Cresol (1,1%)	1,2	1,1	0,14
4-Etil-guaiacol (0,2%)	0,2	0,2	0,03
Siringol (1%)	1,1	1,0	0,13
4-Metil-siringol (1%)	1,1	1,0	0,13
4-Etil-siringol (0,6%)	0,6	0,6	0,08
Água (80%)	87,1	76,6	10,48
Outros (15,7%)	17,1	15,0	2,06
Alcatrão insolúvel	141,5	124,5	17,02
Fenol (6%)	8,5	7,5	1,02
Guaiacol (6%)	8,5	7,5	1,02
2,6-Xilenol (1%)	1,4	1,2	0,70
Cresol (1%)	1,4	1,2	0,17
o-Cresol (6%)	8,5	7,5	1,02
p,m-Cresol (7%)	9,9	8,7	1,19
4-Etil-guaiacol (1%)	1,4	1,2	0,17
4-Propil-guaiacol (0,10%)	0,1	0,1	0,02

(continua)

Dados	Massa antes da Condensação dos Gases (Kg) em BS	Massa liberada após Condensa- ção dos Gases (Kg) em BS	Massa Condensada: licor pirolenhoso obtido (Kg) em BS
3,5-Xilenol (5%)	7,1	6,2	0,85
Siringol (35%)	49,5	43,6	5,96
4-Metil-siringol (11%)	15,6	13,7	1,87
4-Etil-siringol (5%)	7,1	6,2	0,85
Água (15,9%)	22,5	19,8	2,71
Gás total	1.458,6	1.348,7	-
Licor pirolenhoso	-	-	110,0
Alcatrão Total (CFonte:Ferreira 2006)	63,9%		

Com a condensação dos gases, o balanço de massa sofreu alterações. A Tabela 8 mostra que 37,6% do total de madeira seca enfiada foram transformados em material sólido (25,2% carvão, 11,1% atíços e 1,3 finos), 4,7% em líquido pirolenhoso e 57,7% em gases, dos quais 40,3% gases não condensáveis e 59,6% gases condensáveis. Do total condensável (914,2 kg) foram obtidos 110 kg de licor pirolenhoso, correspondentes a 12%.

Considerando o exposto no item 3.2.4.2.3, estimou-se que no Processo 3 foram emitidos 2,1kg de NO₂ e 11,8kg de SO₂.

A Tabela 9 mostra a comparação entre as emissões para 1tCV produzido, por Processo avaliado.

Tabela 9 - Emissões para 1tCV produzido, por Processo (Kg)

Dados para 1t CV produzido	Processo 1	Processo 2	Processo 3
Gases não Condensáveis (GNC)			
CO ₂	496,3	1.573,0	571,9
CO	272,2	79,2	313,6
CH ₄	19,5	6,3	22,5
C ₂ H ₆	1,0	0,3	1,1
H ₂	5,1	0,0	5,9
NO ₂	3,1	3,0	4,4
SO ₂	17,3	16,6	23,9
Outros GNC	6,4	2,1	7,4
Gases Condensáveis (GC)			
CH ₃ OH	64,0	20,8	64,92

(continua)

Dados para 1t CV produzido	Processo 1	Processo 2	Processo 3
H ₃ CCOOH	160,1	51,6	162,29
Água e Outros GC	752,4	1.012,5	762,8
Alcatrão (Solúvel+Insolúvel)	368,2	222,0	373,27
Fenol (6%)	12,8	4,1	13,0
Guaiacol (6%)	12,7	4,1	12,8
2,6-Xilenol (1%)	2,1	0,7	2,1
Cresol (1%)	2,3	0,8	2,3
o-Cresol (6%)	14,3	4,6	14,5
p,m-Cresol (7%)	14,6	4,7	14,8
4-Etil-guaiacol (1%)	2,4	0,8	2,4
4-Propil-guaiacol (0,10%)	0,2	0,1	0,2
3,5-Xilenol (5%)	10,4	3,4	10,5
Siringol (35%)	74,4	24,0	75,5
4-Metil-siringol (11%)	24,5	7,9	24,8
4-Etil-siringol (5%)	11,4	3,7	11,5
Água (15,9%) + Água (80%)	161,2	155,0	163,4
Outros	25,1	8,1	25,5

Comparando os três Processos, o Processo 1 é o que emite a maior quantidade por tCV produzida em relação a todos os compostos. O Processo 2 emite maior quantidade de CO₂. Neste Processo, a queima dos gases resultou em 70% menos emissão de CO e 66,5% menos emissão de CH₄, valores inferiores aos 86% de CO e 88% de CH₄, encontrados por Lana (2014); aos 93,76% e 96,95% obtidos por Cardoso et al. (2010); 74% e 99,8% obtidos por Coelho (2013), respectivamente. Estes experimentos foram feitos em fornos de alvenaria (circulares e retangulares), acoplados a diferentes sistemas de fornalhas (alvenaria e metálicos).

Donato (2017) atribuiu os menores percentuais de redução destes dois gases ao dimensionamento da fornalha. No entanto, um conjunto de variáveis pode interferir na eficiência da fornalha, entre elas: o tempo de residência dos gases no interior da câmara de combustão; o volume de gases ricos e o combustível extra (madeira, p.ex.) capazes de manter a chama no interior da fornalha.

O Balanço de Energia do Processo 1, do Processo 2 antes da queima dos gases e do Processo 3 antes da condensação dos gases está apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Balanço de Energia dos Processos Avaliados

Sólidos	Processo 1			Processo 2			Processo 3		
	(kg)	PCS (Kcal/kg)	Energia (Mcal)	(kg)	PCS (Kcal/kg)	Energia (Mcal)	(kg)	PCS (Kcal/kg)	Energia (Mcal)
Madeira Seca Enfornada	5.453	4.558	24.853	3.204	4.550	14.578	2.239	4.274	9.995
Carvão	1.589	7.535	11.974	1.023	6.916	7.077	590	6.970	4.112
Atiço ¹	435	5.778	2.513	9	5.303	49	260	5.344	1.390
Finos ¹	20	7.536	151	60	6.916	413	30	6.970	209
(1)			48,2%			48,5%			41,1%
Gases Não Condensáveis									
CO ₂	788,6	0	0	488,5	0	0	337,4	0,0	0
CO	432,4	2.412	1.043	267,9	2.412	646	185,0	2.412,0	446
CH ₄	31,0	13.249	411	19,2	13.249	255	13,3	13.249	176
C ₂ H ₆	1,5	12.384	19	0,9	12.384	12	0,7	12.384	8
H ₂	8,1	33.883	276	5,0	33.883	171	3,5	33.883	118
Outros GNC	10,2	xxx	xxx	6,3	xxx	xxx	4,4	xxx	xxx
Gases Condensáveis									
CH ₃ OH	101,8	5.692	579	63,0	5.692	359	43,5	5.692	248
H ₃ CCOOH	254,4	0	0	157,6	0	0	108,8	0	0
Alcatrão solúvel	254,4	5.255	1.337	157,6	5.255	828	108,8	5.256	572
Alcatrão insolúvel	330,7	5.255	1.738	204,9	5.255	1.077	141,5	5.255	744
Água e Outros GC	1.195,6	xxx	xxx	740,7	xxx	xxx	511,6	xxx	Xxx
(2)			21,7%			23,0%			23,1%
Total de Gases	3.409	xxx	5.402	2.112	Xxx	3.347	1.459	Xxx	2.312
(1)+(2)			70%			71,5%			64%

Notas:

- (1) Segundo Castro (2014), o valor médio do PCS dos finos pode ser considerado igual ao do CV e o PCS dos atiços pode ser considerado como 76,7% do PCS do CV.
- (2) Relação da energia contida no carvão/energia contida na madeira seca enfornada (%)
- (3) Relação da energia contida nos gases/energia contida na madeira seca enfornada (%)

A Tabela 10 mostra que no Processo 1, do total da energia potencial contida na massa seca de madeira enfornada, 48,2% estava potencialmente contida no carvão e 21,7% contida nos gases. No Processo 2, a energia potencial contida no carvão foi de 48,5% e nos gases de 23,0%. No Processo 3, essa energia estava 41,1% contida no carvão e 23,1% nos gases. A diferença de energia potencial em

relação à madeira seca enfiada de cada Processo avaliado (30%, 28,5% e 35,8%, respectivamente) estaria contida parte nos atijos, nos finos e parte dispersa para a atmosfera durante o processo de carbonização da madeira.

4.3 ANÁLISE DE VALOR DOS FLUXOS PRODUTIVOS

4.3.1 Análise do Fluxo de Valor Ambiental

O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) dos três Processos avaliados, identificando as entradas, as saídas e as emissões para a atmosfera dos gases restantes, após cada intervenção está apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Inventário do Ciclo de Vida (ICV), por Processo mapeado.

Descrição	ENTRADAS (kg)			SAÍDAS PRODUTOS (kg)			SAÍDAS P/ATMOSFERA (kg)		
	Processo 1	Processo 2	Processo 3	Processo 1	Processo 2	Processo 3	Processo 1	Processo 2	Processo 3
Massa Úmida de Madeira	6.240	5.283	4.060	-	-	-	-	-	-
Massa Seca de Madeira	5.453	3.204	2.339	-	-	-	-	-	-
Carvão	-	-	-	1.589	1.023	590	-	-	-
Atijos	-	-	-	435	9	260	-	-	-
Finos	-	-	-	20	60	30	-	-	-
Licor	-	-	-	-	-	110	-	-	-
Água total	-	-	-	-	-	-	2.432	3.163	2.268
Gases Condensáveis									
Metanol	-	-	-	-	-	-	101,8	21,1	38,3
Ácido acético	-	-	-	-	-	-	254,4	52,8	95,8
Alcatrões									
<i>Fenol</i>	-	-	-	-	-	-	20,3	4,2	7,7
<i>Guaiacol</i>	-	-	-	-	-	-	20,1	4,2	7,6
<i>2,6 Xilenol</i>	-	-	-	-	-	-	3,3	0,7	1,2
<i>Cresol</i>	-	-	-	-	-	-	3,6	0,8	1,3
<i>o-Cresol</i>	-	-	-	-	-	-	22,6	4,7	8,6
<i>p,m-Cresol</i>	-	-	-	-	-	-	23,1	4,8	8,7
<i>4-Etil-guaiacol</i>	-	-	-	-	-	-	3,8	0,8	1,4

(continua)

Descrição	ENTRADAS (kg)			SAÍDAS PRODUTOS (kg)			SAÍDAS P/ATMOSFERA (kg)		
	Processo	Processo	Processo	Processo	Processo	Processo	Processo	Processo	Processo
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>4-Propil-guaiacol</i>	-	-	-	-	-	-	0,3	0,1	0,1
<i>3,5-Xilenol</i>	-	-	-	-	-	-	16,5	3,4	6,2
<i>Siringol</i>	-	-	-	-	-	-	118,2	24,5	5,6
<i>4-Metil-siringol</i>	-	-	-	-	-	-	38,9	8,0	14,7
<i>4-Etil-siringol</i>	-	-	-	-	-	-	18,0	3,7	6,8
Gases Não Condensáveis									
CO ₂	-	-	-	-	-	-	788,6	1.596,1	337,4
CO	-	-	-	-	-	-	432,4	80,4	185,0
CH ₄	-	-	-	-	-	-	31,00	6,4	13,3
C ₂ H ₆	-	-	-	-	-	-	1,50	0,3	0,7
H ₂	-	-	-	-	-	-	8,10	0,0	3,5
Outros GNC	-	-	-	-	-	-	10,20	nd.	4,4
NO ₂	-	-	-	-	-	-	5,0	3,1	2,1
SO ₂	-	-	-	-	-	-	27,5	17,0	11,8

Na Tabela 11, os valores das saídas para atmosfera no Processo referem-se a todo o material gasoso ou sólido em suspensão proveniente da carbonização da madeira. Os valores das saídas para a atmosfera do Processo 2 referem-se ao que não foi queimado durante a combustão na fornalha e no Processo 3 ao que não foi condensado. Os valores obtidos, depois de tratados nos softwares identificados no item 3.2.4.1.4, geraram os resultados da ACV do carvão vegetal por processo avaliado, usando como unidade de análise 1 kgCV.

