

Diagnóstico 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 IV

Consolidação Final de Resultados e Recomendações

Projeto Siderurgia Sustentável
Outubro 2021



CLIENTE



ENTREGÁVEL

Produto IV – Consolidação Final de Resultados e Recomendações

AUTORES

WAYCARBON

Bruna Dias; bruna.dias@waycarbon.com

Raphael Miranda; raphael.miranda@waycarbon.com

Luana Ribeiro; luana.ribeiro@waycarbon.com

Patrícia Merola; patricia.merola@waycarbon.com

Gilberto Caldeira; gilbame@gmail.com

HISTÓRICO DO DOCUMENTO

Nome do documento	Data	Natureza da revisão
PNUDE21A_211022_Produto 4_v1	22/10/2021	Primeira versão.

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.....	10
3.1.2 RETORTA DE CARBONIZAÇÃO CONTÍNUA.....	15
3.1.3 TECNOLOGIA DE FORNOS CONTAINER RIMA (FCR).....	16
3.1.4 FORNOS BRICARBRAS.....	17
3.1.5 TECNOLOGIA DRYING, PYROLISIS, COOLING (DPC).....	17
3.1.6 TECNOLOGIA DE CARBONIZAÇÃO CONTÍNUA CARBOVAL.....	18
3.2 ANÁLISE DOS PROCESSOS TECNOLÓGICOS DAS EMPRESAS CONTEMPLADAS NO ESTUDO.....	19
3.2.1 ARCELORMITTAL.....	19
3.2.2 PLANTAR FLORESTAL.....	20
3.2.3 RIMA.....	22
3.2.4 VALLOUREC.....	23
3.2.5 RESUMO DAS REDUÇÕES DAS EMISSÕES DIRETAS ALCANÇADAS PELOS PROJETOS IMPLANTADOS NO ÂMBITO DO EDITAL JOF 0191/2017.....	24
4. METODOLOGIA.....	26
4.1 ETAPAS PARA A QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO E REMOÇÃO DE GEE.....	26
4.2 DEFINIÇÃO DAS FRONTEIRAS.....	27
4.2.1 GASES DE EFEITO ESTUFA.....	27
4.3 MAPEAMENTO DAS FONTES DE EMISSÕES INDIRETAS DO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO.....	29
4.3.1 FONTES E SUMIDOUROS DE EMISSÕES NÃO CONSIDERADOS NESSE ESTUDO.....	30
4.4 MÉTODOS DE CÁLCULO.....	30
4.4.1 AQUISIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	31
4.4.2 COMBUSTÃO MÓVEL (TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO).....	31
4.4.3 COMBUSTÃO MÓVEL (MAQUINÁRIOS PARA MECANIZAÇÃO DE FORNOS).....	32
4.4.4 RESÍDUO SÓLIDOS.....	32
4.5 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE CÁLCULO APLICÁVEIS PARA CADA PROCESSO TECNOLÓGICO CONTEMPLADO NO ESTUDO.....	33
4.5.1 ARCELORMITTAL.....	33
4.5.2 PLANTAR FLORESTAL.....	34
4.5.3 RIMA.....	35
4.5.4 VALLOUREC.....	37
5. QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES.....	39
5.1.1 ARCELORMITTAL.....	39
5.1.2 PLANTAR FLORESTAL.....	40
5.1.3 RIMA.....	40
5.1.4 VALLOUREC.....	42
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
7. CONCLUSÕES.....	45

8. ANÁLISE CRÍTICA	46
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fornos cilíndricos de alvenaria do tipo “rabo quente”	11
Figura 2: Forno de encosta.	12
Figura 3: Forno de superfície.	13
Figura 4: Forno retangular de alvenaria modelo RAC700.....	14
Figura 5: Sistema forno-fornalha.....	15
Figura 6: Retorta Contínua.	16
Figura 7: Forno FCR.	16
Figura 8: Forno Bricarbras.	17
Figura 9: Tecnologia DPC.....	18
Figura 10: Reator de carbonização contínua Carboval.....	19
Figura 11: Fluxograma de etapas metodológicas para a realização da quantificação das emissões indiretas	26
Figura 12: Fronteiras do Estudo	27
Figura 13: Possível arranjo de cadeia produtiva de aproveitamento econômico da biomassa florestal sustentável usando-se dos princípios da carbo-reciclagem, para fins de formação de sistemas de apoio financeiro por resultados	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das reduções das Emissões Diretas alcançadas	25
Tabela 2: GWP dos Gases de Efeito Estufa.....	28
Tabela 3: Fontes de emissão de acordo com etapa, categoria e dado controlado	29
Tabela 4: Consumo de Energia ArcelorMittal	39
Tabela 5: Emissões Indiretas de Gases de Efeito Estufa dos projetos apoiados	43
Tabela 6: Comparação entre as Emissões Diretas e Indiretas de Gases de Efeito Estufa dos projetos.....	44

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*

MDL – *Mecanismo de Desenvolvimento Limpo*

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 4 – Consolidação Final de Resultados e Recomendações. 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 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 – Quantificação das Emissões:** Detalhamento dos cálculos e fatores de emissão adotados para as emissões indiretas identificadas como relevantes para cada uma das empresas e projetos apoiados pelo Projeto Siderurgia Sustentável;
- **Capítulo 6 – Resultados e Discussões:** Breve resumo e comentários sobre os resultados obtidos no capítulo 5;
- **Capítulo 7 – Conclusões:** Apresenta as conclusões;
- **Capítulo 8 – Análise Crítica:** Recomendações para trabalhos futuros e comentários adicionais;
- **Capítulo 9 - 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, 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).

A indústria siderúrgica mundial é caracterizada por duas rotas tecnológicas principais: as usinas integradas a coque e as usinas semi-integradas. As usinas integradas a coque têm a transformação do minério de ferro e do aço em uma única unidade industrial, sendo compostas 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 utilizam fornos com indução elétrica para a redução de minérios ou para a fusão de sucata ferrosa oriunda de reciclagem, podendo consumir também proporções variáveis de ferro-gusa ou ferro-esponja oriundos de produtores independentes (“mini-mills”) (CGEE, 2010).

O coque siderúrgico, obtido do carvão mineral, é o principal agente termo-redutor usado em todo mundo para os processos siderúrgicos. No contexto brasileiro verificou-se uma peculiaridade, pela grande disponibilidade do minério de ferro, porém com a limitada disponibilidade de carvão mineral coqueificável: além das usinas integradas a coque que importam o carvão mineral ou o coque siderúrgico, surgiram também usinas integradas que se utilizam do carvão vegetal como agente termo-redutor (as empresas ArcelorMittal e Vallourec, participantes desse projeto, se enquadram nessa categoria), e um setor de produtores independentes de ferro-gusa usando o alto-forno a carvão vegetal, a empresa Plantar Florestal participante deste projeto se enquadra nesta categoria. Também a produção de ferro-ligas, como o ferro-silício usado como agente redutor na produção do magnésio metálico, principal produto da Rima Industrial, também participante deste projeto, passou a ser feito em fornos a arco-elétrico usando o carvão vegetal ao invés do coque mineral.

A utilização de carvão vegetal ao invés de carvão mineral é, portanto, uma peculiaridade da siderurgia brasileira, em especial no Estado de Minas Gerais, e que mais recentemente se expandiu também para a região norte, mais especificamente no Pará (CGEE, 2010). Também recentemente, a siderurgia a carvão vegetal passou a ser um setor emergente na África subsaariana, em especial em Angola e Moçambique.

Nos Altos-fornos de produção de ferro-gusa, o coque mineral ou, alternativamente, o carvão vegetal, são utilizados como agentes termo-redutores para converter a carga metálica (minério de ferro, pelotas, sínter e outros) no principal produto, o ferro-gusa, sendo também gerados como subprodutos a 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 pode ser 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 gases de efeito estufa - 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 duas fases líquidas imiscíveis entre si, sendo uma das fases de base orgânica (bio-óleo, ou alcatrão insolúvel) e a outra de base aquosa (licor pirolenhoso). As proporções de carvão vegetal, alcatrão, licor pirolenhoso 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 poliaromáticos. 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 da carbonização 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 (o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL, criado pelo Protocolo de Kyoto) 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 pode 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 em torno 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.

