CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PRODUTOS E PROCESSOS

ISABELLA SOARES FERNANDES GOECKING

USO DE RECUPERADOR DE FUMAÇA NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL PARA A REDUÇÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS COMO UMA PRÁTICA CIRCULAR

BELO HORIZONTE

2023

ISABELLA SOARES FERNANDES GOECKING

USO DE RECUPERADOR DE FUMAÇA NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL PARA A REDUÇÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS COMO UMA PRÁTICA CIRCULAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Produtos e Processos.

Orientadora: Profª. Drª. Patrícia Sueli de Rezende

Coorientadora: Profª. Drª. Luzia Sergina de França Neta

BELO HORIZONTE

2023

Goecking, Isabella Soares Fernandes.
G593u Uso de recuperador de fumaça na produção de carvão vegetal para a redução das emissões atmosféricas como uma prática circular / Isabella Soares Fernandes Goecking. – 2023.
[107] f. : il.
Orientadora: Patrícia Sueli de Rezende.
Coorientadora: Luzia Sergina de França Neta.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, Belo Horizonte, 2023.
Bibliografia.

1. Alcatrão de madeira. 2. Carbonização. 3. Ar - Controle de qualidade. 4. Siderurgia - Aspectos ambientais. I. Rezende, Patrícia Sueli de. II. França Neta, Luzia Sergina de. III. Título.
CDD: 665.772

Ficha elaborada pela Biblioteca - *campus* Nova Suíça - CEFET-MG
Bibliotecária: Rosiane Maria Oliveira Gonçalves - CRB6-2660

ISABELLA SOARES FERNANDES GOECKING

USO DE RECUPERADOR DE FUMAÇA NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL PARA A REDUÇÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS COMO UMA PRÁTICA CIRCULAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Produtos e Processos.

Belo Horizonte, 14 de abril de 2023.

Aprovada pela Banca Examinadora:

Profª. Drª. Patrícia Sueli de Rezende (Orientadora)

Prof. Drª Luzia Sergina de França Neta (Coorientadora)

Prof.ª. Drª. Adriana Akemi Okuma

Profª. Drª Ana Clara Caxito

Prof. Dr. Daniel Brianezi

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, sou grata pela vida, pela bondade e pela misericórdia, que se renovam a cada novo dia. Em toda minha vida tenho experenciado as maravilhas da presença do amor dEle e por isso louvo unicamente o Seu nome por essa conquista!

Aos meus pais, Anderson e Linda, sou grata por serem bençãos na minha vida, por me apoiarem e me amarem demasiadamente! Obrigada por serem meus exemplos e por me ensinarem o mais importante da vida! Amo vocês!

Ao meu amor, Pedro, sou grata por ter me ajudado a olhar para cima todas as vezes que precisei! Obrigada por sempre acreditar em mim! Compartilhar a vida com você é a melhor parte da minha! Te amo!

A minha família, agradeço às orações e por sempre torcerem pelo meu sucesso. Em especial agradeço aos meus sogros, Kátia e Roberto, pela compreensão, carinho e palavras de ânimo, e ao meu tio, Cleider, por toda ajuda e conhecimentos compartilhados durante a realização deste trabalho!

Aos meus amigos agradeço o apoio durante essa trajetória. A companhia e a amizade de vocês alegraram meus dias! Em especial agradeço às minhas melhores amigas, Letícia, Nathalia e Viviane por estarem sempre ao meu lado e ao meu amigo Jefferson, pela paciência em sempre compartilhar seus conhecimentos comigo!

Ao CEFET-MG e docentes, agradeço por me proporcionarem crescimento pessoal, profissional e acadêmico desde a graduação e pelo suporte financeiro ao me conceder uma bolsa de pós-graduação.

À FAPEMIG e a CAPES, agradeço o apoio financeiro durante o período de bolsista de pós-graduação.

À minha orientadora, Patrícia Sueli de Rezende, sou grata pela parceria, pelo profissionalismo e pela dedicação aplicada a esse trabalho. Obrigada por ter feito a diferença na minha vida!

À minha coorientadora, Luzia Sergina de França Neta, agradeço pelas sugestões e pelo incentivo! Sua paixão e esforço pelo conhecimento me inspiram!

A Ecoamb Pesquisas Ambientais e a BIO & IND – Biocarbo e Indústria e Tecnologias de Carbonização LTDA, agradeço pela parceria e por valorizarem o desenvolvimento da ciência e inovação em nosso estado e país.

Aos membros da banca de defesa de dissertação, Drª Adriana Akemi Okuma, Drª. Ana Clara Caxito e Dr. Daniel Brianezzi agradeço por aceitarem o convite e pelas contribuições a esse trabalho.

Por fim, aos meus colegas cientistas, agradeço o apoio e por serem perseverantes na caminhada!

RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores de carvão vegetal do mundo, porém a instalação de unidades com fornos de carbonização da madeira de alta produtividade ainda possui limitações relacionadas a utilização de fornos de alvenaria, que apresentam baixos rendimentos gravimétricos e elevadas emissões atmosféricas. Os coprodutos da reação de carbonização recuperados via condensação da fumaça durante a carbonização da madeira, possuem elevados potenciais comerciais ao serem direcionados para outras indústrias químicas. O presente trabalho objetivou avaliar o perfil das concentrações das emissões de material particulado, compostos orgânicos voláteis e composição gasosa durante um ciclo de carbonização da madeira em forno de alvenaria mediante condensação da fumaça, bem como realizar um diagnóstico de circularidade no processo produtivo. A redução das emissões de poluentes atmosféricos foi avaliada em função da recuperação de alcatrão vegetal e extrato pirolenhoso a partir da condensação da fumaça. Para avaliar a redução das emissões de gases atmosféricos foi utilizado o sistema forno-recuperador, localizado em uma Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC), onde ocorre a obtenção de carvão vegetal, como produto principal, e de licor pirolenhoso, como produto secundário da condensação da fumaça. As amostragens foram realizadas em dois pontos distintos, na entrada e na saída do recuperador. As amostras foram coletadas conforme os procedimentos da *Environmental Protection Agency* (EPA) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As análises de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs), composição gasosa (O_2, CO_2, CO, N_2) e óxidos de nitrogênio (NOx) foram realizadas por analisadores *online* na saída do gasômetro do Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA). Além disso, no CIPA foi possível realizar as medições de vazão e velocidade dos gases. Os resultados mostraram a relevância da recuperação de coprodutos da carbonização como uma alternativa para a diminuição das emissões atmosféricas, bem como a oportunidade de agregar valor ao processo produtivo de carvão vegetal. Os teores de MP e COVs apresentaram significativa redução na fase de carbonização do processo produtivo, com remoção de 52% e 16%, respectivamente na fase que possui liberação de gases poluentes mais intensa. Além disso, os teores de CO e NOx foram reduzidos na fase de fixação do carbono em 21% e 6%, respectivamente. Foi observado que as concentrações são influenciadas pela temperatura do gás e do forno, bem como pela fase da carbonização que a madeira se encontra, sendo necessárias melhorias do processo que envolvam controle da temperatura durante o processo de recuperação da fumaça. Além disso, foram levantadas práticas sustentáveis no processo produtivo de carvão vegetal que indicam as práticas da Economia Circular pela Estrutura RESOLVE e suas respectivas abrangências. Das seis ações da metodologia RESOLVE, foram identificadas cinco, sendo aplicáveis em todos os níveis de abrangência, com 88% em escala meso e micro e 26% em escala macro. Conclui-se que a recuperação de coprodutos é uma rota sustentável com práticas viáveis para a aplicabilidade no setor siderúrgico para diminuir os impactos negativos nos âmbitos sociais, econômicos e ambientais.

Palavras-chave: Alcatrão vegetal, carbonização, extrato pirolenhoso, qualidade do ar, siderurgia sustentável.

ABSTRACT

Brazil is one of the largest producers of charcoal in the world, but the installation of units with high-productivity wood carbonization furnaces still has limitations related to the use of masonry kilns, which have low gravimetric yields and high atmospheric emissions. The co-products of the carbonization reaction recovered via condensation of the smoke during the carbonization of the wood, have high commercial potentials when directed to other chemical industries. The present work aimed to evaluate the profile of the concentrations of emissions of particulate matter, volatile organic compounds and gaseous composition during a cycle of carbonization of wood in masonry furnace through condensation of smoke, as well as to perform a diagnosis of circularity in the production process. The reduction of air pollutant emissions was evaluated due to the recovery of vegetable tar and pyroligneous extract from smoke condensation. To evaluate the reduction of atmospheric gas emissions, the furnace-recuperator system was used, located in a Charcoal Producing Unit (UPC), where charcoal is obtained as the main product and pyroligneous liquor as a secondary product of smoke condensation. The sampling was performed at two distinct points, at the entrance and exit of the recuperator. The samples were collected according to the procedures of the Environmental Protection Agency (EPA) and the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The analyses of Volatile Organic Compounds (VOCs), gaseous composition (O_2, CO_2, CO, N_2) and nitrogen oxides (NOx) were performed by online analyzers at the gasometer output of the Isokinetic Collector of Air Pollutants (CIPA). In addition, in the CIPA it was possible to perform the flow and velocity measurements of the gases. The results showed the relevance of the recovery of co-products from carbonization as an alternative for the reduction of atmospheric emissions, as well as the opportunity to add value to the charcoal production process. The levels of PM and VOCs showed a significant reduction in the carbonization phase of the production process, with removal of 52% and 16%, respectively in the phase that has more intense release of polluting gases. In addition, the CO and NOx contents were reduced in the carbon fixation phase by 21% and 6%, respectively. It was observed that the concentrations are influenced by the temperature of the gas and the furnace, as well as by the carbonization phase that the wood is in, requiring process improvements that involve temperature control during the smoke recovery process. In addition, sustainable practices were raised in the charcoal production process that indicate the practices of the Circular Economy by the RESOLVE Framework and its respective scopes. Of the six actions of the RESOLVE methodology, five were identified, being applicable at all levels of coverage, with 88% on the meso and micro scale and 26% on the macro scale. It is concluded that the recovery of co-products is a sustainable route with viable practices for applicability in the steel sector to reduce the negative impacts in the social, economic and environmental spheres.

Keywords:
Vegetable tar, carbonization, pyroligneous extract, air quality, vegetable tar, sustainable steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coletor isocinético de poluentes atmosféricos (CIPA) 30
Figura 2 - Analisador portátil Optima 7 31
Figura 3 - Analisador portátil do tipo PID 32
Figura 4 - Etapas do processo produtivo do carvão vegetal 34
Figura 5 - Subprodutos da carbonização da madeira 39
Figura 6 - Fornos circulares de alvenaria para a carbonização vegetal 43
Figura 7 - Forno retangular de alvenaria para a carbonização vegetal. 44
Figura 8 - Fornos - Fornalha para a carbonização vegetal. 46
Figura 9 - Forno metálico DPC 47
Figura 10 - Conceito de economia circular 49
Figura 11 - Aplicação dos princípios da economia circular 51
Figura 12 - Fluxo metodológico 61
Figura 13 - Sistema Forno-Recuperador 62
Figura 14 - Pontos amostrais de entrada e de saída 63
Figura 15 - Trem de amostragem CIPA 65
Figura 16 - Caixa de controle CIPA 67
Figura 17 - Caixa fria do CIPA 68
Figura 18 - Caixa quente do CIPA 70
Figura 19 - Análise de Material Particulado- Filtros 72
Figura 20 - Análise de Material Particulado- Béqueres 72
Figura 21 – Legenda para interpretação gráfica 75
Figura 22 - Relação do teor de O_2, CO_2 e CO pela estequiometria ar/combustível 81
Figura 23 - Economia Circular aplicada no processo produtivo do carvão vegetal 90

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação temperatura do forno com tempo de corrida do ciclo de carbonização..... 77
Gráfico 2 - Teores de O_2 e CO_2 durante o ciclo de carbonização analisado..... 82
Gráfico 3 - Concentrações médias de monóxido de carbono durante a carbonização vegetal..... 83
Gráfico 4 - Análise de compostos orgânicos voláteis entre os pontos amostrais 84
Gráfico 5 - Concentrações médias de óxidos de nitrogênio durante as fases da carbonização vegetal..... 85
Gráfico 6 - Concentrações médias de MP durante o ciclo de carbonização vegetal 87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Metodologias de amostragem de MP, Composição Gasosa e COVs 29
Quadro 2 - Relação da fase de carbonização com a temperatura do processo 37
Quadro 3 - Síntese dos tratamentos do Princípio 2 da Economia Circular..... 51
Quadro 4 - Estrutura RESOLVE 54
Quadro 5 - Nomenclatura das fórmulas para cálculo dos resultados..... 73
Quadro 6 - Síntese da aplicabilidade de práticas circulares no processo produtivo de carvão vegetal 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtos da Carbonização da Madeira 40
Tabela 2 - Comparação dos fornos de carbonização no Brasil 42
Tabela 3 - Plano de Amostragem 64
Tabela 4 - Relação das temperaturas médias do forno com as coletas 79
Tabela 5 - Resultados médios das coletas nos dois pontos amostrais 80
Tabela 6 - Eficiências médias da redução das concentrações dos poluentes atmosféricos por fase da carbonização 86
Tabela 7 - Temperatura do gás na amostragem de MP 88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNI	Confederação Nacional das Indústrias
CIPA	Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos
CEFET MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
COP-21	21ª Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas
COP-26	26ª Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas
COP-27	27ª Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas
CSAS	Ciência, Conscientização e Soluções Climáticas (do inglês, *Climate Science, Awareness and Solutions*)
CTM-030	Método de Teste Condicional (do inglês, *Conditional Test Method*)
DEGUSSA	Fornos de carbonização *Reichert-Lurgi*
DPC	Secagem, Pirólise, Resfriamento (do inglês, *Drying, Pyrolisis, Cooling*)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FID	Detector de chama por ionização (do inglês, *Flame Ionisation Detector*)
GEE	Gases do Efeito Estufa
HFCs	Hidrofluorcarbonetos
IBÁ	Instituto Brasileiro de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*)
MAS	Sociedade Americana de Meteorologia (do inglês, *Meteorology American Society*)
MDC	Metro de Carvão
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MP	Material Particulado
NASA	Administração Nacional Aeronáutica e Espacial (do inglês, *National Aeronautics and Space Administration*)
PI	Partículas Inaláveis
PID	Detector fotoionizante (do inglês, *Photoionisation Detector*)

PNMC	Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PPGTPP	Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos
PTS	Partículas Totais em Suspensão (PTS)
SINARE	Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases do Efeito Estufa
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UPC	Unidade Produtora de Carvão
US-EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (do inglês, *United States Environmental Protection Agency*)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 OBJETIVOS 18

2.1 OBJETIVOS GERAIS 18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

3.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA 19
3.1.1 Mudanças Climáticas 20
3.1.2 Qualidade do Ar 22
3.1.3 Legislações aplicáveis 26
3.2 CARVÃO VEGETAL 32
3.2.1 Processo produtivo do carvão vegetal 33
3.2.2 Configuração dos fornos para carbonização da madeira 41
3.3 ECONOMIA CIRCULAR 47
3.3.1 Aplicação do modelo de Economia Circular 52

4 METODOLOGIA 60

4.1 EMPRESAS PARCEIRAS 60
4.2 FLUXO METODOLÓGICO 60
4.3 OBJETO DE ESTUDO 61
4.4 AMOSTRAGEM 63
4.4.1 Determinação dos pontos de amostragem 63
4.4.2 Plano de amostragem 64
4.4.3 Subsistemas de medição 64
4.4.4 Determinação da umidade, velocidade e vazão dos gases 66
4.4.5 Amostragem da composição gasosa 69
4.4.6 Amostragem dos compostos orgânicos voláteis 69
4.4.7 Amostragem do material particulado 69
4.4.8 Análise gráfica das amostragens 75
4.5 INDICADORES CIRCULARES 75

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 77

5.1 ANÁLISE DAS FASES DA CARBONIZAÇÃO 77
5.2 ANÁLISE DAS COMPOSIÇÕES GASOSAS 79
5.3 ANÁLISE DE MATERIAL PARTICULADO 86
5.4 ANÁLISE DA ECONOMIA CIRCULAR 88
5.4.1 Práticas realizadas 88
5.4.2 Práticas com potencial de aplicação 92

6 CONCLUSÕES 95

7 REFERÊNCIAS 97

APÊNDICE A

APÊNDICE B

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética dos últimos anos e a consequente degradação ambiental têm preocupado as nações em todo o mundo. Dessa forma, é possível identificar um aumento do interesse na preservação dos recursos naturais e em cadeias produtivas que necessitem de matérias-primas não renováveis. A sustentabilidade ambiental, cada vez mais discutida nesse cenário, aborda a necessidade de utilizá-los de forma consciente, garantindo o acesso desses recursos às gerações futuras (OLIVEIRA, 2012).

Tecnologias sustentáveis, no âmbito industrial, estão sendo aplicadas visando a economia circular, a otimização de processos e em planos de ação para mitigação ou neutralização de emissões de gases poluentes. As discussões em torno do assunto abrem caminho para a avaliação ou reavaliação de processos já consolidados, bem como para destinação de recursos financeiros para investimentos nessa área (SANTOS, 2017).

A economia circular visa o melhor aproveitamento dos recursos naturais, incentivando ganhos ambientais e econômicos. Transformar sistemas de produção lineares em processos circulares têm sido um desafio para os setores industriais, mas é considerada a solução para o desenvolvimento sustentável. Como exemplos de atitudes relacionadas à economia circular, podemos citar: reaproveitamento de resíduos, otimização de processos e implementação de energias limpas (CNI, 2019).

Na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP-21), realizada em 2015, foram definidos 17 objetivos ambiciosos que devem ser atingidos para que ocorra o desenvolvimento sustentável no Brasil e no mundo, até 2030. A implementação da economia circular em processos industriais está diretamente relacionada com o cumprimento de quatro desses objetivos, que são: 9 - Indústria, inovação e infraestrutura; 11 – Cidades e comunidades sustentáveis; 12 - Consumo e produção responsáveis; e 13 - Ações contra a mudança global do clima (CNI, 2019).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), a poluição atmosférica é um fator ambiental crítico e responsável pela morte prematura de 7 milhões de pessoas por ano (OMS, 2018). Considerando esse fato e as alterações climáticas oriundas do aumento da poluição atmosférica no mundo, a Organização das Nações Unidas (ONU) tem afirmado a necessidade da

diminuição das emissões dos gases do efeito estufa até 2030 a cada ano nas Conferências das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, principalmente o CO_2, devido aos elevados níveis dele na atmosfera (FASIHI; EFIMOVA; BREYER, 2019).

O carvão vegetal, oriundo da carbonização de madeira de plantio florestal comercial, é considerado o principal insumo para o setor siderúrgico e representa uma alternativa sustentável ao uso do carvão mineral, atenuando os efeitos da poluição atmosférica e das mudanças climáticas globais tão iminentes (SILVA; SEYE; PATELLI JR, 2020).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo nacional do carvão vegetal apresentou o crescimento de 3,7%, chegando a 5,3 milhões de toneladas, em 2019 quando comparado ao ano anterior. Além disso, o Instituto Brasileiro de Árvores (IBÁ), no relatório anual de 2020, afirma que o Brasil possui cerca de 180 siderúrgicas principais de médio a grande porte, dentre as quais a maioria utiliza o carvão vegetal como principal agente redutor do ferro oxidado no processo produtivo para obtenção de ferro-gusa, aço e ferro-liga. Mesmo com elevada importância no setor siderúrgico, a produção do carvão vegetal no Brasil ocorre, majoritariamente, em fornos rudimentares de alvenaria, devido ao baixo custo e fácil implementação (IBÁ, 2020). É importante saber que esses fornos geralmente apresentam baixo rendimento gravimétrico e emissões não controladas de gases poluentes para o ambiente (PINHEIRO, 2012).

No ano de 2020, em Minas Gerais, foi registrado o consumo de 12.890.000 m^3 de carvão vegetal pela indústria de ferro-gusa (SINDFER, 2021). Esse estado detém o maior parque siderúrgico de carvão vegetal do Brasil e, consequentemente a maior quantidade de fornos de alvenaria para a produção de carvão vegetal em funcionamento do país. Esse fato é preocupante, uma vez que as emissões dos gases provenientes da sua produção contribuem para a poluição ambiental, condições de trabalho insalubres e perda de energia do processo (SANTOS, 2017). Muito se tem discutido sobre a possibilidade de tornar a produção de carvão vegetal mais sustentável, com menores emissões e com aproveitamento dos gases gerados durante a carbonização, pela condensação ou queima para geração de energia (BENITES *et al.*, 2010). Além dos danos ambientais, tem sido observada a necessidade do desenvolvimento de um processo mais robusto de produção de carvão vegetal, pois grande parte do controle de sua fabricação é realizada com muitas limitações, o que resulta em qualidade variável do produto (SANTOS, 2017).

Na condensação controlada dos gases oriundos da carbonização, ocorre a produção intermediária de alcatrão vegetal e do extrato pirolenhoso. A recuperação sistematizada dos gases condensáveis se torna relevante, pois, além de diminuir as emissões de gases do efeito estufa (GEE), materiais particulados e compostos orgânicos voláteis, eles apresentam características que os tornam economicamente viáveis para o uso em outras indústrias, como as químicas, as alimentícias e as agrícolas (GOMES *et al.*, 2020).

O alcatrão vegetal e o extrato pirolenhoso, que compõem o licor pirolenhoso, são coprodutos de interesse do processo de carbonização da madeira devido ao seu potencial de aplicabilidade em outros processos. O alcatrão vegetal, por exemplo, pode ser utilizado como óleo combustível, em indústrias químicas e alimentícias, enquanto o extrato pirolenhoso possui efeitos fertilizantes e pesticidas, o que torna viável para aplicação na agricultura (REZENDE *et al.*, 2004).

Diferentes tecnologias têm sido desenvolvidas com o intuito de melhorar a eficiência dos fornos de carbonização nas últimas décadas. Esse desenvolvimento foi fortemente influenciado pela necessidade de melhoria de processos sustentáveis no segmento siderúrgico que, além de oferecerem um ganho ambiental, também se apresentam como alternativas econômicas relevantes. Podemos observar que a literatura têm apresentado estudos relacionados à redução das emissões provenientes da produção de carvão vegetal e às tecnologias sustentáveis, possivelmente aplicáveis para esse processo, como pela queima dos gases gerados na carbonização (DONATO, 2017; LANA, 2014), pela condensação dos gases (FERREIRA, 2020; FROEHLICH, 2011), ou pela queima dos gases para cogeração de energia (CARDOSO *et al*., 2015; VILELA *et al*., 2014).

Empresas como a BIO & IND – Biocarbo e Indústria e Tecnologias de Carbonização LTDA e o grupo Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S.A, pioneiras na comercialização e utilização desses coprodutos, relatam a necessidade de desenvolvimento de pesquisa para que as limitações apresentadas por fornos convencionais permitam uma rota para obtenção do carvão vegetal e seus coprodutos (REZENDE *et al.*, 2004).

Conforme Rezende *et al.* (2004) afirmaram, há mais de 18 anos já era evidente a necessidade de investimento em pesquisa e tecnologia capazes de tornar a produção de carvão vegetal mais sustentável e lucrativa. O Ministério do Meio Ambiente (MMA) corrobora que os desafios no setor siderúrgico ainda existem e que é possível superá-los com aplicação de

conhecimentos técnicos, por isso estabeleceu o projeto Siderurgia Sustentável no país, que visa estabelecer uma cadeia de produção siderúrgica sustentável e de baixa emissão.

Diante do exposto, observa-se que há uma carência de estudos na aplicação de tecnologias capazes de serem implantadas em Unidades Produtoras de Carvão Vegetal (UPC) que diminuam suas emissões de gases poluentes e concomitantemente permitam a recuperação de produtos intermediários com potencial econômico. Este estudo foi realizado com o intuito de contribuir com o conhecimento e a ampliação do uso de recuperadores de fumaça em fornos de setores de carbonização. Dessa forma, espera-se alcançar a melhoria contínua de alternativas que levem às reduções das emissões de gases poluentes na cadeia produtiva do carvão vegetal e aumentem a lucratividade do processo pela recuperação dos coprodutos da carbonização.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Avaliar o uso de recuperador de fumaça da carbonização da madeira como uma prática circular e como uma tecnologia de controle ambiental das emissões no processo produtivo de carvão vegetal no setor siderúrgico brasileiro.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar a eficiência da diminuição de emissões do processo de carbonização vegetal do recuperador de coprodutos, em uma Unidade Produtora de Carvão Vegetal em Morada Nova de Minas – MG.
- Avaliar os teores de material particulado, de composição gasosa e de compostos orgânicos voláteis totais durante o processo de carbonização vegetal antes e após a recuperação dos coprodutos, em função da temperatura do forno;
- Indicar as ações práticas de Economia Circular aplicadas e aplicáveis ao processo produtivo do carvão vegetal.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), a poluição atmosférica é um fator ambiental crítico e é responsável pela morte prematura de cerca de 7 milhões de pessoas no mundo por ano. No relatório de 2020, emitido pela *State of Global Air*, a poluição ambiental possuía o 4º maior fator de risco na classificação global de causas de mortes em 2019, perdendo apenas para a hipertensão, tabaco e diabetes (STATE OF GLOBAL AIR, 2020).

A revolução industrial, a partir de 1930 no Brasil, foi um marco no desenvolvimento da economia do país. Uma das consequências desse processo foi a intensa utilização de combustíveis fósseis que aumentam continuamente a concentração de aerossóis e gases poluentes na atmosfera (IPCC, 2007).

Juntamente com o avanço industrial, observou-se que medidas de gerenciamento da qualidade do ar eram fundamentais para a saúde da população, bem como para a preservação ambiental, principalmente dos recursos naturais (DERISIO, 2004).

No Brasil, a necessidade de controle se tornou evidente em decorrência dos graves problemas da qualidade do ar em polos industriais como Cubatão, em São Paulo, situação que foi uma das motivações para a criação do Decreto-Lei nº1.413 de 1975, que dispõe sobre o controle da poluição do ambiente por atividades industriais (PEREIRA JUNIOR, 2007).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 491 de 2018 define o cenário de uma poluição do ar crítica como:

> "situação caracterizada pela presença de altas concentrações de poluentes na atmosfera em curto período, resultante da ocorrência de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos mesmos".

E poluentes atmosféricos são definidos como:

> "qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade".

3.1.1 Mudanças Climáticas

O aquecimento global é um assunto preocupante e tema definitivo de discussões mundiais desde 1992, quando a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu uma convenção sobre mudanças climáticas (GARCIA, 2009).

O efeito estufa é um fenômeno natural que mantém a Terra aquecida e está diretamente associado com o aquecimento global. Com a intensa influência antropogênica na atmosfera após o uso constante de combustíveis fósseis, uma relação foi identificada entre a intensificação do fenômeno e as observações das mudanças climáticas. Naturalmente, ele ocorre quando a radiação solar atravessa a atmosfera e parte da radiação é absorvida pela superfície terrestre, realizando um equilíbrio térmico. Como esperado, parte da radiação não absorvida é refletida em direção ao espaço novamente. Contudo os gases de efeito estufa (GEE), já presentes na atmosfera, são altamente capazes de absorver a radiação infravermelha refletida pela Terra e não permitem que toda a energia seja regressada ao espaço. O aumento das emissões desses gases, com elevados potenciais caloríficos, tem aquecido a atmosfera e influenciado nos mecanismos ambientais que nela coexistem (MANAHAN, 2013).

Com o Tratado de Quioto foram definidas metas que visavam mitigar as emissões dos principais GEE, que são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), os perfluorcarbonetos (PFCs), os hidrofluorcarbonetos (HFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6), sendo a queima de combustíveis fósseis a principal fonte de emissão de CO_2 (IPCC, 2013). Além desses, o ozônio também é considerado um gás de efeito estufa devido ao seu potencial de aquecimento global elevado (GARCIA, 2009).

Foi durante o Acordo de Paris e COP-21, realizada no ano de 2015, que foi determinada a necessidade da diminuição das emissões dos GEE até 2030, principalmente o CO_2, devido aos elevados níveis dele na atmosfera e as alterações climáticas oriundas desse fato (FASIHI; EFIMOVA; BREYER, 2019).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) estima que as atividades humanas tenham causado cerca de 1,0 ºC de aquecimento terrestre desde a era pré-industrial, sendo esperado que atinja 1,5 ºC entre 2030 e 2052, caso o ritmo de emissões não seja minimizado pelos países (IPCC, 2018).