4.3.1.1 Análise do ciclo de vida do carvão vegetal por processo avaliado

Neste trabalho foram avaliados os impactos ambientais relativos das três tecnologias referidas no escopo para a produção do carvão vegetal, considerando alocação e material particulado classificado como finos (diâmetro $d_p < 2,5 \mu$). Ao considerar as fronteiras do estudo e conectar os fluxos tecnológicos de produção de

madeira com a base de dados ecoinvent, têm-se os resultados dos impactos C2G. Os resultados estão apresentados, por categoria de impacto, na Tabela 12.

Tabela 12 - Caracterização do impacto (%) por categoria e por Processo

Categoria de impacto	Processo 1	Processo 2	Processo 3
1. Mudanças climáticas - Saúde Humana	100%	89%	84%
2. Depleção do ozônio	100%	90%	84%
3. Toxicidade humana	100%	58%	78%
4. Formação de oxidantes fotoquímicos	100%	39%	77%
5. Formação de material particulado (dp < 2,5 µ)	69%	100%	55%
6. Radiação ionizante	100%	90%	84%
7. Mudanças climáticas – Ecossistemas	100%	87%	84%
8. Acidificação terrestre	100%	95%	84%
9. Eutrofização da água doce	100%	90%	84%
10. Ecotoxicidade terrestre	100%	33%	74%
11. Ecotoxicidade em água doce	100%	53%	78%
12. Ecotoxicidade marinha	100%	47%	76%
13. Ocupação de terras agrícolas	100%	90%	84%
14. Ocupação de terras urbanas	100%	90%	84%
15. Transformação de terras naturais	100%	90%	84%
16. Depleção do metal	100%	90%	84%
17. Depleção de fósseis	100%	90%	84%

A primeira constatação é a de que o Processo 1 foi o mais impactante em 16 das 17 categorias analisadas. Decidiu-se, portanto, tomar o Processo 1 como o processo de base para efeito de comparações com os Processos 2 e 3 .

Analisando as contribuições do Processo 2, em comparação ao Processo 1, verificou-se redução de impacto em todas as categorias (exceto material particulado).

Em relação às categorias de impacto ligadas a danos à saúde humana (categorias 1 a 6 na tabela 11), o Processo 2 apresentou significativas reduções de impacto nas categorias toxicidade humana (42pp) e formação fotoquímica oxidante (61pp), além de reduções nas categorias depleção do ozônio e radiação ionizante (10pp) e de mudanças climáticas (11pp). No caso do material particulado o Processo 2 passou a ser nesta categoria o equivalente a 100% de impacto.

Analisando as contribuições do Processo 2 em relação às categorias de impacto ligadas a danos ao ecossistema (categorias 7 a 15), significativas reduções

de impacto foram verificadas nas categorias ecotoxicidade terrestre (67pp), ecotoxicidade de água doce (47pp) e ecotoxicidade marinha (53pp). As outras categorias apresentaram alguma redução de impacto, variando entre, como na acidificação terrestre (5pp) e mudanças climáticas do ecossistema (13pp).

Quanto às categorias de impacto ligadas aos danos aos recursos (categorias 16 e 17), o Processo 2 contribuiu com uma redução na depleção de metal (10pp) e depleção de fósseis (10pp),

O Processo 3 apresentou reduções de impacto em todas as categorias quando comparado com o Processo 1 e na categoria formação de material particulado apresentou-se como o melhor dos três com uma redução de (14pp) em relação ao Processo 1, e se comparado com o Processo 2 a redução foi muito significativa (45pp).

Analisando as contribuições do Processo 3 em relação às categorias de impacto ligadas a danos ao ecossistema (categorias 7 a 15), foram verificadas reduções de impacto variando entre acidificação terrestre (16pp) e ecotoxicidade terrestre (26pp).

Quanto às categorias de impacto ligadas aos danos aos recursos (categorias 16 e 17), o Processo 3 contribuiu com uma redução na depleção de metal (16pp) e depleção de fósseis (16pp).

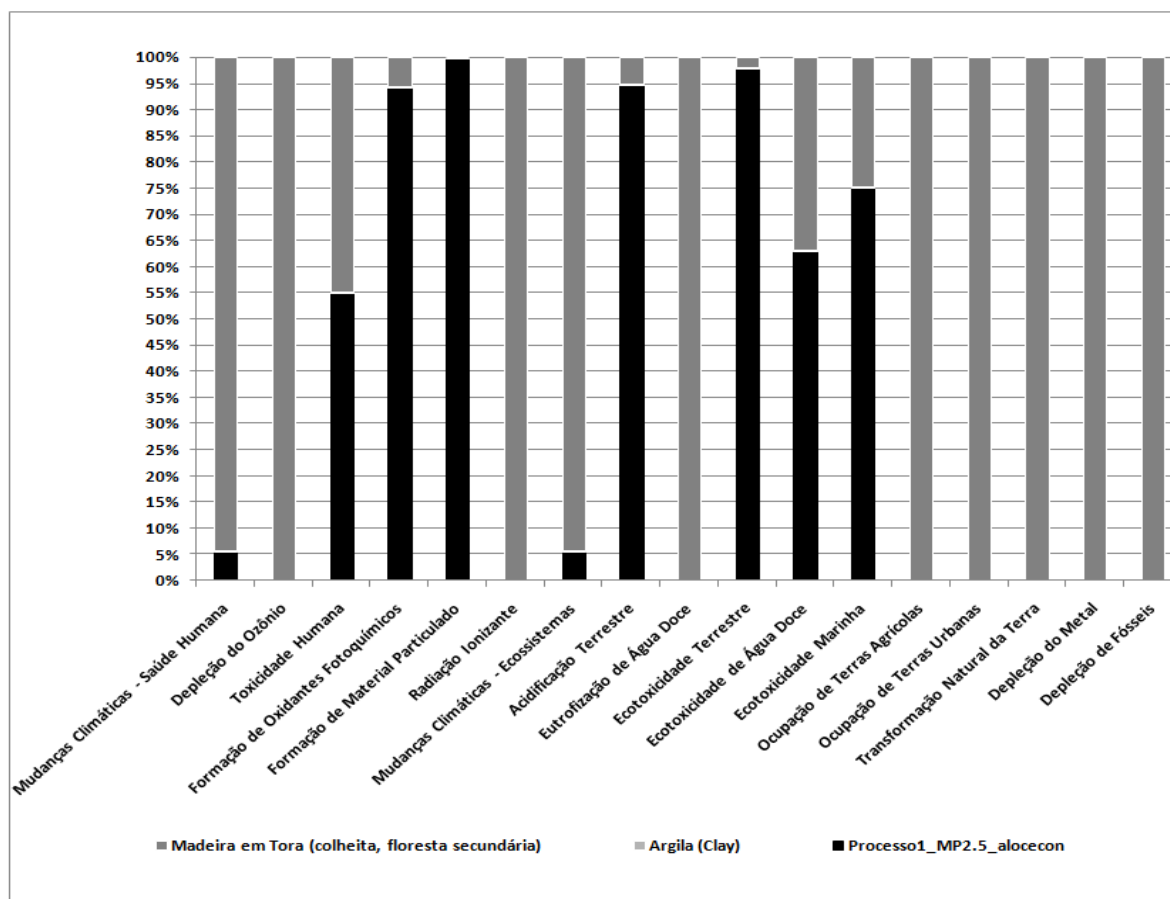
No caso do Processo 2, resultados mais significativos poderiam ser esperados, caso as reduções verificadas do CO (66,5%) e de CH₄ (70,0%) durante a combustão dos gases na fornalha, fossem maiores. Reduções superiores foram encontradas por Lana (2014), sendo 86,2% para o CO e 88,0% para o CH₄; por Coelho (2013) sendo 74,1% para o CO e 99,8% para o CH₄ e por Cardoso et al. (2010) sendo 93,8% para o CO e 96,9% para o CH₄, em sistemas similares. A menor redução dessas emissões pode ser atribuída ao dimensionamento da fornalha (DONATO, 2017). Santos et al. (2017) compararam o ciclo de vida do processo de carbonização com queima dos gases em diferentes tecnologias e afirmam que ao considerar o ciclo de vida da produção de carvão vegetal, nas fronteiras C2G, observa-se que os impactos ambientais possuem dependência principal sobre a eficiência de cada tipo de processo tecnológico de produção do carvão vegetal.

No caso do Processo 3, resultados mais significativos poderiam ser esperados se o condensador fosse mais eficiente, no experimento o resultado mostrou que 12% do total de gases condensáveis disponíveis, foram efetivamente

condensados, representando 4,7% de RG em licor pirolenhoso. Froehlich (2011) realizou dois experimentos de condensação da espécie *Acacia Mearnsii de Wild* (acácia negra): o experimento de laboratório resultou em 38% de RG em líquido condensado e, o experimento de campo, em sistema similar ao desta pesquisa, resultou em aproximadamente 6,5% de RG, mostrando que há oportunidade de melhorias importantes no condensador.

Cumpre, no entanto, apresentar a contribuição dos processos de carbonização e do uso da madeira dentro dos impactos totais provenientes da atividade. O Gráfico 2 mostra essas contribuições no Processo 1.

Gráfico 2 - Contribuições para impactos ambientais no Processo 1



O Gráfico 2 mostra que o processo de carbonização no Processo 1 contribui significativamente para as seguintes categorias de impactos:

a) em relação a potenciais danos à saúde humana, formada pelas categorias: toxicidade humana (55%), formação de oxidantes fotoquímicos (94%) e formação de material particulado (100%);

b) em relação aos danos à qualidade do Ecossistema nas categorias de impactos acidificação terrestre (95%), ecotoxicidade terrestre (98%), ecotoxicidade da água doce (63%) e ecotoxicidade marinha (75pp);

Com relação ao consumo de madeira, o Processo 1 consumiu 9% mais que o Processo 2 e 13% menos que o Processo 3 por tCV produzido. Os resultados mostram:

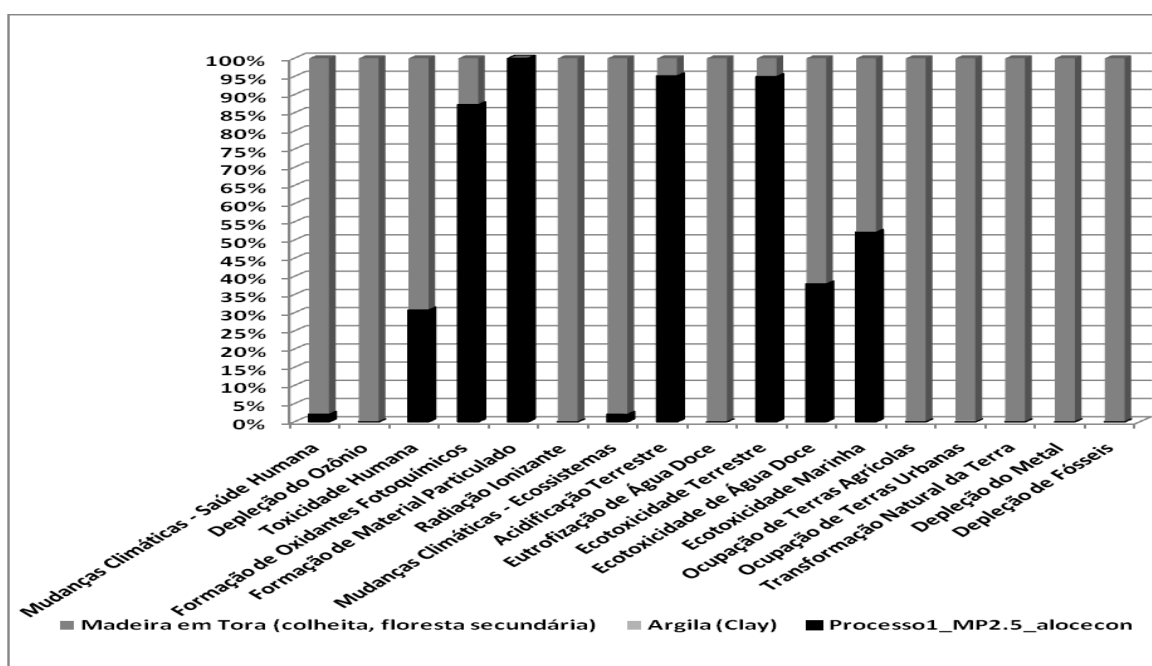
a) potenciais danos à Saúde Humana nas categorias mudanças climáticas (94%), depleção do ozônio (100%), toxicidade humana (45%) e radiação ionizante (100%);

b) contribuição para os danos à qualidade do Ecossistema nas categorias de impactos mudanças climáticas (94%), eutrofização de água doce (100%), ecotoxicidade de água doce (37%), ecotoxicidade marinha (25%), ocupação de terras agrícolas, ocupação de terras urbanas e transformação natural da terra (100% cada);

c) que o potencial impacto ambiental na categoria de danos aos Recursos foi de 100% para as categorias depleção do metal e depleção fóssil.