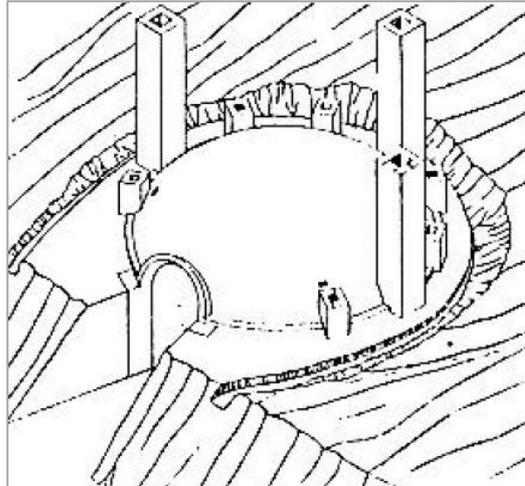


Figura 2: Forno de encosta.

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).

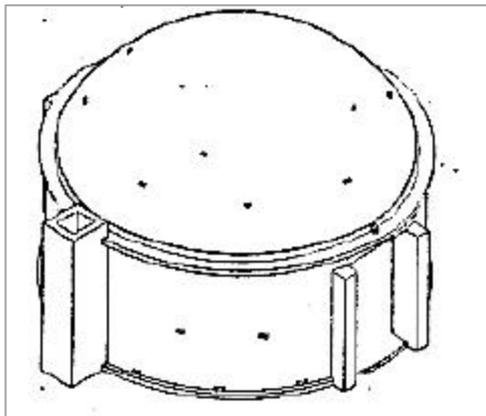


Figura 3: Forno de superfície.

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%.

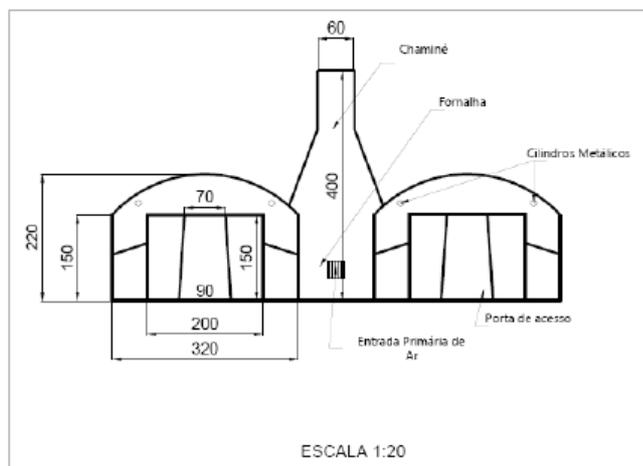


Figura 5: Sistema forno-fornalha.

Fonte: Oliveira, 2012.

3.1.2 Retorta de Carbonização Contínua

Os sistemas de recirculação de gases ou aquecimento indireto, chamados de retorta, são fornos que utilizam uma fonte externa de calor para aquecer a biomassa contida em uma câmara fechada. Podem ser de funcionamento contínuo ou em batelada (ASSIS, 2007).

O forno com funcionamento contínuo consiste em um forno cilíndrico metálico disposto verticalmente, equipado com sistema de queima de gases. A madeira é cortada em peças de 20 a 40 cm de comprimento e o abastecimento se dá pelo topo do forno, descendo por gravidade até a base, em contracorrente com os gases queimados da própria pirólise. Ocorre então, no queimador, a combustão parcial da fumaça produzida continuamente durante o processo de pirólise. Esses gases aquecidos e sem oxigênio, são realimentados no reator, o que permite alcançar altos rendimentos gravimétricos (CGEE, 2015).

As retortas contínuas podem ser consideradas como sendo o mais eficiente sistema de carbonização de madeira em operação no mundo. (RAAD, 2004 apud CGEE, 2015). Atualmente, no Brasil, a ArcelorMittal e a Vallourec Florestal investiram na retorta contínua, porém algumas barreiras como investimento inicial e custo-benefício para viabilidade do investimento acabam impedindo que essa tecnologia seja adotada em larga escala no país (CGEE, 2015).



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 CO e 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}.

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 seja 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.

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}.

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}. Observe-se que a tecnologia de queima dos gases residuais de carbonização consta na descrição do projeto aprovado, no entanto a creditação e o enquadramento do projeto usou-se de método baseado na melhoria do rendimento gravimétrico, portanto desconsiderando a destruição do metano como um componente do projeto.

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 expansão da capacidade produtiva, com a implementação de novos fornos retangulares, com sistema supervisor, sem desativação de atividades de carbonização praticadas com as tecnologias tradicionais. Entretanto, o uso do carvão vegetal adicionalmente produzido no projeto não continuou sendo usado pela própria empresa em seus altos-fornos, pois há algum tempo uma reestruturação na empresa fez com que a carbonização da madeira ficasse como uma atividade independente da siderurgia, portanto o carvão vegetal passou a ser fornecido para terceiros¹.

¹ Durante a entrevista, foi informada a reestruturação da empresa que ocorreu em data próxima da implementação do projeto. A empresa de produção de ferro-gusa foi desmembrada e se tornou independente da empresa de carbonização da madeira (Plantar Carbon). Ao que se indica, a empresa que hoje opera os fornos de carbonização vende o carvão para o mercado consumidor, portanto não há garantia de que o carvão vegetal é usado apenas para finalidade siderúrgica (podendo ser vendido também para uso doméstico, por exemplo). Assim, o projeto que então foi classificado como de categoria 1 não poderia ser enquadrado como tal atualmente, dada a reestruturação empresarial. A carbonização da madeira

3.2.3 Rima

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

A empresa implementou a utilização do 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 é destruído na medida da eficiência do sistema de coleta e queima dos gases.

A empresa apresentou dois projetos apoiados pelo PNUD – Siderurgia Sustentável:

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}.

O projeto baseia-se na premissa que todo o metano presente nos gases gerados nos fornos container é capturado e conduzido até o queimador. De acordo com os dados enviados pela Rima, o forno Container é fabricado de forma a garantir a estanqueidade do processo. O forno carregado de madeira é posicionado na plataforma de carbonização e o exaustor dos gases do processo fica localizado entre o forno e o incinerador, gerando uma pressão negativa que evita o escape de gases. Neste caso, pode ocorrer, e somente se não controlado, a infiltração de ar externo no interior dos dutos. Entre o ventilador e o incinerador de gases o sistema trabalha com pressão positiva e pode ocorrer o escape de gases. Para evitar o escape de metano ou de quaisquer outros gases antes de atingir o queimador, este trecho de tubulação é o mais curto possível e as vedações entre os componentes são checadas regularmente.

como uma atividade independente, não vinculada a um uso cativo pelo setor siderúrgico – como a atual empresa responsável pelo projeto, somente poderá continuar sendo apoiada pelo projeto de siderurgia sustentável se seus clientes consumidores de carvão vegetal para uso siderúrgico sejam identificados e incluídos solidariamente no projeto, permitindo o monitoramento para verificar a substituição do carvão mineral e suas emissões de GEE, que é o efeito desejado para os projetos da categoria 1.

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 da 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}.

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 do aumento da capacidade produtiva da ordem de 350 toneladas de carvão vegetal ao mês. A ideia do forno Container foi substituir a tecnologia tradicional e, deste modo, parte da produção antes ofertada pela tecnologia de fornos de alvenaria foi substituída pelo forno Container, sem gerar aumento de capacidade produtiva total da empresa.

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 alcançam uma redução considerável de emissões de GEE (metano), assim como dos produtos gasosos e de condensáveis formados no processo de carbonização. 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 pelletização da Vallourec Soluções Tubulares Brasil, localizada no município de Jaceaba – MG. Portanto, diferentemente dos demais projetos apoiados, que se baseavam na diminuição de emissões de GEE na carbonização da madeira, o projeto da Vallourec consistia no uso de uma quantidade adicional de um resíduo/subproduto da carbonização da madeira (os finos) em substituição ao gás natural que é o combustível fóssil predominantemente usado na usina de pelletização da empresa.

Objetivou-se o aumento de 72% para 79% da substituição de gás natural pelo 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}.²

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.

² Este relatório não fez uma confirmação de que a metodologia AMS III-AS da UNFCCC foi usada de forma consistente para quantificar as emissões **diretas** de GEE que foram reduzidas pelo projeto de substituição do gás natural pela Vallourec. Esta confirmação também não constava do escopo contratado, que se foca nas emissões indiretas de GEE do projeto.

