

Avaliar e quantificar as reduções de emissões indiretas de gases de efeito estufa (GEE) das propostas apoiadas pelo PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD) através do Projeto Siderurgia Sustentável

PRODUTO II

Definição do Escopo de Avaliação das Emissões Indiretas de GEE

Projeto Siderurgia Sustentável
Setembro 2021



CLIENTE**ENTREGÁVEL**

Produto II – Definição do Escopo de Avaliação das Reduções Indiretas de Emissão de GEE

AUTORES

WAYCARBON

Bruna Dias; bruna.dias@waycarbon.com

Raphael Miranda; raphael.miranda@waycarbon.com

Luana Ribeiro; luana.ribeiro@waycarbon.com

Patricia Merola; patricia.merola@waycarbon.com

Gilberto Caldeira; gilbame@gmail.com

HISTÓRICO DO DOCUMENTO

Nome do documento	Data	Natureza da revisão
PNUDE21A_210910_Produto 2_v1	10/09/2021	Primeira versão.
PNUDE21A_210913_Produto 2_v2	13/09/2021	Segunda versão. Adequações solicitadas pelo PNUD

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVOS	6
3. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	7
3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PRINCIPAIS ROTAS TECNOLÓGICAS DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL.....	7
3.1.1 FORNOS DE ALVENARIA	9
3.1.2 RETORTA DE CARBONIZAÇÃO CONTÍNUA	14
3.1.3 TECNOLOGIA DE FORNOS CONTAINER RIMA (FCR)	15
3.1.4 FORNOS BRICARBRAS.....	16
3.1.5 TECNOLOGIA DRYING, PYROLISIS, COOLING (DPC).....	16
3.1.6 TECNOLOGIA DE CARBONIZAÇÃO CONTÍNUA CARBOVAL	17
3.2 ANÁLISE DOS PROCESSOS TECNOLÓGICOS DAS EMPRESAS CONTEMPLADAS NO ESTUDO	18
3.2.1 ARCELORMITTAL.....	18
3.2.2 PLANTAR FLORESTAL.....	19
3.2.3 RIMA	20
3.2.4 VALLOUREC	22
3.2.5 RESUMO DAS REDUÇÕES DAS EMISSÕES DIRETAS ALCANÇADAS PELOS PROJETOS IMPLANTADOS NO ÂMBITO DO EDITAL JOF 0191/2017.....	23
4. LEVANTAMENTO PRELIMINAR DAS ATIVIDADES QUE SERÃO AVALIADAS	24
4.1 ETAPAS PARA A QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO E REMOÇÃO DE GEE.....	24
4.2 DEFINIÇÃO DAS FRONTEIRAS	25
4.2.1 GASES DE EFEITO ESTUFA.....	25
4.3 MAPEAMENTO DAS FONTES DE EMISSÕES INDIRETAS DO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO	26
4.3.1 FONTES E SUMIDOUROS DE EMISSÕES NÃO CONSIDERADOS NESSE ESTUDO.....	27
4.4 METODOLOGIAS	28
4.4.1 AQUISIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	28
4.4.2 COMBUSTÃO MÓVEL (TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO)	28
4.4.3 RESÍDUO SÓLIDOS	29
4.4.4 EMISSÕES <i>UPSTREAM</i> ASSOCIADAS AO USO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS	30
4.5 ANÁLISE DAS METODOLOGIAS APLICÁVEIS PARA CADA PROCESSO TECNOLÓGICO CONTEMPLADO NO ESTUDO	31
4.5.1 ARCELORMITTAL.....	31
4.5.2 PLANTAR FLORESTAL.....	32
4.5.3 RIMA	33
4.5.4 VALLOUREC	34
5. PRÓXIMAS ETAPAS.....	36
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fornos cilíndricos de alvenaria do tipo “rabo quente”	10
Figura 2: Forno de encosta.....	11
Figura 3: Forno de superfície.....	12
Figura 4: Forno retangular de alvenaria modelo RAC700.....	13
Figura 5: Sistema forno-fornalha.....	14
Figura 6: Retorta Contínua.....	15
Figura 7: Forno FCR.....	15
Figura 8: Forno Bricarbras.....	16
Figura 9: Tecnologia DPC.....	17
Figura 10: Reator de carbonização contínua Carboval.....	18
Figura 11: Fluxograma de etapas metodológicas para a realização da quantificação das emissões indiretas	24
Figura 12: Fronteiras do Estudo.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das reduções das Emissões Diretas alcançadas	23
Tabela 2: GWP dos Gases de Efeito Estufa	26
Tabela 3: Fontes de emissão de acordo com etapa, categoria e dado controlado.....	27
Tabela 4: Detalhamento dos Produtos e Atividades a serem entregues no Produto 03	36
Tabela 5: Detalhamento dos Produtos e Atividades a serem entregues no Produto 04	37

LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

AFOLU – *Agriculture, Forestry and Other Land Use*

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

GEE – Gases de Efeito Estufa

GLP – Gás liquefeito de petróleo

GPC – *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories*

GWP - *Global Warming Potential*

IPCC – *Intergovernmental Pannel on Climate Change*

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*

WRI – World Resources Institute

1. INTRODUÇÃO

A WayCarbon, foi contratada pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) através do Termo de Referência da licitação JOF-0191/2017 para prestação de serviços técnicos especializados para coordenação e execução das atividades referentes à “Quantificação das emissões indiretas de gases de efeito estufa (GEE) das propostas apoiadas pelo Projeto Siderurgia Sustentável”.

Nesse estudo foram contemplados os projetos realizados pelas empresas; ArcelorMittal, Plantar Florestal, Rima e Vallourec.

Este relatório corresponde ao Produto 2 – Definição do escopo da avaliação das emissões indiretas. Após a condução de reuniões com os representantes das empresas para melhor compreensão dos processos, foram identificados gargalos, dificuldades e oportunidades para melhoria do projeto. Assim, o presente relatório busca incluir os principais pontos abordados nas reuniões e estruturar as metodologias aplicáveis ao cálculo de emissões indiretas dos projetos contemplados. Os cálculos serão apresentados no produto 3.

A estrutura desse produto e os capítulos em que cada um dos itens pode ser encontrado ao longo desse relatório estão listados abaixo:

- **Capítulo 1 – Introdução:** Apresenta o conteúdo e a estrutura do presente relatório;
- **Capítulo 2 – Objetivos:** Exposição clara e sucinta do objetivo geral e objetivos específicos do projeto;
- **Capítulo 3 – Contextualização:** Apresenta uma descrição das principais rotas tecnológicas disponíveis para a produção de Carvão Vegetal e uma análise dos processos tecnológicos adotados pelas empresas contempladas no estudo.
- **Capítulo 4 - Metodologias:** Detalhamento de todas as emissões indiretas das propostas apoiadas pelo Projeto Siderurgia Sustentável, descrição de todas as informações que serão necessárias para a quantificação das emissões, exposição da metodologia para quantificação das emissões e premissas adotadas;
- **Capítulo 5 – Próximas etapas:** apresenta uma descrição concisa dos objetivos e atividades a serem desenvolvidas durante o projeto;
- **Capítulo 6 - Referências Bibliográficas:** Fontes de onde foram retiradas as informações desse trabalho.

2. OBJETIVOS

Quantificar as emissões indiretas de gases de efeito estufa (GEE) das propostas apoiadas pelo Projeto Siderurgia Sustentável no âmbito do mecanismo de apoio com pagamento por desempenho. Além de ser uma oportunidade para fortalecer novos investimentos na produção sustentável de carvão vegetal, o desenvolvimento deste estudo visa ampliar a análise de quantificação das emissões, possibilitando uma visão mais ampla da cadeia de produção siderúrgica e tornando-a mais competitiva.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO

3.1 Caracterização das principais rotas tecnológicas de produção de carvão vegetal

A América latina é um importante produtor de carvão vegetal. O continente está em segundo lugar, depois apenas da África, em uso total e per capita de carvão vegetal, sendo o Brasil o maior produtor mundial de carvão, responsável por 12% da produção global de 2015 (6,2 Mt). Diferentemente da África, por exemplo - onde o carvão vegetal é utilizado principalmente para consumo doméstico - na América Latina, o uso de carvão vegetal se dá principalmente pelo consumo industrial. No Brasil, mais de 90% do carvão vegetal é usado no setor industrial, com destaque para as indústrias metalúrgicas e de siderurgia (FAO, 2017).

Um importante uso do carvão vegetal se dá na rota siderúrgica integrada. A produção de aço utiliza como insumos principais minério de ferro, carvão (mineral ou vegetal), sucata e energia elétrica, dependendo da rota tecnológica adotada.

A indústria siderúrgica mundial é caracterizada por duas rotas tecnológicas principais: as usinas integradas a coque e as usinas semi-integradas (mini-mills). As usinas integradas a coque têm a transformação do minério de ferro e do aço em uma única unidade industrial, sendo composta pelas etapas de redução (fabricação do ferro-gusa), refino (produção e resfriamento do aço) e transformação mecânica (produtos siderúrgicos para comercialização). Já as usinas semi-integradas não possuem a etapa de redução, iniciando o processo na aciaria, com a utilização principalmente de sucata ferrosa na como insumo. Há também uma terceira rota, menos difundida mundialmente, a chamada usina integrada à redução direta (RD), que possui as três etapas de redução, refino e transformação mecânica, porém na etapa de redução, ao invés de sinterização, coqueria e alto-forno, utilizam-se módulos de redução direta e, na fase de refino, utiliza aciaria elétrica (CGEE, 2010).

No contexto brasileiro, tem-se a utilização de usina integrada a coque, semi-integrada, integrada à redução direta, integrada à carvão vegetal e produtora independente de ferro gusa à base de alto-forno e carvão vegetal. A utilização de carvão vegetal ao invés de carvão mineral é uma peculiaridade da siderurgia brasileira (CGEE, 2010).