As contribuições do Processo 2 estão apresentadas no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Contribuições para impactos ambientais no Processo 2



O Gráfico 3 mostra que o processo de carbonização do Processo 2 impacta significativamente nas categorias de impactos:

a) em relação a potenciais danos à Saúde Humana, formada pelas categorias toxicidade humana (31%), formação de oxidantes fotoquímicos (87%) e formação de material particulado (100%);

b) em relação aos danos à qualidade do Ecossistema nas categorias de impactos acidificação terrestre (95%), ecotoxicidade terrestre (95%), ecotoxicidade da água doce (38%) e ecotoxicidade marinha (52%);

Com relação ao à utilização da madeira, o Processo 2 consumiu 9% menos que o Processo 1 e 21% menos que o Processo 3 por tCV produzido. Os resultados mostram:

a) potenciais danos à Saúde Humana nas categorias mudanças climáticas (98%), depleção do ozônio (100%), toxicidade humana (69%) e radiação ionizante (100%);

b) contribuição para os danos à qualidade do Ecossistema nas categorias de impactos mudanças climáticas (98%), eutrofização de água doce (100%), ecotoxicidade de água doce (62%), ecotoxicidade marinha (48%), ocupação de terras agrícolas, ocupação de terras urbanas e transformação natural da terra (100% cada);

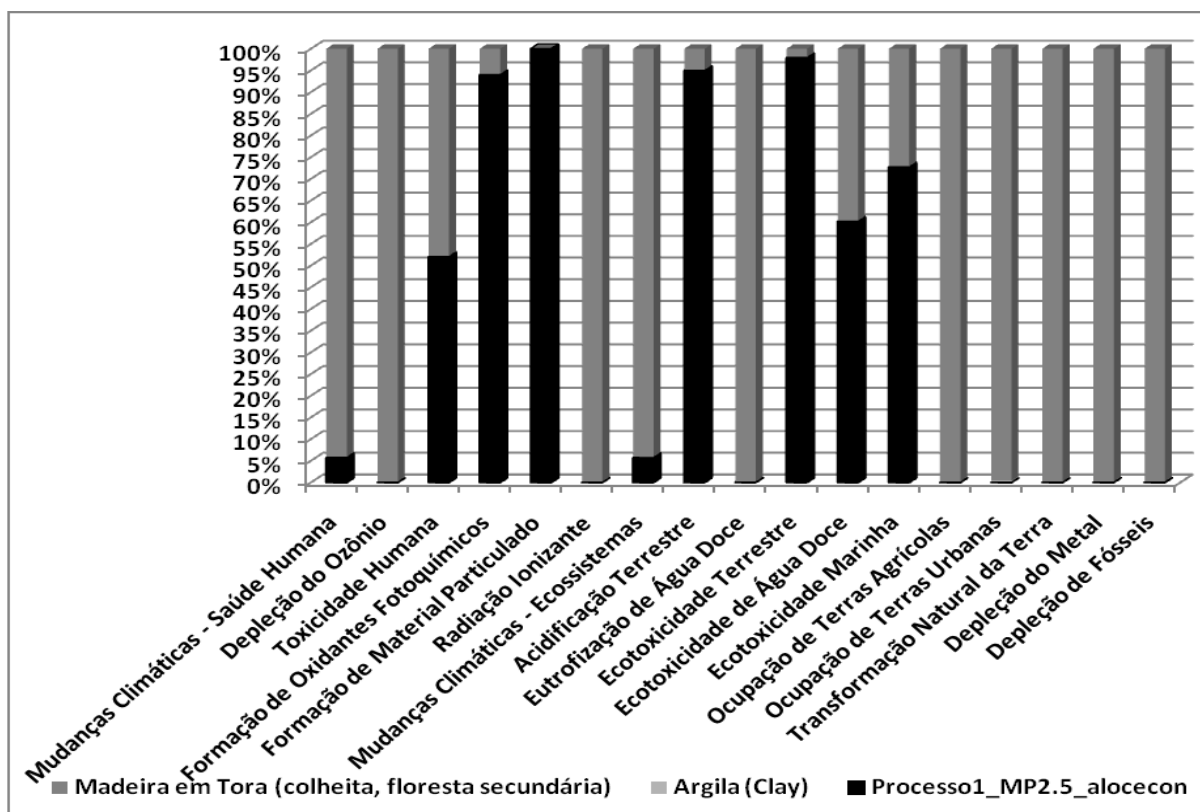
c) que o potencial impacto ambiental na categoria de danos aos Recursos foi de 100% para as categorias depleção do metal e depleção fóssil.

As contribuições do Processo 3 estão apresentadas no Gráfico 4 e mostra que o processo de carbonização do Processo 3 impacta significativamente nas categorias de impactos:

a) em relação a potenciais danos à Saúde Humana, formada pelas categorias toxicidade humana (52%), formação de oxidantes fotoquímicos (94%) e formação de material particulado (100%);

b) em relação aos danos à qualidade do Ecossistema nas categorias de impactos acidificação terrestre (95%), ecotoxicidade terrestre (98%), ecotoxicidade da água doce (60%) e ecotoxicidade marinha (73%);

Gráfico 4 - Contribuições para impactos ambientais no Processo 3



Com relação ao consumo de madeira, o Processo 3 consumiu 16% mais que o Processo 1 e 27% mais que o Processo 2 por tCV produzido. Os resultados mostram:

a) potenciais danos à Saúde Humana nas categorias mudanças climáticas (94%), depleção do ozônio (100%), toxicidade humana (48%) e radiação ionizante (100%);

b) contribuição para os danos à qualidade do Ecossistema nas categorias de impactos mudanças climáticas (94%), eutrofização de água doce (100%), ecotoxicidade de água doce (40%), ecotoxicidade marinha (27%), ocupação de terras agrícolas, ocupação de terras urbanas e transformação natural da terra (100% cada);

c) que o potencial impacto ambiental na categoria de danos aos Recursos foi de 100% para as categorias depleção do metal e depleção fóssil.

4.3.2 Análise do Fluxo de Valor Econômico

Das premissas que nortearam a análise do fluxo de valor econômico dos processos mapeados, resultou a Tabela 13, a partir dos dados fornecidos nos itens 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4 e 4.2.2.

Tabela 13 - Premissas-base para análise econômica, por Processo

Dados / Tipo de UPC	Processo 1	Processo 2	Processo 3
1. Capacidade produtiva considerada em t.	163	163	163
2. Investimento Inicial (R\$)	938.356	999.389	1.043.770
3. Custo de construção/forno	2.000	2.808	2.129
4. Custo do caminhão	150.000	150.000,00	150.000,00
5. Custo do trator com talha Munck	275.000	275.000,00	275.000,00
6. Custo da carreta Julieta	350.000	350.000,00	350.000,00
7. Custo das ferramentas	5.356	5.356,00	5.356,00
8. Capital de Giro	100.000	100.000,00	100.000,00
Dados Técnico-Operacionais			
9. Quantidade de fornos no sistema	29	42	77
10. Ø do forno m	4,00	3,00	2,75
11. Altura do forno m	1,30	1,50	1,80
12. Capacidade do forno em st de madeira	16	11	11
13. Volume de madeira úmida enfiada em st	11	7	6
(continua)			
Dados / Tipo de UPC	Processo 1	Processo 2	Processo 3
14. Tempo de carbonização em horas	204	192	200
15. Quantidade média de fornadas/mês por forno	3,5	3,8	3,6
16. Produção diária (carbonizações/forno)	0,118	0,125	0,120
17. Teor de umidade da madeira enfiada	15,7%	39,4%	42,4%
18. Massa da madeira úmida enfiada kg	6.240	5.283	4.060
19. Massa seca da madeira enfiada kg	5.453	3.204	2.339
20. Massa do carvão produzido	1.589	1.023	590
21. Volume a granel mdc carvão/fornada	6,8	6,5	2,9
22. Rendimento gravimétrico em CV (BS)	28,1%	31,9%	25,2%
23. Carbono fixo %	72,8%	79,1%	60,0%
24. Densidade aparente t carvão/m ³ de carvão (lab.)	0,381	0,355	0,321
25. Densidade a granel t carvão/m ³ de carvão (a granel)	0,233	0,156	0,204
26. Densidade básica da madeira t/m ³ BS	0,488	0,470	0,410
27. Razão volumétrica de conversão (madeira/carvão)	1,64	1,04	1,97

28. Finos de Carvão kg	20,0	59,7	30,0
29. Licor Pirolenhoso em kg	0,0	0,0	110,0
30. Dias produtivos no mês (fornos)	30	30	30
31. Regime de produção em horas/dia (fornos)	24	24	24
32. Horas trabalhadas/funcionário x mês	180	180	180
33. Número de empregados	7	11	19
34. Tempo médio de mão de obra/forno	43,4	46,7	44,6
35. Produção mensal de carvão em t	163	163	163
36. Produção comercial mensal de finos	0	0	0
37. Produção mensal de licor pirolenhoso (kg)	0	0	8.442

Custos Operacionais

38. Mão de obra em R\$/hora	13,66	13,66	13,66
39. Preço da madeira R\$/st CIF	45,00	45,00	45,00
40. Custo médio mensal estimado de manutenção de fornos	400,00	820,91	1.582,53
41. Custo médio mensal manutenção de equiptos e outros	4.250,00	4.250,00	4.250,00
42. Embalagens (gasto mensal)	45,00	45,00	45,00
43. Combustíveis (gasto mensal)	5.890,00	5.890,00	5.890,00
44. Custo Unitário do CV R\$/t	732,97	996,20	1.588,61
45. Madeira/fornada (CIF)	502,81	306,76	256,67
46. Mão de Obra/fornada	657,97	707,45	674,88
47. Manutenção/fornada	3,91	5,16	5,73

Preço de Venda do CV, Finos e Licor Pirolenhoso

48. R\$/t de Carvão CIF	750,00	750,00	750,00
-------------------------	--------	--------	--------

(continua)

Dados / Tipo de UPC	Processo 1	Processo 2	Processo 3
49. R\$/t de Finos CIF	80,00	80,00	80,00
50. R\$/l de Licor CIF	Xxx	Xxx	1,50

Nota: Origem dos dados:

(a) Dados coletados do Processo 1: 1-14;18; 20; 28-33; 36-43; 48-50;

(b) Dados coletados do Processo 2: 3;10-14; 18; 20; 28; 29; 36; 37; 49; 50;

(c) Dados coletados do Processo 3: 3;10-14; 18; 20; 28; 29; 36; 37; 49; 50;

(d) Dados adotados do Processo 1 para os Processos 2 e 3: 1; 2; 4-9;30-32; 38; 39; 41-43; 48;

(e) Dados calculados para o Processo 2:

9: calculado para uma capacidade igualada para todos os Processos;

33: proporcional ao número de fornos em relação ao Processo 1;

40: (proporcional ao custo de construção do forno);

(f) Dados calculados para o Processo 3: 9; 33; 40 (proporcional);

(g) Dados calculados para todos os Processos: 15; 16;19; 21; 22; 27; 34; 35; 44-47;

(h) Dados obtidos em Laboratório: 17; 23-26

Com relação aos finos gerados após o descarregamento dos fornos, não foi evidenciada a prática de comercialização em nenhum dos Processos mapeados. Isto se explica, em parte, pela dificuldade na separação de materiais contaminantes

e pela pequena quantidade gerada. Os produtores responsáveis pelos Processos 1 e 3 utilizam os finos em substratos usados em plantações nas fazendas.