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>	Março a dezembro 2018	9.780
		Janeiro a agosto 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. METODOLOGIA

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):

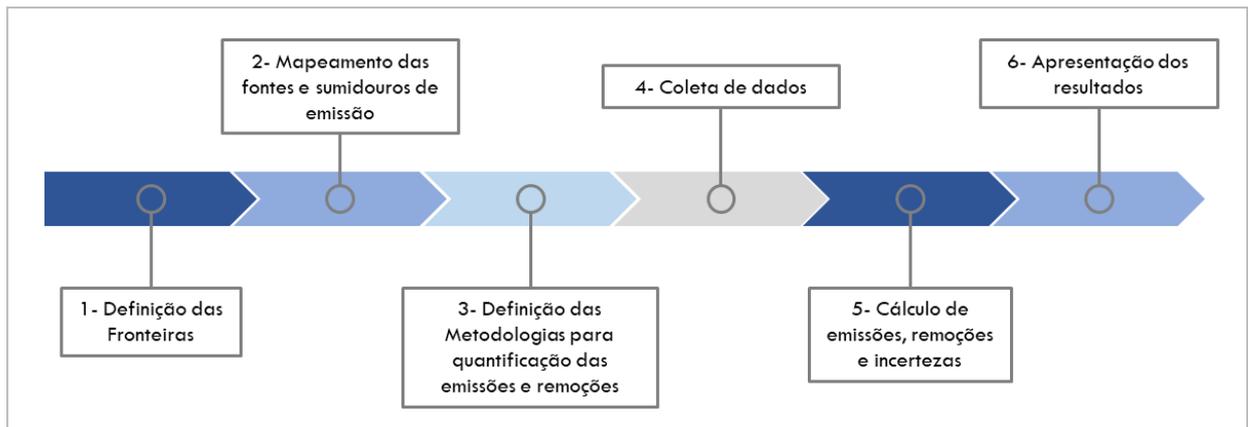


Figura 11: Fluxograma de etapas metodológicas para a realização da quantificação das emissões indiretas

Fonte: Elaboração Própria

Primeiramente, definem-se as fronteiras da quantificação das emissões indiretas da cadeia produtiva siderúrgica baseada no carvão vegetal, ou seja, é necessário determinar quais instalações e atividades da organização serão contempladas pelo estudo, estabelecendo seu limite organizacional. Uma vez que os resultados dos projetos em termos de reduções de emissões diretas de GEE já estavam consolidados e validados/verificados, a análise deste relatório foi focada em identificar todos os efeitos adicionais que os projetos poderiam ter provocado em emissões de GEE, e que foram contemplados nos resultados diretos reportados anteriormente. O terceiro passo é definir as metodologias para quantificação das emissões e, 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 são compilados em um relatório final.

4.2 Definição das fronteiras

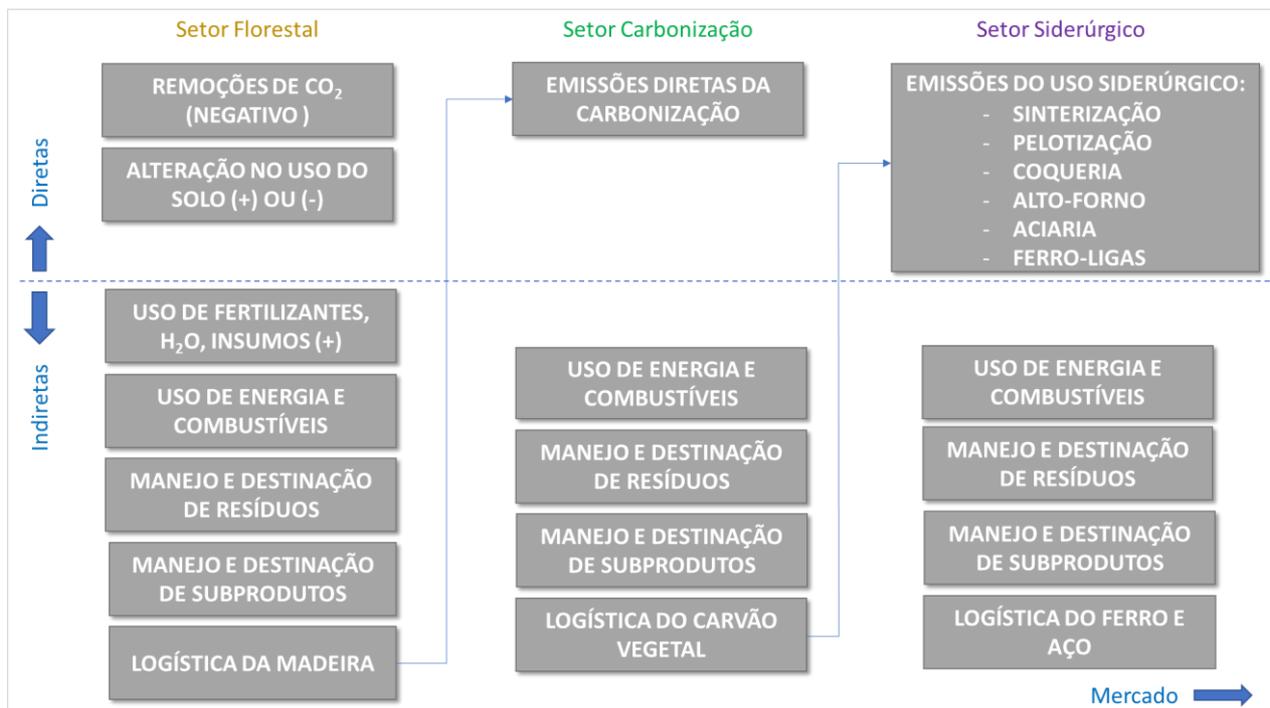


Figura 12: Fronteiras do Estudo

Fonte: Elaboração Própria

A figura 12 contempla todas as fontes de emissão e remoção de GEE pertinentes ao processo de exploração florestal e da siderurgia sustentável. Para este estudo foram consideradas as emissões indiretas relativas a: logística da madeira, do carvão vegetal, e de resíduos e subprodutos; tratamento e disposição de novos resíduos, variação do padrão de consumo de energia elétrica.

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 ³
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.

Consideraram-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, e pelas emissões por operações logísticas.

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

- CH₄: Gerado na decomposição térmica da biomassa nas unidades de carbonização, é a principal emissão de GEE na cadeia do carvão vegetal. O metano formado em processos de combustão de biomassa e de fornos de termoredução siderúrgica (altos-fornos e fornos a arco elétrico) serão desconsiderados por serem irrelevantes e/ou equivalentes às emissões da siderurgia tradicional a coque mineral. Para eventuais tratamentos ou disposições de resíduos sólidos ou efluentes líquidos ricos em matéria orgânica biodegradável em ambientes anaeróbios (aterros sanitários, sistemas anaeróbios de tratamento/disposição de efluentes líquidos) a formação do metano por atividade metanogênica poderia ser considerada, mas essa situação não foi encontrada nos projetos analisados.
- CO₂: Gerado na queima de combustíveis fósseis por fontes móveis e estacionárias. Processos de queima de biomassa de origem florestal renovável e/ou decaimento aeróbio de resíduos sólidos ou efluentes líquidos biodegradáveis não são considerados como emissões diretas ou indiretas de CO₂, porque essas se compensam/neutralizam pelas remoções de CO₂ atmosférico pela atividade biogênica que lhes deu origem. As remoções de CO₂ pela exploração florestal (sumidouros, sequestros de carbono, dando origem a emissões negativas de CO₂) não foram

³ Foi mantido o valor de $GWP_{CH_4} = 21$ (tCO_{2e} / tCH₄) utilizado na quantificação das **emissões diretas** das atividades apoiadas pelo Projeto Siderurgia Sustentável, que corresponde ao valor válido para o primeiro período de compromissos do Protocolo de Kyoto. Para o segundo período de Kyoto o valor foi atualizado para 25 (tCO_{2e} / tCH₄).

considerados neste estudo, e sugestões para inclusão desse escopo serão formuladas na conclusão desse trabalho, onde as emissões e remoções de GEE da atividade de exploração florestal serão abordadas em perspectivas para mecanismos futuros.