O compromisso com as reduções dessas emissões em todas as nações vem sendo ratificado nas últimas conferências mundiais. Discute-se nesses eventos a necessidade urgente de medidas para limitar o aumento da temperatura global a de, no máximo, 1,5 ºC da temperatura mundial acima dos níveis pré-industriais até a referida data como uma forma de conter o aquecimento global (FASIHI; EFIMOVA; BREYER, 2019).

Mesmo com legislação ainda incipiente a respeito do controle dos gases do efeito estufa, que não possuem uma legislação específica, em 2021, durante a 26 ª Conferência da ONU sobre Mudanças do Clima (COP-26) que reuniu quase 200 países para acelerar a ação em direção aos objetivos do Acordo de Paris, os países entraram em um acordo sobre prazos comuns da frequência das revisões e acompanhamento dos seus compromissos climáticos (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2021).

As principais diretrizes da COP-26 foram: todos os países devem informar suas emissões de GEE até 2024 para que haja elaboração de planos mais efetivos que visem sua redução; acabar com o desmatamento até 2030; uso de 45% a 50% de energias renováveis na composição da matriz energética; redução da emissão de gás metano em 30% até 2030; e estabelecimento do mercado de carbono (HANSEN, SATO, RUEDY, 2022).

O Brasil assumiu o compromisso de mitigar 50% de suas emissões de GEE até 2030, alvo considerado ambicioso, já que o Brasil, na contramão do mundo, que diminuiu suas emissões devido à pandemia do COVID-19, aumentou 9,5% de suas emissões de GEE em 2020, principalmente devido ao desmatamento na Amazônia (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2021).

Durante a 27 ª Conferência da ONU sobre Mudanças do Clima (COP-27), que ocorreu em 2022 no Egito, foram propostas discussões para dar continuidade à operacionalização do Acordo de Paris. O objetivo da presidência egípcia era aumentar as ações climáticas globais por meio da redução das emissões, esforços de adaptação e um financiamento justo para os países em desenvolvimento. O cenário mundial, após a invasão russa na Ucrânia, também expôs a necessidade de tornar planos energéticos mais sustentáveis e independentes de combustíveis fósseis. De forma geral, o Brasil se posicionou quanto às finanças, mitigações e esforços de adaptações, deixando clara a necessidade de apoio de financiamento dos países desenvolvidos aos países em desenvolvimento para o cumprimento das metas (CEBDS, 2022).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), criado pelo Protocolo de Quioto em 1997, é um fundo de flexibilização para auxiliar o processo de redução de emissões de GEE ou de captura de carbono por países em desenvolvimento a partir da implantação de tecnologias verdes. Ele foi estabelecido para criar alternativas economicamente viáveis para a elaboração de projetos que envolvam o desenvolvimento sustentável. O Brasil foi um dos primeiros países a estabelecer projetos ligados ao MDL, sendo 65% dos projetos brasileiros envolvendo a redução de gás carbônico (CO_2), 34% da redução de metano (CH_4) e 1% de óxido nitroso (N_2O) (MIGUEZ *et al.*, 2008).

O MDL foi a base para a criação do Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável (MDS), que foi proposto em 201 no Acordo de Paris. O MDL e o MDS são mecanismos que regulam o mercado de carbono entre as partes incentivando setores a elaborarem projetos de eficiência energética e de reflorestamento para gerarem créditos de carbono. O MDS foi estabelecido com um intuito de incentivar metas mais ambiciosas e detalhadas, principalmente para o setor privado (CNI, 2020).

3.1.2 Qualidade do Ar

A qualidade do ar está diretamente relacionada com a composição e com os mecanismos de dispersão dos poluentes no ar. Para que situações de qualidade do ar críticas não ocorram, é necessário que órgãos ambientais definam padrões de emissões para poluentes nocivos (DERISIO, 2004).

Os poluentes relacionados com a qualidade do ar são regulamentados pelo CONAMA Resolução nº491 de 2018, entre eles estão o monóxido de carbono (CO), o dióxido de enxofre (SO_2), o óxido de nitrogênio (NO), o dióxido de nitrogênio (NO_2), os hidrocarbonetos (HC), o ozônio (O_3) e o material particulado (MP) (CONAMA, 2018).

A Resolução CONAMA nº 382 de 2006, define limites para alguns poluentes relacionados ao processamento industrial, como os compostos orgânicos voláteis (COV), os óxidos de enxofre (SOx) os óxidos de nitrogênio (NOx) e o MP (CONAMA, 2006).

3.1.2.1 Material Particulado

O material particulado (MP) consiste em partículas de material sólido e líquido que permanecem em suspensão no ar, podendo se apresentar como poeiras, fumos, fumaças ou névoas.

As principais fontes de emissão de MP são as antrópicas, os considerados de origens primárias são resultantes dos processos industriais, dos veículos automotores, de queima de biomassa e da ressuspensão do solo provenientes de processos de mineração. Os MP de origens secundárias são as partículas oriundas das reações químicas entre os gases SO_2, NOx e compostos orgânicos voláteis com o ar (CETESB, 2021).

O tamanho das partículas é um parâmetro importante para avaliar seu impacto na atmosfera e na saúde pública, pois a inalação dessas partículas permite a penetração de diferentes substâncias no organismo causando doenças respiratórias. Quanto à classificação de tamanho, as partículas podem ser classificadas em partículas totais em suspensão (PTS), e partículas inaláveis (PI). As PTS possuem diâmetro menor que 50 µm (micrômetros) e as PI são subdivididas em grossas (MP_{10}) com diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm, e finas ($MP_{2,5}$) com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm, estas também chamadas de partículas respiráveis (SILVA & VIEIRA, 2017).

Os aerossóis ou MP também interferem na formação das nuvens, na precipitação, na visibilidade e transparência da atmosfera. A redução de visibilidade impede a passagem de radiação na atmosfera por reflexão, dispersão e absorção. As partículas finas $MP_{2,5}$, chamadas de partículas respiráveis, são as principais causadoras da redução da visibilidade, uma vez que por serem menores permanecem mais tempo suspensas no ar, e não são tão afetadas pela força gravitacional (ALVES, 2005; SILVA, 2018).

De acordo com Hess (2008) há uma relação direta entre a queima de biomassa com a incidência de câncer, principalmente no trato respiratório, como nos pulmões. O fato de os trabalhadores serem diariamente expostos ao calor, à fumaça, aos gases tóxicos e às partículas de fuligem, são as razões pelas quais o monitoramento e os controles de emissões tornam-se relevantes para a saúde pública (RODRIGUES, 2016).

Fajersztajn *et al.* (2013) também encontraram evidências epidemiológicas robustas que relacionam a poluição do ar com a mortalidade por câncer de pulmão. Essa relação tem sido subestimada pelas organizações de saúde no mundo, já que os estudos convencionais dos efeitos de MP na saúde foram realizados em locais com concentrações médias anuais que variam entre 5 µg m^{-3} a 35 µg m^{-3}, contudo, as concentrações deste mesmo parâmetro em centros urbanos populacionais, como os da China, Índia e países em desenvolvimento, são frequentemente mais altas que 100 µg m^{-3}.

3.1.2.2 Monóxido de Carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor e inodoro. A principal fonte de emissão deste poluente primário são as combustões incompletas oriundas de fontes móveis, porém também está associado aos processos industriais e queima de resíduos, bem como à decomposição de matéria vegetal (MANAHAN, 2013).

Após a inalação deste gás há riscos à saúde, causando sintomas de envenenamento, tonturas, dor de cabeça e asfixia que levar até mesmo à morte. Isso acontece, pois o CO possui maior afinidade com a hemoglobina que o CO_2, o que impede o ciclo da respiração celular (BAIRD & CANN, 2011).

3.1.2.3 Óxidos de Nitrogênio

Os óxidos de nitrogênio (NOx) são oriundos, principalmente, de processos de combustão, pela queima de combustíveis fósseis ou de matéria orgânica. Os óxidos de nitrogênio, NO e NO2, são formados nos processos de combustão por reações paralelas entre N_2 e O_2 da atmosfera, bem como pela combustão de compostos nitrogenados presentes no combustível e apresentam toxicidade em elevadas concentrações, podendo causar inflamações no trato respiratório (MANAHAN, 2013).

O óxido nítrico (NO) e o óxido nitroso (N_2O) são oriundos das reações de nitrificação e desnitrificação no solo e estão diretamente associadas à fertilização nitrogenada nas atividades agrícolas no Brasil. A adubação rica em nitrogênio no solo tem como objetivo aumentar a produtividade de plantações em grande escala considerando que a ausência desse no solo pode ser um limitante na taxa de crescimento vegetal, porém esse aumento na concentração de nitrogênio também favorece a emissão de um importante gás do efeito estufa, o N_2O (ASSIS *et al.*, 2017).

Como impacto ambiental das emissões destes gases ressalta-se a chuva ácida, já que na atmosfera, os óxidos de nitrogênio podem formar o ácido nítrico (HNO_3). Além da chuva ácida, estes poluentes estão associados aos fenômenos de *Smog* Fotoquímicos pela absorção de radiação ultravioleta e interações atmosféricas com compostos orgânicos voláteis (COVs), causando uma névoa que diminui a visibilidade e causa irritações nos olhos e mucosas (SILVA & VIEIRA, 2017).

3.1.2.4 Compostos Orgânicos Voláteis

Os compostos orgânicos voláteis (COVs) por definição apresentam temperatura de ebulição até 130 ºC a 1 atm e participam ativamente na formação de oxidantes fotoquímicos na atmosfera. São oriundos de combustão incompleta de combustíveis fósseis ou biocombustíveis em emissões veiculares, de fabricação de produtos químicos, de aterros industriais, de refinarias de petróleo, de evaporação de solventes e de processos de pintura (SOARES, 2021). Os grupos que constituem os COVs são os hidrocarbonetos, os álcoois, os aldeídos, as cetonas e os ácidos carboxílicos. Os hidrocarbonetos possuem elevada importância por incluírem compostos aromáticos, alcanos e alcenos, grupos com elevada reatividade. Os compostos aromáticos, como benzeno, etilbenzeno, tolueno e xileno, chamados BTEX, são tóxicos, prejudiciais à saúde, possuem elevada reatividade com o radical hidroxila e participam ativamente da formação do ozônio troposférico e aldeídos (MANAHAN, 2013; SILVA, 2019).

As elevadas concentrações de ozônio na troposfera, camada da atmosfera mais próxima da superfície da Terra, pode ser nociva devido ao alto poder oxidante dessa substância, responsável por iniciar diversas oxidações primárias e processos fotolíticos. Devido à presença de COVs, óxidos de nitrogênio (NOx) e radiação solar na atmosfera, o ozônio troposférico é formado, sendo classificado como um importante poluente secundário (BRAGA, 2005).

A exposição humana à elevada concentração de ozônio pode causar náuseas, dores de cabeça, dores no peito e efeitos diversos na região de ductos alveolares, estando diretamente relacionado com quadros de asma e câncer de pulmão (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 1998).

Como já citado, além da rota a partir de COVs, as reações químicas que envolvem a formação de ozônio troposférico também podem envolver os NOx, que são poluentes oriundos da queima da madeira e atuantes na formação do fenômeno de chuvas ácidas.

De forma geral, podemos considerar que os COVs reagem com os radicais hidroxila, moléculas de ozônio e nitratos presentes na atmosfera gerando radicais alquila e peroxialquila e também o óxido nítrico. Devido à instabilidade da ligação, o óxido nítrico tende a se transformar em dióxido de nitrogênio, que com a presença de radiação solar se decompõe fotoquimicamente

liberando um átomo de oxigênio que, na presença de O_2, formam o ozônio troposférico como representado na sequência de equações (1 a 7) (GARCIA, 2009).

$$RH + {}^{\bullet}OH \rightarrow H_2O + R^{\bullet} \quad \text{Equação 1}$$

$$R^{\bullet} + O_2 \rightarrow RO_2{}^{\bullet} \quad \text{Equação 2}$$

$$RO_2^{\bullet} + NO \rightarrow NO_2 + RO^{\bullet} \quad \text{Equação 3}$$

$$RO^{\bullet} + O_2 \rightarrow HO_2{}^{\bullet} + RCHO \text{ ou } RCOR \quad \text{Equação 4}$$

$$HO_2{}^{\bullet} + NO \rightarrow NO_2 + {}^{\bullet}OH \quad \text{Equação 5}$$

$$NO_2 + h\nu \rightarrow NO + O^{\bullet} \quad \text{Equação 6}$$

$$O^{\bullet} + O_2 \rightarrow O_3 \quad \text{Equação 7}$$

3.1.3 Legislações aplicáveis

Para o controle ambiental das condições da qualidade do ar são necessários padrões de emissões, por fontes poluidoras, estabelecidos pelos órgãos reguladores. Dentre as principais legislações brasileiras aplicáveis a este controle, temos a Resolução nº 491 de 2018 que rege as concentrações máximas permitidas por um determinado período dos poluentes atmosféricos tidos como indicadores da qualidade do ar. Vale ressaltar que o CONAMA não regulamenta os GEE como críticos para a qualidade do ar na Resolução nº 491 de 2018 e que não há uma resolução específica para o controle das emissões desses gases.

Considerando as diretrizes do CONAMA na Resolução nº 382 de 2006 e nº 436 de 2011, o Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) em Minas Gerais delibera limites máximos de emissão de poluentes para fontes fixas de acordo com o combustível, ano de instalação e potência térmica nominal, pela Deliberação Normativa nº 187 de 2013.

De acordo com a referida Deliberação Normativa n° 187 de 2013, há condições e limites máximos de emissões de material particulado (MP) para atividades que utilizam a combustão de derivados da madeira a fim de obterem energia. Além disso, também prevê limites máximos de emissões para atividades industriais não específicas, sendo aplicadas a qualquer processo industrial poluidor, valores de referência para óxidos de enxofre (SOx), óxidos de nitrogênio (NOx) e compostos orgânicos voláteis (COVs).

Desde 2009, o estado de Minas Gerais tem se atentado para as alterações climáticas e a necessidade de tomar frente para mitigar as emissões de GEE, por meio do Decreto Estadual n° 45.229. Tomando como base que só é possível gerenciar o que se mede, esse decreto regulamenta medidas de combate às mudanças climáticas e às emissões de GEE, estabelecendo o registro público voluntário das emissões no Estado. Além disso, no artigo 13 do referido Decreto, o estado se compromete a desenvolver um programa que incentive práticas sustentáveis para o suprimento de carvão vegetal como um combustível renovável, especialmente no setor siderúrgico, por meio dos mecanismos reguladores como o MDL e MDS (MINAS GERAIS, 2009).

Em 2014 o Decreto Estadual nº 45.229 foi alterado pelo Decreto Estadual n° 46.674, não sendo mais voluntário o registro das emissões e autorizando o COPAM a determinar quais atividades estão sujeitas ao relatório de emissões de GEE mandatório (MINAS GERAIS, 2014). Em 2018, ocorreu a segunda alteração do Decreto Estadual nº 45.229, pelo Decreto nº 47.409 instituindo o registro público das emissões e remoções de GEE como uma prática sistemática de inventários corporativos, como um banco de dados para auxiliar na formulação de políticas de redução de emissões em escala estadual (MINAS GERAIS, 2018).

Foi com o Decreto Federal n° 11.075 de 2022 que o governo brasileiro definiu as primeiras diretrizes sobre a elaboração de Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas (PNMC) e instituiu o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases do Efeito Estufa (SINARE). Esse sistema vem com a responsabilidade de apresentar metas gradativas de redução das emissões de GEE para, inicialmente, específicos setores industriais. A partir do cumprimento dos PNMC, o SINARE poderá conceder créditos de carbono certificados, que poderão ser comercializados ou utilizados para o cumprimento dos limites de emissões de GEE propostos nas metas É através do SINARE que o Projeto Siderurgia Sustentável, e consequentemente, a descarbonização dos processos siderúrgicos, foi fortalecido e valorizado por meio do incentivo da otimização e inovação dos processos produtivos de carvão vegetal no Brasil (BRASIL, 2022).

3.1.3.1 Monitoramento de emissões atmosféricas

O monitoramento das fontes emissoras é definido como uma avaliação sistemática de parâmetros físico-químicos de emissões associadas a atividades ou processos industriais e é

essencial para que as taxas de emissões não sejam causadoras de situações críticas da qualidade do ar (JURKEVICZ, 2020).

O monitoramento ambiental atmosférico de fontes fixas ou chaminés é uma determinação das resoluções CONAMA n° 382 de 2006, para fontes novas, e CONAMA n° 436 de 2011, para fontes existentes anteriores a 2007. Ambas as resoluções citadas estabelecem limites máximos de emissões para fontes fixas a depender da atividade ou processo industrial (JURKEVICZ, 2020). Portanto, devem ser realizados monitoramentos ambientais atmosféricos periódicos em chaminés de processos industriais, de acordo com a condicionante ambiental e legislações citadas.

As principais normas que regem metodologias de amostragem em fontes estacionárias para MP, CO, NOx e COVs estão organizadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Metodologias de amostragem de MP, Composição Gasosa e COVs

Descrição	ABNT	CETESB	EPA
Efluentes gasosos em Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Calibração dos equipamentos utilizados na amostragem de efluentes	NBR - 12020/MB3356 - Versão Abril 1996	E16.030- Versão Julho 2009	-
Acompanhamento de Amostragem em dutos e chaminés – Procedimento	-	L9.240- Versão Setembro 1995	-
Determinação dos Pontos de Amostragem – Procedimento	-	L9.221- Versão Julho 1990	*Method* 01- Versão Abril 2020
Determinação da Massa Molecular Base Seca - Método de Ensaio	-	L9.223- Versão Junho 1992	-
Determinação da Velocidade e Vazão dos Gases - Método de Ensaio	NBR-11.966/MB-3080 - Versão Julho 1989	L9.222- Versão Maio 1992	*Method* 02- Versão Agosto 2017
Determinação da Umidade dos Gases	NBR-11.967/MB-3081- Versão Julho 1989	L9.224- Versão Agosto 1993	-
Determinação de Material Particulado - Método de Ensaio	NBR-12.019/MB-3355- Versão Dezembro 1990	L9.225 - Versão Março 1995	*Method* 05- Versão Dezembro 2020
Determinação de Óxidos de Nitrogênio, Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono e Oxigênio - Emissão Motores a Gás Natural, Caldeiras e Aquecedores de Processo Usando Analisadores Portáteis.	-	-	CTM-30- Versão Outubro 1997
Determinação Concentração Orgânica Gasosa - Fotoionização (VOC PID)	-	-	*Method* 25ª- Versão Agosto 2017

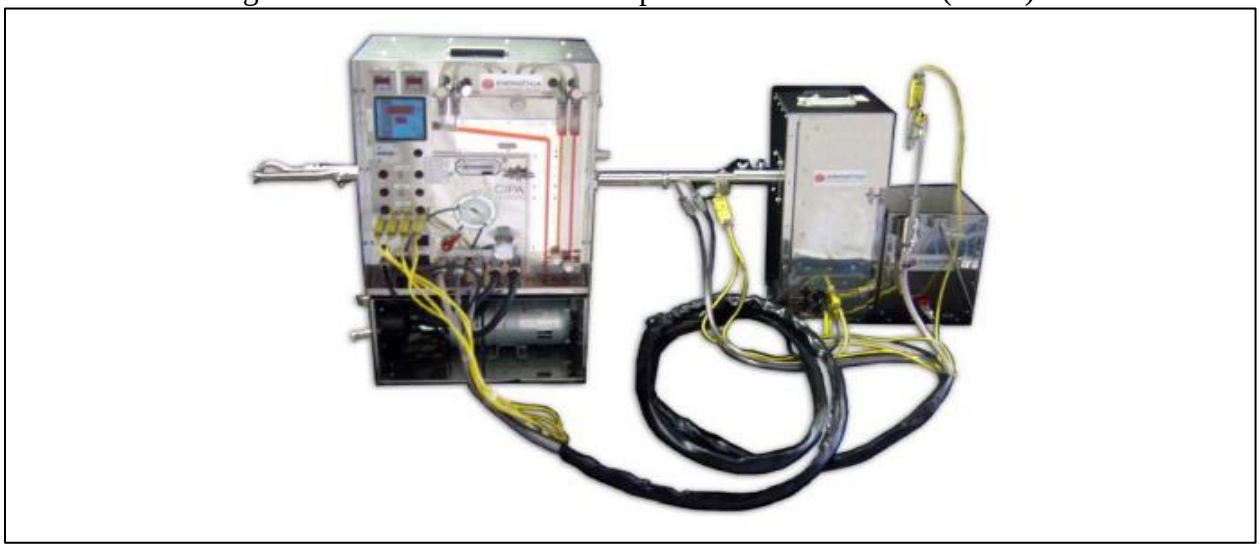
Fonte: Autora (2023)

A amostragem de material particulado em dutos e chaminés é realizada por um coletor isocinético de poluentes atmosféricos (CIPA). Esse equipamento (Figura 1) permite monitorar velocidade, temperatura, pressões e vazões de gases emitidos por chaminés de processos industriais. A utilização do CIPA atende às metodologias da EPA, ABNT e CETESB. Para sua correta aplicação é necessário determinar os pontos de amostragem de forma adequada, a velocidade da vazão volumétrica dos gases, o ar em excesso e a umidade dos gases na chaminé.

O CIPA é composto por painel de controle, bomba de vácuo, caixa de coletas de amostras, sonda e extensão flexível, vidrarias e adaptadores (ENERGÉTICA, 2016). Depois da coleta, a

concentração das partículas é determinada por gravimetria, conforme a metodologia NBR-12.019/MB-3355 de dezembro 1990.

Figura 1 - Coletor isocinético de poluentes atmosféricos (CIPA)



Fonte: Energética (2016)

As análises dos teores de oxigênio (O_2), de dióxido de carbono (CO_2), de monóxido de carbono (CO) e de nitrogênio (N_2) compõem a análise de composição gasosa. Elas são pré-requisitos para a determinação do teor de MP e podem ser obtidas a partir de um analisador *online*.

O Optima 7 (Figura 2) é um analisador *online* capaz de medir a composição gasosa através de uma sonda com sensores eletroquímicos. É um instrumento muito utilizado para o controle e determinação da eficiência de caldeiras em processos industriais (MRU, 2021).

Figura 2 - Analisador portátil Optima 7



Fonte: MRU (2021)

Além dos gases da composição gasosa, é possível acoplar células eletroquímicas para a análise de óxidos de nitrogênio (NOx), de óxidos de enxofre (Sox), de hidrocarbonetos totais, de fluxo de ar, de variação de pressão e temperatura, de eficiência de combustão e perda de calor (MRU, 2021).

O Plano de Monitoramento e Emissões Atmosféricas do Estado de São Paulo define os compostos orgânicos em dois grupos, os voláteis (com temperatura de ebulição entre 30 °C a 120 °C) e os semivoláteis (com temperatura de ebulição entre 120 °C a 300 °C) (CETESB, 2010).

As tecnologias de análise direta de compostos orgânicos voláteis totais são *Photoionisation Detector* (PID - Detector por Fotoionização) e *Flame Ionisation Detector* (FID - Detector por Ionização por Chama) que detectam as moléculas de hidrocarbonetos na atmosfera por meio de eletrodos que atraem as cargas dos íons gerados pela quebra dos compostos. Essa quebra é realizada por lâmpada ultravioleta, no caso do PID, e por chama, no caso do FID (ENERGÉTICA, 2014).

O detector tipo PID (Figura 3) gera radicais a partir da energia proveniente de uma lâmpada ultravioleta, que, por terem carga elétrica, são descarregados em eletrodos de carga oposta. A corrente elétrica gerada pela descarga é proporcional ao número de moléculas presentes no volume

amostral, permitindo assim a medição da concentração desses componentes. A maior vantagem relacionada ao uso dessa tecnologia é a rápida velocidade de resposta, característica de um método físico, e ser aplicável a um instrumento portátil, o que torna as análises acessíveis. Seu uso é indicado para medição de quantidades pequenas de vapores orgânicos, devido à baixa energia das lâmpadas ultravioleta, que não conseguem ionizar algumas moléculas, como o metano (ENERGÉTICA, 2014).

Figura 3 - Analisador portátil do tipo PID



Fonte: Energética (2014)

A tecnologia FID, mais antiga e aplicável a cromatografias, baseia-se na geração de íons com carga elétrica proveniente da quebra da ligação carbono hidrogênio (C-H) após o contato com uma chama. É uma tecnologia robusta e altamente eficiente, sendo possível detectar todas as ligações (C-H) de compostos orgânicos, incluindo o metano. Essa é a maior vantagem do FID, com relação ao PID, no âmbito de qualidade do ar visando às mudanças climáticas, porém vale lembrar que o detector FID é um instrumento fixo, o que dificulta análises que precisam ser realizadas *in loco* (ENERGÉTICA, 2014).

3.2 CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal pode ser definido como um produto da carbonização de compostos lenhosos. É um material sólido, de cor escura e possui elevada porcentagem de carbono, acima de 70%. O carvão vegetal se destaca como uma fonte de energia renovável para suprir o setor siderúrgico nacional. Cerca de 1/3 da produção mundial de carvão vegetal é oriunda do Brasil,

devido ao elevado consumo por parte das siderúrgicas nacionais, porém sua produção ainda é realizada de forma rudimentar ocasionando impactos ambientais relevantes e em condições de trabalho insalubres. Estes fatos ofuscam a origem renovável deste combustível e por isso se tornaram um gargalo no desenvolvimento sustentável do processo (MCTI, 2015).

A produção de carvão vegetal no Brasil é majoritariamente realizada em processos com pouca tecnologia aplicada, associada a baixos rendimentos gravimétricos, a dificuldade de controle do processo, e com o não reaproveitamento dos gases oriundos dele. Além das condições de trabalho insalubre associada à liberação de gases, há emissões de poluentes tóxicos em altas concentrações, como o monóxido de carbono (CO) e de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4).

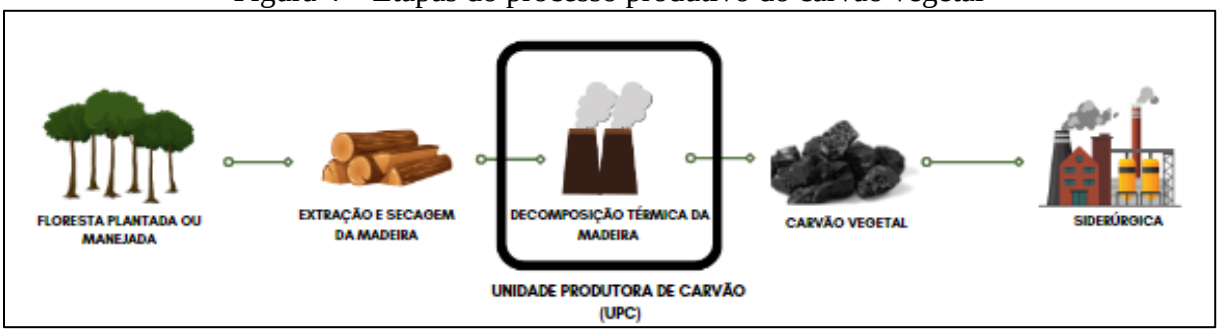
Os maiores gargalos no caminho para alcançar a sustentabilidade no setor siderúrgico, principalmente no que se refere à produção do carvão vegetal, são os impactos econômicos e operacionais que os produtores de carvão vegetal enfrentam ao tentarem se adequar às necessidades de adquirir matéria-prima legalizada e de implementar tecnologias sustentáveis que favoreçam a economia circular, para tornar o processo ambientalmente correto e mais lucrativo (FIDES, 2009).

O Brasil conta com o maior parque industrial de produção siderúrgica da América Latina, com uma capacidade instalada de 51 milhões de toneladas de aço bruto por ano. Os polos consumidores de carvão vegetal no Brasil estão concentrados nos Estados de Minas Gerais, Maranhão, Mato Grosso do Sul e Pará. O setor siderúrgico no Brasil representa expressiva importância no crescimento econômico do país (SANTOS, 2017). No ano de 2021, as siderúrgicas apresentaram um crescimento na produção em índices que equivalem a três vezes o crescimento do PIB brasileiro (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2021).

3.2.1 Processo produtivo do carvão vegetal

A cadeia produtiva do carvão vegetal pode ser representada conforme esquema apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Etapas do processo produtivo do carvão vegetal



Fonte: Autora (2023)

A primeira etapa do processo é a origem da matéria-prima principal, a madeira. O plantio e manejo de florestas destinadas à produção de carvão vegetal no país apresentam técnicas de cultivo, de manipulação genética e de aumento da produtividade avançadas, porém nem todo o território brasileiro utiliza florestas plantadas como matéria-prima para atender às demandas do setor siderúrgico. Portanto, uma das maiores preocupações da atividade carvoeira no Brasil é o uso de florestas nativas para a produção de carvão vegetal (SANTOS, 2017).