A Tabela 13 possibilitou a elaboração dos fluxos de caixa anuais, como mostra a Tabela 14.

Tabela 14 - Fluxo de Caixa Anual (em R\$1.000), por Processo

Processos	Processo 1		Processo 2		Processo 3	
	0	1 [..10]	0	1 [..10]	0	1 [..10]
Itens/Ano						
A) Investimento Inicial	-938		-999		-1.044	
B) Entradas						
Receitas de Vendas						
Carvão		1.464		1.464		1.467
Finos		0		0		0
Licor Pirolenhoso		0		0		13
C) Total de Entradas		1.464		1.464		1.480
D) Saídas						
Madeira		618		585		851
Mão de Obra		207		325		561
Outros custos operacionais		127		132		141
E) Total de Saídas		951		1.042		1.553
F) Saldo (C-E)		513		422		-73
G) Fluxo de Caixa Anual	-938	513	-999	422	-1.044	-73

O fluxo de caixa trata de uma projeção. Portanto, pode ser tratado como um fluxo de entradas e saídas constantes em cada período (após o ano zero), resultando, para efeitos práticos, numa análise de fluxo de caixa de valor médio equivalente, considerado para os experimentos para 10 anos.

A partir dos dados contidos nos fluxos de caixa foi possível explicitar os indicadores econômicos, resultando na Tabela 15.

Tabela 15 - Indicadores econômicos, por Processo.

Indicadores Econômicos	Processo 1	Processo 2	Processo 3
Lucratividade (%)	35	29	-5
Rentabilidade (%)	546	422	-70
Payback (anos)	1,8	2,3	ND
VPL (Valor Presente Líquido em R\$)	1.604.147	1.329.609	-1.301.378
TIR (Taxa Interna de Retorno %)	54	41	ND

Com o preço de venda do CV para o mercado doméstico, da região do Estado do Paraná e custo da madeira praticado na região, adotados nas premissas, a análise da Tabela 15 indica viabilidade econômica nos Processos 1 e 2, com predominância do Processo 1 em todos os indicadores.

A predominância do Processo sobre o Processo 2, em termos econômicos, pode ser explicada pelo fato do Processo 2 não ter sido otimizado quanto às despesas operacionais, uma vez que alguns dados foram adaptados do Processo 1 para permitir a comparação entre eles.

Outra explicação do melhor desempenho econômico do Processo 1 está ligada ao fato de que os Processos 2 e 3 possuem fornos de menor capacidade volumétrica, exigindo maior número de carbonizações, entre outros fatos.

Fatores tais como a baixa densidade, o alto teor de umidade e o baixo volume de madeira enfiada, levaram ao baixo desempenho do Processo 3, mostrando a inviabilidade econômica desse Processo, quando comparado com os Processos 1 e 2.

Numa análise de sensibilidade, considerando variável o preço de venda e todo o mais constante, para que os Processos 1, 2 e 3 sejam economicamente viáveis, o preço de venda por tonelada de carvão não deve ser inferior a R\$ 572,50; R\$ 624,50 e R\$ 882,20, respectivamente.

Considerando todo o mais constante, menos o preço da madeira, para que os Processos 1, 2 e 3 sejam economicamente viáveis, o preço máximo para a aquisição do estéreo da madeira deve ser de R\$ 70,20; R\$ 63,80 e R\$ 31,30, respectivamente.

Dessa forma, ao necessitar de um preço de venda 17,6% maior e de um preço de compra da madeira 30,4% menor do que os valores adotados como base na análise, a inviabilidade é explicada.

O estudo de Dallastra (2010) comparou tecnologias baseadas em fornos metálicos e em fornos em alvenaria do tipo retangulares e circulares. O autor enfatizou que, do ponto de vista do retorno do investimento, quanto menor o investimento, maior o percentual de retorno (tecnologia rudimentar) e que a margem de lucro líquida é diretamente proporcional à eficiência do processo (tecnologia avançada). Afirmou, ainda, que a tecnologia de fornos circulares do tipo rabo quente apresentou o maior retorno sobre o capital investido, porém se apresentou mais sensível às variações nos preços da madeira e do carvão.

Silva; Farias (2015) analisaram a viabilidade econômica da produção de CV em três fornos circulares de alvenaria do tipo rabo quente. Consideraram fornos com e sem chaminé e forno do Sistema Brochier com condensação dos gases; madeira própria proveniente de plantio consorciado de acácia negra com milho e madeira adquirida de terceiros. Os autores encontraram maior atratividade na produção pelo Sistema Brochier justificada pelo uso de madeira própria e pela renda obtida com a venda do licor pirolenhoso.

Oliveira et al. (2017) analisaram a viabilidade e o risco econômico da produção do CV em sistema forno-fornalha e em forno rabo quente. Constataram que o sistema forno-fornalha apresentou maior viabilidade econômica, explicada principalmente, pela obtenção de maior RGCV e que a probabilidade do sistema ser economicamente inviável era de 0,9% enquanto que para o forno rabo quente essa probabilidade era de 27,3%.

4.4 OPORTUNIDADES DE MELHORIAS NOS FLUXOS PRODUTIVOS

A análise SWOT (Quadro 5) por si só identifica as oportunidades de melhorias nos fluxos produtivos, notadamente aquelas referidas nos quadrantes Fraquezas e Oportunidades.

O uso de instrumentos de medição (balança e medidor de temperatura) não faz parte da rotina dos carbonizadores. Em relação ao uso da balança, muitos consideram que a atividade aumenta a carga de trabalho e não compreendem a importância desse controle. Em relação aos medidores de temperatura, acreditam que o uso pode ajudar no controle do processo. No entanto, essa implantação deve ser acompanhada de treinamento e da inserção de procedimentos (ficha de controle, por exemplo).

Todas as oportunidades de melhorias verificadas ao longo desta pesquisa estão retratadas no modelo proposto.

5 PROPOSTA DE MODELO AMBIENTAL E ECONÔMICO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

Este capítulo apresenta uma proposta de modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal, a partir dos resultados encontrados na literatura, nos mapeamentos, na análise do ciclo de vida, na análise econômica dos Processos avaliados e na identificação das oportunidades de melhorias.

Considerando que qualquer proposta para a produção de CV em pequena escala deve levar em conta a pouca disponibilidade financeira da maioria dos produtores, assim como a dificuldade de acesso às informações técnicas mais elaboradas, a conjunção destes dois fatores determina que as soluções devam ser simples, práticas, pouco onerosas e aproveitar o que já existe de bom e consolidado.

5.1 ETAPAS DA PROPOSTA DO MODELO

A proposta foi planejada em três etapas e construída a partir do conhecimento adquirido na literatura, nos resultados das avaliações ambiental e econômica dos experimentos de campo e na identificação das oportunidades de melhorias dos processos mapeados.

A Seção 2.2 descreve a Etapa 1 onde está reunido o conhecimento do estado da arte para a construção do cenário apresentado na literatura e representado na Figura 14.

A Seção 4.2 apresenta os resultados de representações reais de cada processo produtivo mapeado e com seus respectivos fluxogramas apresentados nas Figuras 15, 16 e 17.

As Seções 4.3 e 4.4 apresentam os resultados das análises de valor ambiental e econômico de cada processo produtivo.

A Seção 4.5 complementa os subsídios para a elaboração da proposta do modelo.

A sustentabilidade do processo de produção de carvão vegetal está baseada na garantia da permanência da atividade de acordo com:

(i) a capacidade do não comprometimento dos recursos naturais pela utilização de matéria-prima de origem renovável e que o manejo seja adequado de forma a não agredir o meio ambiente;

(ii) a capacidade de viabilizar o maior aproveitamento dos recursos disponíveis por meio do uso de tecnologias e de boas práticas de fabricação;

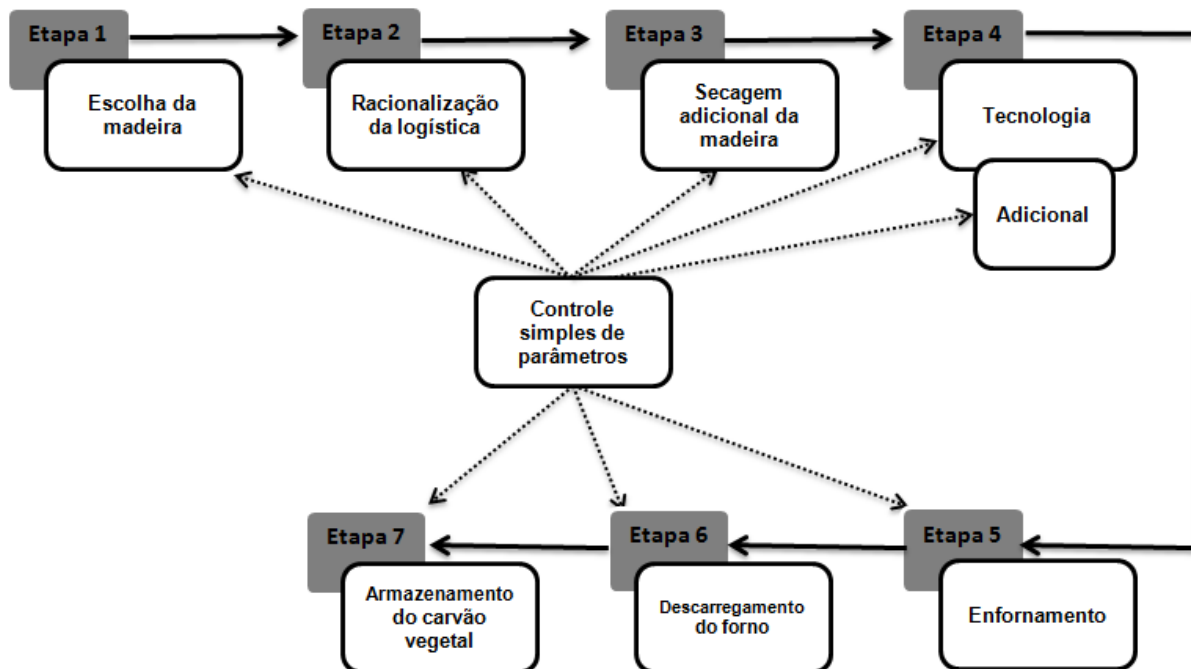
(iii) a garantia de que o ser humano será respeitado em suas necessidades elementares, tanto aqueles envolvidos na atividade, quanto aqueles no seu entorno;

(iv) o respeito ao meio ambiente pela não emissão de poluentes e do cumprimento da legislação pertinente; e,

(v) a viabilização econômica da atividade na geração de ganhos suficientes para a manutenção da atividade e sem agressão ao meio ambiente.