- N_2O : Gerado na queima de combustíveis, fósseis ou de biomassa, por fontes móveis ou estacionárias. Essas emissões foram desconsideradas neste trabalho, por serem de menor monta se comparados com as emissões de CO_2 e CH_4 , e, principalmente, por serem comparáveis aos níveis de emissão de N_2O para os processos siderúrgicos de base carvão vegetal, quando comparados com os processos siderúrgicos a base de carvão mineral. Por exemplo, pode-se afirmar que as emissões de N_2O são menores na carbonização da madeira se comparada com a coqueria do carvão mineral, e que os altos-fornos, fornos a arco elétrico, ou fornos de pelletização consumindo carvão vegetal geram quantidades menores ou equivalentes de N_2O se comparados com os respectivos equipamentos se operados à base de combustíveis fósseis (coque/gás natural). Emissões de N_2O pelo decaimento biológico anóxico de matéria orgânica biodegradável presente em resíduos sólidos e efluentes líquidos também foram desconsiderados. Em caso de projetos envolvendo a compostagem de resíduos sólidos em grandes quantidades (que não foi o caso em nenhum dos projetos considerados) essas emissões biogênicas de N_2O podem ser eventualmente relevantes.

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.

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 de matéria prima e resíduos ou subprodutos	Combustão móvel	Consumo de Combustível no transporte de matérias primas e resíduos ou subprodutos adicionais ao projeto.
Uso na Siderurgia	Consumo de combustíveis e energia para	Identificação de equipamentos auxiliares usados em função do carvão vegetal (ex.: maquinário de carregamento/d Descarregamento, processadores

	equipamentos auxiliares	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

Não serão contabilizadas as emissões da etapa Florestal, sendo elas:

- Mudança no uso do solo;
- Uso de fertilizantes, irrigação, e insumos para o cultivo florestal;
- 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;
- Logística da madeira;
- Manejo de resíduos florestais (logística e tratamento/destinação de resíduos gerados previamente à carbonização da madeira).

No capítulo de análise crítica iremos apresentar propostas de metodologias para projetos futuros e serão abordadas as emissões e sumidouros da etapa florestal.

4.4 Métodos de Cálculo

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)*”.

$$PE_{TR,t} = \sum_f D_{c,t} \cdot FR_{c,t} \cdot EF_{CO_2,Padr\tilde{a}o} \cdot 10^{-6}$$

- $PE_{TR,t}$ 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.
- $EF_{CO_2,Padr\tilde{a}o}$ Fator de emissão padrão para o combustível e veículo utilizado [g CO₂/t km]⁴;

⁴ A metodologia sugere fator de emissão de 129 [gCO₂/ t km] para veículos pesados

- c Carga transportada (carvão vegetal, biomassa e resíduo)
- t Período analisado

4.4.3 Combustão Móvel (maquinários para mecanização de fornos)

Para a quantificação das emissões provenientes da utilização de maquinários para mecanização de fornos, será utilizado a metodologia “*TOOL03 Methodological tool: Tool to calculate project or leakage CO₂ emissions from fossil fuel combustion Version 03.0 (2017)*”.

$$PE_{FC,j,y} = \sum_f FC_{i,j,y} \cdot COEF_{i,y}$$

- $PE_{FC,j,y}$ Emissão oriunda da combustão de combustível fóssil de maquinários do projeto [t CO_{2e}];
- $FC_{i,j,y}$ Quantidade de combustível queimado [m³];
- $COEF_{i,y}$ Coeficiente de emissão de CO₂ do combustível [t CO_{2e}/m³];
- i Tipo de combustível queimado;
- j Processo analisado;
- y Período analisado.

4.4.4 Resíduo sólidos

Não foram identificadas emissões de Gases de Efeito Estufa relacionadas a disposição final de resíduos sólidos para nenhum dos projetos avaliados. Salienta-se que qualquer resíduo de natureza biodegradável ou combustível proveniente da biomassa primária produzida na atividade florestal apenas pode levar a emissões de GEE na forma de metano, se houver alguma disposição de resíduo em ambiente anaeróbio (ex. aterros sanitários). Tal destinação não ocorreu em nenhum dos resíduos identificados nos projetos analisados. Emissões de CO₂ pela queima ou pelo decaimento biológico aeróbio são sempre neutras, por sua origem na fixação atmosférica do próprio CO₂ pela atividade florestal sustentável.

4.5 Análise dos métodos de cálculo 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.

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 foi medido para calcular qual a quantidade de CH₄ formado nos fornos e que foi direcionada para os queimadores. Mesmo que o rendimento gravimétrico tenha sido maior no projeto do que na ausência dele, não implicou em um consumo incremental de matéria prima, nem em uma produção adicional de carvão vegetal em relação ao que seria produzido nos fornos tradicionais se não houvesse os queimadores, excluindo-se assim, das possíveis emissões indiretas, o transporte adicional de carvão vegetal produzido a mais devido ao projeto.

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). Os atíços já eram gerados como parte do processo antes da implementação do projeto.

Nos canais, além do vapor d'água e dos gases presentes na fumaça, flui o alcatrão que se mantém aquecido acima do ponto de condensação, todos são direcionados para a célula onde os gases combustíveis (metano, monóxido de carbono, e compostos orgânicos) são queimados participando de forma fundamental no balanço de energia do equipamento, e transformando-se em CO₂ (climaticamente neutro) e em mais vapor d'água emitidos pela chaminé. As cinzas resultantes da limpeza dos queimadores e dos canais de passagem são destinadas a plantios próximos à unidade. As quantidades e distâncias envolvidas nesse transporte são ínfimas, e foram desconsideradas. A disposição de cinzas (inorgânicas) no solo não resulta em nenhuma emissão de GEE, pois não são metanogênicas e nem potenciais geradores de N₂O.

Com relação ao incremento de energia elétrica consumida após a implementação do projeto, o cálculo foi realizado, porém a conclusão é de que estas emissões indiretas podem ser classificadas como irrisórias. (vide seção 5.1.1).

Metodologias aplicáveis ao cálculo de emissões indiretas do projeto:

No caso do projeto 1, aplica-se a metodologia de aquisição de energia (seção 4.4.1). A metodologia de combustão móvel foi excluída do cálculo do projeto pois os resíduos trata-se apenas de cinzas de atiços destinados a plantios próximos em quantidades 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.

O consumo de energia elétrica antes e após a implementação do projeto seria a única fonte de emissão indireta do projeto. Conforme indicado na seção 5.1.1, as emissões relativas a esse consumo podem ser classificadas como irrisórias. Assim, conclui-se que o projeto 2 de instalação de sistema para controle de temperatura e fluxo de ar não implica em emissões indiretas adicionais.

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).

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 a possíveis incrementos de consumo de energia elétrica decorrentes do projeto e combustão móvel associada à mecanização de 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 4.4.3).

4.5.3 Rima

I. Análise das fontes indiretas de emissões de GEE do projeto 1: Instalação de sistema para combustão de 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 aos 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 ou de produção adicional de carvão vegetal em relação aos fornos tradicionais, excluindo-se assim, das emissões indiretas, o transporte de carvão vegetal adicional devido ao projeto.

A chama do queimador é mantida em operação contínua e em boas condições de queima para uma destruição efetiva do metano. A unidade de produção de carvão vegetal possui sistemas de monitoramento de temperatura instalados ao longo da tubulação, dutos e forno que monitoram a temperatura do processo, desde a carbonização da madeira até a queima de gases. As temperaturas são registradas e podem ser acompanhadas pelo sistema de supervisão do forno. Além disso, rotinas de checagem em campo também são executadas regularmente e registradas no sistema de controle do processo pelo operador, a fim de verificar se há chama no incinerador, presença ou não de vazamentos, nível do armazenamento de subprodutos, etc. Desta forma, possíveis emissões por escape de metano também serão desconsideradas.

No processo do Forno Container, os gases são resfriados e recebem uma destinação controlada pela empresa. De acordo com os dados enviados pela Rima, no projeto 1, os gases coletados no forno container são conduzidos através de dutos metálicos que funcionam como um trocador de calor (retorta destilativa) permitindo a condensação do alcatrão e do licor pirolenhoso. O material condensado é direcionado através de inclinações na tubulação para pontos específicos onde o pirolenhoso é retido e armazenado. Adicionalmente ao processo de troca térmica, parte do pirolenhoso que é coletado é injetado novamente na tubulação através de bicos aspersores, para aumentar a eficiência de coleta, pois, promove a coalescência de partículas (névoa de alcatrão e pirolenhoso) e mantém a parede dos tubos refrigerada.