Na rota integrada, o coque mineral ou, alternativamente, o carvão vegetal, são utilizados nos Altos Fornos como redutor principal da carga metálica (minério de ferro, pelotas, sínter e outros) gerando como produto o ferro-gusa, escória e o gás de alto forno. A escória é um resíduo ou um subproduto de inúmeras finalidades, dentre elas, a utilização para pavimentação de vias e fabricação de cimento, e o gás de alto-forno, combustível que é destinado à central termelétrica para geração de energia elétrica ou é utilizado no processo para geração de calor e pré-aquecimento do ar.

De acordo com Vale e Gentil (2008) apud Oliveira (2012), a carbonização da madeira tem por objetivo a eliminação, por meio da ação do calor, da maior parte do oxigênio e do hidrogênio presente na madeira,

restando um produto com elevada concentração de carbono, denominado por carvão vegetal. Trata-se de um processo de decomposição térmica físico-química irreversível que ocorre em um ambiente fechado (forno) com baixa concentração ou exclusão total de oxigênio. O processo se inicia com a secagem da biomassa, seguida da fase de pirólise, e resulta na geração de gases condensáveis e não condensáveis, além do carvão vegetal (PINHEIRO *et al.*, 2006 apud SANTOS, 2017).

A biomassa se decompõe durante a pirólise para gerar gases, vapores, aerossóis e carvão. Os processos de carbonização geralmente usados no Brasil visam apenas a produção de carvão vegetal, os demais produtos não são aproveitados, e quase sempre descartados no meio ambiente sem controle. Em alguns tipos de reatores, ainda pouco usados no Brasil, pode-se fazer a queima dos gases e vapores gerados no processo, com ou sem aproveitamento da energia térmica gerada, para controle de emissões atmosféricas de GEE e poluentes. Outra opção, ainda menos comum no Brasil, é a bio-refinaria, que promove o resfriamento e condensação dos vapores e aerossóis, formando-se um líquido constituído por duas fases, sendo uma das fases de base orgânica (bio-óleo) e a outra de base aquosa (ácido pirolenhoso). As proporções de carvão vegetal, bio-óleo e gás produzidos dependem do processo de pirólise adotado, das espécies de madeira, teor de umidade e tamanho da lenha.

As etapas do processo de carbonização podem ser classificadas de acordo com a faixa de temperatura a qual a madeira é submetida. Em temperaturas entre 100°C e 200°C, ocorre a secagem da madeira através de processo endotérmico. Entre 200°C e 280°C, ainda em reação endotérmica, isto é, que absorve calor, ocorre a liberação de ácido acético, metanol, H₂O e CO₂, entre outros. Na faixa de 280°C a 500°C, a reação passa a ser exotérmica (libera calor) e ocorre liberação de gases como CO₂, CH₄ e alcatrões. Acima de 500°C ocorre liberação de pequenas quantidades de gases voláteis, especialmente o H₂ (TRUGILHO *et al.*, 2001 apud OLIVEIRA, 2012).

De acordo com Oliveira (2012), o rendimento gravimétrico é a relação entre a massa de carvão vegetal produzida e a massa de madeira utilizada, em base seca. Esse rendimento é influenciado pelas características da madeira utilizada como matéria-prima, tipo de tecnologia empregada (tipos de fornos) e pelo nível de controle operacional disponível (controle da temperatura, controle da vazão de alimentação de ar, taxa de aquecimento, tempo de exposição da madeira ao calor e outros parâmetros).

Na carbonização da madeira, dentre todos os gases e vapores que são emitidos diretamente para a atmosfera, apenas o CO₂ e o metano (CH₄) são gases de efeito estufa para os quais existem um potencial de aquecimento global (GWP) definidos pelo IPCC. O potencial de aquecimento global do CH₄, de acordo com a UNFCCC (valor para o segundo período de compromisso do Protocolo de Kyoto) é de 25 vezes a emissão do CO₂. Ou seja, cada tonelada de CH₄ emitida na atmosfera contribui para o aquecimento global em uma intensidade equivalente a 25 toneladas de CO₂. Entretanto, quando a madeira usada como matéria prima é de origem renovável, o CO₂ pode ser considerado neutro (emissões

zero), restando apenas o CH₄ como GEE a ser controlado para que o processo seja considerado neutro do ponto de vista climático.

O teor de GEE e o volume de gás gerado no processo, variam de acordo com a rota tecnológica de carbonização escolhida (BAILIS, 2009 apud SANTOS, 2017) e ainda é uma prática comum o lançamento dos gases da pirólise da madeira na atmosfera (BAILIS *et al.*, 2013 apud SANTOS, 2017). Outras emissões atmosféricas importantes da carbonização são o monóxido de carbono (CO), os compostos orgânicos voláteis (aldeídos, cetonas, fenóis e outros), que contribuem para degradação da qualidade do ar local e regional (precursores importantes do ozônio troposférico), mas que não são enquadrados como GEE.

Medidas simples na produção de carvão vegetal podem gerar grandes reduções de emissões de GEE e outros gases/vapores. A formação do metano, que é o único GEE da carbonização, é diretamente correlacionada com o rendimento gravimétrico do processo: quanto maior o percentual de conversão da madeira em carvão vegetal, menor é a formação de gases e vapores, e, portanto, menor será a formação do metano. As metodologias de cálculo de emissões em processos de carbonização no UNFCCC CDM são baseadas no rendimento gravimétrico. Com base em dados da literatura e modelagem, verifica-se que a adoção de mudança de fornos tradicionais para fornos modernos mais eficientes poderia reduzir as emissões de GEE. Ainda, a melhoria de tecnologia, combinando a produção de carvão à queima de gases para cogeração de calor ou eletricidade, ou a condensação de vapores com aproveitamento dos produtos líquidos condensáveis, poderia contribuir ainda mais na redução das emissões (FAO, 2017).

Apesar de ainda serem tecnologias emergentes, grandes empresas brasileiras com processos dependentes do carvão vegetal têm investido em pesquisa e desenvolvimento na busca por tecnologias que sejam capazes de obter maior rendimento da madeira, maior homogeneidade do carvão, menor tempo no processo de produção e ganho de escala, além do aproveitamento dos gases da pirólise para cogeração de energia elétrica (VILELA *et al.*, 2014 apud SANTOS, 2017).

As principais tecnologias utilizadas no Brasil para a produção de carvão vegetal são apresentadas a seguir:

3.1.1 Fornos de Alvenaria

A produção brasileira de carvão vegetal ocorre em sua maioria com a utilização de fornos de alvenaria (OLIVEIRA, 2012). Os pequenos e médios produtores, responsáveis por cerca de 80% da produção de carvão vegetal no país, utilizam principalmente fornos de alvenaria dos tipos; “rabo quente”, superfície e encosta.

Forno “rabo quente”

O modelo “rabo quente” é o mais simples entre os fornos de alvenaria e o mais difundido dentre os pequenos produtores, pois é um modelo de baixo custo e fácil manuseio. O controle da carbonização é realizado de forma subjetiva, baseando-se principalmente na coloração dos gases liberados no processo, o que dificulta o controle de temperatura interna do forno e, conseqüentemente, a qualidade do carvão produzido (OLIVEIRA, 2021).

Os fornos circulares de alvenaria possuem capacidades de processamento de madeira que variam de 7 m³ (fornos tipo rabo quente) a 70 m³ (fornos cilíndricos de sete metros de diâmetro) de volume sólido, ou de 4 a 40 toneladas de madeira base seca. Este tipo de tecnologia possui ciclo total de carbonização variando entre sete e doze dias (fornos tipo rabo quente e circular, respectivamente), rendimento gravimétrico entre 24% e 29%, capacidade individual de produção que varia de 50 toneladas (rabo quente) a 350 toneladas (cilíndrico) de carvão vegetal por ano (CGEE, 2015).

Esses fornos não possuem em sua concepção um sistema auxiliar para combustão dos gases gerados no processo. Por isso, o GEE metano é gerado sem controle e emitido na atmosfera.



Figura 1: Fornos cilíndricos de alvenaria do tipo “rabo quente”.

Fonte: CGEE, 2015.

Forno de encosta

Diferentemente do forno “rabo quente”, o forno de encosta é utilizado em regiões de topografia acidentada, pois ele aproveita o desnível do terreno, apoiando a cúpula sobre a borda do terreno, que assume a função de parede do forno. As entradas de ar são posicionadas na cúpula (MENDES *et al.*, 1982 apud OLIVEIRA, 2012).

Esse modelo de forno possui rendimento gravimétrico de 32% e ciclo de carbonização de cinco a nove dias (BAR FILHO, 2008 apud OLIVEIRA 2012). A elevação do rendimento desse modelo de forno comparado a outros fornos de alvenaria, se justifica pelo contato direto de parte do forno com o solo, o

que resulta em menores perdas térmicas para o ambiente. Por outro lado, o resfriamento ocorre mais lentamente, o que aumenta o ciclo de produção.

Esses fornos, não possuem em sua concepção um sistema auxiliar para combustão dos gases gerados no processo. Por isso, o GEE metano é gerado e emitido sem controle.

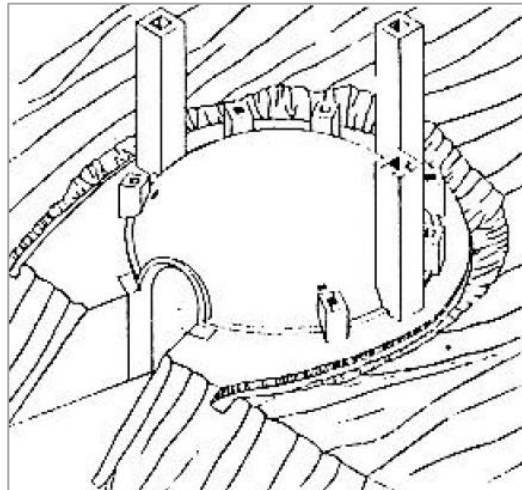


Figura 2: Forno de encosta.

Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais, 2015 apud Brito, 1990.

Forno de superfície

A estrutura do forno de superfície se assemelha ao forno “rabo quente” com a diferença que há a presença de uma chaminé lateral para a retirada dos gases gerados durante a carbonização da biomassa. As entradas de ar encontram-se na parede e na cúpula do forno. Este modelo apresenta melhores condições para a propagação da carbonização, que acaba ocorrendo com mais homogeneidade e maior controle do operador. Desta forma, apresenta também melhor rendimento gravimétrico, comparado a outros modelos de fornos de alvenaria, entre 28% e 34% (OLIVEIRA, 2015).

Há também a versão do forno de superfície com câmara de combustão externa, que tem por objetivo realizar a queima de uma certa quantidade de material para a secagem da madeira e acendimento do forno. Com esse processo, a carbonização pode ser controlada pela quantidade de ar que entra pela câmara de combustão. Assim, não ocorre a queima no interior do forno e há um melhor aproveitamento do espaço interno, melhorando o rendimento gravimétrico (OLIVEIRA, 2015).

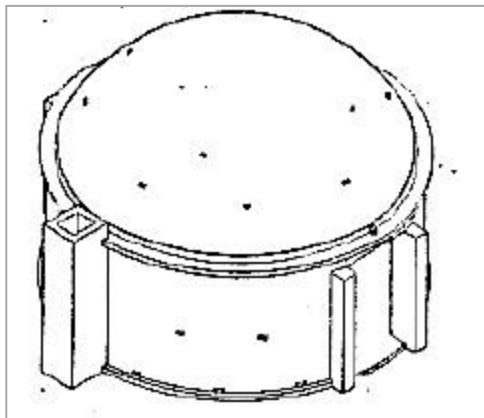


Figura 3: Forno de superfície.

Fonte: Centro Tecnológico de Minas Gerais, 2015 apud Brito, 1990.

Forno retangular

A partir de 1980, grandes empresas do setor siderúrgico iniciaram a construção de grandes fornos retangulares de alvenaria com o objetivo de mecanizar as operações de carregamento da lenha e retirada do carvão dos fornos, utilizando pás carregadeiras. Estas modificações objetivaram o aumento de produtividade e a melhoria das condições de trabalho dos operadores. Os fornos retangulares possuem capacidade de processamento de madeira que variam de 150 m³ para fornos FR190 (fornos retangulares de 13 metros de comprimento e 4 metros de largura) a 450 m³ de volume sólido para fornos RAC700 (fornos retangulares de 26 metros de comprimento e 8 metros de largura), correspondentes a 80 a 250 toneladas de madeira (base seca), respectivamente.

Embora existam tecnologias que melhorem a qualidade do carvão produzido por esse tipo de forno, devido ao seu tamanho, esse tipo de forno possui uma cinética de carbonização bastante irregular em seu interior, produzindo um carvão com qualidade química e física muito variável (SAMPAIO *et al.*, 2016).

Os fornos de FR190 possuem ciclo total de produção médio de 13 dias, o rendimento gravimétrico variando entre 32% e 35% e capacidades de produção média de 750 toneladas de carvão vegetal por ano. Já os fornos RAC700, possuem ciclo total de produção médio de 18 dias, o rendimento gravimétrico variando entre 32% e 35% e capacidades de produção média de 2.000 toneladas de carvão vegetal por ano, quando equipados com tecnologias para controle de temperaturas, vazão de ar e *softwares* de gerenciamento do processo de carbonização (CGEE, 2015).



Figura 4: Forno retangular de alvenaria modelo RAC700.

Fonte: Aperam Bioenergia, 2016

Forno Fornalha (MF1-UFV)

O forno MF1-UFV, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa em parceria com a empresa ArcelorMittal Bioenergia, é um forno retangular acoplado a uma fornalha para combustão dos gases gerados no processo de carbonização. A entrada de ar ocorre por quatro aberturas de cada lado do forno e o controle da carbonização é realizado por termopares instalados na cúpula do forno. Possui rendimento gravimétrico médio de 29%, ciclo de carbonização médio de 5 dias e teores de atíço e finos de carvão menores que 4% (OLIVEIRA, 2015).

Segundo Magalhães (2007) apud Oliveira (2015), as fornalhas são projetadas visando a maior eficiência da combustão e possibilidade de aproveitamento da energia térmica liberada durante o processo de combustão. Os queimadores incineram os gases gerados no processo de carbonização, transformando gases e vapores poluentes em energia na forma de calor. Assim, na carbonização da madeira são gerados gases não condensáveis como CO, CO₂, H₂ e CH₄ e vapores condensáveis que são mantidos em fase gasosa pelas temperaturas elevadas nos dutos em seu percurso até o queimador. Com a queima completa desses gases, as emissões seriam constituídas apenas por CO₂ e vapor d'água (OLIVEIRA, 2015). O processo reduz a emissão de metano (CH₄) em 94% e as emissões de monóxido de carbono (CO) em 97%.



Figura 6: Retorta Contínua.

Fonte: Daniel Barcellos, 2020.

3.1.3 Tecnologia de Fornos Container Rima (FCR)

São fornos cilíndricos metálicos, desenvolvidos pela empresa Rima Industrial S/A (MG), com início em 2001, possuindo capacidade de processamento de 5 m³ por fornada, velocidade de conversão de 5 kg/h e rendimento gravimétrico variando entre 25 e 28%. Com o passar dos anos e de estudos de otimização e melhoria, a versão mais atual (5ª versão) possui capacidade industrial de 52 m³, velocidade de conversão de 700 kg/h e rendimento gravimétrico superior a 35%.

O forno FCR é alimentado com cavacos de madeira. Utilizam-se pás carregadeiras para abastecimento do silo e a carbonização ocorre por exaustão forçada. A energia necessária para o processo é obtida da queima das fumaças no interior do forno. Como o processo ocorre com elevada taxa de aquecimento, a formação de gases é facilitada, com isso, a combustão ocorre mais facilmente que em comparação com a madeira sólida (CGEE, 2015).



Figura 7: Forno FCR.

Fonte: CGEE, 2015.

3.1.4 Fornos Bricarbras

Este modelo de forno foi desenvolvido pela empresa Bricarbras e trata-se de fornos de cilindros metálicos que se movem pela unidade de produção via pontes rolantes. O sistema utiliza para pré-secagem a queima de fumaças provenientes da carbonização em fornalhas de alvenaria. O carregamento da madeira é manual e a descarga do carvão é mecanizada. Os fornos são equipados com controle de temperatura e o rendimento gravimétrico médio é de 33%. Este tipo de tecnologia possui, porém, algumas barreiras como alto custo de investimento, carga ainda manual da madeira e valor do custo operacional superior a valores obtidos para os fornos retangulares. Precisaria comercializar subprodutos como alcatrão e pirolenhoso para se tornar competitivo economicamente (CGEE, 2015).



Figura 8: Forno Bricarbras.

Fonte: CGEE, 2015.

3.1.5 Tecnologia Drying, Pyrolysis, Cooling (DPC)

Tecnologia desenvolvida pela empresa DPC *Thermal Processing*. O processo DPC consiste em fornos retangulares metálicos equipados com uma ou duas caçambas em estrutura de chapa de aço carbono (capacidade em torno de 24 m³ de madeira por caçamba), que recebem gases obtidos da queima das fumaças da carbonização da madeira através de um queimador projetado para este tipo de forno. Para a produção do carvão vegetal ocorre primeiramente a torrefação da madeira, na qual a umidade é reduzida a menos de 10%. Em seguida, ocorre o processo de pirólise e ao final, o resfriamento total do carvão. Os gases resultantes da pirólise são utilizados como fonte de energia, o que aumenta os índices de rendimento gravimétrico e produz um carvão de qualidade química bem mais homogênea que os processos em fornos de alvenaria e combustão parcial interna. Este tipo de tecnologia também apresenta algumas barreiras para implantação, sendo a principal delas a falta de uma planta operando em larga escala ou mesmo em uma escala mínima que possa oferecer um custo-benefício competitivo com o mercado de produção de carvão (CGEE, 2015).



Figura 9: Tecnologia DPC.

Fonte: CGEE, 2015.

3.1.6 Tecnologia de Carbonização Contínua Carboval

Utilizando como referência o processo Lambiotte, a empresa Vallourec desenvolveu o processo de carbonização contínua denominado Tecnologia de Carbonização Contínua Carboval. Segundo Sampaio *et al.* (2016), para a produção de carvão vegetal por este método, utiliza-se a madeira em toretes de 20 cm de comprimento, que são levadas diretamente para o pátio pavimentado da planta industrial, onde acontecem, em sequência: a secagem dos toletes até o atingimento de níveis de umidade de aproximadamente 30% em base seca (essa secagem dura em média 30 dias e é realizada de maneira artificial, utilizando o calor sensível dos gases gerados no processo de carbonização). A carbonização e o resfriamento primário ocorrem no mesmo forno, já o resfriamento secundário ocorre em silos externos que possuem dupla função; passivação do carvão vegetal e armazenamento para posterior carregamento por gravidade nos caminhões que o levarão para a siderurgia.

No reator Carboval, o processo é automatizado, permitindo o controle da temperatura e vazão dos gases recirculados, tempo de carbonização etc., tornando possível o ajuste do processo de forma a obter-se rendimento gravimétrico e parâmetros de qualidade desejados para o carvão vegetal siderúrgico. O carvão produzido por este modelo de forno possui grande homogeneidade das qualidades físicas e químicas, uma vez que todas as peças de madeira são submetidas às mesmas condições de tempo e temperatura dentro do forno. Outros dois pontos também reforçam a competitividade deste sistema: O aproveitamento dos resíduos florestais e do material volátil da madeira para termogeração, que traz a possibilidade de redução expressiva dos custos produtivos através de crédito com a venda de energia elétrica e a redução de consumo específico de carvão vegetal nos altos fornos, que reduz os custos de produção do ferro gusa.