O carvão vegetal é legalmente obtido pela pirólise de madeira reflorestada, porém, por muitos anos, madeira oriunda da vegetação nativa foi comumente usada como matéria-prima. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2020 a maioria da produção de carvão vegetal provém de florestas plantadas para esse fim, cerca de 10 milhões de hectares. A Lei de Crimes Ambientais nº 9.605 de 1998, que veda a utilização de carvão vegetal sem licença, foi a primeira proposta do governo para o controle da proibição do uso de florestas nativas para a produção de carvão vegetal. De acordo com o Programa de Incentivo Fiscal ao Florestamento e Reflorestamento, o reflorestamento proporciona a utilização da madeira como fonte energética pelas indústrias e salvaguarda os recursos não renováveis (OLIVEIRA, 2012).

As principais vantagens do uso de florestas plantadas são: a fixação de carbono atmosférico na forma de florestas cultivadas; a diminuição da pressão sobre as florestas nativas; o reaproveitamento de terras degradadas; a proteção do solo e da água; e a possibilidade de entrada no mercado de carbono (SNIF, 2020).

As espécies do gênero *Eucalyptus*, originária da Austrália, são consideradas as melhores opções para a produção de carvão vegetal devido à boa adaptação das espécies às características do clima e solo brasileiros. Os avanços da silvicultura das espécies deste gênero e as propriedades da madeira tornam seu uso lucrativo. O cultivo do gênero em solo brasileiro apresenta relevância

comercial na economia brasileira, com cerca de 9,93milhões de hectares plantados, sendo 75% da área composta de eucalipto e produtividade média de 39 m³/ha/ano (IBÁ, 2022).

O IBGE publicou no boletim intitulado Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (2021) que o valor da produção florestal energética cresceu 27,1% com relação a 2020, chegando a R$ 30,1 bilhões, sendo registrada a participação de florestas plantadas em 79,3% e 20,7% de extração vegetal. O estado de Minas Gerais é o que apresenta maior valor da produção de florestas plantadas, representando 30,2% do setor brasileiro, e a maior quantidade de carvão vegetal de silvicultura produzido no país, com cerca de 90% do volume nacional. Com relação à produção de carvão vegetal proveniente de florestas nativas manejadas, o Maranhão é o maior produtor do país, representando 32,3% do volume nacional (PEVS, 2021).

Antes de ser utilizada como matéria-prima para a produção de carvão vegetal, a madeira necessita ser preparada. A etapa de preparação é a secagem ao ar livre. Geralmente as toras são secadas ao ar livre por até 150 dias até atingirem umidade relativa aproximada de 35%. O uso de madeiras com teor de umidade acima de 30% exige mais energia para a etapa de secagem e torrefação, fases endotérmicas, podendo ser desvantajoso econômica e ambientalmente. Como observado, essa é uma alternativa de baixo custo, porém longa e exposta a diversos fatores meteorológicos (OLIVEIRA *et al*., 2013). Cardoso (2015) completa que a secagem das toras pode ser realizada a partir da queima dos gases não condensáveis com poder calorífico gerado no próprio processo de carbonização. Dessa forma, o rendimento gravimétrico em carvão vegetal aumentaria, bem como a diminuição das emissões do processo.

Após o corte e a secagem, as toras são enfornadas e dispostas de forma que haja espaço para a permeabilidade do calor entre as toras, mas sem desperdício do espaço. Toras com diâmetros uniformes facilitam essa etapa. O processo de carbonização da madeira só é iniciado após o carregamento do forno, fechamento e dada a ignição. Durante a ignição, geralmente realizada por combustão parcial ou utilização de tiços residuais, é necessário permitir a entrada de ar pelas aberturas dos fornos (OLIVEIRA *et al*., 2013).

O ciclo da carbonização, ou decomposição térmica da madeira, pode durar até cinco dias, e incluindo a fase de resfriamento até quinze dias. A produção, que geralmente ocorre na Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC), pode ser influenciada pela qualidade da espécie da madeira utilizada (alta produtividade, alta densidade, alto teor de lignina, baixo percentual de inorgânicos,

alto poder calorífico, alta densidade energética, baixo teor de umidade), pelo controle da temperatura do processo e do tipo de forno utilizado (TRUGILHO, 2014). Depois do processo de carbonização da madeira, é necessário o resfriamento completo do forno sem entrada de ar. Em fornos de alvenaria é necessário cobrir com barro as possíveis entradas de ar, para acelerar o fim do processo (OLIVEIRA *et al*., 2013).

A última etapa da produção é o desenfornamento, que acontece quando a entrada de oxigênio é considerada sem perigo de reacendimento do forno. Se a abertura do forno for antes do resfriamento total, além do risco de reignição, há contato direto do trabalhador com elevadas temperaturas e emissões de partículas em suspensão (SANTOS, 2017). O armazenamento do carvão vegetal é geralmente feito ao ar livre e é transportado em sacos para as siderúrgicas.

Todas as etapas do processo produtivo de carvão vegetal contribuem para a qualidade do produto final, sendo o controle da carbonização da madeira dentro dos fornos a etapa mais importante para a carbonização da madeira (OLIVEIRA, 2012).

O significado de carbonização é concentrar carbono a partir de uma reação de decomposição a altas temperaturas em ambiente com baixas concentrações ou na ausência de oxigênio, pelo processo que conhecemos como pirólise. A carbonização de madeira produz então o que chamamos de carvão vegetal (SANTOS, 2017).

A madeira é composta de carbono, oxigênio, água, hidrogênio, nitrogênio e sais minerais e apresenta potencial para uso como fonte energética. Durante o processo de concentração de carbono da madeira, há liberação de gases, vapores de água e líquidos orgânicos, permanecendo como produto principal o carvão vegetal, e como coprodutos, o alcatrão vegetal, extrato pirolenhoso, gases condensáveis e tiços de madeira. O conceito de calor e os mecanismos de transferência de calor representam importantes fatores para a compreensão da carbonização (REZENDE *et al.*, 2004).

O calor é associado à transferência de energia térmica entre sistemas que possuem diferenças de temperatura, sendo que a transferência pode ocorrer de três formas: por radiação, por convecção e por condução. Características físicas e químicas da matriz sólida da madeira podem influenciar na transferência do calor, como a baixa condutividade, a taxa de umidade da madeira, e a geometria das peças que serão carbonizadas. No processo de carbonização ocorre inicialmente

o desprendimento de água, a degradação da hemicelulose, celulose e da lignina. O rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal são influenciados pelas propriedades da madeira e pela tecnologia utilizada no processo de carbonização, por isso, essa deve ser muito bem conduzida. Na condensação dos gases desprendidos durante o processo de carbonização, obtêm-se o alcatrão vegetal e o extrato pirolenhoso, coprodutos de interesse comercial (OLIVEIRA, 2012). De acordo com Rezende *et al.* (2004), a comercialização de coprodutos é um objetivo da indústria produtora de carvão vegetal, mas a baixa eficiência na recuperação das fases condensáveis em fornos de alvenaria é um fator limitante que precisa ser superado.

A carbonização da madeira ocorre em quatro fases, em termos gerais são a secagem, torrefação, carbonização e fixação do carbono, respectivamente (ALMEIDA, 1982). As fases estão relacionadas com o tempo e com a temperatura do processo. É apresentado no Quadro 2 uma comparação entre as temperaturas registradas em cada fase da carbonização na literatura.

Quadro 2 – Relação da fase de carbonização com a temperatura do processo

Referência	I. Secagem	II. Torrefação	III. Carbonização	IV. Fixação do Carbono
ALMEIDA (1982)	110 °C- 200 °C	180 °C- 200 °C	250 °C- 300 °C	Acima de 300 °C
RAAD (2004)	Até 100 °C	105 °C-200 °C	200 °C-270 °C	Acima de 270 °C
REZENDE (2006)	Até 110 °C	110 °C- 250 °C	250 °C- 350 °C	Acima de 350 °C
SANTOS (2016)	25 °C- 100 °C	200 °C- 300 °C	300 °C- 400 °C	400 °C-500 °C
OLIVEIRA *et al*. (2013)	100 °C- 150 °C	150 °C- 275 °C	275 °C- 400 °C	400 °C-470 °C
DONATO (2017)	Até 150 °C	150 °C -250 °C	250 °C-400 °C	Acima de 400 °C

Fonte: Autora (2023)

Segundo as referências bibliográficas indicadas no Quadro 2, os principais acontecimentos relacionados a cada uma das fases da carbonização são:

- A secagem da madeira ocorre nas primeiras horas do processo de carbonização. As emissões provenientes dessa fase correspondem à liberação, principalmente, da umidade da madeira e CO_2, dentre outros compostos orgânicos voláteis presentes em menor proporção. A secagem da madeira ocorre sobretudo por reações de origem endotérmica e com perda de massa pouco expressiva, uma vez que os constituintes químicos da madeira possuem elevada estabilidade até 200 °C.

- A fase de torrefação da madeira é quando se inicia a liberação da água de decomposição da celulose e hemicelulose. As emissões de CO também se iniciam. As reações que acontecem nessa etapa também são endotérmicas. Como se inicia o processo de decomposição, também há liberação de gases orgânicos. Nesta fase são esperados maiores rendimentos dos gases condensáveis. Forma-se o tiço ou a madeira torrada.

- A fase da carbonização, propriamente dita, é a única fase que tem caráter exotérmico. Com a intensa decomposição das hemiceluloses (270 °C) e da celulose (350 °C) há geração de gases condensáveis, bióleo e água. Além desses, também há liberação de CO e CH_4. Nessa fase, o carvão vegetal já possui elevado teor de carbono fixo e é observada elevada perda de massa inicial. De acordo com Bryden *et al.* (2012), após a secagem e torrefação ocorre um aumento abrupto da temperatura e a decomposição da madeira se intensifica. Nesta fase são esperados maiores rendimentos dos gases não condensáveis, mas também são esperadas formações de gases condensáveis.

- Na etapa de fixação do carbono ocorre a redução gradual na liberação de voláteis, após a fixação. Também é possível observar, após o aumento da temperatura até o ponto máximo, uma queda gradativa da temperatura, que indica que o processo de fixação de carbono está finalizando.

Madeiras de *Eucalyptus sp.* Possuem composição química estrutural com cerca de 70% de holocelulose, 25% de lignina, 4% de extrativos totais e 1% de cinzas (SOARES, 2014; VIEGA *et al*., 2018). De acordo com Rowell *et al*. (2005), os extrativos da madeira são compostos químicos formados de graxas, ácidos e álcoois graxos, fenóis, terpenos, esteroides, resinas ácidas e compostos orgânicos.

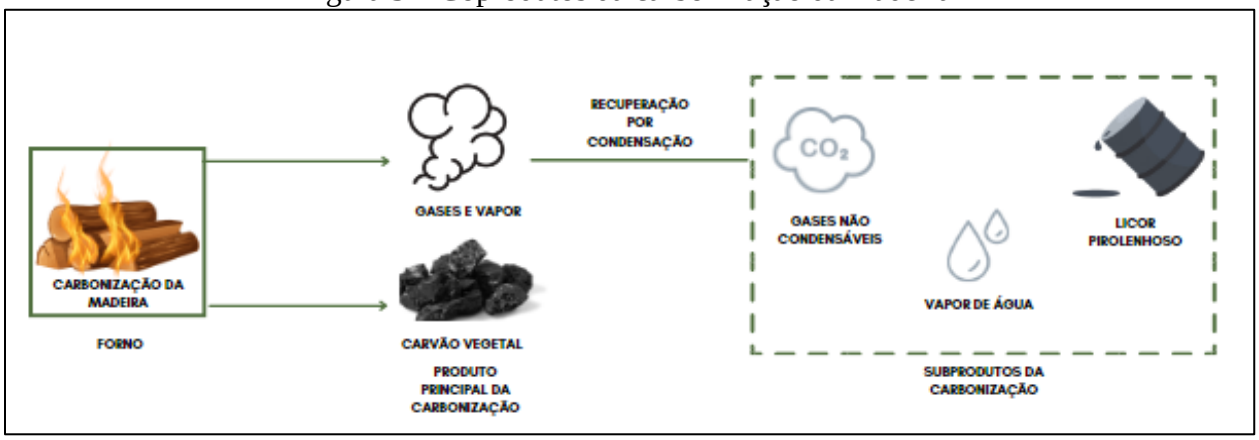
De acordo com Santos *et al.* (2012), podemos classificar os produtos da carbonização em uma fração correspondente ao carvão vegetal e outra fração composta por vapores e gases (alcatrão vegetal, pirolenhosos, e gases não condensáveis). A celulose, as hemiceluloses e a lignina, presentes na estrutura química da parede celular da madeira, quando decompostas, liberam voláteis inflamáveis como CO, CH_4 e C_2H_6. A lignina é o principal constituinte que contribui para a

formação do carvão vegetal e do alcatrão vegetal, pois é o componente de maior resistência térmica da madeira e apresenta conversão de cerca de 40% para a fase sólida após a pirólise (MARTINS, 1980; YANG *et al*., 2007).

De maneira estequiométrica é esperado que cerca de 70% da madeira seja convertida em coprodutos, dos quais 40% em base seca são os gases condensáveis como o alcatrão vegetal e extrato pirolenhoso e 30% em base seca dos gases não condensáveis como hidrocarbonetos (C_nH_n), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO) e hidrogênio gasoso (H_2) (ROY; DIAS, 2017).

As proporções estimadas para cada uma das frações e os produtos estão na Tabela 1 e Figura 5, de forma esquematizada.

Figura 5 – Coprodutos da carbonização da madeira



Fonte: Autora (2023) – (Adaptado de Rezende *et al.* (2004)

Tabela 1 – Produtos da Carbonização da Madeira

Produtos da Carbonização	% base seca
Carvão Vegetal (80% carbono fixo)	**33,0**
Gases Condensáveis	**42,0**
Extrato Pirolenhoso	35,5
Ácido acético	5,0
Metanol	2,0
Alcatrão vegetal solúvel	5,0
Água e outros	23,5
Alcatrão vegetal insolúvel	6,5
Gases não condensáveis	**25,0**
Hidrogênio (0,63%)	0,16
CO (34%)	8,5
CO_2 (62%)	15,5
Metano (2,43%)	0,61
Etano (0,13%)	0,03
Outros (0,81%)	0,20
Total	**100,0**

Fonte: Santos *et al*. (2012)

De acordo com Jesus (2020), a presença de umidade na madeira pode contribuir para o aumento do rendimento em gases condensáveis, e diminuir o rendimento de carvão vegetal, pois a água presente na madeira é uma das frações de composição dos gases condensáveis. Dessa forma, biomassas lenhosas com elevado teor de umidade produzem frações líquidas com um maior rendimento.

Canal *et al*. (2016) ressaltam que a decomposição térmica da madeira deve ser realizada com o controle da temperatura, para que ocorra a redução das emissões de compostos orgânicos voláteis como o metano, um gás relevante para o fenômeno de efeito estufa. Os COVs são os principais compostos poluentes oriundos da carbonização da madeira e, quando recuperados, constituem o licor pirolenhoso. O extrato pirolenhoso, parte mais volátil do licor pirolenhoso durante sua destilação, é formado por cerca de 92% de água e 8% de compostos orgânicos (ALMEIDA, 1982).

O líquido pirolenhoso oriundo da carbonização é composto por extrato pirolenhoso e alcatrão vegetal insolúvel. Esses coprodutos gasosos podem ser recuperados utilizando ciclones e resfriamento em um reator de recuperação e separados por decantação, devido à diferença de densidade (LEAL, 2015). O extrato pirolenhoso é uma solução aquosa amarronzada e formada majoritariamente por ácido acético, metanol e alcatrão vegetal solúvel. O alcatrão vegetal insolúvel

é um produto negro, com maior densidade e viscosidade. Tem caráter fenólico e é formado por ácidos orgânicos, compostos hidrogenados e hidrocarbonetos (SANTOS, 2017).

A principal aplicação do alcatrão vegetal é como combustível para substituição de óleos leves, mas também pode ser utilizado como combustível para gerar energia para o próprio processo de carbonização (LEAL, 2015). Além disso, pode ser utilizado em indústrias químicas e alimentícias. O extrato pirolenhoso, possui efeitos fertilizantes e pesticidas, sendo muito bem aproveitado na agricultura (REZENDE *et al.*, 2004), e como agente conservante e saneante, com ação antibacteriana (ALMEIDA, 2012; CHIAMENTI *et al*., 2016).

SHEN *et al*. (2010) observaram que durante a carbonização, e consequente aumento da temperatura do sistema, há aumento da emissão de compostos gasosos não condensáveis e diminuição da produção de líquidos pirolenhosos (SHEN *et al*., 2010). Logo, a temperatura final de carbonização é um importante parâmetro de qualidade do processo produtivo do carvão vegetal. Quanto maior a temperatura final de carbonização, menor o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e maior em gases. Porém, esse cenário resulta no aumento do teor de carbono fixo e do poder calorífico do carvão vegetal (TRUGILHO; SILVA, 2001).

3.2.2 Configuração dos fornos para carbonização da madeira

Existem diversos sistemas utilizados na produção do carvão vegetal dos mais primitivos aos mais desenvolvidos. A construção desses fornos pode variar em forma, material, tamanho, número de chaminés, fonte de calor e controle de emissões, sendo os que possuem maiores destaques os fornos de alvenaria e os metálicos (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

Os baixos rendimentos gravimétricos dos fornos de alvenaria têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para o processo de produção de carvão vegetal (REZENDE *et al*., 2004). Com a Tabela 2 é possível comparar o desempenho do uso de diferentes fornos para a produção de carvão vegetal.

Tabela 2 – Comparação dos fornos de carbonização no Brasil

Tipo de construção	Ciclo de operação [1] (horas)	Capacidade		Rendimento Volumétrico[4] (kg/MDC)
		Lenha[2] (kg)	Carvão Vegetal[3] (MDC)	
Fornos em Alvenaria com fonte interna de calor				
"Rabo Quente"	144-168	127	8,0	15,9
Superfície JG	144	70	4-5	14,0
Retangular V&M	264-312	1143-1524	95-130	12,0
Fornos Metálicos com fonte externa de calor				
DPC semicontínuo	72	508	53,3	9,5

Fonte: Autora (2023) – (Adaptado de Santos; Hatakeyama (2012))

[1] Ciclo de operação dado em horas (h).
[2] Quantidade de lenha dada em quilogramas (kg).
[3] Rendimento volumétrico (kg/MDC).
[4] Quantidade de carvão vegetal dada em metro de carvão (MDC).

Vale ressaltar que a utilização dos fornos está de acordo com a capacidade produtiva da planta. Grandes empresas do setor siderúrgico geralmente utilizam carvão vegetal proveniente de grandes fornos, com etapas mecanizadas e com maior controle operacional, enquanto pequenos produtores, existentes em maior quantidade no país, operam o processo geralmente de forma intuitiva, em pequenos e rudimentares fornos (SANTOS, 2017). Os maiores rendimentos gravimétricos são observados nos grandes fornos com maior controle operacional. Brito (1992) enfatiza que a transformação da madeira para carvão vegetal depende da temperatura, e a mesma influencia no rendimento dos produtos do processo.

Entendendo o cenário, fica evidente a necessidade do avanço de tecnologias que aperfeiçoem os processos produtivos. Com essa motivação, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) lançou em 2010 o Plano Siderurgia Sustentável com três principais objetivos: promover a diminuição das emissões de efluentes, diminuir o desmatamento de florestas nativas, aumentando a competitividade brasileira da indústria de ferro e aço no âmbito da economia de baixo carbono. O Plano Siderurgia Sustentável apoiou o desenvolvimento de uma tecnologia para a produção de carvão vegetal com baixa emissão de poluentes, maximizando o rendimento em carvão vegetal, sendo chamada de fornos-fornalha (MCTI, 2015; UNDP, 2022).

Santos (2017) ressalta que parte da evolução do processo de fabricação de carvão vegetal está na adoção de equipamentos periféricos que contribuem para a eficiência dos fornos,

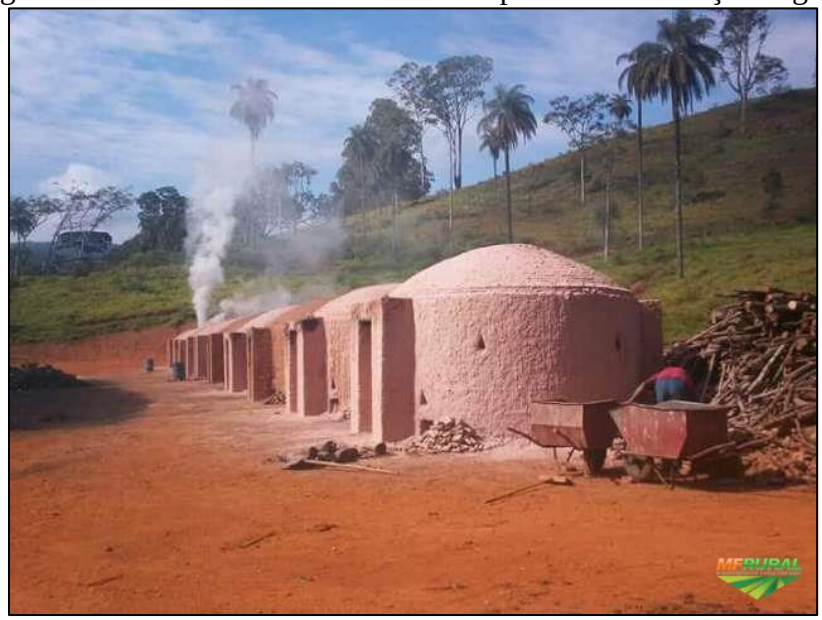
diminuição de emissões e implementação da economia circular, agregando valor para o produto ou processo.

3.2.2.1 Fornos de alvenaria

Os fornos circulares de alvenaria (Figura 6), muito comuns no Brasil, são construídos por tijolos assentados com barro. Esses fornos possuem alta dependência de mão de obra, baixo custo de implementação, ciclo total de carbonização de 7 a 12 dias e rendimentos baixos de conversão de madeira em carvão vegetal, cerca de 35%. Devido à sua estrutura cilíndrica, o processo de resfriamento ocorre mais rápido (CARNEIRO *et al*., 2012).

Os fornos "rabo-quente", amplamente implantados no Brasil, são fornos semiesféricos e apresentam rendimentos intermediários de carvão vegetal. De acordo com Gomes (2011) o carvoeiro controla o processo de acordo com a cor da fumaça emitida pelos orifícios do forno. Os fornos de Superfície JG, bem semelhantes aos de "rabo-quente", também se enquadram em rendimentos intermediários de carvão vegetal, porém apresentam uma taxa de enfornamento mais facilitada (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

Figura 6 - Fornos circulares de alvenaria para a carbonização vegetal



Fonte: MF Rural (2022)

Fornos retangulares de alvenaria (Figura 7) foram desenvolvidos por grandes empresas como Vallourec e Mannesmann Tubes do Brasil (V&M) como uma solução para a necessidade do aumento da produtividade da produção de carvão vegetal e possível recuperação de alcatrão

vegetal (REZENDE *et al.*, 2004). Sobre sua estrutura, são construídos de tijolos e estruturas metálicas, possuem alta capacidade e sistemas de carregamento e descarregamento mecanizados. Os gases oriundos da carbonização desses fornos podem ser reaproveitados como fonte de energia para dar ignição para novos ciclos de carbonização (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

Plantas de carbonização em fornos de alvenaria retangulares do modelo RAC 700, geralmente propriedades de grandes siderúrgicas, podem atingir capacidade de processamento de 250 toneladas de madeira em base seca (CGEE, 2015).

Figura 7 - Forno retangular de alvenaria para a carbonização vegetal.



Fonte: Autora (2023)

Sabe-se que a quantidade de emissões de fumaças (gases e vapores) na carbonização da madeira é diretamente associada ao rendimento em carvão vegetal produzido, ou seja, quanto menor o rendimento gravimétrico de carvão vegetal, maiores são as taxas de emissões. Como as taxas de rendimento gravimétrico desses fornos não são altas infere-se as emissões associadas são elevadas (CARNEIRO *et al.*, 2012).

De acordo com os estudos realizados pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) sobre as emissões de gases poluentes durante o processo de carbonização da madeira, em uma eficiência de 26%, usual entre os fornos de alvenaria, são emitidos 78 kg de gás metano por tonelada de carvão vegetal. Sendo 1 kg de metano equivalente a 28 kg de dióxido de carbono em termos de gases do efeito estufa, é possível estimar que na produção de 6,9 milhões de toneladas

de carvão vegetal foram emitidos 11,3 milhões de toneladas de CO_2 equivalentes por ano (MCTI, 2015).

As maiores desvantagens relacionadas ao uso dos fornos de alvenaria são as dificuldades de controle dos parâmetros de carbonização, que geralmente é por combustão parcial da matéria-prima a ser utilizada, ocorrendo uma perda de energia (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

3.2.2.2 Fornos-fornalha

O Projeto Siderurgia Sustentável, em desenvolvimento em Minas Gerais, coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em atendimento ao Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) tem por objetivo incentivar a produção de carvão vegetal com menores taxas de emissões de GEEs, diminuir o desmatamento de florestas nativas e aumentar a competitividade do setor siderúrgico brasileiro em uma economia de baixo carbono. O sistema que tem sido inicialmente implantado no estado de Minas Gerais e futuramente será por todo o Brasil, propõe a queima dos gases produzidos para geração de energia (UNDP, 2022). A implementação desse projeto é considerada uma estratégia para que o país atinja os objetivos de desenvolvimento sustentável, definidos pela COP-21 (FASIHI; EFIMOVA; BREYER, 2019).

A tecnologia chamada de fornos-fornalha (Figura 8) foi desenvolvida por pesquisadores da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e consiste em quatro fornos circulares de alvenaria ligados por dutos a uma única fornalha onde os gases gerados no processo de carbonização são queimados liberando energia, sob a forma de luz e calor, que têm potencial energético para serem reaproveitados no próprio processo. Com a queima completa dos gases gerados, as emissões seriam constituídas apenas de CO_2 e vapor de água, diminuindo expressamente as taxas de emissões de efluentes do processo. Porém, vale ressaltar que esse sistema não permite a recuperação dos coprodutos tão interessantes para outras destinações comerciais, devido à queima para a geração de energia (OLIVEIRA, 2012).

Figura 8 - Fornos - Fornalha para a carbonização vegetal.



Fonte: Projeto Siderurgia Sustentável (2022)

Podem ser citados como resultados já alcançados pelo Projeto Siderurgia Sustentável a redução média de emissões em cinco vezes mais que a meta esperada de 270 kg CO_2eq/t CV e um rendimento gravimétrico maior que 25% para pequenos, médios e grandes produtores de carvão vegetal (UNDP, 2022). Porém nem todas as unidades produtoras de carvão vegetal têm acesso facilitado a essa tecnologia, uma vez que devem ser construídos novos fornos no formato fornos-fornalha e a queima dos gases produzidos impede a recuperação de coprodutos com interesse comercial, como o alcatrão vegetal e o extrato pirolenhoso (GOMES *et al.*, 2020).

3.2.2.3 Fornos metálicos

Fornos metálicos utilizados na fabricação de carvão vegetal possuem elevada capacidade e espaço para sistemas mais robustos de recuperação de alcatrão vegetal e reaproveitamento dos gases para a realização do preparo da matéria-prima, com o processo de pré-secagem. Todos os fornos apresentam vantagens e desvantagens, porém a grande limitação associada ao uso de fornos metálicos inclui o elevado custo de implementação (MCTI, 2015). Porém, se avaliado a médios e longos prazos, seu uso pode trazer redução do custo operacional, aumento da lucratividade, economia de matéria-prima e redirecionamento de resíduos sólidos e gasosos (COLOMBO *et al*., 2006).

Fornos metálicos do tipo semicontínuos possuem aquecimento externo no momento da ignição. Esses são de grande porte e reutilizam os gases gerados na carbonização para o sistema

de secagem ou manutenção da temperatura no próprio forno, resultando em um carvão vegetal de ótima qualidade (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

Dentre os fornos metálicos com sistemas de reaproveitamento dos gases de emissões consolidados, podemos destacar os fornos *Drying*, *Pirolysis*, *Cooling* (DPC), Reichert-*Lurgi* (DEGUSSA) e *Sific-Lambiotte*. Nos fornos DPC (Figura 9), que possuem forma de torre vertical, os gases são queimados e reutilizados para aquecer e secar a madeira. Nos fornos DEGUSSA, operados de forma sincronizada, também há o aquecimento dos gases que são redirecionados para secagem de carga e circulação pelo sistema. Nos fornos Sific-Lambiotte, além do que ocorre nos fornos DEGUSSA, a energia elétrica gerada pela queima dos gases também pode atuar no resfriamento do carvão vegetal produzido (PINHEIRO, 2009).