Os volumes de pirolenhoso e alcatrão vegetal coletados são armazenados em tanques de contenção construídos durante o projeto. O destino é variado e depende das condições de mercado, sendo os mais comuns, para os alcatrões, a indústria de defensivos agrícolas naturais, produtos carboquímicos na forma de óleos essenciais e aromas para a indústria de alimentos (fumaça líquida) através de empresa

especializada neste tipo de destinação. O alcatrão não comercializado pode também ser usado como combustível em processos internos da empresa. O licor pirolenhoso (que pode ser considerado como água não potável, com quantidades consideráveis de substâncias orgânicas hidrossolúveis) é usado pela própria empresa como agente irrigante em unidade própria de reflorestamento e viveiro de mudas.

Principalmente no caso do alcatrão, para o qual as principais destinações são outras indústrias, o resíduo possui valor econômico, passando a ser classificado como um subproduto da carbonização, e uma matéria-prima para as empresas que o recebe. Sendo assim, estas emissões poderiam ser de responsabilidade das empresas que recebem o alcatrão como matérias-primas. No caso do pirolenhoso, cujo aproveitamento se dá dentro das áreas de plantio de propriedade da Rima, há também um valor econômico para essa destinação, ainda que dentro dos limites da própria empresa. De qualquer forma, será aplicada a metodologia de combustão móvel para emissões resultantes do transporte desses subprodutos até o receptor final, identificando o total destas emissões como emissões indiretas do projeto, mas cabe a discussão sobre a responsabilidade destas emissões a partir do momento que elas deixam de ser um resíduo que seria descartado sem aproveitamento. Salienta-se aqui também, conforme se discutiu anteriormente, que esses subprodutos seriam lançados sem tratamento na atmosfera na ausência do projeto, prática que é admitida devido a um excesso de tolerância da legislação ambiental para com as tecnologias tradicionais.

Também se aplicam como emissões indiretas do processo o cálculo de consumo de energia elétrica do processo antes e após a implementação do projeto. Neste caso, considera-se o aumento em função da inclusão do sistema de alimentação automática do combustível da chama piloto e de bombeamento dos subprodutos para o tanque de armazenamento.

O consumo de cavaco de madeira de eucalipto (cerca de 5 m³ por dia) como combustível auxiliar foi desconsiderado do cálculo por se tratar de uma emissão neutra de CO₂ – considerando a origem renovável da madeira, e as emissões ínfimas relacionadas à sua fabricação e ao transporte e destinação de cinzas após sua queima, tal como também se concluiu com os queimadores da empresa ArcelorMittal.

Metodologias aplicáveis ao cálculo de emissões indiretas do projeto:

Para o projeto 1 serão utilizadas as metodologias de aquisição de energia elétrica (seção 4.4.1) e de combustão móvel para transporte dos resíduos (ou subprodutos) do processo (seção 4.4.2).

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

Conforme indicado na seção 3.2.3, com a modificação para forno Container, identificou-se como emissões indiretas aplicáveis para o Projeto 2, o consumo de energia elétrica devido à implementação do projeto, principalmente em função da inclusão de mais uma plataforma de carbonização e de sistema de pórtico móvel para gerenciamento do pátio de resfriamento de carvão.

Também foram consideradas as emissões de combustão móvel relativas à destinação dos resíduos e/ou subprodutos do processo (licor pirolenhoso e alcatrão vegetal). O alcatrão foi destinado principalmente ao uso como combustível em processos internos da empresa ou para uma destilaria de terceiros que extraia óleos essenciais. Já o licor pirolenhoso foi utilizado internamente nas florestas e viveiros de mudas do grupo, e uma pequena parte foi utilizada em pesquisas de campo.

Não foram identificados consumos adicionais de combustíveis fósseis em equipamentos ou maquinários para adequação e transporte da madeira, etc.

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.

4.5.4 Vallourec

I. Análise das fontes indiretas de emissões de GEE do projeto único: 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 como combustível 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 naquele momento.

As emissões de CO₂ da queima da moinha como combustível são consideradas biogênicas, partindo da premissa de que o carvão provém de fonte renovável, mas, ao ser fabricada na carbonização, as emissões de metano são relevantes. Entretanto, essas emissões não são consideradas por se tratar de um resíduo da carbonização da madeira para produção de carvão vegetal granular, que é o produto principal das unidades de carbonização, e ao qual todas as emissões de metano são contabilizadas.

Assim, para o período em que o projeto foi analisado, serão consideradas como potenciais 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 combustão móvel relativa ao transporte de moinha da unidade de carbonização à unidade de pelotização em Jaceaba – MG.

Não foram identificados consumos de outros combustíveis em alguma etapa de beneficiamento do material (secagem, moagem, etc.). O projeto não implica em incremento da geração de resíduos sólidos, pelo contrário, o projeto consiste no aproveitamento energético de um resíduo antes não utilizado. Assim, o projeto resulta na diminuição da quantidade de um resíduo sólido (a moinha), porém, por ser um produto estável biologicamente, não passível de formação de nenhum outro GEE a não ser o próprio CO₂ em caso de sua queima (que é neutro devido à moinha ser de origem renovável), não há nenhuma redução de emissões de GEE que o projeto causou, a não ser a substituição do gás natural no processo de pelotização. Não houve nenhuma evidência nas informações analisadas de que a moinha usada no projeto era utilizada anteriormente como combustível por outras atividades, e que o uso dela no projeto tenha causado perda a outros processos (vazamentos). Da mesma forma, não foram encontradas evidências de que a moinha era resultante de processos de carbonização de madeira de origem não renovável (ex. desmatamentos). Em entrevista, a empresa informou que mesmo quando a moinha usada no projeto não é originária de carbonização da madeira feita pela própria empresa, e portanto tem origem em carbonização por fornecedores externos, há um controle de que esses fornecedores sejam autossuficientes na produção da madeira de atividades florestais sustentáveis.

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.

5. QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES

Serão considerados os cálculos de emissões indiretas relacionadas aos projetos, conforme descrito na seção 4.

5.1.1 ArcelorMittal

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

Conforme descrito no item 4.5.1, as emissões indiretas aplicáveis ao projeto seriam principalmente relativas ao consumo de energia elétrica. Os dados apresentados pela ArcelorMittal indicam que o consumo de energia não aumentou em decorrência da instalação do sistema de combustão de gases.

A tabela abaixo apresenta dos dados obtidos pela empresa, demonstrando que não houve grandes alterações no consumo de energia no período do projeto (2020), inclusive, pelo contrário, no ano de 2020 houve uma diminuição no consumo de energia e uma menor relação de consumo de energia por kt de carvão produzido, comparado ao ano anterior.

Tabela 4: Consumo de Energia ArcelorMittal

Parâmetro	2018	2019	2020
Carvão Vegetal Produzido (kton/ano)	328	306	325
Consumo de Energia (MWh/ano)	1.163	1.318	1.113

Fonte: Elaboração própria (com base em dados recebidos pela empresa)

Desta forma, pode-se concluir que as emissões relativas ao incremento de consumo de energia elétrica em decorrência do projeto não se aplicam neste caso.

Para as emissões relativas ao transporte de resíduos (cinzas destinadas a plantio próximo da área do projeto, de propriedade da empresa), não houve medição do total de cinzas e total de distância percorrida durante o período do projeto, porém, como se trata apenas das cinzas da queima de atíços que são utilizados para manter acesa a chama do queimador, isto é, cinzas de madeira aplicadas em áreas verdes próximas e que não trazem qualquer dano ambiental, estes cálculos foram desconsiderados.

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

Para este projeto, a única emissão indireta aplicável seria o consumo de energia elétrica adicional devido à inclusão do sistema de controle de temperatura e fluxo de ar. O projeto foi implementado durante o

ano de 2019, quando é possível observar uma pequena alteração de consumo de energia por kt de carvão produzido, de acordo com a tabela 4, acima.

Se considerarmos, de forma conservadora, que todo o incremento de consumo de energia ocorreu por conta do projeto, teremos um aumento de 155 MWh por ano (do ano de 2018 para o ano de 2019). Assim, temos como resultado 12,50 tCO₂e de emissões relativas ao consumo incremental de energia elétrica por conta do projeto.

O total de 12,50 tCO₂e corresponde a apenas 0,02% das emissões reduzidas do projeto (59.721 tCO₂e por ano).

Os dados e cálculos realizados são apresentados no Apêndice I.