Possui um ciclo de produção de 40 horas, sendo distribuído em: 10 horas de carbonização, 6 horas de resfriamento primário e 24 horas de resfriamento secundário. Alcançam uma produção de aproximadamente 22 t/ dia. O rendimento gravimétrico para esta tecnologia é de 42% (SAMPATIO *et al.*, 2016).



Figura 10: Reator de carbonização contínua Carboval.

Fonte: Sampaio *et al.*, 2016.

3.2 Análise dos processos tecnológicos das empresas contempladas no estudo

Para a realização das análises, são considerados os resultados dos projetos, documentos apresentados por cada empresa e as informações levantadas e confirmadas durante entrevistas realizadas com cada uma delas.

3.2.1 ArcelorMittal

I. Descrição do processo de carbonização e suas fontes diretas de emissões de GEE

A ArcelorMittal adota a rota tecnológica de carbonização com fornos retangulares. Assim como em outros processos, ocorre a combustão parcial da carga como fonte energética do processo. Desta maneira, em média, 10% da biomassa inserida é perdida na combustão interna dos fornos.

Os fornos da ArcelorMittal que possuem um queimador de gás e chaminé acoplados ao forno, alcançam uma redução considerável no potencial de aquecimento dos resíduos gasosos e não condensáveis do processo de carbonização. Pois, estes fornos permitem a combustão do Coe CH₄, gerando como produto principal o CO₂, reduzindo consideravelmente o impacto ambiental gerado pelo processo, e praticamente eliminando as emissões de metano, que é o único GEE gerado no processo.

A empresa apresentou e teve dois projetos apoiados pelo PNUD na etapa anterior:

O projeto 1, enquadrado na Categoria 3 (queima de gases / fumaça gerados na produção de carvão vegetal sustentável), consistiu em duas ações principais: instalação de sistema supervisorio para controle de processo e de sistema para combustão dos gases gerados no processo de carbonização da unidade UPE Fazendinha localizada na região Centro-Oeste de Minas Gerais.

Objetivou-se uma redução das emissões de GEE através da redução do potencial de aquecimento do gás exausto e elevação do rendimento gravimétrico do processo de carbonização durante o período de análise do projeto, compreendido entre janeiro e março de 2020. Como resultado, alcançou-se uma redução das emissões de GEE no valor de 12.691 tCO_{2e}.

O projeto 2, enquadrado na Categoria 2 (melhoria de processos na produção de carvão vegetal sustentável), consistiu na implementação de sistema para controle de temperatura e fluxo de ar e aumento do rendimento gravimétrico para, dessa forma, reduzir as emissões de GEE da carbonização na UPE Forquilha localizada na região Norte do estado de Minas Gerais.

Objetivou-se uma redução das emissões de GEE através da elevação do rendimento gravimétrico do processo de carbonização durante o ano de 2019. Como resultado, a redução da emissão do projeto para o ano de 2019 foi de 50.655 tCO_{2e}.

Durante a etapa de entrevistas com os pontos focais da empresa, identificou-se também que todo o metano presente nos gases gerados nos fornos é capturado e conduzido até o queimador em um sistema fechado onde forno e queimador possuem válvulas de controle, garantindo que todo o metano está sendo canalizado até a célula de queima central. Segundo informações confirmadas pela ArcelorMittal, a única possibilidade de perda de metano para a atmosfera antes da queima seria por liberação proposital ou abertura da chaminé do forno. A chama do queimador é mantida em operação contínua e em boas condições de queima para uma destruição efetiva do metano. A célula do queimador possui três termopares para monitoramento de temperatura e válvulas de controle de pressão, para monitoramento e controle dessas condições.

3.2.2 Plantar Florestal

I. Descrição do processo de carbonização e suas fontes diretas de emissões de GEE

A empresa adota tecnologia com fornos retangulares com elevado controle operacional e índice gravimétrico médio de 35%.

Os gases gerados no processo de degradação térmica da madeira, são coletados e queimados no queimador construído próximo aos fornos, assim destruindo o metano presente nos gases recolhidos. Uma vez queimados, os gases são reenviados aos fornos através de dutos de retorno para auxiliar a secagem da madeira e a ignição da lenha. Essa iniciativa melhora o rendimento gravimétrico, visto que parte da energia para secar a madeira e iniciar o processo de carbonização (fase endotérmica) virá dos gases e não da lenha.

De acordo com o relatório de auditoria disponível, o projeto da Plantar Florestal, enquadrado na Categoria 1 (produção de carvão vegetal sustentável: instalação ou ampliação de capacidade produtiva, com ou sem aproveitamento de coprodutos), consistiu na implementação de sistema para controle de temperatura e fluxo de ar e, dessa forma, na redução das emissões de GEE da carbonização na Fazenda Lagoa do Capim – MG2 localizada na região Centro-Norte do estado de Minas Gerais.

Objetivou-se uma redução das emissões de GEE através da elevação do rendimento gravimétrico do processo de carbonização durante os anos de 2018 e 2019. Como resultado, a redução da emissão do projeto para o ano de 2018 foi 1.351 t CO_{2e} e para o ano de 2019 foi 4.217 t CO_{2e}. Totalizando uma redução de emissões no valor de 5.568 t CO_{2e}.

Durante a condução de entrevistas foi levantada a questão da categorização do projeto e confirmado que se trata realmente de um projeto de categoria 1, uma vez que houve uma mudança de rota tecnológica, com a implementação de novos fornos retangulares, com sistema supervisor.

3.2.3 Rima

I. Descrição do processo de carbonização e suas fontes diretas de emissões de GEE

A empresa utiliza o Forno Container como rota tecnológica para a produção do carvão vegetal. Conforme exposto no capítulo 3.1, os fornos de tipo Container, são reatores metálicos com alimentação pela parte superior e com equipamento auxiliar para queima dos gases gerados. Possuem elevado controle operacional e índice gravimétrico superior a 35%.

Os gases gerados no processo de degradação térmica da madeira, são coletados e queimados na plataforma de incineração de gases localizada próxima ao forno de carbonização, e através da queima o metano (único GEE formado no processo) é destruído na medida da eficiência do sistema de coleta e queima dos gases.

A empresa apresentou dois projetos apoiados pelo PNUD na etapa anterior:

O projeto 1, enquadrado na categoria 3 (queima de gases / fumaça gerados na produção de carvão vegetal), consistiu na instalação de sistema para combustão dos gases gerados no processo de carbonização da unidade de florestal da Fazenda Santa Efigênia I localizada no município de Buritizeiro, Minas Gerais.

Objetivou-se uma redução das emissões de GEE através da redução do potencial de aquecimento do gás exausto e elevação do rendimento gravimétrico do processo de carbonização durante o período de análise do projeto compreendido entre setembro de 2019 e fevereiro de 2020. Como resultado, alcançou-se uma redução das emissões de GEE no valor de 3.002 tCO_{2e}.

Este projeto baseia-se na premissa que todo o metano presente nos gases gerados nos fornos container é capturado e conduzido até o queimador. Até o momento, não houve também confirmação sobre os dispositivos e técnicas empregadas para evitar que o metano produzido nos fornos seja perdido para a atmosfera, antes de serem queimados. Na etapa de quantificação de GEE, essas informações deverão ser confirmadas para a contabilização adequada das possíveis emissões de metano do processo.

O projeto 2, foi classificado e validado na etapa de auditoria como Categoria 1 (produção de carvão vegetal sustentável: instalação ou ampliação de capacidade produtiva, com ou sem aproveitamento de coprodutos), e é descrito como elevação da capacidade produtiva de 150 toneladas para 500 toneladas ao mês na unidade localizada no município de Buritizeiro, Minas Gerais.

Objetivou-se uma redução das emissões de GEE através elevação do rendimento gravimétrico do processo de carbonização durante o período de análise do projeto, julho de 2018 até junho de 2019. Como resultado, alcançou-se uma redução das emissões de GEE no valor de 6.388 t CO_{2e}.

Porém, na etapa de entrevistas, foi identificado que o projeto se trata de uma mudança de rota tecnológica (troca de forno tradicional para forno container) e não somente do aumento da capacidade produtiva da ordem de 350 toneladas de carvão vegetal ao mês. Há uma pendência no entendimento sobre esse aumento de capacidade que ainda não foi esclarecida pela Rima: o aumento da capacidade de produção implicou em aumento na utilização de carvão vegetal ou houve somente a alteração de rota tecnológica?

Vale pontuar que caso o projeto seja baseado na mudança de rota tecnológica, há uma possível inconsistência na metodologia adotada no projeto: o forno tradicional emite metano proporcionalmente ao rendimento gravimétrico, de acordo com a equação que foi utilizada. Ao melhorar o funcionamento do forno tradicional por um sistema supervisorio, por exemplo, o resultado é, de fato, uma redução do metano por uma otimização do forno, que continua sendo o mesmo. Neste caso, a equação utilizada seria válida, porém no caso de mudança de rota tecnológica (forno tradicional para forno container) é

necessário verificar se a metodologia foi adequada para avaliar a emissão de metano versus rendimento deste tipo de forno.

3.2.4 Vallourec

I. Descrição do processo de carbonização e suas fontes diretas de emissões de GEE

A empresa conta com três rotas tecnológicas para a produção de carvão vegetal: Fornos Retangulares com e sem queimadores de gás e Carboval.

Conforme exposto no capítulo 3.1, os fornos retangulares, possuem limitações quanto ao controle do processo de carbonização, gerando um produto muito heterogêneo e com índice gravimétrico médio de 35%.