Figura 9 - Forno metálico DPC



Fonte: Pinheiro (2009)

3.3 ECONOMIA CIRCULAR

A Economia Circular visa substituir o atual modelo da Economia Linear, que tem como característica a produção a partir do consumo oriundos de matéria-prima virgens, para obtenção de produtos com ciclo de vida curtos, que são comercializados, utilizados e descartados sob a forma de resíduos. Este modelo necessita de grandes quantidades de energia e recursos naturais para a subsistência, o que têm sido uma problemática em termos da sustentabilidade (CNI, 2014).

Para evitar a escassez dos recursos naturais, esperado com a continuidade da Economia Linear, é necessário o desenvolvimento de um sistema com baixo desperdício, com a valorização

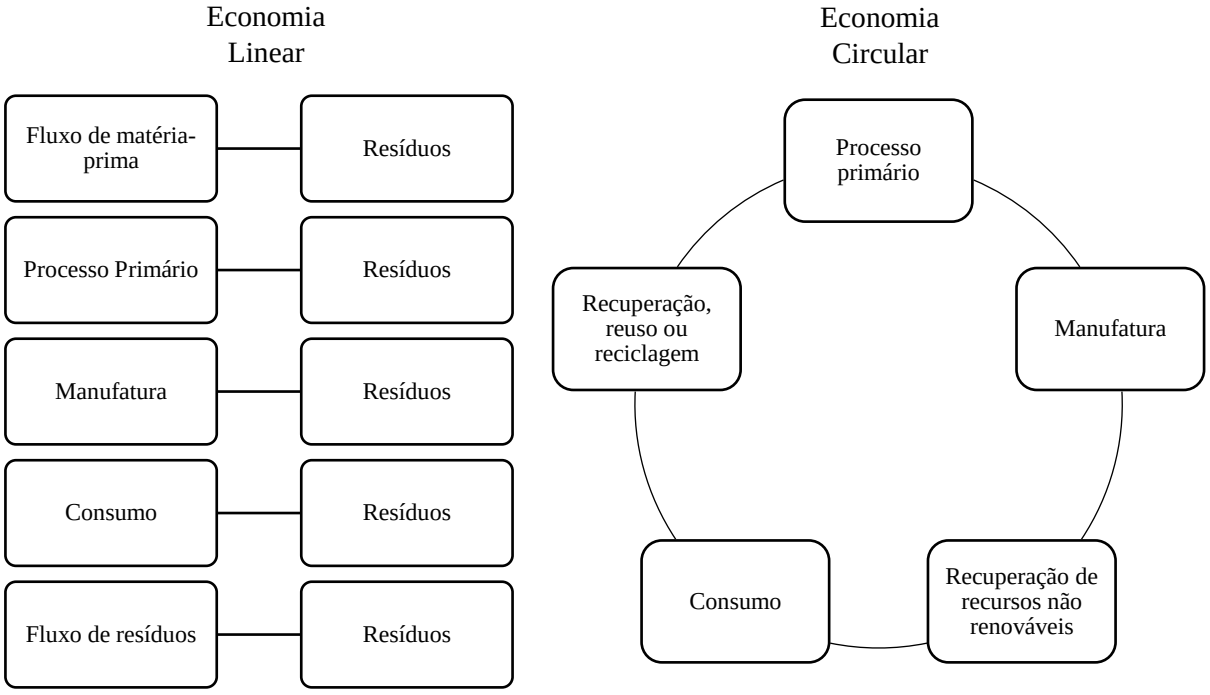
dos resíduos e com uma gestão de recuperação, reutilização, remanufatura e reciclagem de produtos no final da vida (NERY; FREIRE, 2017).

Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU foram estabelecidos em 2015 como um plano de ação global para acabar com a pobreza, proteger o planeta e garantir prosperidade às futuras gerações. Entre estes objetivos, a Economia Circular se torna relevante já que é fundamentada em princípios que buscam reduzir o desperdício e maximizar o valor dos recursos em processos produtivos. A Economia Circular está diretamente relacionada com vários dos 17 ODS da ONU, como:

- 9 - Indústria, inovação e infraestrutura: A Economia Circular pode estimular a inovação e a criação de novas tecnologias, produtos e serviços que reduzam o desperdício e maximizem o valor dos recursos.
- 11 - Cidades e comunidades sustentáveis: A Economia Circular pode contribuir para o desenvolvimento de cidades e comunidades sustentáveis, uma vez que a reutilização e reciclagem de materiais podem reduzir a demanda por aterros sanitários e reduzir a poluição do ar e da água.
- 12 - Consumo e produção responsáveis: A Economia Circular é fundamental para a promoção da produção e consumo responsáveis, uma vez que busca reduzir o desperdício de recursos naturais e maximizar o valor dos materiais, produtos e coprodutos.
- 13 - Ação contra a mudança global do clima: A Economia Circular pode contribuir para combater a mudança global do clima, uma vez que a redução do desperdício e a reciclagem de materiais impactam diretamente na redução das emissões de gases de efeito estufa.

A Economia Circular é um modelo econômico integrado por conceitos e aplicações na ecologia, na indústria, no ciclo de vida de produtos e processos, na economia e no aumento da eficiência. De forma geral, pode ser definida como a economia de energia e matéria utilizadas de forma recircular, diminuindo a geração de resíduos de diversas maneiras (Figura 10) (CNI, 2014).

Figura 10 - Conceito de economia circular



Fonte: Autora (2023) - (Adaptado de Barderi (2017))

O grande desafio é transformar processos lineares, como os de extração, produção e descarte, em fluxos circulares. Para isso é necessário reinventar a maneira de encarar processos e negócios. A implementação dos princípios da economia circular na Europa pode promover um PIB em 1,8 trilhões de euros até 2030. Dessa forma, o Brasil também ganha relevância, uma vez que possui características incomparáveis de bens de capitais naturais e um cenário social atraente para criação de oportunidades de negócio sustentável (NERY; FREIRE, 2017).

Os três princípios da economia circular, definidos pela Ellen MacArthur Foundation (2017), são:

A. Princípio 1

O Princípio 1 da Economia Circular consiste na gestão focada em preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis. Este princípio impulsiona o fluxo nos capitais naturais dentro do próprio sistema, garantindo as condições necessárias para a regeneração, substituição de materiais, virtualização e restauração.

A desmaterialização é a redução da inserção de novos produtos no ciclo econômico, diminuindo o uso de materiais físicos e aumentando o uso de materiais virtuais. Esta prática aplicada ao primeiro princípio do modelo circular aumenta o uso de bens e serviços.

B. Princípio 2

É baseado na otimização do rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais em uso no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico.

O ciclo biológico da Economia Circular abrange os fluxos de materiais renováveis que podem ser regenerados no meio ambiente dentro do mesmo ciclo, em que resíduos são considerados um nutriente em potencial para seu próprio consumidor, pelo fabricante, ou absorvidos em sua totalidade pelo meio ambiente e não causando impacto negativo.

O ciclo técnico da Economia Circular já é aplicável para materiais que não são facilmente biodegradáveis. Os tratamentos dos materiais técnicos, conforme a hierarquia da Economia Circular, são a manutenção, o reuso e redistribuição, a remanufatura e a reciclagem como soluções para aumentar o ciclo de vida do produto, de modo que materiais continuem circulando e contribuindo para agregar valor ao processo ou produto. Estes métodos de circularidade devem ser priorizados em ordem hierárquica em termos de matéria-prima, energia, e o quanto de tempo de vida do produto for maximizado.

É sintetizado no Quadro 3 a definição de cada um dos tratamentos do ciclo biológico e técnico do Princípio 2.

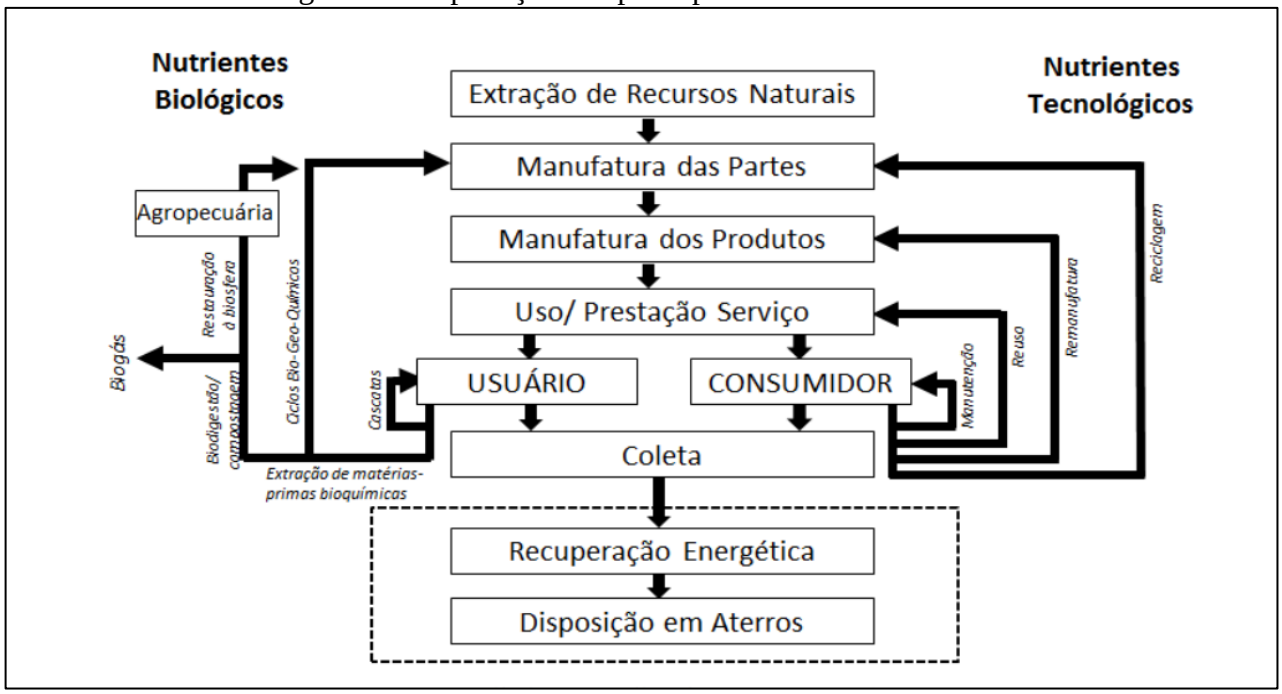
Quadro 3 - Síntese dos tratamentos do Princípio 2 da Economia Circular

Categorias	Tratamentos	Definição
Ciclo Biológico	Regeneração	Resíduo é considerado uma oportunidade de regeneração de nutrientes, absorvido pelo próprio meio como um benefício.
Ciclo Técnico	Manutenção	Deve ser priorizada como tratamento em fim de vida dos produtos pois não exige processos produtivos robustos e o produto é regenerado pelo próprio usuário.
	Reuso e Redistribuição	O produto é reutilizado com o mesmo fim que o produto original, mas há uma perda de valor associada pela necessidade de algum processo para tal, mesmo que não sejam processos robustos. A circularidade pode ocorrer entre usuários não próximos ou prestadores de serviços.
	Remanufatura	Exige a aplicação de um processo produtivo mais robusto em que o produto é renovado e seu ciclo de vida é ampliado.
	Reciclagem	É a última opção de tratamento para o fim de vida de produtos pois podem acarretar uma depreciação na composição dos materiais e exige um processo produtivo mais robusto.

Fonte: CNI (2014)

De acordo com o esquema representado na Figura 11, é possível observar de forma sistemática a aplicação do segundo princípio da economia circular em um ciclo técnico e um ciclo biológico.

Figura 11 – Aplicação dos princípios da economia circular



Fonte: Ribeiro; Kruglianskas (2015) *apud* Nery; Freire (2017)

C. Princípio 3

O Princípio 3 da Economia Circular visa estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio: Concentrando os esforços para diminuir os impactos negativos em todas as áreas, como alimentos, mobilidade, habitação, educação, saúde, uso da terra, ar e água e liberação de substâncias tóxicas. As externalidades negativas podem ser definidas como as consequências de atividades que não recaem sobre quem as estão exercendo, como as emissões atmosféricas oriundas de uma indústria que causam impacto na comunidade ao redor.

3.3.1 Aplicação do modelo de Economia Circular

Em um estudo sobre as aplicações dos modelos de negócio no Brasil, baseados na economia circular, as práticas mais comuns são: utilização de matérias-primas secundárias, o *ecodesign*, o ciclo reverso, a economia partilhada, a extensão de vida útil, o resíduo como recurso e recuperação energética. Tais práticas são válidas e respeitam os princípios da economia circular, porém representam apenas uma pequena parcela das possibilidades que esse sistema pode promover. Outras práticas muito interessantes, mas que precisam ser mais aplicadas e desenvolvidas são as tecnologias que aumentam a durabilidade de materiais visando o aumento do ciclo de vida; remanufatura feita pelos próprios fabricantes; vendas de refis ou partes sobressalentes de equipamentos para serem reutilizados; e modernização de equipamentos que resultem em menor consumo de recursos naturais e menor taxa de emissão de carbono (CNI, 2019).

De acordo com a Confederação Nacional das Indústrias (CNI), em seu relatório com o título “Economia Circular – Caminho estratégico para a indústria brasileira”, publicado em 2019, as barreiras para a aplicação dos princípios da economia circular em sistemas industriais podem ser:

- A ausência de políticas públicas – como o incentivo ao reaproveitamento de resíduos, regulações que impedem o uso de reciclados, a falta de critérios que considerem a sustentabilidade nos processos de compra;
- A baixa consciência ambiental dos cidadãos e empresários – sobre a separação correta de resíduos, na falta de profissionais qualificados em implementar as práticas da economia

circular em empresas, na carência de informação sobre as vantagens da aplicação da economia circular;

- A necessidade de desenvolvimento na pesquisa, no desenvolvimento e na inovação – na falha de criação de produtos voltados à circulação dos materiais, limitada parceria entre o setor industrial e centros acadêmicos, e ausência de métricas e indicadores para a avaliação da circularidade;
- A falta de financiamento de projetos – na falta de conhecimento sobre as modalidades de financiamento, na dificuldade de elaborar projetos dentro dos orçamentos, do custo de crédito pouco atrativo;
- O ambiente de negócio sustentável pouco explorado – na falta de triagem e reciclagem para suprir as matérias-primas, falta de simbiose industrial, na pouca cooperação entre empresas do mesmo setor, no alto apelo pelo consumismo e baixo incentivo de consumo de produtos reciclados, na falta de conhecimento de empreendimentos das oportunidades de negócios circulares.

Visando tornar mais prática a transição de processos lineares para processos circulares, a EMF (2015) identificou um conjunto de seis ações a serem implementadas por instituições, como resultado de pesquisas e estudos de casos com especialistas. As seis ações possuem origem na língua inglesa e são: regenerar (*regenerative*), compartilhar (*share*), otimizar (*optimise*), ciclar (*loop*), virtualizar (*virtualize*) e trocar (*exchange*), que juntas formam a estrutura RESOLVE. A estrutura RESOLVE pode ser exemplificada com as ações do Quadro 4.

Quadro 4 Estrutura RESOLVE

Ações	Exemplos
Regenerar	• Utilizar energia e materiais renováveis; • Recuperar, reter e restaurar ecossistemas; • Regenerar recursos biológicos ao meio ambiente.
Compartilhar	• Reutilizar produtos; • Aplicar os tratamentos de prolongação de vida útil para materiais técnicos; • Compartilhar materiais e ativos.
Otimizar	• Aumentar a eficiência de processos; • Diminuir a geração de resíduos; • Aumentar a automação em processos industriais.
Ciclar	• Aplicar os tratamentos de prolongação de vida útil para materiais técnicos; • Usar digestão anaeróbia para tratamentos de resíduos; • Extrair substâncias bioquímicas dos resíduos orgânicos.
Virtualizar	• Desmaterializar produtos
Trocar	• Substituir materiais não renováveis por mais avançados e duráveis; • Aplicar novas tecnologias e optar por produtos e serviços.

Fonte: EMF (2015)

Dessa forma, o que se espera para o desenvolvimento da economia circular no país é que a qualidade de vida conquistada pela sociedade, no que tange o uso dos recursos naturais, não cause um desequilíbrio ambiental e econômico, e a reformulação do modelo econômico adotado até então. Pelo incentivo na aplicação de diversas práticas, como: Aplicação da Estrutura RESOLVE em modelos de negócios, a Produção mais Limpa, a Simbiose Industrial, a Avaliação do Ciclo de Vida do produto, Economia da Funcionalidade, Biomimetismo, *Design for Environment*, entre outras que visem a aplicabilidade da sustentabilidade (CNI, 2019).

A fim de medir a circularidade de produtos e processos, é necessário o estabelecimento de indicadores de circularidade, que tornem as gestões ambientais, sociais e econômicas mais visíveis. A Economia Circular ainda não apresenta indicadores estabelecidos devido à elevada abrangência e formas de aplicação (LINDER; SARASINI; VAN LOON, 2017).

De acordo com Gen e Doberstein (2008), é possível avaliar as práticas sustentáveis com indicadores quantitativos nos âmbitos econômico, ambiental e social, bem como classificá-los de acordo com a respectiva abrangência. Os indicadores podem ser classificados quanto ao fluxo de

materiais, à eficiência dos materiais, ao ciclo de vida do produto e à redução do impacto ambiental. As abrangências podem ser divididas entre níveis de complexidade macro, meso e micro para cada um dos parâmetros dos indicadores quantitativos. Avaliar esses indicadores pode ajudar a identificar áreas que precisam de melhoria e monitorar o progresso em direção a uma economia mais circular e sustentável.

O indicador “Fluxo de materiais” mede a quantidade de materiais que entram e que saem de um sistema, incluindo matérias-primas, produtos e resíduos, visando sempre a redução do consumo de recursos naturais e a maximização do uso dos materiais existentes. O indicador “Eficiência dos materiais” mede o desempenho dos processos e materiais utilizados, com o objetivo de diminuir os resíduos e aumentar a reciclagem. O indicador “Ciclo de vida do produto” mede a extensão da vida útil do produto, desde a extração de matérias-primas até o descarte final, este indicador mostra a necessidade de redução de novos produtos. O indicador “Redução do impacto ambiental” mede as consequências de um sistema ou produto, incluindo energia, emissões de gases de efeito estufa e geração de resíduos como um todo (GEN; DOBERSTEIN; 2008).

O nível micro de abrangência inclui as práticas circulares relacionadas à organização, aos seus produtos ou aos processos e aos consumidores no âmbito ambiental e econômico, como o fluxo de materiais e ciclos de vida dos produtos. Nesse nível se enquadram a eficiência dos materiais, a minimização de resíduos, a utilização de materiais reciclados e a utilização de fontes renováveis (GEN; DOBERSTEIN; 2008).

No nível meso de complexidade, os indicadores são avaliados em nível de setor ou cadeia de suprimentos, consistindo em uma análise mais ampla dos fluxos e ciclos de vida dos materiais. Estão inclusas nesta análise, por exemplo, a eficiência de materiais e a utilização de materiais reciclados em toda a cadeia de suprimentos, bem como a colaboração interempresarial para reduzir o desperdício e aumentar a reciclagem (GEN; DOBERSTEIN; 2008).

O nível macro de complexidade abrange uma discussão regional ou nacional, avaliando aspectos econômicos do país, os impactos no uso dos recursos naturais e as políticas públicas relacionadas às práticas circulares (GEN; DOBERSTEIN; 2008).

3.3.1.1 Aplicação da Economia Circular na produção de carvão vegetal

A aplicação da Economia Circular no processo produtivo de carvão vegetal pode contribuir para a redução dos impactos ambientais deste setor e promover uma produção mais sustentável. Além dos ganhos ambientais, a adoção das práticas circulares pode trazer benefícios econômicos, como a redução de custos e a geração de novas oportunidades de negócios (BARDERI, 2017).

O uso de equipamentos auxiliares que podem ser acoplados a fornos já existentes é uma alternativa interessante para o desenvolvimento sustentável e economia circular dentro do setor siderúrgico, principalmente no Brasil, já que a produção de carvão é milenar e dificilmente muitos processos não serão substituídos por novas tecnologias. Esses equipamentos podem ser utilizados para o controle térmico das fases da carbonização; para a condensação de gases; para combustão de gases; e para o resfriamento dos fornos (SANTOS, 2017). Os primeiros recuperadores acoplados aos fornos de alvenaria no Brasil eram em termos gerais trocadores de calor, uma vez que acreditavam que o alcatrão vegetal ou os gases condensáveis estavam em forma de vapor. Após baixas eficiências de recuperação, testaram a hipótese de que a parte condensável, principalmente o alcatrão vegetal, era emitida na forma de partículas, como aerossol ou névoa. Foram então desenvolvidos aparelhos de impacto, torres de absorção ou pulverização, ciclones, exaustores e filtros e os resultados de recuperação foram mais satisfatórios (CETEC, 1982).

O grupo ACESITA, desde 1978, estudou a recuperação de coprodutos da carbonização em escala industrial e operacional. As concepções básicas do sistema preveem a montagem de equipamentos auxiliares com combinações de lavagem, ciclonagem, borbulhamento, recirculação de líquidos e trocadores de calor. Em 1982, o grupo implantou, no Vale do Rio Doce (MG), vinte equipamentos de coleta para seus 40 fornos. O alcatrão vegetal recuperado, cerca de 60 ton $mês^{-1}$, foi utilizado como combustível dentro da própria usina (CETEC, 1982). Contudo, tamanho investimento não chegou aos pátios siderúrgicos do país.

Gonçalves *et al*. (2010) estudou a captação de licor pirolenhoso da carbonização de *Eucalyptus cloeziana* com um tubo de zinco com 8 metros de comprimento acoplado em forno do tipo “rabo quente”. O tubo de zinco teve como principais funções o resfriamento da fumaça e posterior recuperação do líquido condensado. De acordo com o autor, o coletor apresentou eficiência esperada e contribuiu para a diminuição das emissões de poluentes para a atmosfera.

Também visando a recuperação dos gases condensáveis, Froehlich (2011) sugeriu a utilização de um tubo coletor de PVC acoplado em fornos chamados de Sistema *Brochier*, por pequenos produtores no Rio Grande do Sul. Os testes de eficiência de recuperação foram realizados em laboratórios e os resultados mostraram que o maior rendimento de licor pirolenhoso ocorreu na menor taxa de aquecimento empregada (2°C min^{-1}).

De acordo com Santos (2017), processos de produção de carvão vegetal que apresentam sistemas de recuperação de coprodutos presentes nos gases da carbonização ou aproveitamento da energia no processo representam um ganho ambiental na redução de gases do efeito estufa e eficiência do processo, uma vez que a energia oriunda da queima dos gases gerados poderá ser reaproveitada para a secagem prévia das toras ou na ignição de outros fornos, por exemplo.

A recuperação de coprodutos do processo de carbonização no setor siderúrgico representa uma alternativa para combater a mudança global do clima e impulsiona a inovação sustentável nos processos industriais, sendo esses dois dos treze objetivos do desenvolvimento sustentável listados pela ONU (CNI, 2014).

A BIO & IND – Biocarbo e Indústria e Tecnologias de Carbonização LTDA afirma que a recuperação dos coprodutos oriundos da carbonização, em escala industrial, é tanto viável como uma necessidade das siderúrgicas, pois aumenta a valoração do processo e reduz as emissões de gases poluentes. Além da recuperação, também mostra a importância do beneficiamento do licor pirolenhoso, para aumentar a qualidade do produto e obter diferentes formulações, conforme a necessidade dos clientes (REZENDE *et al*., 2004).

3.3.1.1.1 Princípios da recuperação de coprodutos na carbonização

As tecnologias para a melhoria do processo de carbonização no Brasil estão majoritariamente relacionadas ao material dos fornos, ou adaptações no processo produtivo. Na Europa, a implantação dos processos visando a economia circular na produção de carvão vegetal, como a recuperação contínua de coprodutos com interesse comercial, tem substituído as formas de produção convencionais (NERY; FREIRE, 2017).

Os processos físico-químicos de recuperação de alcatrão vegetal em fornos de alvenaria são, principalmente, a condensação, a coalescência e a separação de partículas, líquido-gás (ALMEIDA, 1982). De acordo com Leal (2015), existem quatro processos mais comuns para a

recuperação do alcatrão vegetal em fornos de alvenaria: por adsorção, por impacto e coalescência, por mistura mecânica e precipitação eletrostática.

A condensação dos voláteis pode ser realizada por torres de lavagem, onde a troca de calor é direta e parte da energia térmica dos compostos é transferida para o líquido pulverizado, que é misturado com a névoa de alcatrão vegetal resfriando e favorecendo a condensação destes. Esse processo aumenta a massa e o diâmetro das partículas, uma fase importante para as etapas seguintes (CETEC, 1982). De acordo com Brito (2012), a condensação é o processo de recuperação de alcatrão vegetal mais antigo, porém não é o mais utilizado, porque os produtores não consideram que existe uma clareza quanto ao estabelecimento de processos que realmente sejam econômicos e viáveis.

A coalescência, junção ou aderência de compostos que estavam anteriormente separados, das partículas de alcatrão vegetal contidas nos voláteis pode ser favorecida pelo aumento da velocidade do fluxo com impactos em anteparos. Esse processo também aumenta a massa e o diâmetro das partículas (CETEC, 1982).

A separação físico-química de partículas líquido-gás é realizada pela força centrífuga em ciclones. O exaustor utilizado após o ciclone tem como função aglomerar partículas que não foram coletadas pelo ciclone devido ao seu baixo diâmetro (ALMEIDA, 1982). Como a eficiência dos ciclones não é de 100%, é necessário o uso de filtros para controle das emissões de particulados após o exaustor. Os gases condensáveis que se liquefazem podem ser coletados na parte inferior do lavador e ou ciclone, enquanto os gases não condensáveis, devido à baixa volatilidade, podem ser coletados na parte superior do equipamento. O licor pirolenhoso coletado é armazenado em tanques bio-óleo. Parte do bio-óleo é circulado no sistema como líquido de resfriamento e emulsificador (LEAL, 2015).

A produção de alcatrão vegetal e extrato pirolenhoso realizada na BIO & IND – Biocarbo e Indústria e Tecnologias de Carbonização LTDA se dá por meio da recuperação por um equipamento com um sistema de lavador de gases para a condensação e recuperação por separação físico-química de partículas líquido-gás em ciclone (BIOCARBO, 2022).

A avaliação das emissões atmosféricas na produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria acoplados a um recuperador de fumaça é um passo importante para o desenvolvimento

de produção de carvão vegetal, uma vez que permitirá grandes avanços na diminuição das emissões atmosféricas, representando um ganho ambiental, bem como no reaproveitamento de resíduos, representando um ganho econômico.

4 METODOLOGIA

4.1 EMPRESAS PARCEIRAS

O presente trabalho foi desenvolvido em parceria com as empresas BIO & IND – Biocarbo e Indústria e Tecnologias de Carbonização LTDA, voltada em desenvolver soluções sustentáveis para indústrias carboquímicas e Ecoamb Pesquisas Ambientais LTDA, que fornece monitoramentos atmosféricos em fontes estacionárias, qualidade do ar e nível de pressão sonora.

A empresa BIO & IND – Biocarbo e Indústria e Tecnologias de Carbonização LTDA é especializada no desenvolvimento de soluções para a produção de alcatrão vegetal e extrato pirolenhoso de alta qualidade extraídos em Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC). Iniciou suas operações em 1994 e desde então tem trabalhado na inserção da sustentabilidade na indústria carboquímica vegetal no Brasil. Com o *slogan* "Transformamos fumaça em valor", a empresa possui tecnologia própria para a recuperação de licores pirolenhosos em fornos retangulares de alvenaria. Interessados no desenvolvimento sustentável de seus produtos, permitiram que o presente estudo fosse realizado sua filial e no equipamento de propriedade intelectual.

A instituição afirma que a recuperação de fumaça traz ganhos financeiros, com o aumento do rendimento gravimétrico, a comercialização do alcatrão vegetal e extrato pirolenhoso e a oportunidade de entrada no mercado de carbono, bem como ganhos ambientais com a redução da emissão de gases do efeito estufa, economia de energia e ausência de fumaça no ambiente de trabalho (BIOCARBO, 2022).