Baseado nessas condições, o modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal contempla as etapas descritas na Figura 18, numa visão macro do modelo concebido para uma UPC em pequena escala.

Figura 18 - Visão macro do modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal



A Figura 18 sintetiza as etapas do modelo e mostra as atividades pertinentes a cada uma delas, destacando que a atividade 'Adicional' refere-se à possibilidade de escolha da fonte do calor, por câmara de combustão externa, ao invés da fonte interna de calor. A fonte externa permitirá o aproveitamento de resíduos florestais

para provimento do calor necessário ao aquecimento do forno sem que a madeira enfornada seja queimada para este fim.

Na fonte interna de calor, a ignição é iniciada pela queima da madeira, em torno de 10–20%, para aquecimento do forno (BRITO, 1990). Na fonte externa, a ignição é iniciada numa câmara externa pela queima de qualquer material combustível, como resíduos florestais, alcatrão, gás, entre outros e os gases quentes são introduzidos na carga para a realização da pirólise (PINHEIRO et al., 2006). Essa decisão gera custos de construção, requer experiência e mais acompanhamento, no entanto proporciona aumento no RGCV e maior receita de venda.

5.2 ATIVIDADES PERTINENTES ÀS ETAPAS DO MODELO PROPOSTO

O Quadro 6 especifica as atividades de acordo com as etapas estabelecidas no modelo.

Quadro 6 - Descrição das etapas do modelo

Etapas do Modelo	Atividades
1. Escolha da espécie da madeira	<ul style="list-style-type: none"> - planejar plantio com as seguintes condições: <ul style="list-style-type: none"> . Características da Espécie: <ul style="list-style-type: none"> (a) alta densidade (> 500kg/m³); (b) alto teor de lignina; (c) alta produtividade¹ (36 m³/ha.ano). . Manejo: <ul style="list-style-type: none"> (d) condições edafoclimáticas; (e) espaçamento; (f) manejo adequado; - adquirir madeiras com as seguintes características, além das citadas acima: <ul style="list-style-type: none"> (g) idade de corte (média de 7 anos); (h) dimensões (Φ entre 10 e 20 cm; entre 1,20 m e 1,70 m); (i) baixo teor de umidade (< 30%).
2. Logística	<ul style="list-style-type: none"> - minimizar a distância entre a fonte de madeira e a UPC; - verificar condições das vias de acesso; - verificar a existência de transporte adequado; - avaliar a influência do custo do transporte.
3. Secagem adicional da madeira	<ul style="list-style-type: none"> - fazer secagem adequada de campo; - considerar o aproveitamento do calor gerado na combustão dos gases não condensáveis na secagem adicional da madeira.

Etapas do Modelo	Atividades
4. Tecnologia de Produção	<ul style="list-style-type: none"> - construir a UPC considerando a instalação de um sistema produtivo conjunto e instrumentado, composto por: <ul style="list-style-type: none"> . forno circular de alvenaria; . sistema de condensação; . sistema de combustão; . estufa de secagem da madeira (ou usar o próprio forno); . tubos metálicos; . pirômetros; . sistema de pesagem.
Adicional	O forno circular de alvenaria pode ser construído com câmara externa para economia da madeira enfiada. O aquecimento da carga pode ser feito com a utilização de resíduos florestais.
5. Enfornamento da madeira	- padronizar a disposição da madeira no interior do forno.
6. Controles simples de parâmetros	<ul style="list-style-type: none"> - estimar o teor de umidade; - controlar a temperatura na estufa de secagem; - pesar matéria-prima e produtos; - adotar faixas de tempo e temperatura conforme umidade estimada.
7. Descarregamento do forno	<ul style="list-style-type: none"> - definir procedimento para descarregamento do carvão; - definir tipo de embalagem do carvão de acordo com a destinação.
8. Armazenamento do carvão	- determinar período de armazenamento do carvão.

Nota: ¹ Base 2015 (IBÁ, 2016).

As atividades pertinentes a cada etapa foram explicadas a seguir:

1. **Escolha da espécie da madeira:** O suprimento de madeira para a UPC pode ser feito de duas formas: pela formação de floresta própria ou pela compra de madeira produzida por terceiros. Em ambas as formas, a observância da qualidade da madeira é a mesma. A escolha da espécie da madeira para o planejamento do plantio da floresta deve estar baseada na espécie que possuir maior densidade básica (kg/m^3), maior teor de lignina (%), maior produtividade em $\text{m}^3/\text{ha.ano}$ (metro cúbico por hectare ano), técnicas de plantio (espaçamento entre plantas, p.ex.) e manejo adequado em função da área disponível e das condições edafoclimáticas. Essas informações estão disponíveis nos viveiros florestais de cada região e nos órgãos públicos de assistência técnica e extensão rural (por exemplo: CATI - Coordenadoria de Assistência Técnica Integral; Casa da Agricultura;

EMATER - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural). A idade de corte é influenciada pela espécie plantada e pelas condições edafoclimáticas.

Na opção pela compra da madeira produzida por terceiros devem ser observados: a idade da árvore abatida, a densidade básica, as dimensões (comprimento e diâmetro) e o teor de umidade.

2. **Logística:** O transporte representa uma parcela importante no custo de produção do carvão vegetal. Quanto menor a distância entre a fonte de madeira e a UPC, menor o custo de produção e maior a receita do empreendimento. Devem ser consideradas as condições das vias de acesso entre a fonte de madeira e a UPC. Quanto melhores forem as vias de acesso e mais adequado for o veículo para o transporte da madeira, menor o desgaste do veículo, menor o consumo de combustível e menor o tempo gasto no trajeto, conseqüentemente, menor o custo de produção.

3. **Secagem adicional da madeira:** O teor de umidade da madeira depende, além das características anatômicas da espécie, da época do ano em que foi feito o corte, das condições climáticas (umidade relativa do ar, insolação, corrente de ar, entre outras), da montagem/disposição da pilha e do tempo (dias ou meses) de exposição ao ar livre para secagem natural. No entanto, a exposição da madeira ao ar livre não é suficiente para alcançar um teor de umidade adequado para uma pirólise eficiente e o produtor deve optar por uma secagem adicional. Para isto, os gases não condensados provenientes da pirólise, após passagem pelo condensador, devem ser queimados numa fornalha. O teor de umidade adotado como máximo sugerido para uma madeira de secagem ao ar deve estar abaixo de 30%, mas ao se adotar a secagem adicional em estufa pode-se estabelecer como máximo aceitável 20%, sendo mesmo possível chegar a 10%. Vale lembrar que, quanto menor o teor de umidade da madeira, menor o consumo da madeira enfiada, menor o tempo de carbonização, menor a quantidade de emissões e maior o RGCV, conseqüentemente, maior a receita de vendas.

4. **Tecnologia de produção:** A instalação da UPC deve ser composta por fornos circulares, sistema de condensação dos gases condensáveis (câmara de resfriamento e coletor), sistema de combustão dos gases não condensáveis (fornalha), sistema para secagem da madeira (canalização de mistura de ar atmosférico para diminuição da temperatura antes da estufa para aproximadamente 150°C, estufa e chaminé) e sistema simples para monitoramento dos fornos,

fornalha e estufa (tubos metálicos e pirômetro). Toda a instalação deve ser feita de forma linear e em alvenaria, tornando o sistema construtivo de baixo custo e de fácil execução, conforme sugestão apresentada no Anexo A.

A UPC deve ser formada por conjuntos de 4 (quatro) fornos, no mínimo, interligados ao restante do sistema. Quanto mais fornos forem interligados, maior a possibilidade de sincronização, de modo a possibilitar o fornecimento de gases combustíveis ao sistema de combustão e, conseqüentemente, garantir o fornecimento de calor suficiente para o sistema de secagem da madeira, com continuidade, sem a necessidade de consumo de material auxiliar para manutenção da chama na fornalha de combustão dos gases. A eficiência da operação será determinada pela eficiência do planejamento da produção.

O modelo do forno deve seguir a estrutura dos fornos de superfície, com uma abertura na porta do forno e tatus distribuídos na sua base para controle de entrada de ar no forno.

Uma câmara posicionada no lado oposto à porta de cada forno direciona os gases ao longo da tubulação de resfriamento. Esta tubulação deve ser longa e resfriada por serpentina helicoidal, por exemplo, de modo a aumentar o tempo de permanência dos gases e para que ocorra o maior volume de líquido condensado possível. Esta tubulação não deve ser de aço comum, pois os gases vão corroê-la, pode ser de tubo PVC, por exemplo.

Na seqüência, os gases que não foram condensados passarão por uma câmara de combustão. Essa câmara deve ser capaz de queimar com eficiência os gases restantes, com o menor uso possível de material auxiliar (madeira ou resíduos florestais). Os gases quentes da câmara de combustão (fornalha) devem ser direcionados à estufa de secagem da madeira. Faz-se necessária a diluição dos gases provenientes da fornalha com ar frio ambiente, de forma a diminuir a temperatura para aproximadamente 150°C, objetivando uma secagem adequada da madeira, sem o perigo de iniciar a ignição dentro da estufa de secagem.

O mercado para o licor pirolenhoso está ainda em desenvolvimento. Existe para o produtor em pequena escala a oportunidade de utilizá-lo nas outras eventuais atividades da propriedade (tratamento de dejetos da criação de suínos, p.ex.) ou na comercialização com os mesmos fins para propriedades vizinhas. Na eventualidade de não haver utilização e/ou venda para o licor pirolenhoso ou parte dele o sistema

deve prover a possibilidade de com uma simples comutação permitir a queima dos gases antes da condensação.

A estufa de secagem deve ser dimensionada considerando o volume de entrada dos gases, o volume e a umidade da madeira contida na estufa. Ainda, permitir o fluxo dos gases quentes e o correto direcionamento da umidade retirada da madeira pela chaminé posicionada no lado oposto à entrada dos gases quentes. A chaminé deve ser dimensionada de tal forma a proporcionar o correto fluxo dos gases desde os fornos.

5. **Enfornamento da madeira:** a madeira a ser enfornada deve ser a mais padronizada possível, em termos de espécie, idade, tamanho, diâmetro e teor de umidade. A disposição da madeira dentro do forno deve proporcionar livre trânsito dos gases quentes para toda a carga.

6. **Controles simples de parâmetros:** a instrumentação dos fornos e periféricos (condensador, queimador, estufa e chaminé) é de suma importância para o controle do processo de produção. Os equipamentos importantes para este controle são: balança para pesagem da madeira, do carvão, dos atijos e dos finos; tubos metálicos instalados nas paredes dos fornos e da fornalha, e aparelho medidor da temperatura. A temperatura e o tempo de permanência devem acompanhar as faixas estabelecidas por Oliveira et al. (2013) e mostradas na Tabela 4, em função do teor de umidade da madeira enfornada.

7. **Descarregamento do forno:** a etapa de descarregamento dos fornos deve otimizar o tempo do operador, por meio da diminuição de atividades. Para tanto, em caso de ensacamento do carvão, a atividade de esvaziamento do forno com balaios para ensacamento posterior pode ser eliminada. O ensacamento deve ocorrer dentro do próprio forno. Isto diminuirá o esforço físico do operador.

8. **Armazenamento do carvão:** as atividades de armazenamento do carvão dependerão da logística estabelecida para escoamento da produção. O local para armazenamento deve ser coberto, preferencialmente, para evitar efeitos das intempéries e influências na qualidade do carvão.