Os fornos da Vallourec que possuem um queimador de gás e chaminé acoplados ao forno, alcançam uma redução considerável de emissões de GEE (metano), assim como dos produtos gasosos e de condensáveis formados no processo de carbonização. Pois, ele permite a combustão do CO e CH₄, e dos vapores orgânicos, gerando como produto principal o CO₂, reduzindo consideravelmente o impacto ambiental gerado pelo processo.

Já os fornos de tipo Carboval são reatores contínuos com elevado controle operacional e índice gravimétrico médio entre 40 e 42%, conforme exposto no capítulo 3.1.

Os gases gerados no processo de degradação térmica da madeira, são coletados e utilizados nos queimadores para fornecimento da energia térmica necessária ao processo de carbonização, não havendo a necessidade de utilização de fontes de combustível externas. Devido a isso, o CO₂ é o principal componente de emissão direta no processo, e essas emissões são neutras do ponto de vista climático, pois são produtos de remoção de CO₂ atmosférico pela fotossíntese florestal.

O projeto da Vallourec apoiado pelo PNUD na etapa anterior foi classificado como Categoria 4 (adoção e/ou ampliação e/ou melhoria de arranjos tecnológicos que implique o uso do carvão vegetal sustentável e/ou de seus coprodutos na produção de ferro-gusa, aço e ferroligas) e consistiu na ampliação da capacidade de substituição de gás natural por moinha de carvão vegetal pulverizada, como combustível térmico principal do forno rotativo da usina de pelotização da Vallourec Soluções Tubulares Brasil, localizada no município de Jaceaba – MG.

Objetivou-se o aumento de 72% para 79% da substituição de carvão vegetal reduzindo a emissão de CO₂ de origem fóssil, no período de análise do projeto, de março de 2018 a agosto de 2019. Como resultado, alcançou-se uma redução das emissões de GEE no valor de 23.847 tCO_{2e}.

3.2.5 Resumo das reduções das emissões diretas alcançadas pelos projetos implantados no âmbito do Edital JOF 0191/2017

O **Projeto Siderurgia Sustentável** (BRA/14/G31 - Produção sustentável de carvão a base de biomassa para a indústria siderúrgica no Brasil) coordenado pelo MMA e implementado pelo PNUD, lançou em 2017 o Edital de Licitação JOF 0191/2017, destinado a apoiar projetos que se candidataram para receber apoio financeiro dentro de um “Mecanismo de Apoio ao Desenvolvimento, Melhoria e Demonstração de Tecnologias Sustentáveis de Produção e de Uso de Carvão Vegetal na Indústria Siderúrgica (Ferro-gusa, Aço e Ferroligas)”. Ao todo, seis projetos foram selecionados e executados pelos proponentes. Os resultados relacionados à execução financeira e reduções diretas de emissão de GEE foram auditados. A tabela 1 abaixo representa o resumo das emissões diretas que foram reduzidas pelos seis projetos.

Tabela 1: Resumo das reduções das Emissões Diretas alcançadas

Categorias de Projeto	Empresas apoiadas	Período de Apuração	Emissões Reduzidas (t CO_{2e})
Categoria 1 Produção de carvão vegetal sustentável - instalação ou ampliação de capacidade produtiva, com ou sem aproveitamento de coprodutos	<i>Plantar Empreendimentos e Produtos Florestais Ltda.</i>	Agosto a dezembro 2019	1.351
		Janeiro a Junho 2020	4.217
		Total	5.568
	<i>Rima Industrial S/A</i>	Julho 2018 a Junho 2019	6.388
Categoria 2 Melhoria de processos na produção de carvão vegetal sustentável	<i>ArcelorMittal BioFlorestas Ltda.</i>	Janeiro a Dezembro 2019	59.721
Categoria 3 Queima de gases/fumaça gerados na produção de carvão vegetal sustentável	<i>Rima Industrial S/A</i>	Setembro 2019 a fevereiro 2020	3.002
	<i>ArcelorMittal BioFlorestas Ltda.</i>	Janeiro a Março 2020	12.691
Categoria 4 Adoção e/ou ampliação e/ou melhoria de arranjos tecnológicos que implique o uso do carvão vegetal sustentável e/ou de seus coprodutos na produção de ferro-gusa, aço e ferroligas	<i>Vallourec Soluções Tubulares do Brasil S/A</i>	01/03/2018 a 31/12/2018	9.780
		01/01/2019 a 31/08/2019	14.068
		Total	23.848
Categoria 5 Recuperação e/ou beneficiamento de coprodutos de carvão vegetal sustentável, fabricação de produtos complementares (briquetes, biocoque etc.) voltados à produção de ferro-gusa, aço e ferroligas	Não houve projetos aprovados		
Total de emissões reduzidas (t CO_{2e}):	111.218		

Fonte: Relatórios das Auditorias confeccionados pela RINA Brasil Serviços Técnicos Ltda

4. LEVANTAMENTO PRELIMINAR DAS ATIVIDADES QUE SERÃO AVALIADAS

4.1 Etapas para a quantificação da emissão e remoção de GEE

As etapas conceituais utilizadas para a elaboração desse trabalho são apresentadas no fluxograma abaixo e explicadas em seguida (Figura 11):

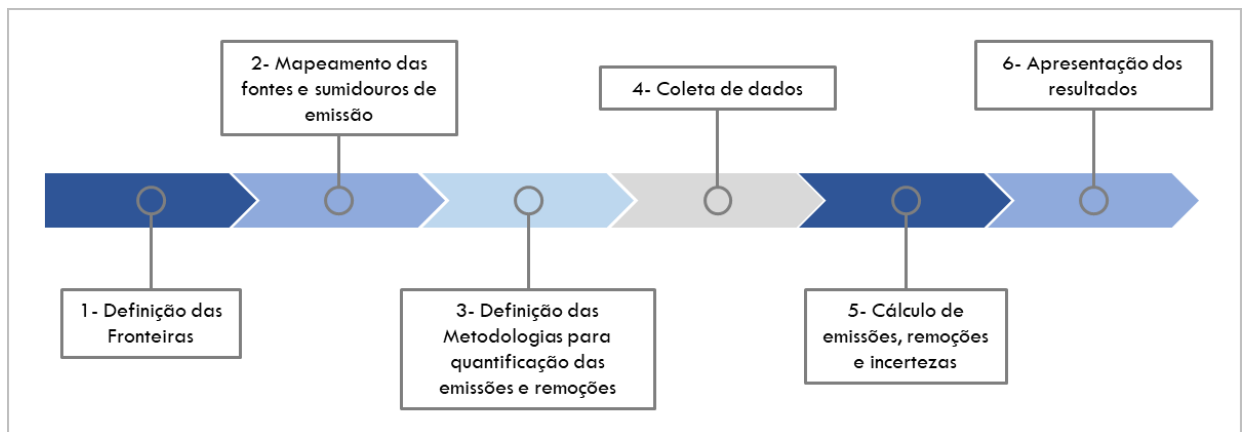


Figura 11: Fluxograma de etapas metodológicas para a realização da quantificação das emissões indiretas

Fonte: Elaboração Própria

Primeiramente, definem-se as fronteiras da quantificação das emissões indiretas do processo de Carbonização, ou seja, é necessário determinar quais instalações e atividades da organização serão contempladas pelo estudo, estabelecendo seu limite organizacional. Em seguida, são identificadas e categorizadas as fontes das emissões indiretas dentro da fronteira definida na etapa 1. O terceiro passo é definir as metodologias para quantificação das emissões identificadas na etapa 2. Em seguida, realiza-se o processo de coleta de dados, para a realização do cálculo das emissões, onde são utilizados os dados de atividades emissoras coletados, bem como os fatores de emissão (vide adiante). Nesta etapa também são calculadas as incertezas do inventário. Por fim, os resultados serão compilados em um relatório final.