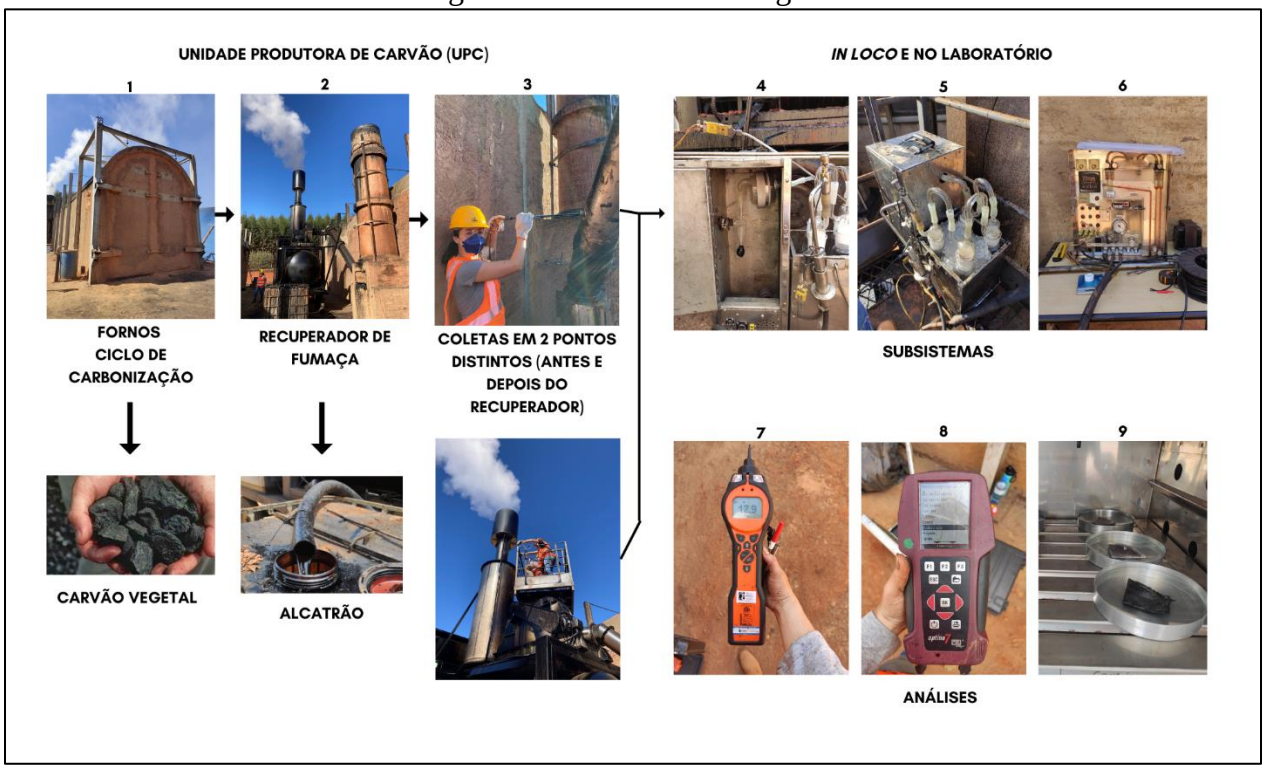
A Ecoamb Pesquisas Ambientais LTDA é uma empresa que oferece apoio à gestão ambiental para indústrias por meio de monitoramentos atmosféricos em diversas fontes poluentes. Por defender a responsabilidade ecológica nas indústrias, contribuíram com o empréstimo dos equipamentos e aparatos necessários para o trabalho de campo desenvolvido neste projeto.

4.2 FLUXO METODOLÓGICO

De forma esquemática e resumida podemos definir o fluxo metodológico de acordo com a Figura 12. Detalhes da metodologia serão explicados nos subtópicos seguintes. O objeto de estudo foi o sistema forno (1) - recuperador (2) localizado em uma Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC), onde são obtidos o carvão vegetal como produto principal e o alcatrão vegetal e extrato pirolenhoso como produtos secundários. As amostragens foram realizadas em dois pontos

distintos, na entrada (3) e na saída (4) do recuperador. As amostras foram coletadas conforme as normas aplicáveis e o fluxo de gases foi submetido a subsistemas de controle e medições (4, 5 e 6). A umidade foi determinada pelos métodos aproximado e de fluxo saturado no subsistema 5. As análises de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) (7), composição gasosa (O_2, CO_2, CO, N_2) e óxidos de nitrogênio (NOx) (8) foram realizadas por analisadores *online* na saída do gasômetro do Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA) (6). Além disso, no CIPA foi possível realizar as medições de vazão e velocidade dos gases. O material particulado coletado no subsistema 4 foi levado para o laboratório e o teor de massa obtido por método gravimétrico (9).

Figura 12 - Fluxo metodológico



Fonte: Autora (2023)

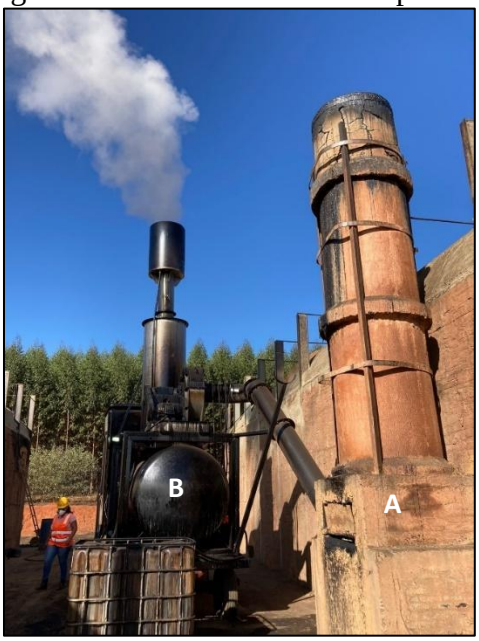
4.3 OBJETO DE ESTUDO

O estudo de caso foi realizado na cidade Morada Nova de Minas (MG), onde está localizada uma UPC com fornos retangulares de alvenaria e a instalação de um recuperador de gases oriundos da carbonização da madeira em escala industrial. O objeto de estudo consiste em um sistema forno-recuperador (Figura 13).

O forno em questão apresenta uma configuração retangular em alvenaria (A) e com capacidade para processamento de até 30 toneladas de madeira. O processo de carbonização vegetal foi realizado em batelada e tem duração média de 4 dias ou 90 horas. O Apêndice A apresenta o controle de temperatura de um forno durante um ciclo de carbonização completo, disponibilizado pelos operadores, e utilizado como referência para esse estudo de caso. O controle de temperatura foi realizado por meio de um termômetro digital de infravermelho do modelo MT350A e da marca Minipa.

O recuperador de fumaça (B) em escala industrial, desenvolvido pela empresa BIO & IND – Biocarbo e Indústria e Tecnologias de Carbonização LTDA, se baseia na condensação controlada da névoa de gás oriunda da carbonização e está conectado ao forno por um duto de aço que operou com rotação do motor do exaustor com a potência máxima (1700 rpm) na maior parte do tempo de carbonização. O ciclo total da carbonização avaliada foi de 90 horas, porém o recuperador de fumaça somente foi iniciado no início da 40º hora, devido às orientações de segurança que visam evitar incêndios oriundos das faíscas presentes no início do processo de degradação térmica da madeira. Como o recuperador permaneceu em funcionamento até o final do processamento (90 horas), foram avaliadas 50 horas do sistema forno-recuperador.

Figura 13 - Sistema Forno-Recuperador



Legenda: A- Forno de alvenaria; B- Recuperador de Fumaça;
Fonte: Autora (2023)

4.4 AMOSTRAGEM

4.4.1 Determinação dos pontos de amostragem

De acordo com a orientação da CETESB L.9221 (Dutos e chaminés de fontes estacionárias-determinação dos pontos de amostragem) é necessário que os dutos ou chaminés tenham no mínimo um comprimento igual ao dobro do diâmetro até o ponto de coleta, no trecho reto compreendido entre duas singularidades consecutivas. Além disso, o ponto amostral deve ser no mínimo 2 diâmetros à jusante e 0,5 diâmetros à montante. O diâmetro do duto e da chaminé no sistema de estudo possui 30 cm, dessa forma o ponto de amostragem deveria ser a 60 cm de altura do duto ou chaminé, porém, devido à dificuldade no processo de adequação do equipamento para as coletas, as condições dos pontos amostrais nesse estudo não atenderam às condições mínimas de medidas, sendo o ponto de entrada (E) localizado em 40 cm de comprimento do total de 230 cm do duto, enquanto o ponto de saída (S) a 50 cm de comprimento do total de 100 cm (Figura 14).

Figura 14 - Pontos amostrais de entrada e de saída



Fonte: Autora (2023)

Conforme o *Conditional Test Method* 30 (CTM-30) da EPA são requeridas coletas, de, no mínimo, três amostras localizadas nas posições 16%, 50% e 83% do valor do diâmetro, para diminuir o erro de variações de concentrações dentro do duto ou chaminé, vale ressaltar que os comprimentos dos flanges dos furos foram desconsiderados. Dessa forma, todas as coletas

seguiram o padrão recomendado, além de ser realizada em triplicata, sendo coletadas durante um mesmo intervalo de tempo para cada um desses pontos internos.

4.4.2 Plano de amostragem

O plano de amostragem foi elaborado levando em consideração a logística, a disponibilidade de operação e o tempo de coleta. O início da carbonização de cerca de 30 toneladas de lenha de *Eucalyptus sp*. (Clone AEC 1528) com aproximadamente 30% de umidade foi iniciado no dia 13/08/2022, enquanto a operação do recuperador só foi iniciada apenas no dia 15/08/2022. As amostragens foram realizadas após o início de operação do recuperador e totalizaram 14 amostras, sendo 7 na entrada (E) e 7 na saída (S), realizadas em três dias, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Plano de Amostragem

Data	Coleta	Ponto	Parâmetros
15/08/2022	I	(E)	Vazão, velocidade do gás e umidade do gás, MP, COVs, CO, CO_2, O_2, N_2 e NOx
		(S)	
	II	(E)	COVs, CO, CO_2, O_2, N_2 e NOx
		(S)	
16/08/2022	III	(E)	Vazão, velocidade do gás e umidade do gás, MP, COVs, CO, CO_2, O_2, N_2 e NOx
		(S)	
	IV	(E)	COVs, CO, CO_2, O_2, N_2 e NOx
		(S)	
	V	(E)	COVs, CO, CO_2, O_2, N_2 e NOx
		(S)	
17/08/2022	VI	(E)	Vazão, velocidade do gás e umidade do gás, MP, COVs, CO, CO_2, O_2, N_2 e NOx
		(S)	
	VII	(E)	COVs, CO, CO_2, O_2, N_2 e NOx
		(S)	

Fonte: Autora (2023)

As três amostras que envolveram as coletas de material particulado (I, III e VI), uma por dia, tiveram duração de aproximadamente 1h, enquanto as demais foram realizadas a partir de um analisador direto e *online*, possuindo tempo de resposta rápida (aproximadamente 1 min).

4.4.3 Subsistemas de medição

Os subsistemas de medição e seus componentes foram:

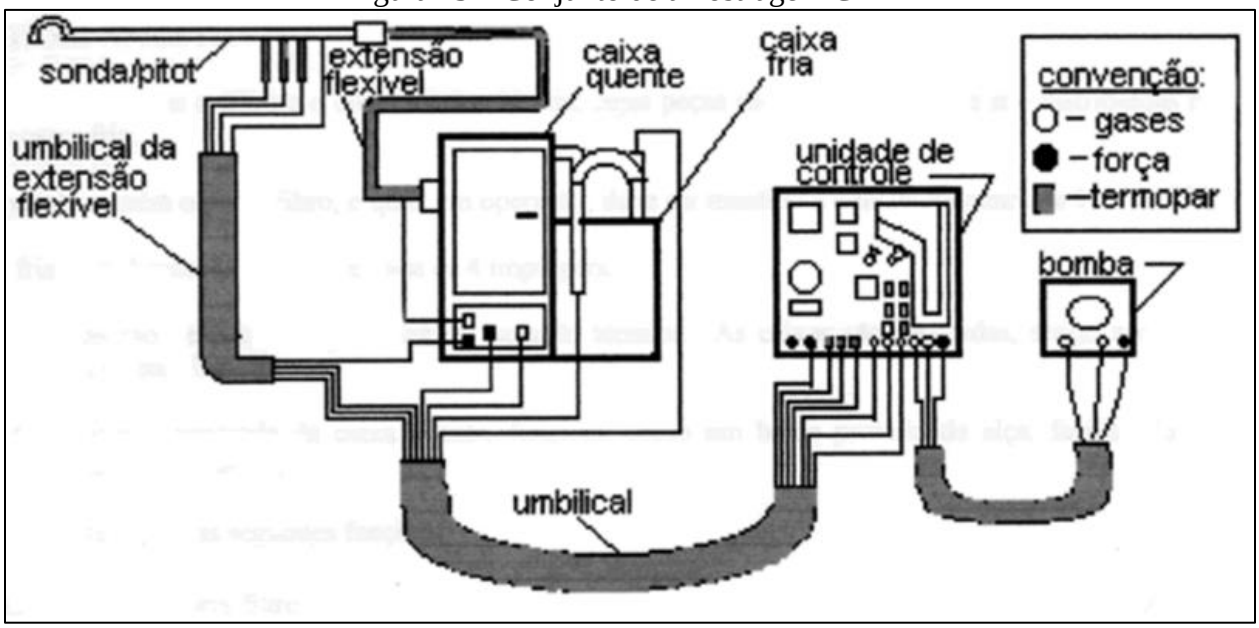
a. Coleta: sonda; tubo de *Pitot*; termopar; conjunto de boquilhas, extensão flexível e cordão umbilical.

b. Amostra: caixa quente; caixa fria; filtro e porta-filtro; ciclone, *impingers* (borbulhadores) e juntas de silicone.

c. Controle: caixa de controle; caixa da bomba; cordão de ligação entre a caixa de controle e a caixa da bomba.

Esses itens juntos formaram o conjunto de amostragem no Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA) para coleta de material particulado, umidade, vazão e velocidade dos gases, COVs, NOx e composição gasosa em dutos e chaminés (Figura 15).

Figura 15 – Conjunto de amostragem CIPA



Fonte: Energética (2013)

O CIPA é usado para amostragem isocinética, que significa que é realizada em condições tais que o fluxo de gás na entrada do equipamento de amostragem tenha a mesma velocidade que o fluxo de gás que pretende analisar. Devido ao tamanho do furo dos pontos amostrais não foi possível realizar a análise isocineticamente, sendo medidas a velocidade e a vazão dos gases nos três pontos internos antes da coleta de material particulado e consideradas para o período de amostragem nos mesmos três pontos definidos *a priori*.

De forma geral, para a amostragem, introduziu-se o tubo de *Pitot* no orifício da chaminé e mediram-se os parâmetros de vazão e velocidade nos 3 pontos internos do duto ou chaminé, com a bomba de vácuo ligada. Após a medição, introduziu-se a sonda no orifício, para coleta de MP, perpendicular ao fluxo do gás, por 20 minutos em cada ponto interno do duto ou chaminé. Enquanto o CIPA está em operação, o porta-filtro e a sonda são aquecidos e mantidos a aproximadamente 120 ºC no que chamamos de caixa quente. É na caixa quente que a sonda é conectada com a boquilha, no ciclone e no porta-filtro. No ciclone, são coletadas as partículas maiores, enquanto no porta-filtro, são coletadas as partículas menores. Do filtro, os gases passam para a caixa fria com os *impingers* (borbulhadores). Os dois primeiros resfriam o fluxo de gás e removem os gases condensáveis e materiais gasosos solúveis em água. Os últimos dois *impingers* removem a umidade presente nos gases amostrados, sendo possível calcular a umidade do gás. Em seguida, o fluxo é transferido para a caixa de controle através do cordão umbilical, que primeiramente passam pela bomba a vácuo e em seguida pelo gasômetro. Após o gasômetro, os gases são descarregados na atmosfera, e nesse ponto foram realizadas as amostragens para os analisadores *online*, para a análise de COVs, NOx e composição gasosa. As amostragens com os analisadores portáteis foram realizadas após a saída do CIPA para evitar que o equipamento atingisse a taxa *range*, ou o limite de detecção ao ser utilizado diretamente no duto ou chaminé, esta condição de amostragem foi aplicada para todas as coletas.

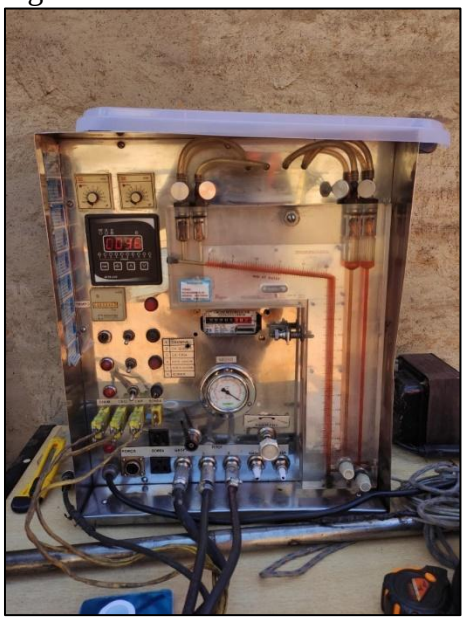
4.4.4 Determinação da umidade, velocidade e vazão dos gases

Para a determinação da velocidade e vazão dos gases, bem como a coleta deles, foram utilizados os subsistemas de coleta (a), amostra (b) e controle (c). Não foi detectado fluxo ciclônico no duto ou chaminé, nem vazamentos, o que impediria a amostragem por esse método de acordo com a CETESB L.9222 (Dutos e chaminés de fontes estacionárias- determinação da velocidade e vazão dos gases). Por estar localizada antes de um exaustor, a pressão estática no interior do duto no ponto de entrada (E) foi negativa, enquanto na saída (S) a pressão estática foi positiva. A pressão atmosférica foi de 717 hPa.

O tubo de *Pitot* e o termopar foram conectados ao manômetro de coluna, ao medidor de pressão artificial e ao termômetro da caixa de controle do CIPA nas conexões indicadas pelo equipamento (Figura 16). Após as conexões, foi possível determinar as temperaturas e as pressões estática e cinética nos três pontos internos da chaminé e do duto. A pressão cinética foi determinada

no manômetro com as duas conexões fixadas, enquanto a pressão estática foi determinada retirando apenas a conexão da saída A.

Figura 16 – Caixa de controle CIPA



Fonte: Autora (2023)

A velocidade média do gás (v) nas condições do duto e da chaminé e a vazão volumétrica média do gás seco (QNBS) na condição normal, utilizando as seguintes Equações (8 e 9). A nomenclatura dos símbolos e unidades utilizadas nas fórmulas estão no Quadro 5.

$$v = K_1 Cp(\sqrt{\Delta P})m\sqrt{\frac{T}{PMMu}} \qquad \text{Equação 8}$$

$$Q_{NBS} = \frac{3600\ (1-Bag)\ vATnP}{TPn} \qquad \text{Equação 9}$$

As umidades dos gases nos pontos de coleta foram determinadas a partir das orientações da norma técnica da CETESB L9.224 (Dutos e chaminés estacionárias- determinação da umidade dos efluentes). As variantes utilizadas foram os métodos aproximado e do fluxo saturado. Os subsistemas relacionados com esta análise são os de coleta, amostra e controle. Na caixa fria (C'), utilizada na determinação de umidade pelo método aproximado, foram colocados 100 mL de água destilada em 2 *impingers* (borbulhadores), cerca de 200 g de sílica no quarto *impinger* e o terceiro foi deixado vazio de forma que o gás passou pelo sistema na ordem apresentada (Figura 17). Com o sistema montado, a determinação de umidade foi realizada por aproximadamente 1 hora a uma

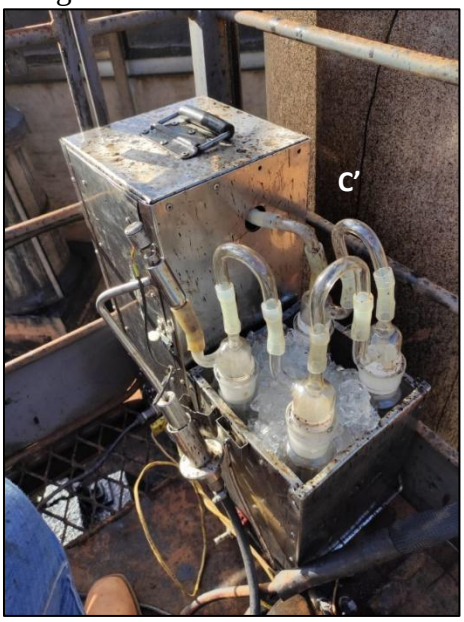
vazão de 21 L min^{-1}, por meio de uma bomba do gasômetro. A caixa fria foi mantida abaixo de 20 ºC por meio da adição de gelo para impedir perda de umidade. Mediu-se a massa dos borbulhadores antes e após a coleta, obtendo-se gravimetricamente a parcela condensável e não condensável da amostragem. Os resultados foram obtidos a partir das Equações (10, 11 e 12). A nomenclatura dos símbolos e unidades utilizadas nas equações estão no Quadro 5.

$$Vag\ cn = 0{,}001244\ (Mf - Mi)$$ Equação 10

$$Vg\ cn = \frac{0{,}00269\ Y\ Vg\ Pg}{Tg}$$ Equação 11

$$Bag = \frac{Vag\ cn}{Vag\ cn + Vg\ cn}$$ Equação 12

Figura 17 – Caixa fria do CIPA



Fonte: Autora (2023)

No momento da amostragem percebeu-se que havia presença de gotículas devido à presença do lavador de gases no sistema, e por isso realizou-se o cálculo de umidade pelo método do fluxo saturado de forma comparativa. Nesse método, determina-se a temperatura média dos gases no duto ou chaminé e a pressão absoluta (pressão barométrica + pressão estática). A partir dessas informações, e do uso das pressões de vapor de saturação da água (PVS), indicada na norma técnica, foi possível calcular o teor de umidade conforme a Equação 13. A nomenclatura dos símbolos e unidades utilizada na fórmula estão apresentados no Quadro 5.

$$Bag\ fs = \frac{PVS}{Patm + Pe}$$ Equação 13

4.4.5 Amostragem da composição gasosa

De acordo com o *Conditional Test Method* (CTM-30) da EPA é possível determinar os teores de óxidos de Nitrogênio (NOx), Oxigênio (O_2), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO_2) e Nitrogênio (N_2) no fluxo gasoso em dutos e chaminés de fontes estacionárias através de analisador de gases portátil e *online*, como o Optima 7. Antes da utilização do analisador, foram realizados testes de calibração com gases de referência e verificação de estabilidade das células eletroquímicas em um ambiente livre de contaminação dos gases poluentes analisados.

Os gases de calibração para o analisador foram de CO em nitrogênio e O_2, NO em nitrogênio, NO_2 no ar ou nitrogênio e O_2 no nitrogênio. As concentrações dos gases foram: Monóxido de Carbono (CO): 1000 ppm; Óxido de Nitrogênio (NO): 500 ppm; Oxigênio (O_2): 10%.

A sonda do equipamento foi utilizada na saída do gás no gasômetro em todas as análises nos pontos de entrada e saída do recuperador, para evitar a queima das células eletroquímicas à exposição de elevadas concentrações e elevada umidade dentro do duto e da chaminé. Além disso, vale ressaltar que foram realizadas medições em triplicatas em cada coleta. A resposta do equipamento foi rápida e os resultados apresentados no *display* foram anotados.

4.4.6 Amostragem dos compostos orgânicos voláteis

Para determinação da concentração orgânica gasosa total de vapores, tomou-se por base o *Method* 25ª da EPA. Foi utilizado o equipamento *Photoionisation Detector* (PID) no ponto amostral localizado na saída do gasômetro do CIPA e os resultados foram obtidos em termos de carbono (ppm). Antes da leitura, o equipamento foi verificado com gás de referência, isobutileno de 100 ppm, e zerado em ambiente neutro. O equipamento foi introduzido na saída do gasômetro para evitar a queima das células eletroquímicas à exposição de elevadas concentrações e elevada umidade dos gases dentro do duto e da chaminé. As leituras apresentaram tempo de resposta de 2 minutos e foram realizadas leituras para os três pontos internos do diâmetro da chaminé e do duto.

4.4.7 Amostragem do material particulado

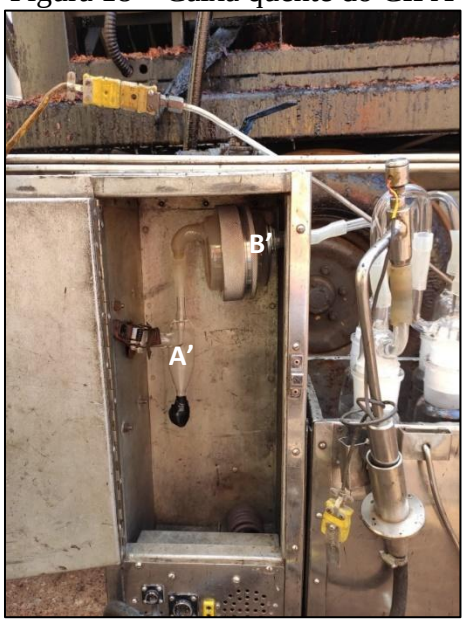
Para a coleta de material particulado (MP) foi utilizado como métodos de referência a norma técnica CETESB L9.217 (Dutos e chaminés de fontes estacionárias- Determinação de

material particulado com o sistema filtrante no interior do dito ou chaminé). Nesse método, o material particulado foi coletado em 3 pontos internos ao diâmetro do duto e da chaminé, respeitando as porcentagens determinadas pela CTM-30, por 20 minutos cada, totalizando uma amostragem de 1h. Foi determinado o volume de gás amostrado pelo uso do gasômetro do CIPA. A massa do material particulado foi determinada gravimetricamente. Foram utilizados todos os subsistemas do CIPA para a coleta de MP.

Antes de iniciar as amostragens foram realizados testes de vazamento no equipamento e no tubo *Pitot* e na ausência desses, os procedimentos foram continuados.

Para a coleta, foram utilizados filtros de fibra de vidro com pelo menos 99,95% de eficiência para retenção de partículas de até 0,3 μm, garantido pelo fabricante. Os filtros foram pesados antes de serem utilizados. O fluxo de gás foi coletado de forma que as análises de umidade, vazão e velocidade foram realizadas no mesmo período que a coleta de MP. Na caixa quente (Figura 18), foram colocados um ciclone (A'), acoplado na boquilha da sonda, e um porta-filtro (B'), para a coleta do material particulado. O filtro foi posicionado no porta filtro acoplado na caixa quente e ligado a todo o sistema, enquanto os borbulhadores foram mantidos no gelo. No início e ao final da coleta registrou-se a leitura do gasômetro e zerou os manômetros.

Figura 18 – Caixa quente do CIPA



Fonte: Autora (2023)

Após o tempo de coleta, o material particulado depositado no interior da boquilha, sonda e porta-filtro foi recuperado com uma solução de acetona e armazenado em potes plásticos transparentes e identificados. O filtro foi recolhido, identificado e armazenado em sacos plásticos transparentes.