6 CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta as conclusões da pesquisa, as dificuldades encontradas, assim como as limitações e sugestões de trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES E LIMITAÇÕES

O mapeamento e avaliação dos processos consideraram três rotas tecnológicas. A rota tecnológica do Processo 1 é madura e utilizada na maioria dos processos produtivos de carvão vegetal em uso no país. A rota tecnológica presente no Processo 2 é emergente e está em fase de implantação e em constante aprimoramento. A rota tecnológica a que se refere o Processo 3, mesmo estando consolidada está concentrada em pequenas comunidades, necessita de reforço nas pesquisas para que seja disseminada.

A análise de valor ambiental destaca o Processo 1 como o mais impactante entre os processos avaliados, enfatizando a necessidade de mudança de paradigma. Os Processos 2 e 3, mostraram melhorias significativas em relação ao Processo 1, no entanto carecem ainda de adequações tecnológicas para melhoria da eficiência sob o ponto de vista de performance ambiental.

Sob este aspecto, das sugestões do modelo proposto, destacam-se:

Logística: a racionalização da logística contribui para a diminuição de emissões provenientes de combustíveis fósseis, principalmente;

Secagem adicional da madeira: utilizando o calor gerado pela queima dos gases não condensáveis provenientes da pirólise apresenta alto grau de melhorias ambientais pela redução dos gases de efeito estufa, redução de outros poluentes e redução da necessidade de madeira para a produção do CV, conseqüentemente redução da necessidade de florestas;

Tecnologia de Produção: as melhorias tecnológicas têm alto impacto na melhoria ambiental ao favorecerem diretamente a diminuição de emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes;

Controle de parâmetros: a influência do controle de parâmetros está diretamente correlacionada com a eficiência operacional que, por sua vez, influencia diretamente no volume das emissões.

A análise de valor econômico destaca que, embora a atividade de produção de carvão vegetal tenha mostrado a oportunidade de se operar com processos de baixa tecnologia e que pelo fato do investimento ser muito baixo apresentam atratividade quanto ao retorno do investimento. A margem de lucro líquida, por outro lado, tem se mostrado cada vez mais dependente da redução do custo operacional e, portanto, dependente da eficiência da operação.

Todas as sugestões do modelo trazem contribuições para a eficiência operacional, como na Escolha da madeira; Secagem adicional da madeira; Adequações da tecnologia, destacando os Controles de parâmetros que apresentam o mais alto grau de influência na melhoria da eficiência do processo.

Seguindo a sugestão dada por Smebye et al. (2017) de que as tecnologias rudimentares não devem ser incentivadas, o presente trabalho conclui que, do ponto de vista da viabilidade econômica, a melhoria da tecnologia prevalente e dos procedimentos operacionais devem ser considerados, por meio de soluções simples e pouco onerosas, que possam atender os objetivos de aumento da eficiência operacional e, ao mesmo tempo, serem acessíveis aos produtores de pequena escala.

A evolução nos âmbitos econômico e ambiental tem como fator limitador a necessidade absoluta de: *i*) conscientização do universo de produtores de pequena escala da necessidade de se aprimorar a atividade; *ii*) desenvolvimento, via órgãos oficiais (Universidades, EMATER e SENAR, por exemplo), de programas que levem ao produtor as instruções necessárias contidas no modelo; e, *iii*) criação de programas oficiais que incentivem o produtor de pequena escala a se adequar ao modelo oficialmente proposto.

A melhoria das condições de trabalho com reflexo na saúde do trabalhador deve ser uma consequência da melhoria da tecnologia e dos procedimentos operacionais.

6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Esta pesquisa limitou-se ao estudo das rotas tecnológicas situadas nos Estados de Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul e indica sua replicação para outras localidades.

- Futuras avaliações de ciclo de vida devem considerar a comparação das emissões com fontes de energias fósseis e do modelo proposto;

- O desenho esquemático apresentado no Anexo A deve ser transformado em projeto;

- As sugestões do modelo proposto devem ser transformadas em instruções práticas, por meio de cartilhas, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14040: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estruturas**. Rio de Janeiro, 2001.
- ADAM, J. C. Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort–kiln (Eco-charcoal). **Renewable Energy**, 2007 World Renewable Energy Conference - Pacific Rim Region. v. 34, n. 8, p. 1923–1925, ago. 2009.
- AFRANE, G.; NTIAMOAH, A. Comparative life cycle assessment of charcoal, biogas, and liquefied petroleum gas as cooking fuels in Ghana. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 4, p. 539–549, 1 ago. 2011.
- ALMEIDA, M. R. **Recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria**. Produção e utilização de carvão vegetal. CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais: Belo Horizonte, , 1982.
- ALMEIDA, R. S. 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. R. **Utilização de frações de alcatrão na síntese de resinas fenólicas para substituição parcial de fenol e formaldeído**. 2003. Tese (Doutorado) - Ciência Florestal, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.
- ANDRADE, F. W. C. **Teste em equipamento MACRO ATG: rendimento gravimétrico sólido e transferência térmica na pirólise da madeira de Eucalyptus**. Dissertação (Mestrado) - Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade de Lavras. Lavras, 2015.
- ANTAL, M. J.; GRØNLI, M. The art, science, and technology of charcoal production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 42, n. 8, p. 1619–1640, 1 abr. 2003.
- ARANTES, M. D. C. et al. Charcoal characteristics of an *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake clone. **CERNE**, v. 19, n. 3, p. 423–431, set. 2013.
- ARAÚJO, J. C. DE A. **Auditoria técnica como ferramenta para melhorias da produção de carvão vegetal: estudo de caso dos fornecedores da Metalsider**. Sociedade de Investigações Florestais-SIF/Universidade Federal de Lavras-UFLA. **Anais...** In: IV FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte-MG: SIF - Sociedade de Investigações Florestais, 2016
- ARROCHA, F.; VILLENA, M. G. Applying a bioeconomic optimal control model to charcoal production: the case of slash-and-burn agriculture in Mexico. **Ciencia e Investigación Agraria**, v. 39, n. 3, p. 489–504, 1 set. 2012.

ARRUDA, T. P. M. et al. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, v. 35, n. 4, 2011.

ASSIS, C. O. DE et al. **Sistema alternativo para carbonização de madeira**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade de Lavras. Lavras, 2008.

ASSIS, M. R. et al. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291–302, set. 2012.

BAILIS, R. Modeling climate change mitigation from alternative methods of charcoal production in Kenya. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 11, p. 1491–1502, nov. 2009.

BAILIS, R. et al. Innovation in charcoal production: a comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, Special Issue on Charcoal. v. 17, n. 2, p. 189–200, abr. 2013.

BARCELLOS, D. C. **Forno container para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição**. 2002. Dissertação (Mestrado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2002.

BARCELOS, D. C. **Cadeia produtiva do carvão vegetal: mercado, competitividade e sustentabilidade**. **Meu Negócio Florestal**, 25 out. 2016. Disponível em: <<http://meunegocioflorestal.com/cadeia-produtiva-do-carvao/>>

BASSUK, J. A.; WASHINGTON, I. M. The A3 problem solving report: a 10-step scientific method to execute performance improvements in an academic research Vivarium. **PLOS ONE**, v. 8, n. 10, p. e76833, 29 out. 2013.

BASTOS FILHO, J. G. **Sistemas alternativos de produção de carvão vegetal em pequena e média escala**. . In: IV FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL E I SEMINÁRIO DE ENERGIA DA BIOMASSA FLORESTAL. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: SIF - Sociedade de Investigações Florestais; DEF/UFV - Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, 8 nov. 2016. Disponível em: <<http://www.sif.org.br/evento/iv-forum-nacional-sobre-carvao-vegetal--ii-forum-de-energia-da-biomassa-florestal>>

BOAS, M. A. V. et al. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Sci. For., Piracicaba**, v. 38, n. 87, p. 481–490, set. 2010.

BRITO, J. O. **Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira**. **Documentos Florestais**. ESALQ. USP/– **Documentos Florestais: Piracicaba (9): 1-19, maio 1990**. USP/ESALQ - Documentos Florestais: Piracicaba (9): 1-19, , maio 1990.

BRITO, J. O. **Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise**. 1992. Tese (Doutorado) - Ciência Florestal, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”. Piracicaba, 1992.

BRITO, J. O. et al. **Produção de carvão vegetal no Brasil e o atual estágio das tecnologias para aproveitamento dos gases do processo.** Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/download.php?tabela=documentos&id=1075&leitura=s>>. Acesso em: 11 set. 2017.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia.** n. 2 ed. Piracicaba, SP: IPEF, 1981. v. v.2

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de Eucalyptus: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR.** 2008. Dissertação (Mestrado) - Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2008.

CAMPOS, M. G. **Abordagem de ciclo de vida na avaliação de impactos ambientais no processamento primário offshore.** 2012. Projeto de Graduação/Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2012.

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

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

CARDOSO, M. T. **Secagem de toras para produção de carvão vegetal.** 2015. Tese (Doutorado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2015.

CARNEIRO, A. C. O. et al. **Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal.** [s.l.] Editores, 2013.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Potencial energético da madeira de Eucalyptus sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, 2014.

CARVALHO, R. M. M. A.; SOARES, T. S.; VALVERDE, S. R. Caracterização do setor florestal: uma abordagem comparativa com outros setores da economia. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 1, 2005.

CARVALHO, S. R. et al. Instrumentação térmica aplicada ao processo de produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria. **Revista Árvore**, v. 36, n. 4, p. 787–796, 2012.

CASTRO, A. F. N. M. Potencial dos resíduos florestais e dos gases da carbonização da madeira para geração de energia elétrica. 5 dez. 2014.

CEMIN, D. DA S. **Desenvolvimento de um forno para carbonização de resíduos agroflorestais em pequena escala.** 2010. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Florestal, Universidade de Brasília. Brasília, 2010.

CGEE. **Metodologia de estudo e análise de escoamento de gases com transferência de calor por meio de simulação computacional em CFD (Computational Fluid Dynamics) para otimização do processo de carbonização da madeira em tecnologia DPC (Dry, Pyrolysis, Cooling). Nota Técnica.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, jul. 2014.

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

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

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

COLOMBO, S. DE F. DE O.; PIMENTA, A. S.; HATAKEYAMA, K. **Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável.** SIMPEP. **Anais...** In: XIII SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Bauru-SP: UNESP, 2006

CONSEMA. Resolução n. 315/2016. . 16 maio 2016. Disponível em <http://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201610/25161109-2016-resolucao-consema-n-315-estabelece-criterios-lic-atividade-producao-carvao-vegetal-em-fornos.pdf>. Acesso em 09.08.2016.

COPAM. 130. Deliberação Normativa COPAM nº 130/2009. . 14 jan. 2009. Disponível em <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=9051>. Acesso em 04.07.2016

COSTA, J. M. F. N. **Temperatura final de carbonização e queima dos gases na redução de metano, como base à geração de créditos de carbono.** 2012. Dissertação (Mestrado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2012.

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

COUTINHO, A. DOS R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. **IPEF**, n. 38, p. 33–37, 1988.

DALLASTRA, E. C. **Sistemas de produção de carvão vegetal existentes no Brasil: uma análise de viabilidade econômica.** 2010. Dissertação (Mestrado Profissional) - Agroenergia, Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 2010.

DAMÁSIO, R. A. P. et al. Controle da carbonização em forno circular por meio da temperatura interna. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 1, p. 10- 12953/2177- 6830/rcm.v61p11–22, 1 maio 2015.

DE MIRANDA, R. C.; BAILIS, R.; VILELA, A. DE O. Cogenerating electricity from charcoaling: a promising new advanced technology. **Energy for Sustainable Development**, Special Issue on Charcoal. v. 17, n. 2, p. 171–176, abr. 2013.