5.1.2 Plantar Florestal

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

Para o projeto da Plantar Florestal aplicam-se como emissões indiretas o consumo de energia elétrica adicional devido ao projeto e a combustão móvel associada à mecanização de carga e descarga dos fornos retangulares, com utilização de tratores. Entretanto, devido à ausência de dados relativos ao consumo de energia elétrica e pela característica do projeto, no qual não é esperada uma elevação considerável no consumo dessa utilidade, considerou-se irrisória a emissão atrelada a esse precursor.

Para o cálculo da combustão móvel associada à mecanização do processo, obtivemos os dados de consumo durante o período do projeto para a utilização de 02 máquinas carregadeiras modelos CAT 924. Para as duas máquinas é utilizado o total de 4.000 litros de óleo diesel (10 litros por hora, 400 horas por mês de funcionamento). Utilizando a metodologia aplicável, chegou-se ao total de 9,70 tCO₂e emitidas pela atividade. Este valor corresponde a 0,17% do total de emissões reduzidas pelo projeto.

Os dados utilizados e cálculos realizados são apresentados no Apêndice II.

5.1.3 Rima

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

Houve um incremento no consumo de Energia Elétrica igual a 3.100 kWh (ou 3,1 MWh) por mês devido à implementação do projeto. Considerando o período de 6 meses do projeto (setembro de 2019 a fevereiro de 2020), temos 18,6 MWh de energia adicional utilizada.

Utilizando a metodologia de aquisição de energia elétrica, chegou-se ao total de 1,37 tCO₂e, que corresponde a aproximadamente 0,04 % do total de emissões reduzidas do projeto (3.002 tCO₂e).

Para as emissões referentes ao transporte de resíduos ou subprodutos, serão considerados os transportes de alcatrão vegetal e pirolenhoso. Conforme citado na seção 4.5.3 o licor pirolenhoso é destinado principalmente para irrigação em áreas de reflorestamento próprias e o alcatrão é enviado para indústrias de destilação ou de alimentos. Para o cálculo das emissões, foram considerados os valores informados pela Rima, sendo 14,535 toneladas de pirolenhoso e 11,628 toneladas de alcatrão transportados durante o período do projeto. Considerou-se também, de forma conservadora, as maiores distâncias percorridas, sendo para o pirolenhoso a área mais distante de plantio, 782 km e para o alcatrão o comprador mais distante, a 1.400 km.

As emissões resultaram em 2,93 tCO₂e devido ao transporte de licor pirolenhoso e 4,20 tCO₂e devido ao transporte de alcatrão. Somadas, estas emissões indiretas correspondem a 0,24% do total de emissões reduzidas do projeto (3.002 tCO₂e).

Os dados utilizados e cálculos realizados são apresentados no Apêndice III.

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

Para o projeto 2, o incremento no consumo de Energia Elétrica foi da ordem de 7.000 kWh por mês (ou 7,0 MWh por mês) durante o período do projeto. Considerando o período de 12 meses do projeto (julho de 2018 a junho de 2019), tem-se 82 MWh de energia adicional utilizada.

Utilizando a metodologia de aquisição de energia elétrica, chegou-se ao total de 5,79 tCO₂e, que corresponde a aproximadamente 0,09% do total de emissões reduzidas do projeto (6.388 tCO₂e).

Para as emissões referentes ao transporte de resíduos, serão considerados os transportes de alcatrão vegetal e pirolenhoso. Assim como no projeto 1, foram considerados os valores informados pela Rima, sendo 27,477 toneladas de pirolenhoso e 22,291 toneladas de alcatrão transportados durante o período do projeto. Considerou-se também, de forma conservadora, as maiores distâncias percorridas, sendo para o pirolenhoso a área mais distante de plantio, 782 km e para o alcatrão o comprador mais distante, a 1.400 km.

Como resultado, foram obtidos 5,54 tCO₂e devido ao transporte de licor pirolenhoso e 8,05 tCO₂e devido ao transporte de alcatrão. Somadas, estas emissões correspondem a 0,21% do total de emissões reduzidas do projeto (6.388 tCO₂e).

Os dados utilizados e cálculos realizados são apresentados no Apêndice IV.

5.1.4 Vallourec

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

De acordo com os dados obtidos pela Vallourec, houve um incremento de consumo de Energia Elétrica da ordem de 1 kWh por tonelada de pelota produzida. Considerando o período do projeto (março de 2018 a agosto de 2019), o total de pelotas produzidas foi de 2.089.074 toneladas.

Assim, utilizando a metodologia de aquisição de energia elétrica, chegou-se ao total de 167,31 tCO₂e, que corresponde a aproximadamente 0,70 % do total de emissões reduzidas do projeto (23.847 tCO₂e).

Com relação às emissões por combustão móvel relativas ao transporte de moinha de carvão da unidade de peneiramento de carvão até a unidade de pelletização em Jaceaba – MG, a empresa informou que a distância de uma unidade a outra é de 218 km. A massa da moinha utilizada no período do projeto foi obtida no relatório de auditoria e corresponde a 55.988 toneladas.

Com base nos dados obtidos e aplicando a metodologia de combustão estacionária aplicável para transporte e distribuição, chegou-se ao total de 3.148,99 tCO₂e emitidas pelo transporte de moinha no período do projeto. Este total corresponde a cerca de 13% do total de emissões reduzidas pelo projeto.

Os dados utilizados e cálculos realizados são apresentados no Apêndice V.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 5 apresenta o resumo dos resultados obtidos na seção anterior.

Tabela 5: Emissões Indiretas de Gases de Efeito Estufa dos projetos apoiados

Empresa	Projeto	Tipo de Emissão Indireta	Emissões (tCO_{2e})
ArcelorMittal	Projeto 1: Instalação de sistema para combustão dos gases residuais da carbonização	Aquisição de Energia Elétrica ⁵	N/A
		Combustão Móvel (transporte de cinzas) ⁶	N/A
	Projeto 2: Instalação de sistema para controle de temperatura e fluxo de ar	Aquisição de Energia Elétrica	12,50
Plantar Florestal	Projeto 1: Implementação de sistema supervisorio para controle de processo	Aquisição de energia elétrica ⁷	N/A
		Combustão móvel (mecanização do processo)	9,70
Rima	Projeto 1: Instalação de sistema para combustão de gases residuais	Aquisição de energia elétrica	1,37
		Combustão móvel (transporte de resíduos / subprodutos)	7,13
	Projeto 2: Elevação da capacidade produtiva	Aquisição de energia elétrica	5,79
		Combustão móvel (transporte de resíduos / subprodutos)	13,60
Vallourec	Projeto 1: Ampliação da capacidade de substituição de combustível fóssil	Aquisição de energia elétrica	167,31
		Combustão móvel (transporte de moinha)	3.148,99
Total de Emissões (tCO_{2e})			3.366,38

Fonte: Elaboração Própria

⁵ Emissões relativas à aquisição de energia elétrica foram analisadas para o projeto, porém não foram aplicáveis, vide seção 5.1.1.

⁶ Emissões relativas à combustão móvel foram analisadas para o projeto, porém não foram aplicáveis, vide seção 5.1.1.

⁷ Emissões relativas à aquisição de energia elétrica foram analisadas para o projeto, porém não foram aplicáveis, vide seção 5.1.2.

Tabela 6: Comparação entre as Emissões Diretas e Indiretas de Gases de Efeito Estufa dos projetos

Empresa	Projeto	Reduções de Emissões Diretas (tCO_{2e})	Aumento de Emissões Indiretas (tCO_{2e})	Percentual (Indiretas/Diretas)
ArcelorMittal	Projeto 1: Instalação de sistema para combustão dos gases residuais da carbonização	-12.691,00	N/A	NA
	Projeto 2: Instalação de sistema para controle de temperatura e fluxo de ar	-59.721,00	12,50	0,02%
Plantar Florestal	Projeto 1: Implementação de sistema supervisorio para controle de processo	-5.568,00	9,70	0,17%
Rima	Projeto 1: Instalação de sistema para combustão de gases residuais	-3.002,00	8,50	0,28%
	Projeto 2: Elevação da capacidade produtiva	-6.388,00	19,38	0,30%
Vallourec	Projeto 1: Ampliação da capacidade de substituição de combustível fóssil	-23.848,00	3.316,30	13,91%
Total de Emissões (tCO_{2e})		-111.218,00	3.366,38	3,03%

Fonte: Elaboração própria

De acordo com os cálculos realizados, observa-se que, no geral, as emissões indiretas contabilizadas no presente trabalho representam uma porcentagem muito pequena das emissões reduzidas de cada projeto. Em quase todos os casos, as emissões indiretas correspondem a menos que 1% dessas emissões. A maior emissão indireta está relacionada à combustão móvel do transporte da moinha de carvão vegetal que substituiu o gás natural no projeto da empresa Vallourec. Mesmo representando a maior das emissões indiretas em valores absolutos, esse valor corresponde a cerca de 14%.