Os filtros foram transferidos para uma placa de Petri e mantidos por 5 h na estufa a 150 ºC, sendo a verificação da massa realizada após 2 horas de dessecação (Figura 19). As amostras líquidas, recuperadas da sonda, do interior da boquilha e do porta-filtro, foram transferidas para béqueres, previamente tarados, foram mantidos em chapa aquecedora por 24h, até a completa evaporação e obtenção da massa seca (Figura 20). A metodologia utilizada para a análise foi a de gravimetria, e as massas após a secagem foram anotadas. Os cálculos foram realizados a partir das Equações (14 a 24). A nomenclatura dos símbolos e unidades utilizadas nas fórmulas estão apresentados no Quadro 5.

$$P = Patm + Pe$$ Equação 14

$$Pg = Patm + \frac{\Delta H}{13{,}6}$$ Equação 15

$$Vag = \frac{0{,}00346\ T\ Mag}{P}$$ Equação 16

$$V = \frac{Y\ Vg\ T\ Pg}{P\ Tg}$$ Equação 17

$$Vg = Vgf - Vgi$$ Equação 18

$$Bag = \frac{Vag}{Vag+V}$$ Equação 19

$$Vag = \frac{Bag\ V}{1-Bag}$$ Equação 20

$$I' = \frac{\left(0{,}0477\ Y\ V'gPg\right)}{Cpe'\ Ab\ T'g(1-Bag)(\sqrt{\Delta P})'\sqrt{\frac{P}{T'MMu}}}$$ Equação 21

$$I = \frac{1{,}677\ (V+Vag)}{ve\ Ab}$$ Equação 22

$$C = \frac{Mmp}{Vgn}$$ Equação 23

$$Te = 10^{-6}\ C\ Q_{NBS}$$ Equação 24

Figura 19 – Análise de Material Particulado- Filtros



Fonte: Autora (2023)

Figura 20 – Análise de Material Particulado- Béqueres



Fonte: Autora (2023)

Quadro 5 – Nomenclatura das fórmulas para cálculo dos resultados

Símbolo	Significado	Unidades de medida
A	Área da seção de amostragem da chaminé ou duto	m^3
Ab	Área da boquilha	m^2
Ac	Área da chaminé	m^2
Bag	Umidade dos gases	%
$B'ag$	Umidade dos gases para o ponto de coleta e intervalo de tempo	%
C	Concentração de material particulado nas condições normais, base seca	mg Nm^{-3}
Cp	Coeficiente do tubo de *Pitot*	Adimensional
ΔH	Média aritmética das pressões diferenciais do orifício	mm H_2O
I	Isocinética	%
I'	Isocinética no ponto de coleta no intervalo de tempo	%
K_1	Fator de conversão, no Sistema Internacional	$K_1 = 128{,}96 \left(\frac{m}{s}\right) [\frac{\frac{g}{gmol}}{K}]^{0,5}$
Mmp	Massa total de material particulado coletado	mg
MMu	Massa molecular do gás, base úmida	g $g\ mol^{-1}$
MMs	Massa molecular do gás, base seca	g $g\ mol^{-1}$
Mag	Massa total de água coletada nos borbulhadores	g
$(\sqrt{\Delta P})m$	Média das raízes quadradas da pressão cinética dos gases	Pa
$\sqrt{\Delta P}'$	Raiz quadrada de ΔP no ponto de coleta	mm $H_2O^{0,5}$
ΔP	Pressão de velocidade dos gases na chaminé	mm H_2O
P	Pressão absoluta do gás	Pa
Pe	Pressão estática do gás na chaminé ou duto	Pa
Pg	Pressão absoluta do gasômetro	mm Hg
Pn	Pressão absoluta na condição normal	101325 Pa
Q_{NBS}	Vazão volumétrica média do gás seco, na condição normal	$Nm^3\ h^{-1}$
Q	Vazão do efluente nas condições da chaminé ou duto	$m^3\ h^{-1}$
v	Velocidade média do gás	m s^{-1}

Fonte: Autora (2023)

Quadro 5 – Nomenclatura das fórmulas para cálculo dos resultados
(Continuação)

Símbolo	Significado	Unidades de medida
V	Volume do gás medido no gasômetro nas condições da chaminé ou duto	m^3
Vag	Volume de água nas condições da chaminé ou duto	m^3
Vg	Volume do gás medido no gasômetro nas condições de ensaio	m^3
$V'g$	Volume do gás seco coletado no ponto, no intervalo de tempo, medido no gasômetro	m^3
Vgf	Leitura final no gasômetro	m^3
Vgi	Leitura inicial no gasômetro	m^3
Vgn	Volume de gás medido nas condições normais, base seca	Nm^3
T	Temperatura absoluta média do gás na chaminé ou duto	K
T'	Temperatura absoluta do gás no ponto de coleta na chaminé ou duto	K
Te	Taxa de emissão de material particulado	$kg\ h^{-1}$
Tg	Média das temperaturas médias do gás na entrada e saída do gasômetro	K
Tn	Temperatura absoluta na condição normal	273 K
$T'g$	Média das temperaturas médias do gás na entrada e saída do gasômetro no ponto de coleta	K
Y	Fator de calibração do gasômetro	Adimensional
18	Massa molecular da água	$g\ g\ mol^{-1}$
3600	Fator de conversão	$s\ h^{-1}$

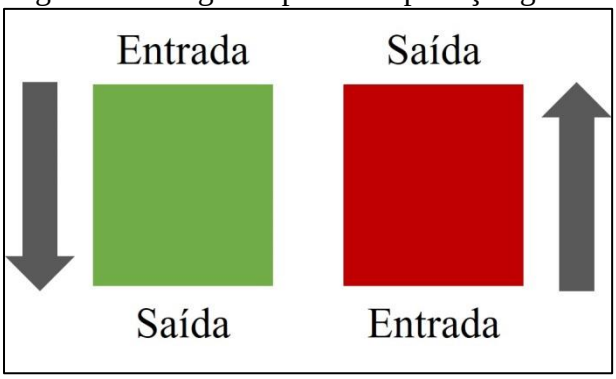
Fonte: Autora (2023)

4.4.8 Análise gráfica das amostragens

Os resultados das amostras foram avaliados em gráficos que ilustram as flutuações das concentrações encontradas, com relação ao tempo e registros das temperaturas das quatro superfícies do forno durante as coletas. O modelo de gráfico utilizado é amplamente aplicado para ilustrar flutuações de ações financeiras, com valores de abertura, alta, baixa e fechamento no decorrer do tempo. Para adaptar este modelo à realidade da amostragem realizada neste trabalho, foi necessário igualar os valores de abertura e alta, bem como os valores de baixa e fechamento, por causa dos valores únicos médios de cada coleta.

Neste gráfico também é possível visualizar as coletas cujo uso do recuperador de fumaça se apresentou eficiente ou ineficiente, representados pelas cores verde e vermelha, respectivamente. Quando os valores de entrada se apresentam maiores que os de saída, os resultados das concentrações devem ser lidos de cima para baixo. De forma contrária, quando os valores de saída se apresentam maiores que os valores de entrada, devem ser lidos de baixo para cima, de acordo com a Figura 21.

Figura 21 – Legenda para interpretação gráfica



Fonte: Autora (2023)

4.5 INDICADORES CIRCULARES

Para avaliar as ações de sustentabilidade, tanto as já realizadas como as em potenciais de aplicação, que estão relacionadas a Economia Circular, foi realizada uma visita técnica na UPC com o sistema forno-recuperador. Com as informações coletadas na visita, foi possível preencher um formulário, elaborado nos conceitos da Fundação Ellen MacArthur (2015) e nos indicadores quantitativos abordados por Gen e Doberstein (2018), para o levantamento das práticas circulares e para o enquadramento de acordo com a Estrutura RESOLVE. Também foi realizada a classificação das abrangências de complexidade de cada prática sustentável levantada.

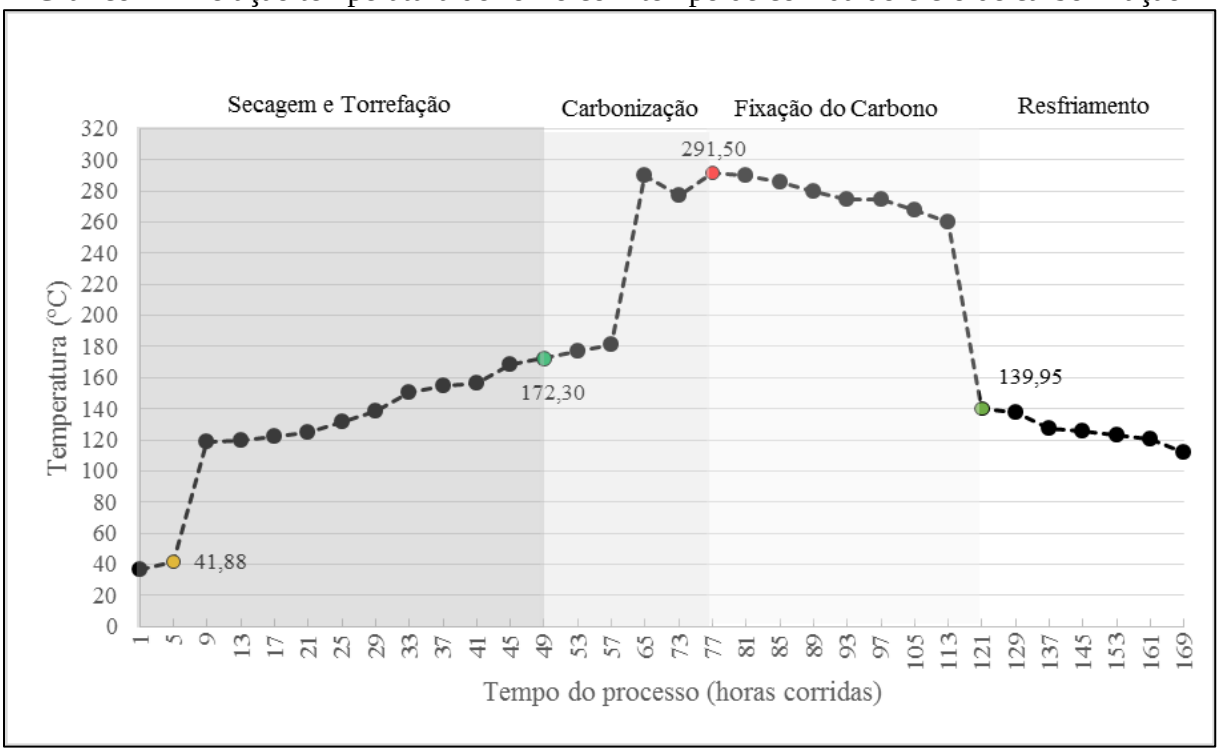
O formulário utilizado como guia neste levantamento está no Apêndice B. O objetivo desta análise é indicar os pontos de melhoria do processo que precisam de investimento e quais são as práticas associadas ao desenvolvimento sustentável do processo de carbonização vegetal estudado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE DAS FASES DA CARBONIZAÇÃO

Como a carbonização vegetal está diretamente relacionada com a temperatura do processo, foram realizadas análises que relacionam a temperatura do forno com as fases da carbonização (secagem, torrefação, carbonização e fixação do carbono). Para isso utilizou-se o controle de temperatura realizado pela BIO & IND – Biocarbo e Indústria e Tecnologias de Carbonização LTDA conforme referência contida no Apêndice A por meio de um termômetro digital de infravermelho portátil manipulado por funcionários nas quatro superfícies externas do forno a cada 1 hora. No Gráfico 1 são apresentadas as temperaturas médias que foram medidas, por um termômetro digital, nas quatro superfícies externas do forno de alvenaria retangular da Unidade Produtora de Carvão Vegetal (UPC), em função das horas corridas que marcaram o ciclo de carbonização, que duram de 4 a 5 dias.

Gráfico 1 – Relação temperatura do forno com tempo de corrida do ciclo de carbonização



Fonte: Autora (2023)

Considerando apenas a análise do perfil térmico da corrida de carbonização, as primeiras 48 horas do ciclo de carbonização correspondem à primeira e à segunda fase da degradação térmica da madeira, a secagem e a torrefação. De acordo com Raad (2004), a fase de secagem da madeira

ocorre durante o aquecimento do forno de alvenaria até atingir 100 ºC e entre 105 ºC a 200 ºC espera-se que ocorra a fase de torrefação da madeira. Almeida (1982) corrobora com Raad (2004) ao afirmar que as duas primeiras fases ocorrem até a temperatura interna do forno atingir 200 ºC. Até os 200°C ocorre pouca perda de massa inicial, devido à estabilidade dos constituintes térmicos da madeira nesta temperatura. De acordo com Jesus (2020), ocorre pouca formação de gases não condensáveis nas fases iniciais o que pode ser justificado pelos elevados gradientes de temperatura da madeira, que podem chegar a uma diferença de 200 ºC entre a superfície e o centro da madeira. Portanto, atribui-se que na corrida de carbonização analisada as fases de secagem e torrefação tenham ocorrido de 41,88 ºC (ponto amarelo) até 172,30 °C (ponto verde escuro), como observado pelo Gráfico 1.

Observa-se no Gráfico 1 um aumento da temperatura significativo após o tempo de corrida atingir 60 horas e 180 ºC, o que caracteriza o início da fase de pirólise ou carbonização da madeira. De acordo com Rezende *et al.* (2004), a carbonização é a terceira fase do ciclo de produção do carvão vegetal e é a única que apresenta característica exotérmica. Como toda reação exotérmica, em que há transferência de energia de um meio interior para o meio exterior, atribui-se que o aumento de temperatura a partir da sexagésima hora seja decorrente de tal fenômeno. O aumento dos rendimentos em gases não condensáveis ocorrem acima de 200°C, em decorrência da decomposição térmica das hemiceluloses e da celulose, o que caracteriza o momento de maior perda de massa inicial (JESUS, 2020). Atribui-se que na corrida de carbonização analisada a fase de carbonização ocorreu por aproximadamente 30 horas.

De acordo com Raad (2004) pode-se considerar que a partir de 270 ºC já se deu início a fase de fixação de carbono. Almeida (1982), Rezende *et al.* (2004) e Donato (2017) relatam que a fixação de carbono ocorre em temperaturas mais altas entre 300 a 400 ºC. A maior temperatura registrada nas superfícies do forno foi de 291,50 °C (ponto vermelho), em 77 horas após o início da corrida de carbonização vegetal, sendo mantida acima dos 270°C até 97 horas, dessa forma atribui-se esse intervalo de tempo para a fase de fixação de carbono. Após a fixação do carbono e o encerramento da corrida de carbonização, foi identificado uma diminuição na temperatura do forno para 139,95 ºC (ponto verde claro) e deu-se início a etapa de resfriamento. Vale ressaltar que valores experimentais podem ser influenciados pelo tamanho, espessura e formato do forno, e que

as pequenas variações dos resultados apresentados no Gráfico 1, quando comparadas aos relatados pela literatura, são justificáveis.

A Tabela 4 apresenta os momentos de coleta das amostras de gás e as temperaturas médias do forno, medidas nas superfícies externas do forno. Os pontos de coleta de Entrada (E) e Saída (S) do recuperador de fumaça foram determinados a fim de coletar os gases antes e após a condensação dos gases condensáveis.

Tabela 4 - Relação das temperaturas médias da superfície externa do forno com as coletas de amostras gasosas

Coleta	Ponto no Recuperador	Hora da Coleta	Tempo Forno (horas corridas)	Temperatura média do forno (ºC)
I	(E)	17:45	48	172,30
	(S)	15:50	46	168,32
II	(E)	19:00	50	176,90
	(S)	17:00	48	178,30
III	(E)	11:17	66	290,00
	(S)	9:30	64	290,00
IV	(E)	12:00	67	290,00
	(S)	10:30	65	290,00
V	(E)	15:30	70	277,00
	(S)	16:11	71	277,00
VI	(E)	9:50	88	280,00
	(S)	8:31	87	285,00
VII	(E)	10:34	89	280,00
	(S)	9:10	88	280,00

Legenda: E- Entrada; S- Saída;

Fonte: Autora (2023).

As análises gasosas realizadas durante o ciclo de carbonização ocorreram entre o período de 46 a 90 horas corridas. Dessa forma, pode-se considerar que foram contempladas análises, em pelo menos algum período, nas fases de torrefação, de carbonização e de fixação do carbono.

5.2 ANÁLISE DAS COMPOSIÇÕES GASOSAS

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios dos parâmetros oxigênio (O_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV) e óxidos de nitrogênio (NOx), avaliados nas coletas nos dois pontos amostrais, sendo estes localizados na entrada (E) e saída (S) do recuperador.

Tabela 5 - Resultados médios das coletas gasosas nos dois pontos amostrais do recuperador de fumaça

Coletas	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (g $dm^{-3)}$	COV (ppm)	NOx (ppm)
I (E)	16,60	4,20	94,69	2048,33	243,67
I (S)	12,40	8,40	91,87	2918,66	1070,00
II (E)	17,10	3,80	100,09	1982,00	219,67
II (S)	11,80	9,00	90,44	2583,33	409,00
III (E)	7,50	13,20	73,18	2026,33	822,00
III (S)	12,40	8,00	105,75	1003,30	923,33
IV (E)	8,30	12,20	77,00	1650,00	435,33
IV (S)	12,10	8,70	103,42	1506,66	585,33
V (E)	7,60	12,60	51,61	1771,66	*
V (S)	9,60	11,20	84,03	2063,00	*
VI (E)	15,50	5,80	141,04	784,26	423,00
VI (S)	14,00	6,60	112,87	722,00	392,33
VII (E)	15,30	5,10	134,33	916,30	441,00
VII (S)	14,10	6,70	105,90	1249,33	419,00

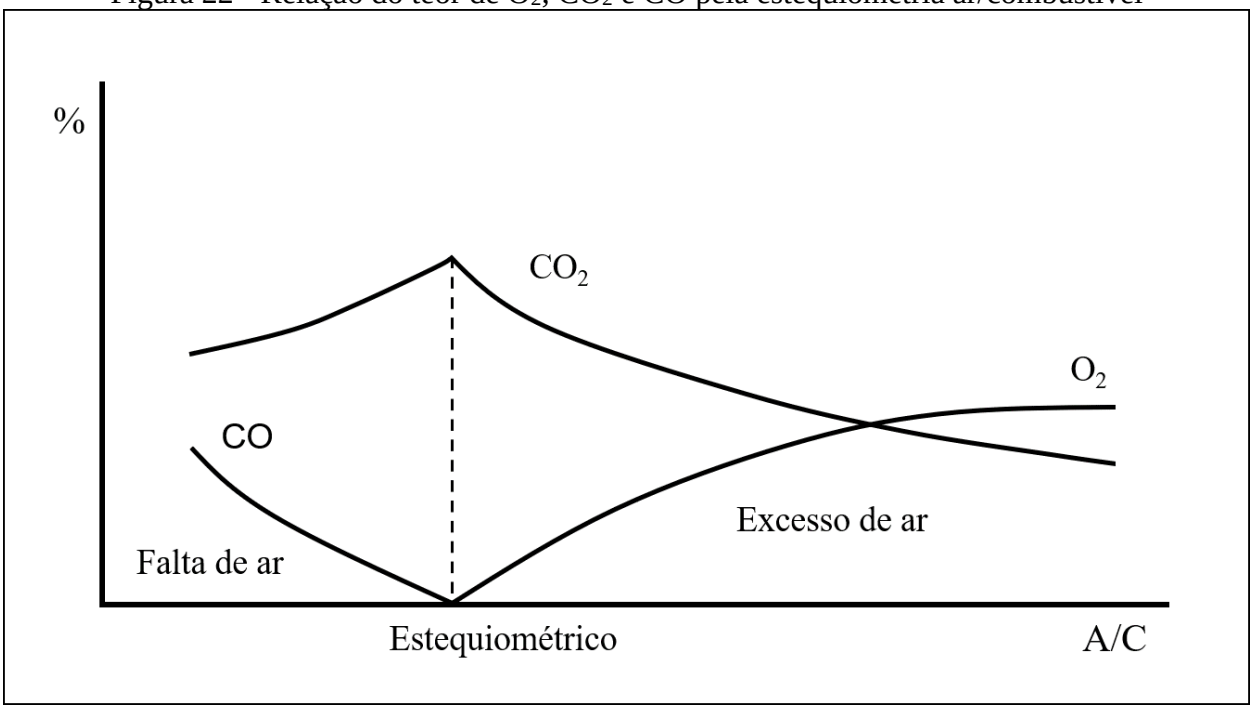
Legenda: E- Entrada; S- Saída;

Fonte: Autora (2023)

* Não foi possível realizar na coleta V o parâmetro de NOx devido à instabilidade no equipamento que foi solucionada após purga e verificação com gás de referência do equipamento.

De acordo com Donato (2017), também é possível relacionar as emissões dos gases não condensáveis oriundos da carbonização com a temperatura do forno e tempo de corrida. A carbonização da madeira trata-se de uma reação incompleta ou indireta, sendo sua eficiência diretamente relacionada com o controle desta combustão com o manejo do teor de oxigênio no sistema, que geralmente ocorre em excesso de ar (TRUGUILHO, 2013). A medida do teor de CO_2 no gás de exaustão está relacionada com a presença de oxigênio na reação (Figura 22). As proporções estequiométricas de ar e combustível variam com o teor de carbono do combustível. Espera-se que, à medida que o teor de CO_2 decresce, a quantidade de O_2 aumente. A falta de ar no momento da combustão é indicada pelo aparecimento de CO acompanhada da produção de fumaça (fuligem ou material particulado) (BIZZO; SÁNCHEZ, 2001).

Figura 22 - Relação do teor de O_2, CO_2 e CO pela estequiometria ar/combustível



Fonte: Bizzo e Sánchez (2001) - Adaptado

No Gráfico 2 são apresentados os valores de CO_2 e O_2 encontrados durante o ciclo de carbonização estudado. De acordo com a Resolução CONAMA nº 436 de 2011, os resultados devem ser expressos às condições referenciais de oxigênio para cada atividade. De forma teórica na atmosfera há 21% de O_2, porém, de forma estequiométrica, é considerado o teor de 8% de O_2 como a referência para fontes de emissões que possuem combustão externa de derivados de madeira, no momento da combustão.

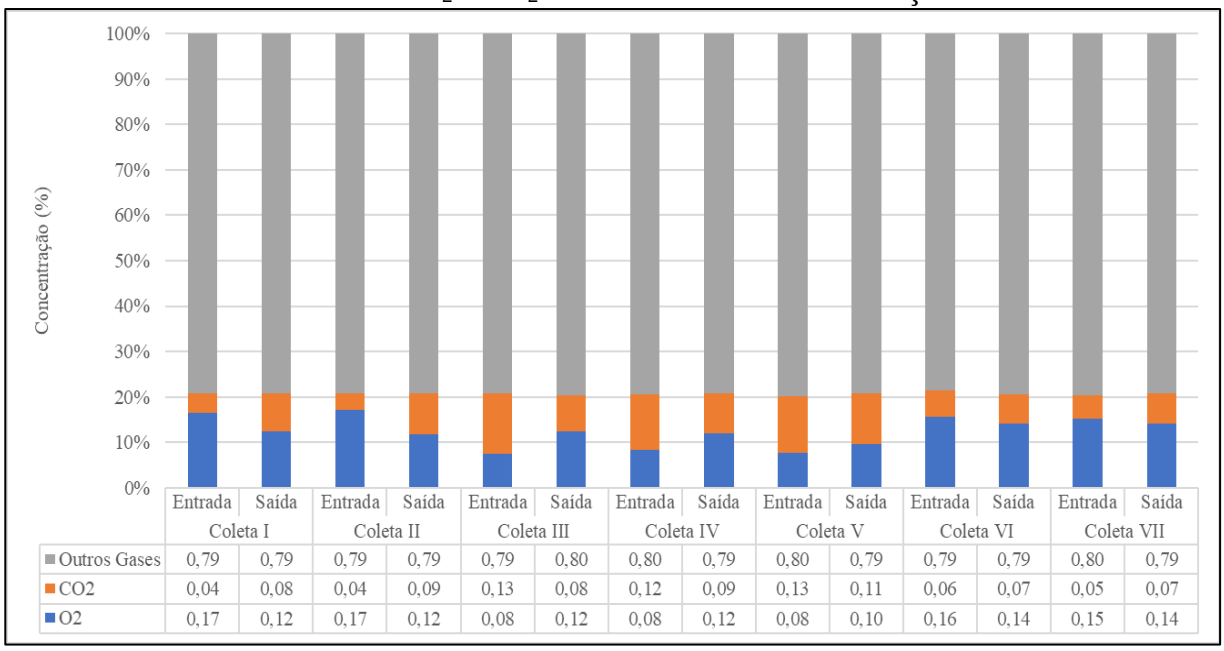
O dióxido de carbono (CO_2), importante gás na intensificação do efeito estufa, também foi avaliado por Donato (2017). Verificou-se um comportamento de aumento das emissões ao longo da fase da carbonização, quando ocorre a degradação da parede celular, e consequentemente o aumento da temperatura do sistema, atingindo o pico máximo próximo dos 300°C, temperatura em que ocorre a quebra dos grupos carbonila e ligações covalentes entre o carbono e oxigênio na biomassa.

O gás dióxido de carbono (CO_2) apresentou concentrações menores das saídas quando comparada às concentrações da entrada nas Coletas III, IV e V, ou seja, na fase de carbonização. A eficiência total desta fase foi de 26%, o que indica que o recuperador de coprodutos da

carbonização da madeira possui potencial de reduzir as emissões de gases do efeito estufa no processo de produção do carvão vegetal.

Dessa maneira, é possível observar que os teores de O_2 e CO_2 são complementares a aproximadamente 21% de O_2 na atmosfera e que possuem uma relação direta com a reação de carbonização. Nas coletas III, IV e V no ponto amostral de entrada do recuperador (localizada imediatamente após o processo de combustão) foram encontrados os menores teores de O_2, próximos a 8%, indicando mais uma vez a ocorrência da fase da carbonização bem como de uma reação de combustão incompleta.

Gráfico 2 - Teores de O_2 e CO_2 durante o ciclo de carbonização analisado



	Entrada Coleta I	Saída Coleta I	Entrada Coleta II	Saída Coleta II	Entrada Coleta III	Saída Coleta III	Entrada Coleta IV	Saída Coleta IV	Entrada Coleta V	Saída Coleta V	Entrada Coleta VI	Saída Coleta VI	Entrada Coleta VII	Saída Coleta VII
Outros Gases	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,80	0,80	0,79	0,80	0,79	0,79	0,79	0,80	0,79
CO2	0,04	0,08	0,04	0,09	0,13	0,08	0,12	0,09	0,13	0,11	0,06	0,07	0,05	0,07
O2	0,17	0,12	0,17	0,12	0,08	0,12	0,08	0,12	0,08	0,10	0,16	0,14	0,15	0,14

Fonte: Autora (2023)

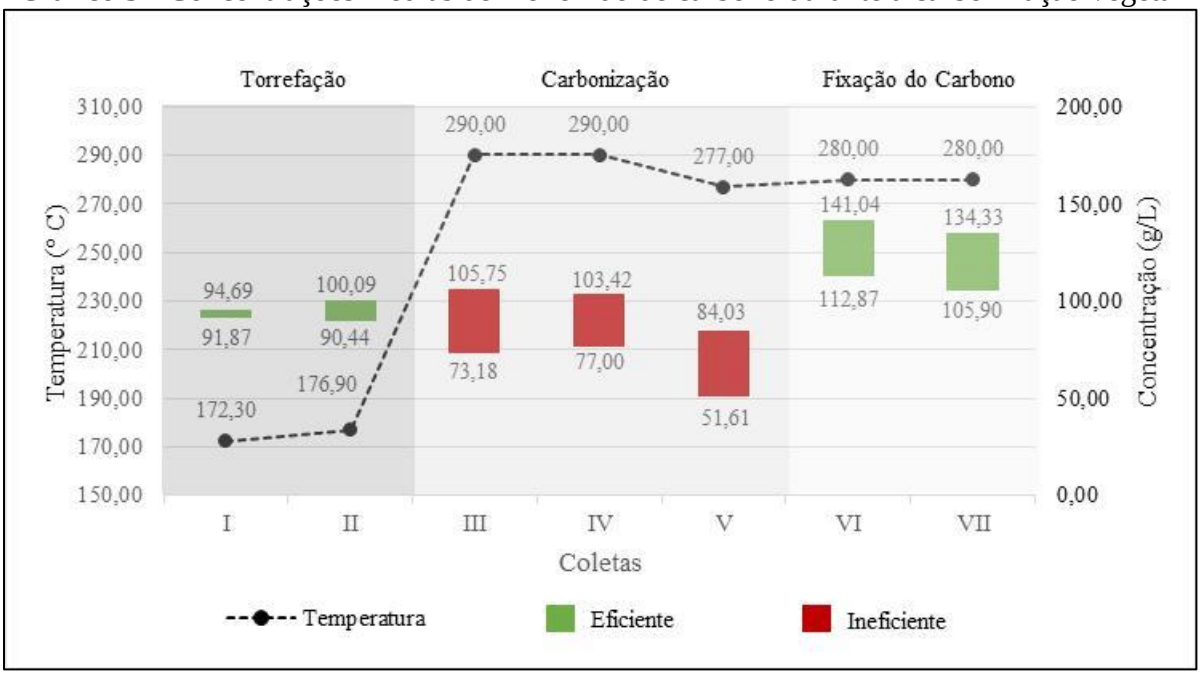
O gás monóxido de carbono (CO) apresentou a maior emissão na fase endotérmica inicial (torrefação) devido à decomposição das ramificações das hemiceluloses e celulose da madeira nessas fases (COSTA; 2012; YANG *et al.*; 2007). Picos de concentrações nessas fases eram esperados, porém não maiores que na fase de pirólise, na qual são esperadas as produções de gases não condensáveis mais intensamente. Este fato pode indicar a necessidade de maior controle da temperatura do forno e teor de oxigênio para que ocorra a reação de carbonização objetivando o maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Para as análises gráficas posteriores foram utilizadas as instruções do item 4.4.8. Quando os valores de entrada se apresentam maiores que os de saída, os resultados das concentrações

devem ser lidos de cima para baixo, indicando a eficiência do uso do recuperador na redução das emissões pela cor verde. De forma contrária, quando os valores de saída se apresentam maiores que os valores de entrada, a interpretação deve ser de baixo para cima, indicando a ineficiência do uso do recuperador na redução das emissões pela cor vermelha.