DIAS, E. C. et al. Processo de trabalho e saúde dos trabalhadores na produção artesanal de carvão vegetal em Minas Gerais, Brasil. **Cad Saude Publica**, p. 269–277, 2002.

DINIZ, C. R.; SILVA, I. B. **Metodologia científica**. Campina Grande; Natal: UEPB/UFRN - EDUEP, 2008.

DONATO, D. B. **Desenvolvimento e avaliação de desempenho de uma fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira**. 2017. Tese (Doutorado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2017.

EKEH, O.; FANGMEIER, A.; MÜLLER, 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**, v. 19, n. 9, p. 1643–1652, 10 jun. 2014.

ELCOCK, D. **Life-cycle thinking for the oil and gas exploration and production industry**. [s.l.] Environmental Science Division, Argonne National Laboratory, 2007.

EPE. **Balço Energético Nacional 2017: ano-base 2016**. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Energia, 2017. Disponível em:
<file:///C:/Users/Asus/Downloads/70a324edde3b1bc50494f8a5d810059e.pdf>.

ESSER, J. DE O. L. **Projeto siderurgia sustentável MCTIC MMA**. . In: IV FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL E I SEMINÁRIO DE ENERGIA DA BIOMASSA FLORESTAL. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: SIF - Sociedade de Investigações Florestais; DEF/UFV - Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, 8 nov. 2016

EVARISTO, A. B. et al. Potencial energético dos resíduos do fruto da Macaúba e sua utilização na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v.26, n. 2, 2016.

FANTINI, A. C.; SCHLINDWEIN, S. L. **Learning to run a business: transforming charcoal production of family farmers in Santa Catarina, Brazil**. . In: 11TH EUROPEAN IFSA SYMPOSIUM, FARMING SYSTEMS FACING GLOBAL CHALLENGES: CAPACITIES AND STRATEGIES. Berlin, Germany: International Farming Systems Association (IFSA) Europe, 1 abr. 2014

FAO. **Industrial charcoal making**. **FAO. Forestry Paper 63**. Roma: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985a.

FAO. **Industrial charcoal making technologies**. Chapter 3. Modern carbonising retort systems. Rome: FAO, Forestry Department, 1985b. Disponível em:
<<http://www.fao.org/docrep/x5555e/x5555e04.htm#TopOfPage>>.

FAO, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The charcoal transition: greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihoods.** J. van Dam, , 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i6935e.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2017

FERREIRA, O. C. O futuro do carvão vegetal na siderurgia: emissão de gases de efeito estufa na produção e consumo do carvão vegetal. **Revista Economia & Energia**, v. 4, 2000.

FROELICH, P. L. **Estudo dos processos de obtenção do carvão vegetal no Vale do Rio dos Sinos.** 2011. Dissertação (Mestrado) - Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, Universidade Feevale. Novo Hamburgo, 2011.

GAZULL, L.; GAUTIER, D. Woodfuel in a global change context. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, v. 4, n. 2, p. 156–170, 1 mar. 2015.

GHOSH, M. A3 Process: A pragmatic problem-solving technique for process improvement in health care. **Journal of Health Management**, v. 14, n. 1, p. 1–11, 1 mar. 2012.

GOMES, G. F.; ENCARNAÇÃO, F. The environmental impact on air quality and exposure to carbon monoxide from charcoal production in southern Brazil. **Environmental Research**, v. 116, p. 136–139, jul. 2012.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. DE. **Teoria da carbonização da madeira.** CETEC: Série Publicações Técnicas 1. In: Uso da madeira para fins energéticos, compilado Waldir Resende Penedo. 1v. 158p, , 1980.

GOMÉZ, E. O. et al. **Projeto de pirólise rápida contínua de biomassa com ar em reator de leito fluidizado atmosférico.** . In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL. Campinas-SP: 2000. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000200020&script=sci_arttext&lng=pt>. Acesso em: 26 jul. 2017

GONÇALVES, F. G. et al. Captação de líquido pirolenhoso da carbonização da madeira de Eucalyptus cloeziana em forno rabo quente - DOI: 10.5039/agraria.v5i2a647. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária) Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 5, n. 2, p. 232–237, 5 maio 2010.

GUIMARÃES, R. M. et al. Avaliação econômica e financeira de projetos de fornos dos tipos container industrial e retangular de 40 estéreos. **Revista Árvore**, v. 31, n. 4, 2007.

IAP - INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Resolução Conjunta IBAMA/SEMA/IAP**IBAMA/SEMA/IAP, , 28 set. 2007. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/RESOLUCAO_CONJ_IBAMA_SEMA_IAP_047_2007_CARVAO_REGULAMENTA_PRODUCAO_TRANSPORTE.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2017

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2016** - ano-base 2015. [s.l.: s.n.]. Disponível em:
<http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2017** - ano-base 2016. [s.l.] Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ, 2017.

IBGC - INSTITUTO BRASILEIRO DE GOVERNANÇA CORPORATIVA. **Guia de sustentabilidade para as empresas**: Cadernos de Governança Corporativa. São Paulo-SP: IBGC, 2007.

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>.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global energy trends to 2040**: world energy outlook. OECD/IEA, Paris, 2015. Disponível em:
<<http://www.worldenergyoutlook.org>>. Acesso em: 15 jan. 2016

IYAMA, M. et al. **Achieving sustainable charcoal in Kenya**: harnessing the opportunities for cross-sectoral integration. Technical Brief. Nairobi, World Agroforestry Centre (ICRAFstitute) & Stockholm Environment In, , 2014.

JUSTE, C. N. **Revestimentos refratários para fornos de carvão vegetal**. Sociedade de Investigações Florestais-SIF/Universidade Federal de Lavras-UFLA. **Anais...** In: III FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte-MG: SIF - Sociedade de Investigações Florestais, 22 out. 2014

KAMMEN, D. M.; LEW, D. J. **Review of technologies for the production and use of charcoal**. Berkeley, CA, USA: University of California, 2005.

KAROLI, L. **Sustainable charcoal project to reduce youth unemployment problem**". A case of Chanzuru Ward in Kilosa District. masters—[s.l.] The Open University of Tanzania, 2013.

KATTEL, R. R. Improved charcoal production for environment and economics of blacksmiths: evidence from Nepal. **Journal of Agricultural Science and Technology B**, v. 5, n. 3, p. 197–204, 2015.

KHOO, H. H.; TAN, R. B. H.; SAGISAKA, M. Utilization of woody biomass in Singapore: technological options for carbonization and economic comparison with incineration. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 4, p. 312, 1 jun. 2008.

KITUYI, E. Towards sustainable production and use of charcoal in Kenya: exploring the potential in life cycle management approach. **Journal of Cleaner Production**, Applications of Industrial Ecology. v. 12, n. 8–10, p. 1047–1057, out. 2004.

KROGSTIE, L. et al. On knowledge-based development: how documentation practice represents a strategy for closing tolerance engineering loops. **Procedia CIRP**, 24th CIRP Design Conference. v. 21, p. 318–323, 1 jan. 2014.

- LANA, A. Q. **Desempenho e avaliação de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira.** DISSERTAÇÃO (Mestrado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2014.
- LATORRE, F. L. . **Qualidade do carvão siderúrgico. III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal. Sociedade de Investigações Florestais-SIF/ Universidade Federal de Lavras-UFLA: Belo Horizonte-MG, 22 e 23 de outubro de 2014.** . In: III FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: Sociedade de Investigações Florestais-SIF/Universidade Federal de Lavras-UFLA, 22 out. 2014
- LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte.** 2a. ed. [s.l.] Editora Interciencia, 2002.
- MAIA, I. M. O. **Avaliação das condições posturais dos trabalhadores na produção de carvão vegetal em cilindros metálicos verticais.** 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2008.
- MARRI, A. et al. **Manual de construção e operação de fornos de carbonização.** Série Publicações Técnicas n.7, CETEC, , 1982.
- MARTINS, H. **Madeira como fonte de energia.**CETEC: Série Publicações Técnicas. In: Uso da madeira para fins energéticos, compilado Waldir Resende Penedo. 1v. 9-26p., , 1980.
- MARTINS, M. A. **Resfriamento artificial de fornos.** Sociedade de Investigações Forestais-SIF/Universidade Federal de Lavras-UFLA. **Anais...** In: III FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte-MG: SIF - Sociedade de Investigações Florestais, 22 out. 2014
- MARTINS, R.; ATANASSIV, B.; MIRIRA, R. **Produção sustentável de carvão vegetal: análise sócio-ecológica, estudo de mercados e legislação relevante em Gaza, Maputo e Maputo Cidade: Parte 1 de 2.** Maputo: GreenLight Projects, 2016.
- MIRANDA, R. C. DE et al. **Sustainable production of commercial woodfuel: Lessons and guidance from two strategies.** Rogério C. de Miranda, Steve Sepp, Eliane Ceccon, Stefan Mann, Bipulendu Singh. Washington, DC, USA: World Bank, 2010. Disponível em: <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/Sustainable_production_of_commercial_woodfuel.pdf>.
- MME. **Anuário estatístico do setor metalúrgico (preliminar).** Brasília-DF: Ministério de Minas e Energia, 2017.
- MONTAGU, K. D.; KEARNEY, D. E.; SMITH, R. G. B. The biology and silviculture of pruning planted eucalypts for clear wood production—a review. **Forest Ecology and Management**, v. 179, n. 1, p. 1–13, 3 jul. 2003.
- MOTA, F. C. M. **Análise da cadeia produtiva do carvão vegetal oriundo de Eucalyptus sp. no Brasil.** 2013. Dissertação (Mestrado) - Ciências Florestais, Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

MOTTA, R. DA R.; CALÔBA, G. M. **Análise de investimentos**: tomada de decisão em projetos industriais. São Paulo: Atlas, 2002.

MULLER, A. N.; ANTONIK, L. R. **Matemática financeira**: instrumentos financeiros para a tomada de decisão em administração, economia e contabilidade. São Paulo: Saraiva, 2012.

NAKAKURA, T. **PM ambiental prende homem com produção ilegal de carvão**. Disponível em: <<http://maringa.odiario.com/policia/2017/06/pm-ambiental-prende-homem-com-producao-ilegal-de-carvao/2381541/>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

NJOH, A. J. The SWOT model's utility in evaluating energy technology: Illustrative application of a modified version to assess the sawdust cookstove's sustainability in Sub-Saharan Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 313–323, mar. 2017.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **MapBiomass**: projeto de mapeamento anual da cobertura e uso do solo no Brasil; [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.observatorioeco.com.br/index.php/2017/04/mapeamento-inedito-traz-perfil-do-uso-e-ocupacao-do-solo-brasileiro/>>.

OKELLO, C. et al. Appraising bioenergy alternatives in Uganda using strengths, weaknesses, opportunities and threats (SWOT)-analytical hierarchy process (AHP) and a desirability functions approach. **Energies**, v. 7, n. 3, p. 1171–1192, 26 fev. 2014.

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

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2012.

OLIVEIRA, A. C. et al. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**. v. 37, n. 3, 2013.

OLIVEIRA, A. C. **Secagem de toras de eucalipto**. 2015. Tese (Doutorado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2015.

OLIVEIRA, A. C. et al. Resfriamento artificial em fornos retangulares para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 39, n. 4, p. 769–778, ago. 2015.

OLIVEIRA, A. C. et al. Análise de risco econômico de dois sistemas produtivos de carvão vegetal. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

OLIVEIRA, R. L. M. **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2009.

OLIVEIRA FILHO, D. et al. Resfriamento rápido de fornos de carbonização. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1023–1032, 2010.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

PEREIRA, E. G. et al. Pyrolysis gases burners: sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews (2016)**, 2016.

PICANCIO, A. C. S. **Gestão da qualidade aplicada à melhoria do processo de produção de carvão vegetal**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2011.

PIEKARSKI, C. M. et al. Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 575, p. 103–111, 1 jan. 2017.