7. CONCLUSÕES

Buscando o desenvolvimento de uma cadeia de produção siderúrgica sustentável e de baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE), foi feita uma quantificação das emissões indiretas atreladas aos projetos apoiados pelo Projeto Siderurgia Sustentável. Assim, foi identificado um total de 3,36 kt de CO₂e distribuídos entre os 6 projetos realizados nas 4 empresas apoiadas pelo programa.

Em projetos que propõem o uso de subprodutos ou resíduos para finalidades siderúrgicas com a substituição de combustíveis fósseis (como foi o caso da Vallourec), entende-se que seja necessário analisar a influência que as emissões associadas ao transporte podem impactar na emissão total do projeto, pois é notório a sua forte contribuição. Esta situação também parece que irá ser relevante em projetos que efetivamente resultem em aumento da quantidade de carvão vegetal produzida e consequente aumento no consumo de carvão vegetal nos processos siderúrgicos (Categoria 1, onde nenhum dos projetos pôde ser enquadrado). A logística do transporte do carvão vegetal dos locais de carbonização, situados nas regiões de produção florestal, até as usinas siderúrgicas, geralmente situados em áreas metropolitanas, parece ser relevante. Entretanto, mesmo essa situação se revelará favorável ao carvão vegetal quando comparado com o seu competidor (o carvão mineral), cuja logística e cadeia de conversão (coquerias) são muito mais impactantes do ponto de vista de emissões de GEE e poluentes atmosféricos.

Concluiu-se que as emissões indiretas analisadas no presente trabalho correspondem a um desconto de aproximadamente 3% do total reduzido nas emissões diretas pelos projetos implementados. Entretanto, recomenda-se que em trabalhos futuros a etapa florestal e mudança e uso do solo sejam consideradas na quantificação das emissões indiretas, de modo a obter uma visão mais completa sobre as emissões indiretas dos processos de carbonização e uso na siderurgia. Algumas sugestões são apresentadas na próxima seção (análise crítica) para esse fim.

8. ANÁLISE CRÍTICA

Esta seção tem o objetivo de fazer recomendações gerais para o caso de novos projetos de apoio ao setor de siderurgia sustentável baseados em pagamentos por resultados, contemplando de forma adequada os efeitos diretos e indiretos sobre as emissões e remoções de GEE, e outros efeitos socioeconômicos e ambientais dos projetos de base florestal.

Para projetos que no futuro venham a ser classificados como da **Categoria 1 (Produção de carvão vegetal sustentável - instalação e/ou ampliação de capacidade produtiva de carvão vegetal)**, recomenda-se que o resultado do projeto seja medido como uma diminuição do consumo de uma quantidade correspondente de coque mineral ou outros combustíveis fósseis nos processos internos da produção siderúrgica (ver Figura 12 acima). Dessa forma, em projetos da Categoria 1, devem ser calculadas como emissões reduzidas pelo projeto aquelas que correspondem ao uso, e adicionalmente, a toda a cadeia de produção do coque mineral substituído, incluindo as atividades de mineração, transporte, beneficiamento do carvão mineral (inclusive coqueria). Nenhum dos projetos contemplados até aqui envolveu tal situação⁸, mas tais projetos têm o maior impacto possível em relação à redução de emissões de GEE, e certamente serão mais relevantes no futuro.

Nesse aspecto, as empresas potencialmente contempladas não se restringem àquelas que já se utilizam do carvão vegetal, mas também empresas hoje baseadas no coque mineral, que decidam converter-se para o sistema sustentável. Aqui se assinala que a opção pelo carvão vegetal sustentável é uma decisão que representa um compromisso de longo prazo. As florestas sustentáveis, para fornecerem as quantidades de biocarbono suficientes para a manutenção de um setor siderúrgico, são consideráveis não apenas em termos de extensão de área de florestamento ou reflorestamento requeridos, mas também pelos longos prazos de maturação de estoques vivos e de manutenção de uma atividade fotossintética regular se estendendo por décadas. A decisão empresarial de ampliar ou de ingressar no ramo da siderurgia sustentável enfrenta óbvias barreiras, por demandar imobilização de vultuosos investimentos. Assim, mecanismos financeiros internacionais voltados para a mitigação e resiliência climática podem prescindir de requisitos de demonstração de adicionalidade aos candidatos que se mostrarem interessados na conversão energética. Ou seja: nenhum player do setor siderúrgico iria expandir ou aderir ao carvão vegetal, em detrimento do carvão mineral por iniciativa própria apenas. No entanto, se houver um instrumento de intervenção econômica vigoroso para combater a crise climática e atingir os

⁸ O projeto da Vallourec envolveu a substituição do gás natural pela moinha de carvão vegetal, que tem efeitos semelhantes. Ao substituir o gás natural por um combustível renovável, pode-se calcular não apenas as reduções de emissões que ocorrem pelo combustível que deixou de ser queimado (emissões diretas reduzidas) como também as emissões da cadeia de produção e distribuição do combustível fóssil. Para essas apropriações, os instrumentos que podem ser usados são a metodologia AMS III-AS (já citada anteriormente) e o *"TOOL15 Methodological tool: Upstream leakage emissions associated with fossil fuel use. Version 02.0 (2014)"*.

objetivos do Acordo de Paris, essa transição para a economia de baixo carbono pode ser atrativa para todo o setor siderúrgico brasileiro. A bioenergia é, de fato, descrita e prescrita pelo IPCC no relatório que serve de guia para os países chegarem aos objetivos do acordo de Paris, de limitar o aquecimento global em 1.5°C (IPCC, 2018 e 2019). Mecanismos de mercado para o Acordo de Paris estão atrasados, e assim que entrarem em vigor devem ser usados como a base para formulação do apoio à siderurgia sustentável, baseada nos resultados quantificáveis e certificáveis, como se descreve em seguida.

Uma primeira consideração a fazer é de criação de mecanismos voltados para um apoio de resultados alcançados em cada uma das três diferentes fronteiras de atuação da siderurgia sustentável, isto é, a **desverticalização: (a) Florestas Energéticas Sustentáveis; (b) Carbonização Sustentável; e (c) Siderurgia Sustentável.**

O apoio ao setor de **florestas energéticas sustentáveis** tem que considerar similitudes e peculiaridades da biomassa florestal lignocelulósica (lenha), se comparada com os demais modais de bioenergia e de biocombustíveis relevantes no Brasil, aí englobando bioetanol base cana-de-açúcar, milho ou biomassa lenhosa (etanol de 3ª geração), assim como o biodiesel. Esses setores procuram, cada um de sua maneira, o reconhecimento de méritos relativos a aspectos ambientais e climáticos, vários projetos foram registrados para certificação de créditos de carbono na modalidade MDL, criado pelo Protocolo de Kyoto e gerenciado pela UNFCCC.

Em comparação com cultivos de espécies de ciclo anual para o etanol e biodiesel, o cultivo florestal resulta em formação de grandes estoques de carbono nas áreas florestadas. Entretanto, no mecanismo de Kyoto não houve contemplação de nenhum crédito pela remoção de CO₂ atmosférico pela incorporação na biomassa florestal, exceto para as atividades de florestamento e reflorestamento (Projetos CDM modalidade A/R) de áreas que se demonstrassem estarem sem cobertura florestal na data de referência (31/12/1989). Tampouco, não existiu nenhuma possibilidade de certificação de projetos que resultassem na remoção e imobilização de carbono por meio da atividade de carbonização (pirólise) da madeira sustentável. Ambas as modalidades foram excluídas do MDL por conta da falta de garantias de adicionalidade e/ou permanência, ou seja: (i) para não criar um efeito perverso de incentivo ao desmatamento para criação de áreas elegíveis a serem reflorestadas; e (ii) por não haver garantias de que o carbono capturado em estoques florestais ou na carbonização não fossem consumidos posteriormente ao recebimento dos créditos de carbono.