Conforme apresentado no Gráfico 3, observou-se baixa eficiência do recuperador na fase de torrefação para a redução os teores de CO, acredita-se que pelo fato de o gás ser não condensável. Donato (2017) observou que a concentração de CO diminuiu consideravelmente ao final do processo, indicando que os produtos voláteis na massa de madeira resultante estavam se esgotando, o que também pode ser observado pelas concentrações de entrada e saída de CO no Gráfico 3. Ressalta-se que a decomposição em caráter mais intenso também ocorre na terceira fase da carbonização (etapa exotérmica), que também apresenta elevadas emissões de CO_2 e CH_4, porém não maiores que nas etapas endotérmicas (DONATO, 2017).

Gráfico 3 - Concentrações médias de monóxido de carbono durante a carbonização vegetal

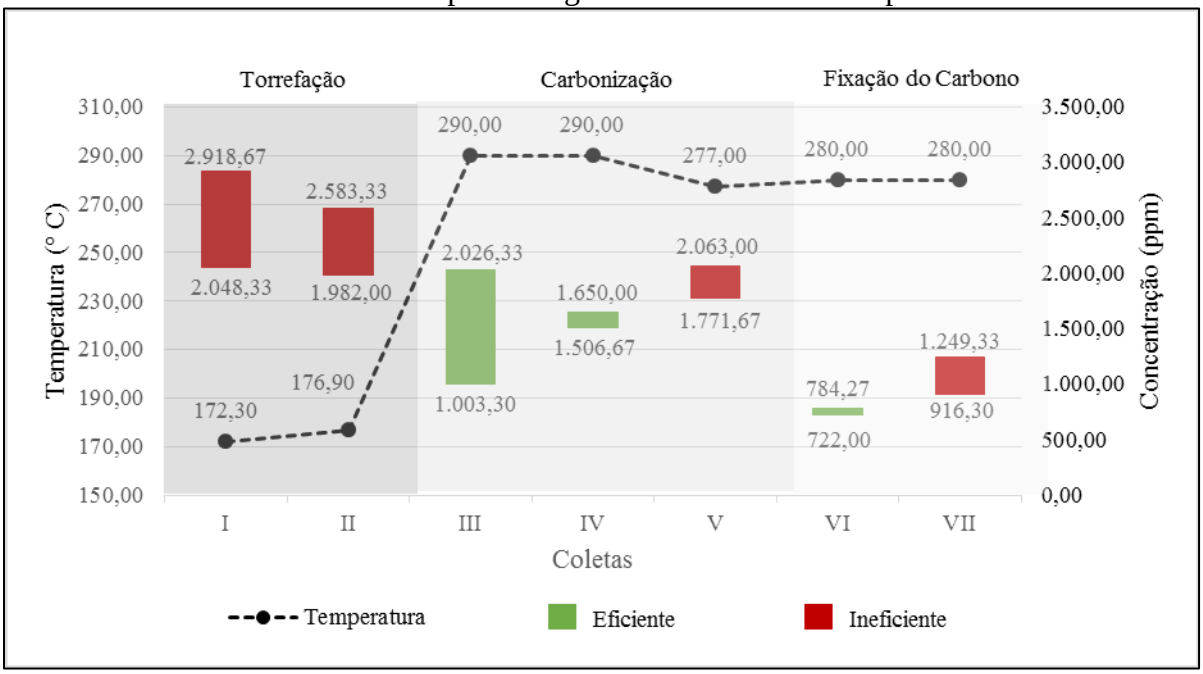


Fonte: Autora (2023)

A análise de compostos orgânicos voláteis (COVs) durante a produção de carvão vegetal possui relevância, pois no processo há liberação de gases orgânicos condensáveis e não condensáveis (REZENDE *et al.*, 2004). Como a recuperação de alcatrão vegetal ocorre por meio da condensação de gases condensáveis, espera-se uma redução entre os resultados obtidos na

entrada e na saída do recuperador desse parâmetro. Dessa forma, plotou-se o Gráfico 4 para a análise dos valores encontrados.

Gráfico 4 - Análise de compostos orgânicos voláteis entre os pontos amostrais

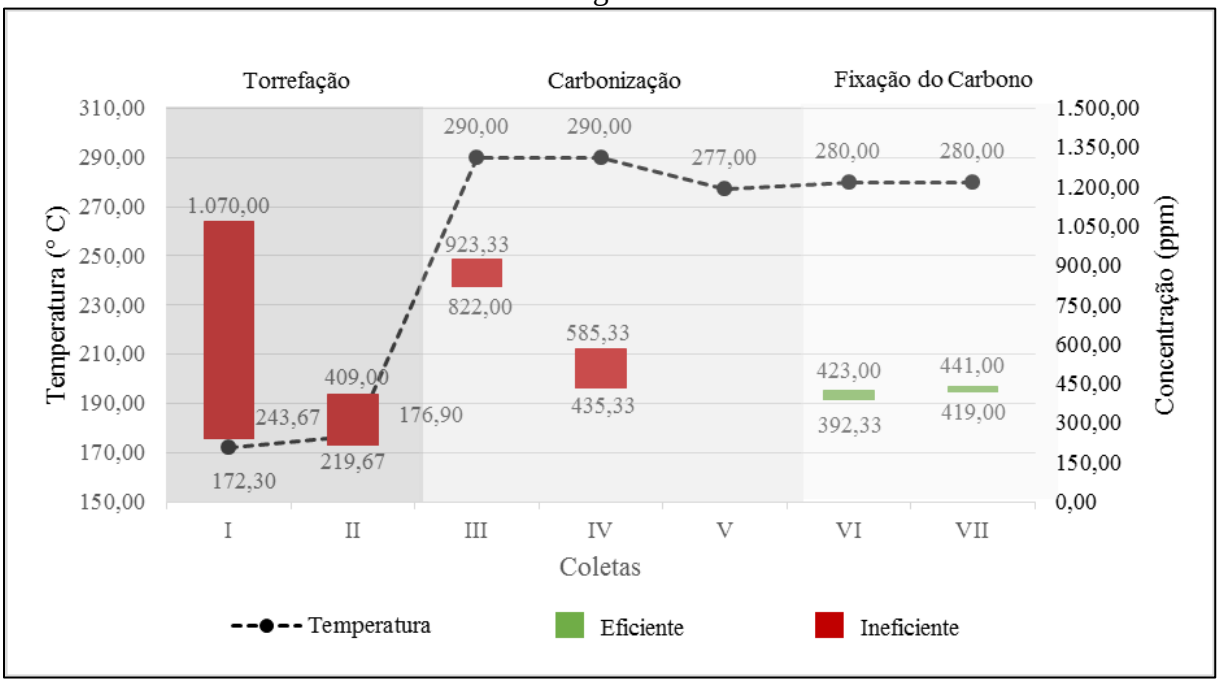


Fonte: Autora (2023)

As maiores concentrações de COVs foram observadas no início do ciclo com o aumento da temperatura e volatilização dos gases oriundos da decomposição da madeira, conforme já esperado (REZENDE *et al.*, 2004). O recuperador de fumaça se apresentou eficiente nas fases intermediárias com eficiência de 50% de remoção de COVs na etapa III, 9% de remoção de COVs na coleta IV e 8% de remoção de COVs na coleta VI. Na coleta final (VII), o recuperador não se apresentou eficiente na remoção de gases orgânicos poluentes, esse fato indica que a recuperação de alcatrão vegetal é maior no período da carbonização propriamente dita e que, com o aumento da temperatura do sistema de recuperação, a condensação dos gases fica comprometida, dificultando a recuperação, bem como a diminuição das emissões.

As análises de óxidos de nitrogênio (NOx) são apresentadas no Gráfico 5. De acordo com a CETESB (2015) as emissões deste parâmetro podem ser significativas quando as condições de queima não estão adequadas.

Gráfico 5 - Concentrações médias de óxidos de nitrogênio durante as fases da carbonização vegetal



Fonte: Autora (2023)

Como esperado, em processos de combustões, principalmente no que se trata de processos industriais, há formação de óxidos de nitrogênio. Com o Gráfico 5 é possível observar que os valores referentes às concentrações de NOx na saída do recuperador são maiores que para os valores de entrada para coletas I, II, III e IV, indicando a ineficiência na remoção desse parâmetro pela cor vermelha, enquanto nas coletas VI e VII foram observadas concentrações ligeiramente maiores nos pontos de entrada quando comparadas com os da saída, apresentando eficiência na remoção desse parâmetro nas coletas finais, indicada pela cor verde.

De acordo com os resultados apresentados no Gráfico 2, espera-se que nas coletas iniciais, cujo teor de O_2 é próximo de 12%, as medições de óxidos de nitrogênio totais tenham detectado majoritariamente a presença de óxidos de nitrogênio na sua forma mais reduzida (NO), enquanto que nas coletas finais, em um ambiente com maior teor de O_2 (cerca de 14%), espera-se que as medições tenham detectado óxidos de nitrogênio convertidos a sua forma mais oxidada (NO_2).

Equipamentos de contenção baseados em lavagem de gases poluentes apresentam eficiências significativas na remoção de óxidos de nitrogênio uma vez que devido à reatividade e solubilização dos compostos em contato com o fluxo de água é possível transformá-los em ácidos (SILVA *et al.*, 2014). Logo, podemos considerar que nas coletas finais houve a contenção mais

eficiente dos compostos de nitrogênio, visto que a forma mais oxidada prevalece com maior intensidade em um ambiente com maior teor de oxigênio e que possuem solubilidade favorecida pelo lavador de gases (SILVA *et al.*, 2017).

Considerando as médias das concentrações de entrada e de saída durante todo o período do processo produtivo de carvão vegetal foram calculadas as eficiências gerais da fase de torrefação (coletas I e II), da fase da carbonização (coletas III, IV e V) e da fase de fixação do carbono (coletas VI e VII), para cada parâmetro. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Eficiências médias da redução das concentrações dos poluentes atmosféricos por fase da carbonização

Coletas / **Parâmetros**	**I e II**	**III, IV e V**	**VI e VII**
CO_2	-	26%	-
CO	6%	-	21%
COVs	-	16%	-
NOx	-	-	6%

Fonte: Autora (2023)

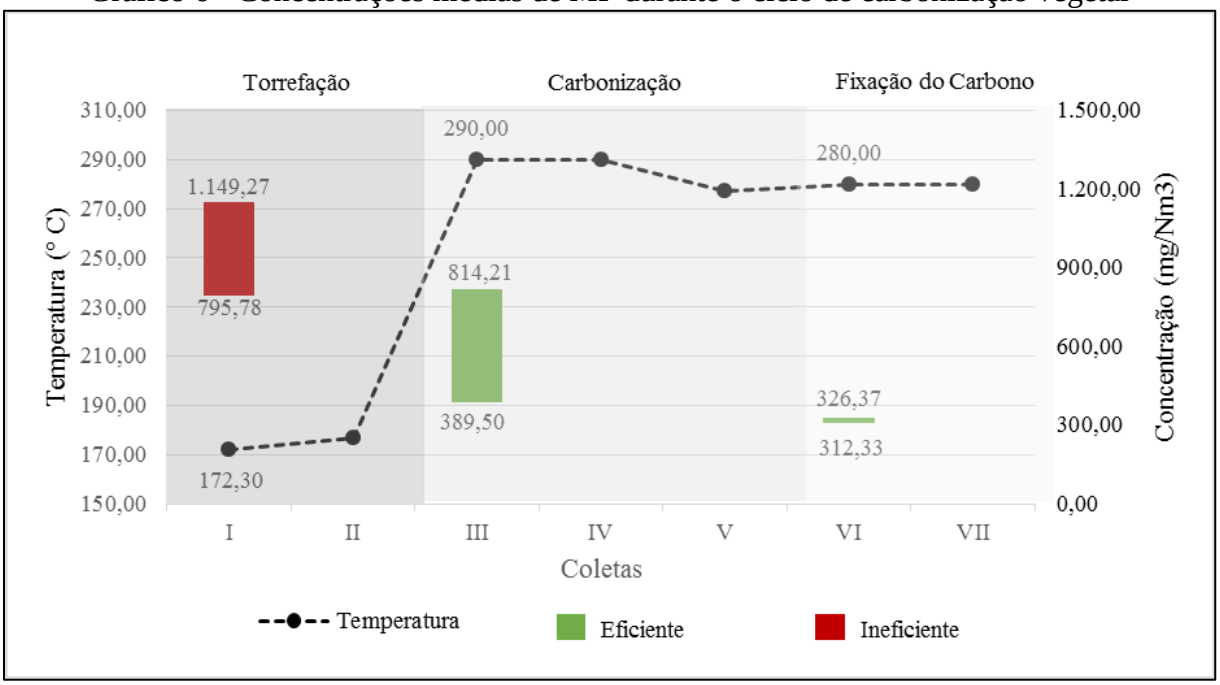
Conclui-se em termos gerais, que o recuperador de fumaça é mais eficiente após atingir a temperatura de 200ºC, quando comparado às fases iniciais, para todos os parâmetros analisados.

Segundo Hasan *et al.*, (2017) os gradientes de temperatura entre a superfície e o centro da madeira influenciam o tempo de formação dos coprodutos condensáveis ou não condensáveis da carbonização. O perfil térmico da madeira não é homogêneo e as reações químicas são totalmente dependentes da taxa de aquecimento. Pode ser observado em processos de produção de carvão vegetal a não uniformidade das reações químicas e consequentes oscilações dos picos de concentrações dos gases emitidos.

5.3 ANÁLISE DE MATERIAL PARTICULADO

Os resultados das análises de velocidade, vazão e umidade dos gases foram utilizados para os cálculos de concentração de material particulado (MP), os resultados foram expressos em g Nm^{-3}, conforme exige a legislação (CONAMA nº436/2011). Os resultados médios das coletas de MP na entrada (E) e na saída (S) do recuperador de fumaça em função da temperatura das superfícies do forno estão apresentados no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Concentrações médias de MP durante o ciclo de carbonização vegetal



Fonte: Autora (2023)

Os resultados para as concentrações de particulados totais na saída do recuperador foram menores na coleta III (fase de carbonização), representando uma eficiência de remoção de 52% do teor de material particulado. A fase de fixação de carbono, representada pela coleta VI, apresentou remoção de 4 % do teor de material particulado. Contudo, observou-se em campo que a vazão de gases apresentava gotículas no momento da amostragem, possivelmente oriundas do lavador de gases presente no recuperador, localizado próximo ao ponto amostral de entrada. Dessa forma, as concentrações das coletas no ponto amostral de entrada foram diretamente influenciadas pela umidade e contato com o material líquido recuperado (licor pirolenhoso).

Além disso, foi observado um aumento da temperatura dos gases, entre o ponto de entrada e o ponto de saída na coleta VI, conforme indicado na Tabela 7, sugerindo um aquecimento provocado pelo sistema devido a mistura do líquido recuperado com a água de lavagem dos gases. Este fato dificulta a recuperação do MP nos períodos finais do processo resultando na perda de partículas que deveriam ser capturadas durante a condensação dos gases.

Tabela 7 - Temperatura do gás na amostragem de MP

Coleta	Ponto	Temperatura do gás (°C)
I	E	86,80
	S	82,10
III	E	101,60
	S	90,70
VI	E	124,60
	S	132,80

Fonte: Autora (2023)

Diante do exposto, observou-se a necessidade de realizar melhorias para que o recuperador se apresente mais eficiente nas fases iniciais e finais da carbonização, para aumentar a recuperação de gases condensáveis e diminuir as emissões. O uso de equipamentos de contenção de poluentes nas fases críticas com processos de filtragem concomitante com o controle mais efetivo da temperatura do sistema forno-recuperador favorece a diminuição das emissões e o aumento da taxa de condensação.

5.4 ANÁLISE DA ECONOMIA CIRCULAR

O levantamento das práticas sustentáveis no processo produtivo do carvão vegetal foi realizado mediante a visita técnica e preenchimento do formulário no Apêndice B. As práticas foram divididas entre realizadas e com potencial de aplicação e representam o diagnóstico circular do processo produtivo de carvão vegetal analisado. Cada ação identificada está mais detalhada neste tópico, bem como a sua avaliação quanto à estrutura RESOLVE, indicadores circulares e sua abrangência.

5.4.1 Práticas realizadas

5.4.1.1 Ecodesign do recuperador de fumaça

O recuperador de fumaça utilizado no processo de carbonização foi especialmente projetado para tornar a condensação de gases em fornos de alvenaria retangulares viável em escala industrial, permitindo o crescimento da indústria de extração de biocarboquímicos e agregando valor aos resíduos do processo de carbonização. A aplicação desta prática está atrelada ao terceiro princípio da Economia Circular, especificamente na redução de impactos negativos oriundos das emissões de gases poluentes durante o processo. O recuperador impede que gases condensáveis sejam emitidos para a atmosfera e também se apresenta eficiente para a remoção dos gases não

condensáveis e por isso foi associado ao indicador de circularidade denominado “Eficiência dos materiais”.

Entre as ações RESOLVE foi identificado o ato de *otimizar,* uma vez que o recuperador visa reduzir a emissão de resíduos da produção. Esta ação de captura e condensação dos gases oriundos da carbonização em escala industrial pode ser caracterizada como uma inovação aplicada ao processo tradicional de produção de carvão vegetal. Também foi identificado o ato de *ciclar* devido à extração de substâncias bioquímicas, pela condensação, dos resíduos orgânicos. A abrangência desta prática é micro por envolver os processos, investimentos e aplicação no âmbito do próprio empreendimento, porém entende-se que pode ser necessário agregar conhecimentos e investimentos nas escalas meso e macro, para difundir a tecnologia e buscar uma melhoria contínua.

5.4.1.2 Uso de madeira reflorestada

O uso da madeira reflorestada para a produção do carvão vegetal visa a preservação dos recursos não renováveis, como preconiza o primeiro princípio da Economia Circular. O indicador circular que mais se aproxima dessa prática é o denominado de “Fluxo dos materiais” no controle da quantidade de matérias-primas no processo produtivo, sempre visando a redução do consumo dos recursos naturais.

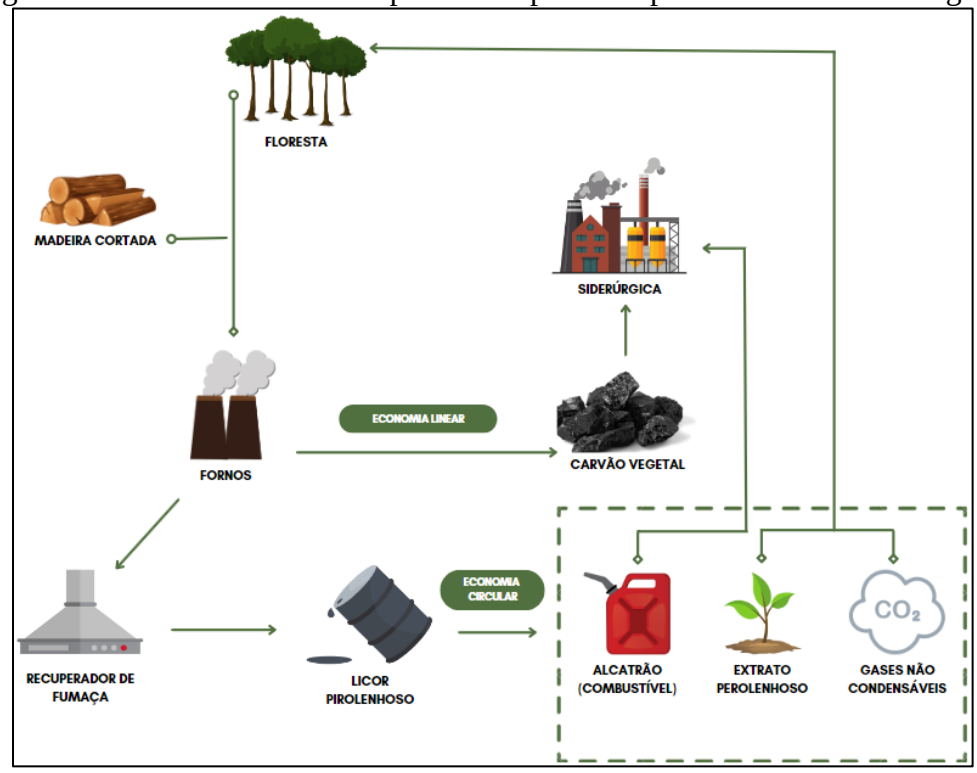
As ações *regenerar* e *trocar* foram identificadas nessa prática sustentável dentro da estrutura RESOLVE, pois as madeiras reflorestadas são uma substituição renovável para as florestas nativas e são aplicadas tecnologias de cultivo para a plantação em larga escala para suprir a demanda siderúrgica. Por se tratar de uma determinação federal, essas ações, possuem uma abrangência macro.

5.4.1.3 Recuperação de biocarboquímicos

A recuperação de biocarboquímicos é a prática central da aplicação da Economia Circular no processo produtivo de carvão vegetal analisado. Está diretamente relacionada com o segundo princípio da economia circular que visa aumentar a utilidade de um produto por meio de técnicas de recuperação em ciclos biológicos ou técnicos, como a regeneração, a reciclagem ou a remanufatura.

A recuperação dos biocarboquímicos exemplifica a Economia Circular no processo produtivo do carvão vegetal (Figura 23).

Figura 23 - Economia Circular aplicada no processo produtivo do carvão vegetal



Fonte: Autora (2023)

As ações da Estrutura RESOLVE associadas à esta prática sustentável foram cinco de seis: *regenerar, compartilhar, otimizar, ciclar e trocar. Regenerar*, pois a recuperação dos coprodutos possibilita a devolução dos recursos biológicos à biosfera, como com a aplicabilidade do extrato pirolenhoso como fertilizante. *Compartilhar*, porque o ciclo de vida da madeira (matéria-prima) foi prolongado com a destinação dos coprodutos do processo de carbonização vegetal. *Otimizar*, uma vez que a recuperação diminui as emissões removendo os resíduos da produção, além de aumentar a eficiência do processo. *Ciclar* por meio da remanufatura dos coprodutos da carbonização, agregando valor aos produtos pela circularidade dos recursos. *Trocar*, pela substituição do processo convencional de produção de carvão vegetal pela adição de uma nova tecnologia no processo.

Todos os indicadores de circularidade estão associados a esta prática em certo nível. O "Fluxo de materiais", por exemplo, está associado à valoração de resíduos, enquanto a "Eficiência dos materiais", com o desempenho do processo para a obtenção dos produtos de interesse,

diminuindo a geração de resíduos. O indicador “Ciclo de vida” se refere à vida útil do produto, desde a extração da madeira até todas as suas finalidades e com a recuperação deu origem ao aumento da aplicabilidade da matéria-prima, tornando seu consumo com menor impacto ambiental. “Impacto Ambiental” como indicador também é aplicável pela redução de poluentes oriundos do processo e as possibilidades advindas de novas tecnologias para a geração de energia além da recuperação. Sobre a abrangência desta prática, podemos considerar micro, por se tratar de uma iniciativa privada e local.

5.4.1.4 Aplicação de coprodutos em outras indústrias

A aplicabilidade industrial dos coprodutos da carbonização vegetal são a motivação econômica do processo de recuperação de biocarboquímicos. A extensão da vida do ciclo biológico e do ciclo técnico dos coprodutos como fertilizantes (extrato pirolenhoso) e como combustível (alcatrão vegetal), respectivamente, estão associadas ao segundo princípio da Economia Circular. Como indicador circular, ressaltamos o “Ciclo de Vida” como indicativo de que é possível estabelecer diversas funcionalidades de um recurso renovável por rotas sustentáveis.

As ações da Estrutura RESOLVE identificadas foram *regenerar, compartilhar e ciclar.* Vale ressaltar que a ação *compartilhar* pode ser identificada na necessidade de dividir ativos (processo produtivo de produção de carvão vegetal e o processo produtivo de recuperação e refino do subproduto recuperado), bem como em compartilhar soluções sustentáveis com a cadeia de fornecedores. Por envolver a necessidade e aceitação da cadeia de fornecedores, no uso do extrato pirolenhoso como fertilizante para plantação de florestas que virão a ser a matéria-prima do processo, bem como as de outros clientes do agronegócio, a abrangência dessa prática é meso.

5.4.1.5 Reutilização de tiços como material para ignição

O segundo princípio da Economia Circular preconiza o reaproveitamento de resíduos no próprio processo produtivo como prioridade, evitando perdas e maximizando ganhos. A utilização de tiços, que são resíduos sólidos da madeira que não sofreram o processo de carbonização completo, é corriqueira na UPC e representa uma solução para a ignição do forno, uma vez que possuem elevado poder calorífico e diminuem o consumo da matéria-prima para esse fim, que não será convertido à carvão vegetal.

Dentro da Estrutura RESOLVE foram identificadas as ações *compartilhar e ciclar*, representando a reutilização de coprodutos no próprio ciclo produtivo analisado. Por se tratar de um reaproveitamento que envolve o reaproveitamento e a reciclagem de um resíduo sólido, o indicador circular associado a essa prática foi "Eficiência dos materiais" e com abrangência micro, por ser em âmbito local.

5.4.2 Práticas com potencial de aplicação

5.4.2.1 Utilização de fornos de carbonização com elevada eficiência

Devido ao potencial de reaproveitamento das características físico-químicas da madeira concomitante com as elevadas emissões oriundas do processo produtivo do carvão vegetal, tão necessário para o setor siderúrgico no país, maiores têm sido os investimentos em novas tecnologias e técnicas de controle e monitoramento da carbonização. Com o objetivo de possibilitar a recuperação dos gases condensáveis, o reaproveitamento energético da queima dos gases não condensáveis e a produção eficiente do carvão vegetal, se faz necessário o desenvolvimento de um novo forno de carbonização.

O *Ecodesign* deste novo forno deve contar com as aplicações de todos os três princípios da Economia Circular, bem como com o apoio financeiro e tecnológico de organizações em escala meso ou macro. O indicador circular associado a esta prática são a "Eficiência dos materiais" e as ações da estrutura RESOLVE identificadas foram *otimizar* e *trocar*.

5.4.2.2 Geração de energia com os gases não condensáveis

A queima contínua dos gases não condensáveis em fornalhas acopladas aos fornos convencionais é considerada hoje a técnica mais promissora de redução das emissões de gases poluentes, principalmente os gases do efeito estufa. Porém, como toda técnica, essa também apresenta suas limitações como a não recuperação dos gases condensáveis, o sincronismo dos fornos, e a heterogeneidade dos gases.

Contudo, a geração de energia com os gases não condensáveis, se for a única alternativa sustentável viável, é mais vantajosa do que o não reaproveitamento de nenhum subproduto. Dessa forma deve ser incentivado e implantado na Unidade Produtora de Carvão, pelo menos nos fornos onde não estão sendo recuperados os gases condensáveis. A energia elétrica gerada pode ser

reaproveitada no próprio processo para a instalação de monitoramentos elétricos da temperatura ou o funcionamento dos recuperadores concomitantes.

A aplicação dessa prática se associa ao terceiro princípio da Economia Circular de eliminação do “Impacto Ambiental” para a sociedade, fauna e flora. Além disso, as ações da Estrutura RESOLVE identificadas foram *regenerar* a saúde dos ecossistemas, *otimizar* o processo com a remoção dos resíduos *e trocar* tecnologias convencionais por novas tecnologias sustentáveis, com abrangência meso.

5.4.2.3 Concentração do extrato pirolenhoso e Reutilização da água para o resfriamento do sistema

A água, como constituinte da madeira e como fluido condensador, está no processo de recuperação dos coprodutos, e por isso é gerado um grande volume de solução de extrato pirolenhoso. A destilação desta solução permitiria a concentração do extrato pirolenhoso, bem como a recuperação da água para seu reaproveitamento no processo.

Essas práticas, além de promoverem a economia de água, reduzem o consumo de embalagens plásticas necessárias para armazenar e transportar os frascos com o produto, bem como oferecem ganhos econômicos requerendo menos espaço para o armazenamento e facilidade logística de transporte, sendo aplicabilidades do segundo princípio da Economia Circular. Por esta razão as ações da Estrutura RESOLVE identificadas foram *compartilhar, otimizar e ciclar*.

Os indicadores circulares associados às práticas citadas foram o “Fluxo de materiais” pela redução do consumo de água, recurso não renovável no sistema e “Eficiência dos materiais” pela redução dos resíduos gerados e aumento da reciclagem. As abrangências foram consideradas micro e meso, por envolver a cadeia de fornecedores.