4.2 Definição das fronteiras

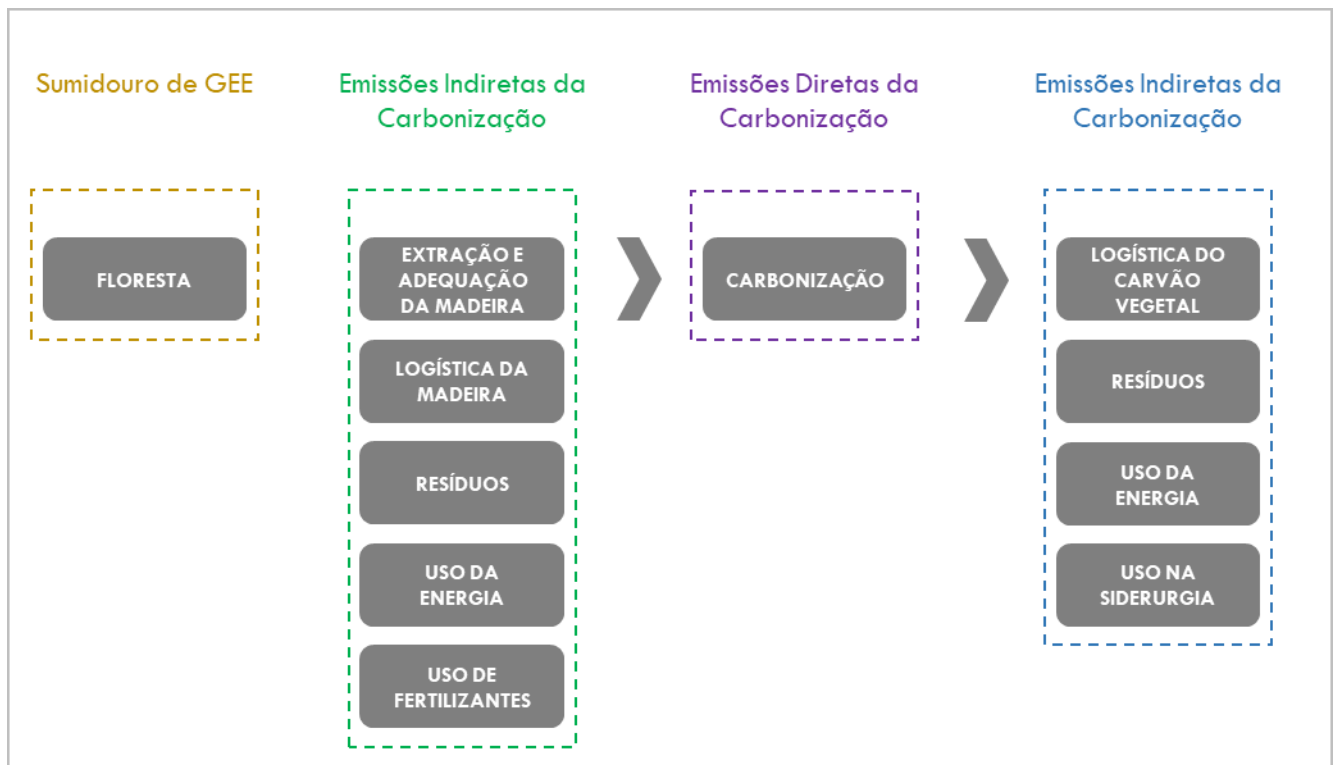


Figura 12: Fronteiras do Estudo

Fonte: Elaboração Própria

A figura 12 contempla todas as fontes de emissão e remoção de GEE pertinentes ao processo de carbonização. Entretanto, nesse trabalho, foram considerados somente as emissões da logística da madeira e do carvão vegetal, geração de resíduos, uso da energia elétrica e redução na emissão de CO₂ devido a substituição do agente redutor da carga metálica (Gás Natural e Coque) por carvão vegetal no processo siderúrgico.

4.2.1 Gases de Efeito Estufa

De acordo com o Programa Brasileiro do *GHG Protocol*, são contemplados 7 tipos de GEE no reporte do Protocolo de Kyoto: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido de nitrogênio (N₂O), hidrofluorcarbono (HFCs), perfluorcarbono (PFCs), hexafluoreto de enxofre (SF₆), e trifluoreto de nitrogênio (NF₃). Adicionalmente, o Protocolo de Montreal inclui os gases depletadores da camada de ozônio como os hidroclorofluorcarbono (HCFCs), que também contribuem para o aquecimento global.

Cada GEE possui um *Global Warming Potential* (GWP) associado, que é a medida do quanto cada gás contribui para o aquecimento global. O GWP é um valor relativo que compara o potencial de

aquecimento de uma determinada quantidade de gás com a mesma quantidade de CO₂ que, por padronização, tem o GWP de valor igual a 1. O GWP é sempre expresso em termos de equivalência de CO_{2e}. A Tabela 2 abaixo apresenta os valores do GWP utilizados no estudo:

Tabela 2: GWP dos Gases de Efeito Estufa

Gás	GWP
Dióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	21 ¹
Óxido nitroso (N ₂ O)	298
Hexafluoreto de enxofre (SF ₆)	22.800
Trifluoreto de nitrogênio (NF ₃)	17.200
PFCs	7.390 - 17.700
HFCs	12 - 14.800
HCFCs	5 - 14.400

Fonte: PBGHGP, 2020.

Considerou-se as emissões de CO₂, CH₄, N₂O de acordo com as fontes de emissão mapeadas e a disponibilidade de dados. Adicionalmente, o estudo também computa as reduções nas emissões de CO₂ devido a substituição do carvão mineral por carvão vegetal.

Os gases CO₂, CH₄, N₂O são gerados das seguintes maneiras:

- CH₄: Gerado na decomposição térmica da biomassa nas unidades de carbonização; O metano formado em processos de combustão de biomassa e de termoredução siderúrgica em altos-fornos serão desconsiderados por serem irrelevantes.
- CO₂: Gerado na queima de combustíveis fósseis por fontes móveis e estacionárias;
- N₂O: Gerado na queima de combustíveis fósseis por fontes móveis.

4.3 Mapeamento das fontes de emissões indiretas do processo de carbonização

As fontes de emissão e remoção indireta de GEE do processo de Carbonização foram identificadas e categorizadas e encontram-se listadas na tabela 3.

¹ Foi mantido o valor de GWP_{CH4}= 21 (tCO_{2e} / tCH₄) utilizado na quantificação das **emissões diretas** das atividades apoiadas pelo Projeto Siderurgia Sustentável.

Tabela 3: Fontes de emissão de acordo com etapa, categoria e dado controlado

Etapa	Categoria	Dado Controlado
Carbonização	Destinação e disposição de Resíduos sólidos	Para cada tipo de resíduo gerado: quantidade de resíduo, tecnologia de destinação e disposição final
	Consumo de combustíveis e energia para equipamentos auxiliares	Identificação de equipamentos auxiliares (ex.: maquinário de carregamento/d Descarregamento, processadores mecânicos, sistemas supervisórios, combustíveis auxiliares), e respectivo consumo de energia elétrica ou combustíveis.
Transporte e distribuição do carvão vegetal	Combustão móvel	Consumo de Diesel no transporte do carvão vegetal da carbonização até a planta siderúrgica
Uso na Siderurgia	Consumo de combustíveis e energia para equipamentos auxiliares	Identificação de equipamentos auxiliares usados em função do carvão vegetal (ex.: maquinário de carregamento/d Descarregamento, processadores mecânicos, sistemas supervisórios), e respectivo consumo de energia elétrica ou combustíveis.
	Destinação e disposição de Resíduos sólidos	Para cada tipo de resíduo gerado: quantidade de resíduo, tecnologia de destinação e disposição final

Fonte: Elaboração própria

4.3.1 Fontes e sumidouros de emissões não considerados nesse estudo

Coerentes com o escopo para os produtos 2 e 3, não serão contabilizadas as emissões da etapa Florestal, sendo elas:

- Mudança no uso do solo;
- Uso de fertilizantes;
- Consumo de diesel das máquinas no plantio das mudas, manutenção da floresta, colheita e adequação da madeira.
- Estoques de carbono da floresta em pé, e fluxo de remoção de CO₂ na produção primária de biomassa.

Para o produto 4 onde iremos apresentar propostas de metodologias para projetos futuros serão abordadas as emissões e sumidouros da etapa florestal.

4.4 Metodologias

A quantificação das emissões indiretas de GEE das atividades apoiadas pelo Projeto Siderurgia Sustentável, será elaborada via planilha em Excel®, utilizando as metodologias aplicáveis a cada categoria citada na tabela 3. As emissões indiretas serão classificadas como positivas (emissões de GEE que foram criadas ou aumentadas devido ao projeto) ou negativas (emissões que foram eliminadas ou foram diminuídas devido ao projeto).

4.4.1 Aquisição de Energia Elétrica

Para a quantificação das emissões provenientes da atividade de geração da energia elétrica comprada, será utilizado a metodologia “*TOOL05 Methodological tool: Baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption and monitoring of electricity generation Version 03.0 (2015)*”.

$$E_{EE} = \sum_i EC_i \cdot EF_{EE,i} \cdot (1 + TDL_i)$$

- E_{EE} Emissão pelo consumo de energia elétrica [t CO_{2e}];
- EC_i Quantidade de eletricidade consumida [MWh]. Em cada situação, será indicado se a energia elétrica foi consumida a mais (positiva), ou a menos (negativa) em relação à situação de ausência do projeto.
- $EF_{EE,i}$ Fator de emissão da Energia Elétrica [tCO₂/MWh]
- TDL_i Média da perda técnica na transmissão e distribuição da Energia Elétrica
- i Fonte da energia elétrica

4.4.2 Combustão Móvel (Transporte e Distribuição)

Para a quantificação das emissões provenientes do transporte e distribuição da biomassa, carvão vegetal e resíduo (se houver), será utilizado a opção B da metodologia “*TOOL12 Methodological tool: Project and leakage emissions from transportation of freight Version 01.1.0 (2012)*”

$$E_{TR,t} = \sum_f D_{c,t} \cdot FR_{c,t} \cdot EF_{CO_2,Padrão} \cdot 10^{-6}$$

- $PE_{TR,t}$ Emissão oriunda do transporte de carga no projeto [t CO_{2e}];
- $D_{c,t}$ Distância (ida e volta) da origem até o destino da carga no período analisado [km];

- $FR_{c,t}$ Massa total da carga transportada no período analisado [t]. Em cada situação, será indicado se a atividade de transporte foi a maior (positiva), ou a menor (negativa) em relação à situação de ausência do projeto.
- $EF_{CO_2,Padrão}$ Fator de emissão padrão para o combustível e veículo utilizado [$g\ CO_2/t\ km$]²;
- c Carga transportada (carvão vegetal, biomassa e resíduo)
- t Período analisado

4.4.3 Resíduo sólidos

Para a quantificação das emissões provenientes dos resíduos gerados nas etapas de carbonização e uso na siderurgia serão identificados quais os resíduos que foram gerados (ou deixaram de ser gerados), em que quantidades, e quais os tratamentos ou disposição final adotados. Em função dessas tecnologias serão quantificadas as emissões indiretas positivas ou negativas. Entre as tecnologias mais comuns para tratamento ou disposição estão a compostagem, a disposição em aterros ou lixões, ou a queima.

Haverá também situações em que os resíduos gerados pelo projeto eram descartados na atmosfera na ausência dele. Por exemplo, quando o projeto faz a condensação de vapores (licor pirolenhoso e bio-óleos). Nesses casos serão calculadas as emissões de GEE adicionais, e será indicado que na ausência do projeto essas emissões de GEE teriam também ocorrido na ausência dele, se a legislação ambiental tivesse uma determinação proibitiva de emissões não controladas de poluentes com efeitos locais/regionais na carbonização da madeira. O entendimento desse estudo é que as normas e padrões ambientais possuem uma lacuna para o controle dessa atividade, e serão revistas em futuramente.