PIMENTA, A. S. et al. Avaliação do perfil de trabalhadores e de condições ergonômicas na atividade de produção de carvão vegetal em bateria de fornos de superfície do tipo “rabo-quente”. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, 2006.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C.; OLIVEIRA, E. **Carbonização**. Universidade Federal de Viçosa–UFV. Curso de Carbonização, Departamento de Engenharia Florestal–DEF, Viçosa–MG, 2001.

PINHEIRO, M. A. **Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013.

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

PINHEIRO, P. C. DA C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 2, p. 159–168, 2005.

PROTÁSIO, T. DE P. et al. Mass and energy balance of the carbonization of babassu nutshell as affected by temperature. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 3, p. 189–196, mar. 2014.

QUIRINO, W. F. A pesquisa sobre energia da biomassa no laboratório de produtos florestais e no Brasil. **Jornal Brasileiro das Indústrias de Biomassa**, p. 2–6, fev. 2013.

RAAD, T. J.; MELO, V. F.; OLIVERIA, A. C. **Fornos metálicos para produção de carvão vegetal**. . In: III FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: 22 out. 2014

RAMIREZ, P. K. S. **Análise de métodos de alocação utilizados em avaliação do ciclo de vida**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

REIS, G. M. C. **Logística e transporte de carvão vegetal**. Sociedade de Investigações Florestais-SIF/Universidade Federal de Lavras-UFLA. **Anais...** In: III FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte-MG: SIF - Sociedade de Investigações Florestais, 22 out. 2014

REIS, H. O. **Resfriamento de fornos de carbonização por injeção de vapor de água**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2009.

REMADE. Acácia pode ser cortada com cinco anos. **REMADE - Revista da Madeira**, n. 89, abr. 2005.

REZENDE, J. B.; DOS SANTOS, A. C. **A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades**. EPAMIG - Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, , 2010. Disponível em: <file:///C:/Users/Asus/Downloads/bt95.pdf>

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental. Curso: Fundamentos e práticas da carbonização da biomassa**. . In: SEMINÁRIO: PRÁTICA, LOGÍSTICA, GERENCIAMENTO E ESTRATÉGIAS PARA O SUCESSO DA CONVERSÃO DA MATÉRIA LENHOSA EM CARVÃO VEGETAL PARA USO NA METALURGIA E INDÚSTRIA. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: 27 nov. 2006

REZENDE, R. N. et al. Air drying of logs from an Eucalyptus urophylla clone for carbonization use. **CERNE**, v. 16, n. 4, p. 565–572, dez. 2010.

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

SANDER, D. C. et al. **Anodização de titânio em licor pirolenhoso bruto e destilado**. . In: XX SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA. Canoas, RS: 2014Disponível em: <<http://www.conferencias.ulbra.br/index.php/sic/xx/paper/view/2446>>

SANTOS, I. S. **Resfriamento artificial de carvão vegetal em fornos de alvenaria**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e na contração da madeira e no rendimento e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Florestal, Universidade de Brasília. Brasília, 2010.

SANTOS, L. C. et al. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de Eucalyptus plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, 2012.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. Tese (Doutorado) - Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2010b.

SANTOS, R. C. et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 221–230, jun. 2011.

SANTOS, S. F. O. M. **Produção de carvão vegetal em cilindros metálicos verticais**: alguns aspectos referentes à sustentabilidade. 2007. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2007.

SANTOS, S. F. O. M.; HATAKEYAMA, K. Sustainable charcoal production process focusing the environmental, economical, social and cultural aspects. **Production**, v. 22, n. 2, p. 309–321, abr. 2012.

SANTOS, S. F. O. M. et al. Life cycle analysis of charcoal production in masonry kilns with and without carbonization process generated gas combustion. **Sustainability**, v. 9, n. 9, p. 1558, 1 set. 2017.

SCHNITZER, J. A. et al. Pyroligneous extract doses in orchids culture. **Revista Ceres**, v. 62, n. 1, p. 101–106, fev. 2015.

SILVA, D. A. L. et al. Análise de viabilidade econômica de três sistemas produtivos de carvão vegetal por diferentes métodos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, 2014.

SILVA, F. C. L. DA; FARIAS, J. A. DE. Análise econômica da produção de *Acacia mearnsii* De Wild e carvão vegetal no Vale do Caí e Taquari, Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 45, n. 5, p. 927–932, 1 maio 2015.

SILVA, E. F. C. D. et al. Comportamento eletroquímico das ligas de alumínio 2024-t3 revestidas com condensado da fumaça. **Anais**. Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 4, n. 2, 2012.

SILVA FILHO, O. S.; CALADO, R. Learning supply chain management by PBL with A3 Report support. **IFAC Proceedings Volumes**, 6th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics. v. 46, n. 24, p. 471–477, 1 set. 2013.

SINDIFER. **Anuário estatístico 2016**. Minas Gerais: Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais, 2016. Disponível em: <<http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario.php>>.

SMEBYE, A. B. et al. Life-cycle assessment of biochar production systems in tropical rural areas: Comparing flame curtain kilns to other production methods. **Biomass and Bioenergy**, v. 101, p. 35–43, 1 jun. 2017.

SOARES, V. C. et al. **Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Ciências Florestais, Universidade de Brasília. Brasília, 2008.

SOBEK, D. K.; JIMMERSON, C. C.: **A3 Reports**: tool for process improvement. Proceedings of the Industrial Engineering Research Conference. **Anais...**2004

STAINBACK, G. A. et al. Smallholder agroforestry in Rwanda: a SWOT-AHP analysis. **Small-scale Forestry**, v. 11, n. 3, p. 285–300, 1 set. 2012.

SYRED, C. et al. A clean, efficient system for producing Charcoal, Heat and Power (CHaP). **Fuel**, v. 85, n. 10–11, p. 1566–1578, jul. 2006.

TACCINI, M. M. **Estudo das metodologias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, referentes à avaliação de emissões de gases de efeito estufa na produção de carvão vegetal**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Tecnologia de Produtos Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz. Piracicaba, 2010.

TANNEAU, L. Biomasse: l'état retient Carbonex. **L'Est Éclair**, 18 mar. 2017. Disponível em www.lest-eclair.fr. Acesso em 20.07.2017.

TEIXEIRA, S. R.; PENA, A. F. V.; MIGUEL, A. G. Briquetting of charcoal from sugarcane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel. **Waste Management**, v. 30, n. 5, p. 804–807, 1 maio 2010.

TRUGILHO, P. F. **Matéria-prima para produção de carvão vegetal e aproveitamento energético de resíduos florestais**. Sociedade de Investigações Florestais-SIF/Universidade Federal de Lavras-UFLA. **Anais...** In: III FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte-MG: Sociedade de Investigações Florestais-SIF/Universidade Federal de Lavras-UFLA, 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.

VALE, A. T. et al. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, v. 17, n. 2, 2011.

VILELA, A. DE O. et al. A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration. **Biomass and Bioenergy**, v. 69, p. 222–240, out. 2014.

VILELA, A. DE O. **Processo integrado de produção de carvão e alcatrão vegetal**. Sociedade de Investigações Florestais-SIF/Universidade Federal de Lavras-UFLA. **Anais...** In: IV FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte-MG: SIF - Sociedade de Investigações Florestais, 2016

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. DE C. O.; PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira para fins energéticos**. [s.l.] Editores, 2013.

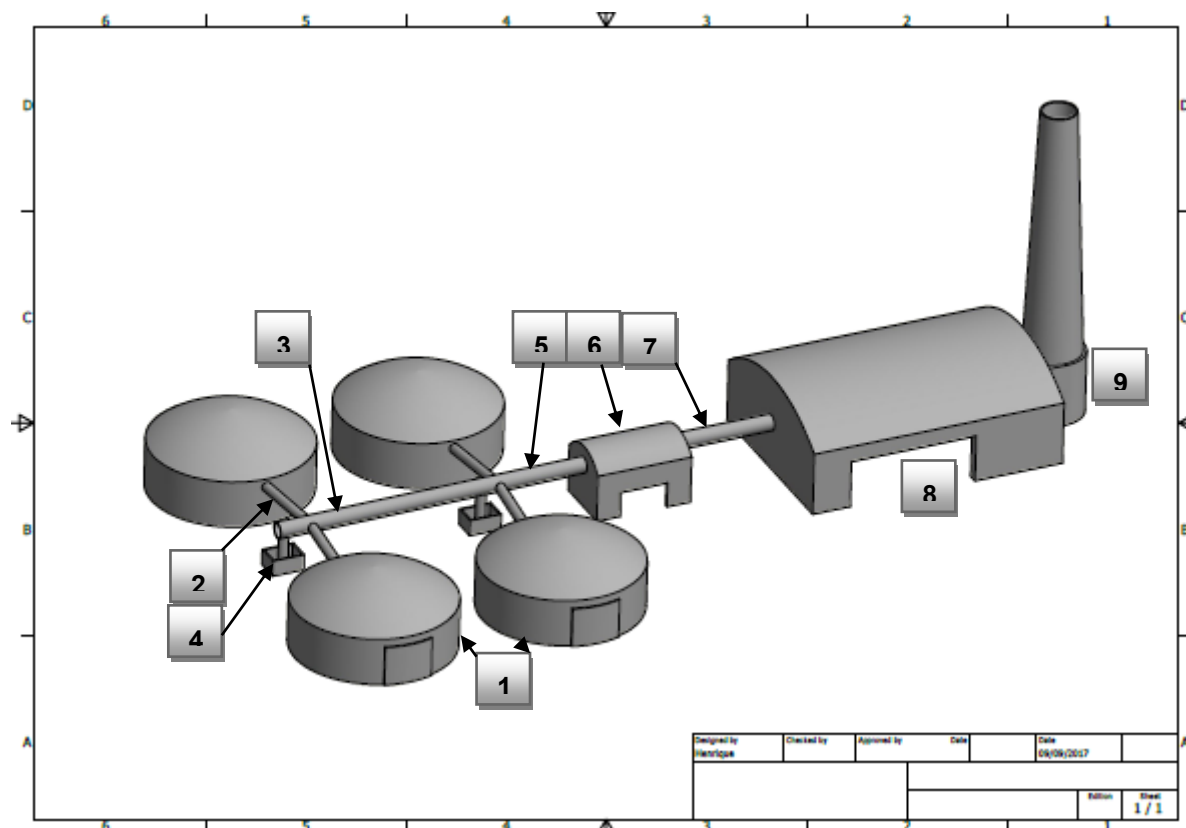
VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil**. BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, , set. 2009. Disponível em: <<https://web.bndes.net/bib/jspui/handle/1408/1661>>

WEIDEMA, B. P.; WESNÆS, M. S. Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3, p. 167–174, 1 jan. 1996.

ZANÚNCIO, A. J. V. **Influência da secagem da madeira de *Euclayptus* e *Corymbia* na produção e qualidade do carvão.** 2013. Dissertação (Mestrado) - Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2013.

ZUCHI, P. S. **Avaliação ergonômica do trabalho na atividade de carvoejamento.** In: SIMÓCIO BRASILEIRO SOBRE ERGONOMIA E SEGURANÇA DO TRABALHO FLORESTAL E AGRÍCOLA. 2000

ANEXO A - Desenho Esquemático do Modelo



Legenda:

1. Fornos circulares em alvenaria;
2. Tubulação de saída dos gases dos fornos para o sistema de condensação;
3. Sistema de condensação dos gases;
4. Caixas coletoras do líquido pirolenhoso;
5. Tubulação de passagem dos gases não condensados para a Câmara de combustão (fornalha);
6. Câmara de combustão;
7. Tubulação de saída e resfriamento dos gases quentes para a estufa de secagem;
8. Estufa de secagem da madeira;
9. Chaminé