Por meio da análise dos indicadores adotados, foram identificadas nove ações sustentáveis que se enquadram com a Estrutura RESOLVE e compõem a Economia Circular de forma prática ou com potencial de aplicação, sumarizadas no Quadro 6. Dentre as práticas já realizadas, que são cinco, todas possuem relação com pelo menos duas ações RESOLVE, sendo uma com abrangência de aplicação macro, uma com abrangência meso, e três com abrangência micro. Dentre as quatro práticas em potencial de aplicação, também foram identificadas pelo menos duas ações RESOLVE em cada, sendo uma de abrangência micro e três de abrangência de aplicação meso.

Quadro 6 - Síntese da aplicabilidade de práticas circulares no processo produtivo de carvão vegetal

Práticas já realizadas			
Prática Circular	**Indicador Circular**	**Ação Estrutura RESOLVE**	**Abrangência**
Ecodesign do recuperador de fumaça	Eficiência dos materiais	Otimizar e Ciclar	Micro
Utilização de madeira reflorestada	Fluxo de materiais	Regenerar e Trocar	Macro
Recuperação de biocarboquímicos	Fluxo de materiais, Eficiência dos materiais, Ciclo de vida e Impacto ambiental	Regenerar, Compartilhar, Otimizar, Ciclar e Trocar	Micro
Aplicação de coprodutos em outras indústrias	Ciclo de vida	Regenerar, Compartilhar e Ciclar	Meso
Reutilização de tiços como material para ignição	Eficiência dos materiais	Compartilhar e Ciclar	Micro
Práticas com potencial de aplicação			
Prática Circular	**Indicador Circular**	**Ações Estrutura RESOLVE**	**Abrangência**
Utilização de fornos de carbonização com elevada eficiência	Eficiência dos materiais	Regenerar, Otimizar e Trocar	Meso
Geração de energia com os gases não condensáveis	Ciclo de vida e Impacto ambiental	Regenerar, Otimizar e Trocar	Meso
Reutilização da água para resfriamento do sistema	Impacto ambiental	Otimizar e Ciclar	Micro
Concentração do extrato pirolenhoso	Fluxo de materiais e Eficiência dos materiais	Compartilhar, Otimizar e Ciclar	Meso

Fonte: Autora (2023)

Considerando as nove práticas levantadas, ressalta-se que foram identificadas cinco das seis ações da metodologia RESOLVE, sendo essas aplicáveis em todos os níveis de abrangência, com 88% em escala meso e micro, e 26% em escala macro. De acordo com essa análise, a aplicabilidade de práticas circulares no processo produtivo de carvão vegetal tem potencial de ser aplicada na UPC avaliada bem como de ser ampliada aos pátios siderúrgicos em todo o país.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesse estudo se mostraram relevantes na recuperação de coprodutos da carbonização como uma alternativa para a diminuição das emissões atmosféricas, aumentando o valor agregado do processo de produção de carvão vegetal e se tornando uma alternativa para o estabelecimento de práticas relacionadas a economia circular em uma atividade industrial importante para a economia brasileira.

Foi possível observar a partir das coletas e análises dos dados oriundos das amostras da entrada e da saída do recuperador de fumaça que são necessárias melhorias na aplicação da tecnologia, principalmente para as fases iniciais da carbonização vegetal, quando se iniciam os picos de concentrações dos gases condensáveis. Os resultados também indicaram a importância do controle da temperatura do sistema com as emissões de material particulado e gases condensáveis uma vez que seu controle contribui para a eficiência da recuperação e consequente diminuição das emissões.

Os perfis das concentrações do material particulado, da composição gasosa e dos compostos orgânicos voláteis durante a pirólise vegetal se apresentaram não uniformes, variando muito com a temperatura na fase de carbonização da madeira. O recuperador de fumaça se mostrou eficiente na redução de 52% de material particulado, de 16% de compostos orgânicos voláteis e de 26 % de dióxido de carbono na fase da carbonização. Na fase final de fixação do carbono se apresentou eficiente na remoção de 6 % para os óxidos de nitrogênio totais e 21% de monóxido de carbono.

Conforme a análise dos indicadores de circularidade da Economia Circular e da Estrutura RESOLVE, foi possível identificar que as práticas já realizadas e as que possuem potencial de aplicação modificam o processo linear em processos cíclicos. Das seis ações da metodologia RESOLVE, foram identificadas cinco, sendo essas aplicáveis em todos os níveis de abrangência, com 88% em escala meso e micro e 26% em escala macro. Dessa forma, é possível inferir que a maioria das práticas identificadas apresentam possibilidade de aplicação em outras Unidades Produtoras de Carvão Vegetal.

A recuperação de coprodutos, a prática circular apresentada e discutida neste trabalho, é uma rota sustentável interessante para a cadeia de suprimentos siderúrgicos e uma grande oportunidade

de investimento, uma vez que bem aplicada implicará na diminuição dos impactos negativos na sociedade, na economia e no meio ambiente.

Sugere-se para trabalhos futuros avaliar a composição química da madeira para relacioná-la com os compostos emitidos durante o processo de carbonização, visando a otimização da produção do carvão vegetal e seus coprodutos e a redução das emissões de poluentes. Outra sugestão é analisar a viabilidade técnica da implementação das práticas circulares com potencial de aplicação levantadas na Unidade Produtora de Carvão Vegetal e em outros pátios siderúrgicos, para ampliar a circularidade em processos industriais, tornando-os mais sustentáveis.

7 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Guia Metodológico para a Realização de Inventários em Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Rio de Janeiro: Banco Interamericano de Desenvolvimento, 2013. 30 p.

ALENCAR, J. L. S. de; SIMONI, J. H.e; FIORELLI, M. N.; ANGELIS NETO, G. de. SISTEMA DE GESTÃO AMBIENTAL E ISO 14000 NA INDÚSTRIA TÊXTIL – A SUSTENTABILIDADE COMO TENDÊNCIA. **Revista Eletrônica em Gestão Educação e Tecnologia Digital**, Santa Maria, v. 2, n. 19, p. 575-586, ago. 2015.

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.. Aerossóis atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. **Química Nova**, [S.L.], p. 859-870, v. 28, n.5, 2005.

ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; ASSIS, M. R. de; BIANCHI, M. L.. Efeito da Aplicação de Nitrogênio na Produção e Qualidade da Madeira e Carvão Vegetal de um Híbrido de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla. **Floresta e Ambiente**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 1-8, 11 dez. 2017.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BARBON, A.; GOMES, J. **Simulação das Emissões Atmosféricas Sobre o Município de Araucária com Uso do Modelo AERMOD**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 129-140, 2010.

BENITES. V. de M.; TEIXEIRA, W. G.; REZENDE, M. E.; PIMENTA, A. S. Utilização de carvão e subprodutos da carbonização vegetal na agricultura: aprendendo com as terras pretas de índio. In: TEIXEIRA; KERN; MADARI; LIMA; WOODS. **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas.** Manaus: Embrapa, 2010. p. 286-297.

BIOCARBO. **Gestão Consciente**. 2022. Disponível em: https://biocarbo.com/?gclid=CjwKCAjw5P2aBhAlEiwAAdY7dIXTLzP2rtDG_p2sgekXB1Tex5Qeb4t3eicJJEBOFIcJzyC4vmsDJxoCU9IQAvD_BwE. Acesso em: 18 out. 2022.

BIZZO, W. A.; SÁNCHEZ, C. G. Estequiometria e Reações de Combustão. In Caio Glauco Sánchez (Org). **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa**. 1 ed. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010, v.1, p. 215-246.

BRAGA, B. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 332 p.

BRASIL. Decreto nº 11075, de 19 de maio de 2022. Estabelece os procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas, institui o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa e altera o Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022. Brasília.

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.

BRYDEN, K.M.; RAGLAND, K.W.; RUTLAND, C.J. Modeling thermally thick pyrolysis of wood. **Biomass and Bioenergy,** London, v.1, n. 22, p. 41–53, Jan. 2002.

CANAL, W. D. et al. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa no processo de carbonização. **Scientia Florestalis**, v. 44, n. 122, p. 831-840, 2016.

CARDOSO, M. T. **Secagem De Toras Para Produção De Carvão Vegetal Utilizando A Queima De Gases De Carbonização**. 2015. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

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.

CARNEIRO, A. de C. O.; LANA, A. Q.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.i; SALLES, T. . **Estudo Da Viabilidade Técnica E Econômica Da Produção De Carvão Vegetal Em Fornos Circulares Com Baixa Emissão De Poluentes**. Viçosa, 30 out. 2012.

CETESB. **Qualidade do ar**: poluentes. Poluentes. 2022. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/#:~:text=As%20principais%20fontes%20de%20emiss%C3%A3o,poeira%20do%20solo%2C%20entre%20outros. Acesso em: 05 jul. 2022.

CETESB. Qualidade do ar: **Plano De Redução De Emissões De Fontes Estacionárias Guia De Melhor Tecnologia Prática Disponível Fontes De Combustão**. São Paulo, 2015.

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.

CNI. **Economia circular: caminho estratégico para a indústria brasileira 2019**. 68 p. Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2019.

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

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **L9.217**: Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação de material particulado com o sistema filtrante no interior do duto ou chaminé: método de ensaio. São Paulo, SP: Cetesb, 1989. 15 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **L9.222**: Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação da velocidade e vazão dos gases: método de ensaio. São Paulo, SP: Cetesb, 1992. 7 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **L9.224**: Dutos e chaminés estacionárias - determinação da umidade dos efluentes: método de ensaio. São Paulo: Cetesb, 1993. 14 p.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: **O que será discutido na COP27** – Ronaldo Seroa da Motta. São Paulo: Cebds, 2022.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. **Deliberação Normativa Copam Nº 187**. Belo Horizonte, MG, 19 set. 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **CONAMA, Resolução Nº 382**. Brasília, DF, 26 dez. 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **CONAMA, Resolução Nº 436**. Brasília, DF, 22 dez. 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **CONAMA, Resolução Nº 491**. Brasília, DF, 19 nov. 2018.

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. 71p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG - 2012.

CUNHA, B. P. da; AUGUSTIN, S. **Sustentabilidade Ambiental: estudos jurídicos e sociais**. Caxias do Sul: Educs, 2014. 486 p.

DERÍSIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 3. Ed. São Paulo: Signus Editora, 2007

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, MG, 2017.

DUARTE, A. D.; SILVA, G. L. da. Aplicação da ferramenta de Análise de Ciclo de Vida (ACV) no processo de tratamento de efluentes em uma lavanderia de beneficiamento de jeans. **Exacta**, Pernambuco, v. 2, n. 18, p. 355-367, jun. 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION - EMF. **Uma economia circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial**. São Paulo, 2017.

ENERGÉTICA. **Coletor Isocinético para Poluentes Atmosféricos: Manual de Operação**. Rio de Janeiro: Energética Ind.E Com. Ltda, 2013. 46 p.

ENERGÉTICA. **Monitoramento de VOCs - PID OU FID.** Rio de Janeiro: Energética, 2014.

EPA- United States Environmental Protection Agency. EMC CONDITIONAL TEST METHOD (CTM-030): **Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide, and Oxygen Emissions from Natural Gas-Fired Engines, Boilers and Process Heaters Using Portable Analyzers**. Estados Unidos: Environmental Protection Agency, 1997

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (Denmark). European Union (org.). **Annual report 1998**. Copenhagen: European Environment Agency, 1999. 80 p.

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.

FAJERSZTAJN, L.; VERAS, M.; BARROZO, L. V.; SALDIVA, P.. Air pollution: a potentially modifiable risk factor for lung cancer. **Nature Reviews Cancer**, [S.L.], v. 13, n. 9, p. 674-678, 8 ago. 2013.

FASIHI, M.; EFIMOVA, O.; BREYER, C.. Techno-economic assessment of CO_2 direct air capture plants. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 224, p. 957-980, jul. 2019.

FEAM- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (Minas Gerais). **Orientações Técnicas Para A Elaboração De Um Estudo De Dispersão Atmosférica**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte, p. 10. 2019.

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.

FROEHLICH, 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.

GARCIA, G.. **Construção e calibração de amostrador passivo para determinação de ozônio troposférico**. 2009. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, SP, 2009.

GOMES, A. F.; PEREIRA, E. G.; SANTOS, I. da S. dos; CARNEIRO, A. de C. O.; MARTINS, M. A. Qualidade do carvão vegetal submetido a diferentes taxas de resfriamento com trocador de calor. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 677–687, 2020.

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

HANSEN, J.; SATO, M.; RUEDY, R.. **Global Temperature in 2021**. Disponível em: http://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2022/Temperature2021.13January2022.pdf%20.%20Acesso%20em%2001/02/2022. Acesso em 01 fev 2022

HASAN, M.; HU, X.; GUNAWAN, R.; LI, C. Pyrolysis of large mallee wood particles: Temperature gradients within a pyrolysing particle and effects of moisture content MD. **Fuel Processing Technology**, Australia, v.158, p. 163–171, Jan. 2017.

Health Effects Institute. 2020. **State of Global Air 2020**. Special Report. Boston, MA: Health Effects Institute. Disponível em: https://www.stateofglobalair.org/. Acesso 05 jan. 2021.

HESS, S. **Riscos à saúde do trabalhador na produção de carvão vegetal em carvoarias no Brasil**. 2008.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2020**. São Paulo: Indústria Brasileira de Árvores, 2020. Disponível em: https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf. Acesso em: 10 jan. 2022.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2022**. São Paulo: Indústria Brasileira de Árvores, 2022. Disponível em: https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf. Acesso em: 10 maio 2023.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério da Economia. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS) 2020**. Brasília, DF, 2021. 8 p.

IPCC **Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report Climate Change 2007**: The Physical Science Basis. Disponível em: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_ report_the_physical_science_basis.htm Acesso em 14 de jun de 2021.

IPCC **Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013**: The Physical Science Basis Disponível em: http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI12Doc2b_FinalDraft_All.pdf Acesso em 15 de jun de 2021.

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (Brasil). Organização das Nações Unidas (org.). **Aquecimento Global de 1,5°C**. Brasília: MCTIC, 2019. 28 p.

JESUS, M. S. de. **Decomposição Térmica Da Madeira Como Subsídio Para Curvas De Carbonização E Queima De Gases**. 2020. 105 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

JURKEVICZ, S. S. **Controle Das Emissões De Compostos Orgânicos Voláteis (Covs) Na Atividade De Pintura De Carroceria Automotiva – Veículos Leves**. 2020. 104 f. Monografia (Doutorado) - Curso de Curso de Pós-Graduação "Conformidade Ambiental Com Requisitos Técnicos e Legais, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo Escola Superior, São Paulo, 2020.

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.

LEAL, T. E. **Produção de energia elétrica através de gases provenientes da carbonização da madeira com micro-ondas**. 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, REDEMAT, Ouro Preto, 2015.

LINDER, M.s; SARASINI, S.; VAN LOON, P.a. A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. **Journal Of Industrial Ecology**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 545-558, 24 fev. 2017. Wiley.

NERY, S. M.; FREIRE, A. S.. A Economia Circular E O Cenário No Brasil E Na Europa. In: **XXXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,** 37, 2017, Joinville. A Engenharia de Produção e as novas tecnologias produtivas: indústria 4.0, manufatura aditiva e outras abordagens avançadas de produção. Joinville, SC: Abepro, 2017.

MANAHAN, S. E. **Química ambiental**. 9.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 912 p.

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.

MCTI, Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação (org.). **Modernização da produção de carvão vegetal**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015. 150 p.

MDL, **O MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO**: **guia de orientação 2009.** Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio Gráfica e Editora, 2009.

MINAS GERAIS. Decreto nº 45.229, de 03 de dezembro de 2009. Regulamenta medidas do Poder Público do Estado de Minas Gerais referentes ao combate às mudanças climáticas e gestão de emissões de gases de efeito estufa e dá outras providências. Belo Horizonte.

MINAS GERAIS. Decreto nº 46.674, de 17 de dezembro de 2014. Regulamenta medidas do Poder Público do Estado de Minas Gerais referentes ao combate às mudanças climáticas e gestão de emissões de gases de efeito estufa e dá outras providências e altera o Decreto nº 45.229, de 03 de dezembro de 2009. Belo Horizonte.

MINAS GERAIS. Decreto nº 47.409, de 17 de maio de 2018. Regulamenta medidas do Poder Público do Estado de Minas Gerais referentes ao combate às mudanças climáticas e gestão de emissões de gases de efeito estufa e dá outras providências e altera o Decreto nº 45.229, de 03 de dezembro de 2009. Belo Horizonte.

MRU AIR FAIR. **2021-04-19,V3.10.EN**: OPTIMA 7 USER MANUAL. Neckarsulm: Mru, 2021.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. MapBiomas: projeto de mapeamento anual da cobertura e uso do solo no Brasil; 2021.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema Forno-Fornalha Para Produção De Carvão Vegetal**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A.C.O.; PEREIRRA, B.L.C.; VITAL, B.R.; CARVALHO, A.M.; TRUGILHO, P.F.; DAMÁSIO, R.P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 557-566, 2013.

PEREIRA JÚNIOR, J. de S.. **Legislação brasileira sobre poluição do ar**. 2007,12 p. Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados, 2007

PINHEIRO, P. C. C**. Produção de Carvão Vegetal no Brasil**. Seminário "Encuentro Regional sobre Biocombustibles y Energias Renovables". Abril de 2009. Montevideo. Uruguay

PINHEIRO, L. L.. **Avaliação da Sustentabilidade da Produção de Carvão Vegetal na Paraíba**. 2012. 152 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Centro Tecnológico, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL (São Paulo). FGVces – Centro de Estudos em Sustentabilidade. **Classificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 1 nas respectivas categorias de fontes de emissão**: versão 2. São Paulo: FGVces, 2016. 4 p.

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.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do Eucalyptus spp**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2004.

REZENDE, M. E.; CARAZZA, F.; SAMPAIO, R.; GONÇALVES, R. R. EVOLUÇÃO DO MERCADO DE SUBPRODUTOS DA CARBONIZAÇÃO. In: SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO DE CARVÃO VEGETAL, 1., 2004, Belo Horizonte. **Trabalho de Congresso.** Belo Horizonte: Sociedade de Investigações Florestais, 2004. p. 1-13.

RODRIGUES, T. I.. **Diagnóstico Ambiental Da Produção De Carvão Vegetal No Município De Tabaí –Rs**. 2016. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

ROWELL, R. M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. New York: Taylor & Francis Group, 2005.

ROY, P.; DIAS, G. Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, United Kingdom, n.77, p. 59-69, Sept. 2017.

SANTOS, S.de F. de O. M.. **Modelo Ambiental E Econômico De Produção De Carvão Vegetal**. 2017. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017

SANTOS, S. de F. de O. M.; HATAKEYAMA, K.. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Production**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 309-321, 6 mar. 2012.

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, 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.

SHEN, R.; GU, S.; BRIDGWATER, A. V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicelluloses. **Carbohydrate Polymers**, v.82, p. 39-45, 2010.

SILVA, A. F. da; VIEIRA, C. A.. Aspectos da poluição atmosférica: uma reflexão sobre a qualidade do ar nas cidades brasileiras. **Ciência e Sustentabilidade - Ces**, Juazeiro do Norte, v. 3, n. 1, p. 166-189, jan-jun/2017.

SILVA, C. M *et al.* Speciation Analysis of Ozone Precursor Volatile Organic Compounds in the Air Basins of the Rio de Janeiro Metropolitan Area. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 1887-1909, 2017.

SILVA, M. A. da. **Estudo das concentrações de compostos orgânicos voláteis na cidade de Nilópolis e no parque natural do Gericinó, Rio de Janeiro, Brasil**. 2019. 266 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SILVA, R. L. da; SEYE, O.; PATELLI JUNIOR, J. R.. Carvão vegetal de madeiras nativas do Cerrado em aplicações siderúrgicas e energéticas. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 4, n. 14, p. 1-17, ago. 2020.

SINDIFER. **Anuário estatístico 2021**. 52 p. Minas Gerais: Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais, 2021.

SNIF, Sistema Nacional de Informações Florestais. **As Florestas Plantadas**. 2020. Disponível em: https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-plantadas/405-as-florestas-plantadas. Acesso em: 01 jul. 2022.

SOARES, P. L.. **Avaliação Dos Dados De Monitoramento De Qualidade Do Ar De Duas Estações Fixas De Belo Horizonte**: ano base 2019. 2021. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.38, n.3, p. 543-549, Set. 2014.

TRINDADE, B. T. **Quantificação dos Aerossóis Atmosféricos e a Influência dos Principais Sistemas Meteorológicos Atuantes na Região da Grande Vitória/ES: Um Estudo de Caso Para o Inverno de 2013**. 2013. 90 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Ambiental) –Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2013.

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

UNDP, Brasil (org.). **Projeto Siderurgia Sustentável**. 2022. Disponível em: https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/projects/SiderurgiaSustentvel.html. Acesso em: 10 jan. 2022.

VEIGA, T. R. L. A.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; DESSIMONI, A. L.; ROCHA, M. F. V. Propriedades mecânicas de amostras individualizadas da madeira e do carvão de Eucalyptus urophylla e de Corymbia citriodora. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.46, n. 117, p. 107-114, Abril. 2018.

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.

YANG, H. *et al.* Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, London, v. 86, n. 12-13, p. 1781–1788, Jan. 2007.

APÊNDICE A

Tabela das temperaturas do forno em um ciclo de carbonização fornecida pela BIO & IND – Biocarbo e Indústria e Tecnologias de Carbonização LTDA

Data	Hora	Tempo do forno (horas corridas)	Temperatura (ºC)
10/10/2022	20:00	1	36,37
11/10/2022	00:00	5	41,87
11/10/2022	04:00	9	119,07
11/10/2022	08:00	13	119,97
11/10/2022	12:00	17	122,00
11/10/2022	16:00	21	124,97
11/10/2022	20:00	25	131,37
12/10/2022	00:00	29	138,60
12/10/2022	04:00	33	150,05
12/10/2022	08:00	37	154,55
12/10/2022	12:00	41	156,52
12/10/2022	16:00	45	168,32
12/10/2022	20:00	49	172,30
13/10/2022	00:00	53	176,90
13/10/2022	04:00	57	181,45
13/10/2022	08:00	61	-
13/10/2022	12:00	65	290,00
13/10/2022	16:00	69	-
13/10/2022	20:00	73	277,00
14/10/2022	00:00	77	291,50
14/10/2022	04:00	81	290,00
14/10/2022	08:00	85	285,50
14/10/2022	12:00	89	280,00
14/10/2022	16:00	93	274,50
14/10/2022	20:00	97	275,00
15/10/2022	00:00	101	-
15/10/2022	04:00	105	267,50
15/10/2022	08:00	109	-
15/10/2022	12:00	113	260,25
15/10/2022	16:00	117	-
15/10/2022	20:00	121	139,95
16/10/2022	00:00	125	-
16/10/2022	04:00	129	137,20
16/10/2022	08:00	133	-
16/10/2022	12:00	137	127,60
16/10/2022	16:00	141	-
16/10/2022	20:00	145	125,40
17/10/2022	00:00	149	-
17/10/2022	04:00	153	122,95
17/10/2022	08:00	157	-
17/10/2022	12:00	161	120,10
17/10/2022	16:00	165	-
17/10/2022	20:00	169	112,05

APÊNDICE B

Formulário de identificação de práticas sustentáveis no processo produtivo de carvão vegetal

Práticas Circulares Identificadas	**Descrição**	**Estrutura RESOLVE**	**Indicador Circular**	**Abrangência**
Práticas realizadas				
Ecodesign do recuperador de fumaça	O recuperador de fumaça já utilizado no processo de carbonização foi especialmente projetado para tornar a condensação de biocarboquímicos em fornos de alvenaria retangulares possível em escala industrial. Também é aplicável ao Princípio 3 de minimização de perdas e externalidades negativas	☐ Regenerar ☐ Compartilhar ☒ Otimizar ☒ Ciclar ☐ Virtualizar ☐ Trocar	☐ Fluxo de materiais ☒ Eficiência dos materiais ☐ Ciclo de Vida do Produto ☐ Impacto Ambiental	☒ Micro ☐ Meso ☐ Macro
Utilização de madeira reflorestada	A biomassa vegetal utilizada para a produção do carvão é renovável e diminui o consumo de matérias-primas finitas e está totalmente relacionado ao Princípio 1 da Economia Circular.	☒ Regenerar ☐ Compartilhar ☐ Otimizar ☐ Ciclar ☐ Virtualizar ☒ Trocar	☒ Fluxo de materiais ☐ Eficiência dos materiais ☐ Ciclo de Vida do Produto ☐ Impacto Ambiental	☐ Micro ☐ Meso ☒ Macro
Recuperação de biocarboquímicos	Aplicação do segundo princípio da Economia Circular, aumentando a utilidade de um produto através da reciclagem e remanufatura. Além disso representa o fluxo de materiais circular, agregando valor a resíduos.	☒ Regenerar ☒ Compartilhar ☒ Otimizar ☒ Ciclar ☐ Virtualizar ☒ Trocar	☐ Fluxo de materiais ☐ Eficiência dos materiais ☐ Ciclo de Vida do Produto ☒ Impacto Ambiental	☒ Micro ☐ Meso ☐ Macro
Aplicação de coprodutos em outras indústrias	Extensão da vida e ciclo biológico e ciclo técnico dos coprodutos que são úteis como fertilizantes para o solo (extrato pirolenhoso) e combustíveis (alcatrão), respectivamente.	☒ Regenerar ☒ Compartilhar ☐ Otimizar ☒ Ciclar ☐ Virtualizar ☐ Trocar	☐ Fluxo de materiais ☐ Eficiência dos materiais ☒ Ciclo de Vida do Produto ☐ Impacto Ambiental	☐ Micro ☒ Meso ☐ Macro
Reutilização de tiços como material para ignição	Aplicação do segundo princípio da Economia Circular, aumentando a utilidade de um produto através do reuso e da redistribuição.	☐ Regenerar ☒ Compartilhar ☐ Otimizar ☒ Ciclar ☐ Virtualizar ☐ Trocar	☐ Fluxo de materiais ☒ Eficiência dos materiais ☐ Ciclo de Vida do Produto ☐ Impacto Ambiental	☒ Micro ☐ Meso ☐ Macro

Práticas Circulares Identificadas	Descrição	Estrutura RESOLVE	Indicador Circular	Abrangência
Práticas em potencial				
Utilização de fornos de carbonização com elevada eficiência	Os fornos de alvenaria retangulares possuem taxa de conversão medianas devido à perda de calor durante o processo. Projetar fornos com materiais refratários melhores, aumentaria a eficiência do processo e consequente diminuição das emissões.	☒ Regenerar ☐ Compartilhar ☒ Otimizar ☐ Ciclar ☐ Virtualizar ☒ Trocar	☐ Fluxo de materiais ☒ Eficiência dos materiais ☐ Ciclo de Vida do Produto ☐ Impacto Ambiental	☐ Micro ☒ Meso ☐ Macro
Geração de energia com os gases não condensáveis	Os gases não condensáveis oriundos da carbonização vegetal possuem elevado poder calorífico e quando queimados em ambiente controlado podem gerar energia térmica e ou elétrica aplicáveis no próprio fluxo ou abatimento de consumo de energia do empreendimento.	☒ Regenerar ☐ Compartilhar ☒ Otimizar ☐ Ciclar ☐ Virtualizar ☒ Trocar	☐ Fluxo de materiais ☐ Eficiência dos materiais ☐ Ciclo de Vida do Produto ☒ Impacto Ambiental	☐ Micro ☒ Meso ☐ Macro
Reutilização da água para resfriamento do sistema	O sistema já é resfriado com água, porém como o produto recuperado tem alto teor de água, é possível por meio de destilação, recuperá-la e reutilizá-la no sistema. Desta forma o consumo de água seria reduzido.	☐ Regenerar ☐ Compartilhar ☒ Otimizar ☒ Ciclar ☐ Virtualizar ☐ Trocar	☒ Fluxo de materiais ☐ Eficiência dos materiais ☐ Ciclo de Vida do Produto ☐ Impacto Ambiental	☒ Micro ☐ Meso ☐ Macro
Concentração do extrato pirolenhoso	Recuperação de água e diminuição de frascos para transporte (diminuição dos gastos) e uso de plásticos para transporte	☐ Regenerar ☒ Compartilhar ☒ Otimizar ☒ Ciclar ☐ Virtualizar ☐ Trocar	☐ Fluxo de materiais ☒ Eficiência dos materiais ☐ Ciclo de Vida do Produto ☐ Impacto Ambiental	☐ Micro ☒ Meso ☐ Macro