Por último, também teremos a situação em que determinado resíduo gerado no projeto tem uma destinação econômica. Por exemplo, líquidos condensáveis ou finos de carvão vegetal que são fornecidos a terceiros, mediante pagamento ou não. No presente estudo, esses resíduos serão considerados como isentos de emissões indiretas (positivas ou negativas). No produto 4 será proposto que em projetos futuros esses “resíduos” devem ser mais adequadamente tratados como subprodutos, compartilhando com o carvão vegetal parte das emissões diretas de GEE da carbonização, e permitindo também quantificar reduções de emissões de GEE pelo uso desses subprodutos nas suas respectivas cadeias econômicas.

² A metodologia sugere fator de emissão de 129 [$gCO_2/ t\ km$] para veículos pesados

4.4.4 Emissões *upstream* associadas ao uso de combustíveis fósseis

Para a quantificação das emissões indiretas relacionadas à substituição de gás natural por moinha de carvão, realizada no projeto da Vallourec, é aplicável utilização a metodologia “*TOOL15 Methodological tool: Upstream leakage emissions associated with fossil fuel use. Version 02.0 (2014)*”

As emissões devem ser determinadas usando uma das duas opções a seguir:

Opção (A): abordagem simples com base em fatores de emissão padrão; ou

Opção (B): abordagem detalhada com base nas fases de emissões a montante.

Considerando a abordagem simples com base em fatores de emissão padrão, temos:

$$E_{US,y} = \sum_x EF_{US,x,default} X (FC_{PJ,x,y} - FC_{BL,x,y})$$

Onde:

- $E_{US,y}$ Emissões upstream no ano y [t CO_{2e} / ano];
- $EF_{US,x,default}$ Fator de emissão padrão para emissões upstream associadas com consumo de combustível fóssil tipo x [t CO_{2e} / TJ];
- $FC_{PJ,x,y}$ Quantidade de combustível fóssil tipo x usado na situação do projeto no ano y [TJ/ano];
- $FC_{BL,x,y}$ Quantidade de combustível fóssil tipo x usado na situação de linha de base no ano y [TJ/ano];
- X Tipo de combustível fóssil usado no projeto e / ou situação de linha de base e para o qual as emissões upstream devem ser determinadas.

O fator $EF_{US,x,default}$ padrão deve ser selecionado na Tabela 3, da mesma metodologia, para o tipo de combustível fóssil X correspondente. Para o caso de gás natural, o valor correspondente é de 2,9 t CO_{2e}/TJ. No caso do projeto da Vallourec a moinha de carvão vegetal usada na pelotização diminui o consumo de gás natural, ou seja, o consumo desse combustível é menor no projeto do que na ausência dele. Isso significa que as emissões indiretas do projeto são negativas: o projeto resulta não apenas na redução de emissões por evitar a queima do gás natural (emissões diretas que já foram quantificadas, como descrito no capítulo 3) como também há uma diminuição adicional das emissões de GEE decorrentes das etapas de produção, refino e transporte do gás natural que deixou de ser consumido (emissões de montante).

4.5 Análise das metodologias aplicáveis para cada processo tecnológico contemplado no estudo

De acordo com o levantamento realizado após a condução de entrevistas com cada empresa, foram definidas as emissões indiretas aplicáveis a cada projeto e, conseqüentemente, as metodologias que serão utilizadas para a quantificação das emissões na próxima etapa do projeto:

4.5.1 ArcelorMittal

I. Análise das emissões indiretas de GEE do Projeto 1: Instalação de sistema para combustão dos gases residuais da carbonização

Conforme indicado na seção 3.2.1, a redução de emissões do projeto foi calculada com base no rendimento gravimétrico, o qual não implica em um consumo incremental de matéria prima, excluindo-se assim, das emissões indiretas, o transporte de matéria prima adicional devido ao projeto.

Para o cálculo das emissões indiretas relacionadas ao tratamento de resíduos, é aplicável o cálculo de emissões relativos ao transporte destes resíduos.

Conforme reportado pela empresa, os gases são canalizados e recebem destinação adequada. O queimador passa por manutenções trimestrais, nas quais a célula de queima é limpa retirando-se os resíduos oriundos do processo de queima de alguns atíços (madeiras não totalmente carbonizadas, necessárias para manter o calor dentro da célula quando há problemas no sincronismo dos fornos). Nos canais, além da fumaça, têm-se o alcatrão que é direcionado para a célula onde é queimado participando de forma fundamental no balanço de energia do equipamento. As cinzas resultantes da limpeza dos canais de passagem são destinadas à plantios próximos à unidade. Assim, devem ser calculadas as emissões relativas ao transporte das cinzas geradas.

Metodologias aplicáveis ao cálculo de emissões indiretas do projeto:

No caso do projeto 1, aplicam-se as metodologias de aquisição de energia e combustão móvel, apresentadas nas seções 4.4.1 e 4.4.2, respectivamente.

Apontamentos:

Com a obtenção de dados quantitativos na etapa de cálculo de emissões, serão avaliadas se as emissões por transporte de resíduos (cinzas para as áreas de plantio próximas à UPE Fazendinha) e por consumo de energia elétrica adicional devido à implementação do projeto são relevantes ou irrisórias.

II. Análise das emissões indiretas de GEE do projeto 2: Instalação de sistema para controle de temperatura e fluxo de ar

O projeto consiste na instalação de sistema supervisorio para otimização da produção de carvão por meio de controle de temperatura e fluxo de ar. A redução das emissões do projeto foi calculada com base no rendimento gravimétrico, de modo que para este projeto também não há aquisição adicional de matérias primas ou geração de resíduos devido à implementação do projeto.

Referente ao consumo de energia elétrica antes e após a implementação do projeto, a empresa informou que não houve variação significativa.

Como emissões indiretas indica-se apenas o cálculo de consumo de energia elétrica, porém, de acordo com as informações obtidas na etapa de condução de entrevistas, o consumo de energia do processo antes e após a implementação do projeto não é medido.

Metodologias aplicáveis ao cálculo de emissões indiretas do projeto:

No caso do projeto 2, aplica-se apenas a metodologia de aquisição de energia (seção 4.4.1).

Apontamentos:

Recomenda-se obter os dados de consumo de energia do processo antes e após a implementação do projeto para, na etapa de quantificação de emissões de GEE, avaliar-se quantitativamente seu impacto sobre o cálculo de emissões indiretas.

4.5.2 Plantar Florestal

I. Análise das emissões indiretas de GEE do Projeto 1: Implementação de sistema supervisorio para controle de processo

Conforme indicado na seção 3.2.2, o projeto consiste na otimização da produção de carvão por meio da utilização de novos fornos retangulares com controle de temperatura e fluxo de ar para redução das emissões de metano. Entendeu-se que a redução das emissões do projeto foi calculada com base no rendimento gravimétrico da nova carbonização, comparado ao rendimento gravimétrico médio das tecnologias tradicionais existentes, de modo que para este projeto também não há aquisição adicional de matérias primas ou geração de resíduos devido à implementação do projeto.

Assim, serão consideradas como emissões indiretas as emissões relativas à possíveis incrementos de consumo de energia elétrica decorrentes do projeto (que podem ou não ser irrisórias, serão avaliadas na etapa de quantificação) e combustão móvel associada à mecanização carga e descarga com utilização de tratores.

Metodologias aplicáveis ao cálculo de emissões indiretas do projeto:

Aplica-se a metodologia de aquisição de energia (seção 4.4.1) e combustão móvel (seção 4.4.2).

Apontamentos:

Conforme indicado na reunião com os pontos focais da Plantar Florestal, os novos fornos possuem dispositivo para captação de licor pirolenhoso, porém está pendente a confirmação se esse aproveitamento é realizado.

4.5.3 Rima

I. Análise das fontes indiretas de emissões de GEE do projeto 1: Instalação de sistema para combustão dos gases residuais

Após condução de entrevistas com os pontos focais da empresa, identificou-se que o projeto consistiu na instalação de sistema de queima de gases residuais do processo de carbonização, bem como adequação das instalações elétricas e automação, o que torna o processo mais sustentável se comparado à fornos tradicionais. A redução de emissões do projeto foi calculada com base em rendimento gravimétrico, o qual não implica em um consumo incremental de matéria prima, excluindo-se assim, das emissões indiretas, o transporte de matéria prima adicional devido ao projeto.

No processo do Forno Container, os gases são resfriados e recebem uma destinação controlada pela empresa. Até o presente momento, não foi esclarecido pela Rima qual o processo de resfriamento dos gases residuais e qual a destinação dos resíduos e/ou subprodutos gerados durante o período do projeto. Se relevantes, as emissões relativas aos resíduos gerados pelo processo deverão ser consideradas na etapa de quantificação de emissões de GEE.

Também se aplica como emissões indiretas do processo, o cálculo de consumo de energia elétrica do processo antes e após a implementação do projeto e, se houver, o consumo de combustíveis auxiliares para manutenção de chamas em queimadores.

Do mesmo modo, o projeto considera que a chama do queimador é mantida em operação contínua e em boas condições de queima para uma destruição efetiva do metano. Faz-se necessário o retorno da empresa sobre os dispositivos de controle e registro das condições de operação da chama, para a contabilização de possíveis emissões de metano neste caso.

Metodologias aplicáveis ao cálculo de emissões indiretas do projeto:

Para o projeto 1, será utilizada a metodologia de aquisição de energia elétrica, apresentada na seção 4.4.1.

Após a identificação dos resíduos gerados no processo e de sua destinação, poderão ser utilizadas também as metodologias de resíduos sólidos e combustão móvel, descritas nas seções 4.4.3 e 4.4.2, respectivamente.

Apontamentos:

Para a contabilização das emissões indiretas do projeto, será necessário obter da empresa a confirmação e os dados quantitativos sobre as questões acima levantadas: consumo de energia elétrica do processo, informações sobre resíduos e subprodutos gerados durante o período do projeto (volume, transporte e destino) e dispositivos de controle de emissões de metano antes da chegada no queimador.

II. Análise das fontes indiretas de emissões de GEE do projeto 2: Elevação da capacidade produtiva

Dado o exposto na seção acima, faz-se necessário a confirmação pela Rima quanto ao objeto do projeto e o respectivo enquadramento de categoria. De qualquer forma, as emissões indiretas associadas ao projeto, que são objeto de análise desta etapa, não sofrem influência pela metodologia utilizada anteriormente. Assim, são aplicáveis para o cálculo das emissões indiretas do Projeto 2 o consumo de energia elétrica e de combustíveis fósseis dos equipamentos (maquinário para adequação e transporte da madeira), e a destinação dos resíduos e/ou subprodutos do processo.

Metodologias aplicáveis ao cálculo de emissões indiretas do projeto:

Para o projeto 2, serão utilizadas as metodologias de aquisição de energia elétrica e combustão móvel, apresentadas nas seções 4.4.1 e 4.4.2, respectivamente.

Após a identificação dos resíduos gerados no processo e de sua destinação, poderão ser utilizadas também as metodologias de resíduos sólidos, descrita na seção 4.4.3

Apontamentos:

Estão pendentes as confirmações e envio de informações referentes ao processo de preparação da madeira para uso no forno container (ex. tamanho das toras e condições de secagem) em comparação com os fornos tradicionais, informações sobre os resíduos e subprodutos gerados durante o período do projeto (volume, transporte e destino) e se houve algum uso pela Rima ou por terceiros, para o licor pirolenhoso e/ou para os alcatrões durante o projeto. Estas informações são extremamente relevantes para a etapa de quantificação de emissões.

4.5.4 Vallourec

I. Análise das fontes indiretas de emissões de GEE do projeto 1: Ampliação da capacidade de substituição de combustível fóssil

Após a condução de entrevistas, identificou-se que o projeto consistiu na introdução de moinha de carvão vegetal pulverizada no processo de pelletização, em substituição ao gás natural. A metodologia de cálculo no caso de substituição de combustível baseia-se na quantidade de combustível utilizado

(quantidade de energia consumida no processo) e no seu respectivo fator de emissão. No caso da moinha utilizada no projeto, o fator de emissão pode ser considerado zero, pois no período em que o projeto aconteceu, a moinha era um resíduo da carbonização que estava disponível em quantidade suficiente, sem a necessidade de maior produção de carvão para este fim, além de não ter valor comercial no momento.

As emissões de CO₂ da queima da moinha como combustível são consideradas biogênicas, partindo da premissa de o carvão provém de fonte renovável, mas ao ser fabricada na carbonização, as emissões de metano são relevantes, inclusive, o CH₄ um potencial de aquecimento global muito maior que do CO₂. Neste caso, as emissões não serão consideradas por se tratar de um resíduo, conforme mencionado acima, porém, hoje, a moinha deixou de ser um resíduo e passou a ser um subproduto, de modo que as emissões de sua fabricação devem ser consideradas em cálculos futuros. Neste caso - em que a moinha é utilizada na planta de pelotização - as emissões da carbonização do carvão que gera a moinha entrariam como emissões indiretas, ou seriam emissões diretas se considerarmos o processo de carbonização.

Assim, para o período em que o projeto foi analisado, serão consideradas como emissões indiretas o consumo adicional de energia relacionada ao tratamento da moinha, considerando a modificação do equipamento de queima de gás natural para queima de moinha e consumo de energia ou outros combustíveis em alguma etapa de beneficiamento deste material (secagem e etc.).

O projeto não implica em incremento da geração de resíduos sólidos.

Metodologias aplicáveis ao cálculo de emissões indiretas do projeto:

Para o cálculo de emissões indiretas do projeto, serão utilizadas as metodologias de aquisição de energia elétrica e combustão móvel, apresentadas nas seções 4.4.1 e 4.4.2, respectivamente.

Será necessário utilizar metodologia de quantificação de emissões upstream associadas ao consumo de combustível fóssil, para a comparação com o cenário de utilização de gás natural (conforme indicado na seção 4.4.5).

Apontamentos:

Para a análise das emissões indiretas do projeto, as emissões relativas à utilização da moinha de carvão não foram contabilizadas. No entanto, conforme mencionado, a moinha passa a ser um subproduto, de modo que as emissões de sua fabricação devem ser consideradas. Neste caso, será necessário realizar o cálculo das emissões da fabricação da moinha, em comparação com o cálculo das emissões upstream do gás natural (combustível fóssil). Entende-se que há uma diminuição de emissões de upstream pela quantidade de gás que deixa de ser utilizada.

5. PRÓXIMAS ETAPAS

O detalhamento dos próximos produtos e atividades é apresentado nas tabelas a seguir:

Tabela 4: Detalhamento dos Produtos e Atividades a serem entregues no Produto 03

Produto e Conteúdo	Detalhamento dos Produtos e Atividades	Responsabilidade
Levantamento de parâmetros e fatores de emissão das tecnologias	<p>Pesquisa à base de dados da WayCarbon, fatores disponíveis em bases públicas confiáveis e em eventuais casos, estimativas serão adotadas.</p> <p>Todas as estimativas serão devidamente documentadas e os fatores de conversão utilizados devidamente referenciados em um banco de dados que acompanhará a planilha de coleta de dados.</p>	WayCarbon
Quantificar as emissões e reduções indiretas de GEE	<ul style="list-style-type: none"> • As atividades/projetos e processos terão suas emissões calculadas utilizando a metodologia que melhor descrevê-las; • Os cálculos serão realizados em planilha Excel. 	WayCarbon
P3: Relatório contendo os resultados da quantificação de redução de emissões indiretas	<ul style="list-style-type: none"> • Uma versão preliminar do produto será entregue à equipe do PNUD para verificação e validação de seu conteúdo; • Envio da versão final, após correções solicitadas; • A revisão por parte da Consultoria ficará limitada a 1 (uma) rodada de dúvidas/questionamentos. 	WayCarbon

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5: Detalhamento dos Produtos e Atividades a serem entregues no Produto 04

Produto e Conteúdo	Detalhamento dos Produtos e Atividades	Responsabilidade
Consolidação dos resultados	Será realizado uma estratificando das emissões/ reduções por empresa, atividade e por tecnologia.	WayCarbon
Comentários finais e recomendações	Identificação das lacunas/gargalos, oportunidades de melhoria e lições aprendidas por meio do Projeto Siderurgia Sustentável	WayCarbon
P4: Relatório contendo a análise dos dados finais de redução de emissões indiretas	<ul style="list-style-type: none"> • Uma versão preliminar do produto será entregue à equipe do PNUD para verificação e validação de seu conteúdo; • Envio da versão final, após correções solicitadas; • A revisão por parte da Consultoria ficará limitada a 1 (uma) rodada de dúvidas/questionamentos. 	WayCarbon

Fonte: Elaboração própria

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aperam Bioenergia. **Forno RAC 700 - tecnologia da Aperam BioEnergia**, 2016. Disponível em: <<https://aperambioenergia.com.br/forum-sobre-carvao-vegetal-recebe-mais-de-100-trabalhos-de-pesquisa/>>. Acesso em: 08 de julho de 2021.
- Assis, C. O. **Sistema alternativo para carbonização de madeira**. Lavras, MG, 2007.
- Carvalho, T. H. **Análise da segmentação tecnológica dos mercados da indústria siderúrgica no Brasil**. Piracicaba, SP, 2012.
- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). **Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia**. Brasília, DF, 2015.
- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). **Siderurgia no Brasil 2010-2025: subsídios para tomada de decisão**. Brasília, DF, 2010.
- Daniel Barcellos. **Forno retorta contínua**. Tecnologias alternativas de carbonização, 2020. Disponível em: <<https://danielbarcellos.com/tecnologias-alternativas-de-carbonizacao/>> Acesso em : 09 de julho de 2021.
- FAO. 2017. *The charcoal transition: greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihoods*, by J. van Dam. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2017.
- Hembrom, S., Roy, B. N., Roy, D. **Life Cycle Assessment in Charcoal and Steemaking Processes: Review**. International Journal of Trend in Research and Development, Volume 3, 2016
- Oliveira, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. Viçosa, MG, 2012.
- Sampaio, R., Mendes, F., Lopes Latorre, F., Soares, L., Azevedo, F. 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 17º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week. **Tecnologia Carboval de produção integrada do carvão vegetal siderúrgico**, Rio de Janeiro, 2016.
- Santos, S. F. O. M. **Modelo Ambiental e Econômico de Produção de Carvão Vegetal**. Ponta Grossa, PR, 2017.
- *The National Greenhouse Gas Inventories Programme, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2006. Disponível em < <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>>. Acesso em: 06/07/2021

- World Resources Institute (WRI) e World Business Council for Sustainable Development. **GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard**, 2014. Disponível em: <<https://ghgprotocol.org/corporate-standard>>. Acesso em: 02 de julho de 2021.
- World Resources Institute (WRI) e wbcSD. *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions*, 2013. Disponível em < <https://ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard>> Acesso em: 02 de julho de 2021.



Htec – Parque Tecnológico de Belo Horizonte
Rua Professor José Vieira de Mendonça, 770 – Sala 502
CEP 31310 – 260 - Belo Horizonte – MG
Telefone | Fax 55 31 3401.1074

BH | SP | RJ

WWW.WAYCARBON.COM