Para cobrir essa lacuna do MDL, programas de apoio a atividades sustentáveis relacionadas à redução de desmatamento e degradação florestal (REDD+) foram apoiados pelos fundos financeiros climáticos oficiais. Também os mercados voluntários de reduções de emissões de GEE (os “voluntary carbon markets – VCMs”) surgiram e se disseminaram no setor florestal, estabelecendo condicionantes para monitoramento e certificação de remoções de carbono por entidades ou arranjos institucionais que

receberam reconhecimento de investidores interessados em neutralização voluntária de suas emissões, fora do arcabouço da UNFCCC.

Hoje, porém, o Acordo de Paris está em vias de ser regulamentado para os seus mecanismos de mercado, os quais tomam por base as recomendações do IPCC para as tecnologias/medidas necessárias para alcançar o objetivo de limitar o aquecimento do planeta a 1.5°C, e dentre essas tecnologias elegíveis pelo IPCC foram elencadas a bioenergia de origem de projetos de manejo sustentável de florestas (IPCC, 2018 e 2019), e a captura do carbono em tecnologia de carbonização como por exemplo o Biochar para aumentar o aporte de carbono e melhorar a qualidade dos solos (Motta, 2020).

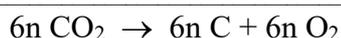
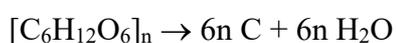
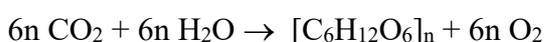
Assim, em breve podemos estar diante do reconhecimento e possibilidade de criação de mecanismos de apoio público internacional por remoções certificadas de CO₂ e/ou substituição de combustíveis fósseis pelo uso da biomassa ou biocarbono, não apenas oriundos do cultivo de florestas monoculturais (ex. eucalipto, pinus) como é a prática que foi apoiada pelo PNUD no projeto de siderurgia sustentável, mas eventualmente também da extração de produtos lenhosos pela gestão sustentável de ecossistemas florestais biodiversos e nativos, desde que satisfazendo requisitos legais ambientais dos países hospedeiros e os co-benefícios e aceitabilidade comunitária em escalas locais e regionais.

Dentre os requisitos a serem atendidos para projetos de bioenergia de origem florestal monocultural ou biodiversa inclui-se o compromisso dos proponentes com longos prazos de creditação, vinculados à manutenção do ecossistema e extração da biomassa de forma comprovadamente renovável. Assim, recomenda-se a utilização de modelos que levem em conta todas as emissões e todas as remoções de CO₂ (biomassa colhida) durante todo o ciclo de vida de um empreendimento, que dura no mínimo em torno de 30 anos (se considerarmos apenas 3 cortes a cada 7 anos como a tecnologia a ser usada na análise econômica do projeto de uso de floresta renovável baseada no cultivo monocultural em espécies de rápido crescimento).

Para o uso bioenergético de florestas de vegetação nativa, diversas modalidades de manejo sustentável podem ser elaboradas, cada uma com sua especificidade, por exemplo: manejo florestal sustentável (SFM), em unidades de conservação ou em reservas extrativistas, aproveitamento de biomassa renovável oriunda do manejo sustentável em APPs/RLs (protegidas pelo código florestal) de propriedades rurais produtivas, projetos de redução do desmatamento envolvendo comunidades locais na modalidade REDD+, aproveitamento de madeira oriundas de projetos de infraestrutura (energia, mineração, transportes, agricultura e atividades urbanas etc.) que resultam em alteração no uso do solo (Land Use Change – LUC), e aproveitamento de resíduos agrícolas diversos. Muito promissor no Brasil é o florestamento e reflorestamento em áreas degradadas ou pastos abandonados, na medida em que o confinamento da pecuária está liberando grandes extensões de áreas que, se não forem submetidas ao

manejo sustentável, se colocam em risco de grandes e repentinas perdas de biomassa pela incidência crescente de incêndios e queimadas das vegetações não manejadas.

A **carbonização sustentável** é o segundo componente setorial que merece ser apoiado por seus efeitos de mitigação climática. De fato, se associado à biomassa florestal renovável, o efeito conjunto final da carbonização é a obtenção de um produto, o carvão vegetal sustentável, cujas virtudes como modal energético e climático são singulares. Primeiro, o efeito de imobilização e mineralização do carbono retirado da atmosfera, ou seja, uma captura e sequestro de CO₂, que pode ser didaticamente descrita como as duas seguintes reações químicas que simplificada e descrevem a fotossíntese florestal para formação da biomassa lignocelulósica [C₆H₁₂O₆]_n seguida da sua carbonização:



Como a última reação indica, o resultado conjunto da fotossíntese com carbonização, do ponto de vista do ciclo biogeoquímico do carbono, é a fixação do CO₂ atmosférico na forma de carbono fixo (carbono presente no carvão vegetal na forma elementar, artificialmente mineralizado/fossilizado, não mais biodegradável), e liberação do oxigênio atmosférico. Do ponto de vista do ciclo hidrológico, os dois processos correspondem a uma imobilização inicial da água na forma de biomassa (durante a fotossíntese florestal a água se liga ao carbono formando os carboidratos constituintes da celulose, bem como se mantendo na forma de água livre nos tecidos vegetais); na carbonização, por sua vez ela é totalmente liberada e pode ser recuperada, formando o licor pirolenhoso.

Do ponto de vista energético, o carvão vegetal, além de conter o carbono retirado da atmosfera, contém também a energia solar que foi capturada pelos vegetais na fotossíntese. Assim, a simples estocagem do carvão vegetal, em depósitos geológicos controlados (projetos CCS, isto é, de captura e estocagem do carbono), corresponde a uma emissão negativa (remoção permanente) de CO₂ atmosférico. Se disposto adequadamente em ambientes conhecidos e controlados (por exemplo em cavas de mineração) pode constituir uma reserva de carbono e energia, tangível e auditável, que ficará disponível para uso das futuras gerações, quando a circunstância climática o permitir.

Aliado a isso, acrescenta-se que o carvão vegetal tem uma logística imbatível em comparação com qualquer outro modal energético fóssil, por ser inofensivo à água e aos ecossistemas naturais: exceto pelos riscos associados à ignição e fogo não controlado, que podem ser prevenidos, não há nenhum efeito adverso no transporte e estocagem do carvão vegetal em ecossistemas terrestres ou aquáticos. A baixa densidade (propriedade flutuante) é outro aspecto favorável à logística terrestre e

aquática/marítima (não requer volumes confinados para a cabotagem, e pode ser transportado na forma de bags flutuantes por rebocadores).

Assim, do ponto de vista energético ou climático, a simples produção do carvão vegetal e sua estocagem representa uma ação de mitigação facilmente quantificável, por ser estequiométrica e tangível: cada m³ de carvão vegetal sustentável corresponde a 1 tonelada de CO₂ removido da atmosfera (assumindo a densidade granular de 270 kg/m³ e considerando o carvão como constituído de carbono elementar). Essa capacidade de remoção de carbono pela pirólise foi reconhecida parcialmente no IPCC SR1.5 (2018), que incluiu a produção do biochar como tecnologia de emissão negativa, entretanto, esse produto denominado biochar foi indicado pelo IPCC apenas como um material de uso no condicionamento de solos, de forma dispersa, e não para a estocagem permanente em local controlado. Essa tecnologia de estocagem permanente do carbono é objeto de uma reivindicação antiga da UFMG/Waycarbon⁹, e não foi contemplada na UNFCCC nos mecanismos de Kyoto pela questão da permanência, que agora pode ser superada.

A tecnologia da carbonização da madeira foi pouco aperfeiçoada historicamente, por ser pouco praticada com finalidades industriais, conforme esse relatório descreveu em sua introdução. Esse fato, associado ao outro fato inegável de que a carbonização da madeira tem sido feita predominantemente a partir de biomassa florestal não certificada e de origem duvidosa, coloca o setor carvoeiro na berlinda mundialmente como um mau exemplo de atividade predatória e poluidora, sem contar que muitas vezes realizada na informalidade ou ilegalidade, sem observância de condições fiscais e trabalhistas condizentes com a regulação das atividades econômicas.

Mas os desenvolvimentos que estão identificados neste relatório, resultados das iniciativas do setor de siderurgia sustentável com o apoio do PNUD, podem ser vistos como um alento para que se prossiga com o reconhecimento da sua singularidade climática e energética.

Para este objetivo, propõe-se que projetos de apoio futuro à carbonização sustentável com pagamento por resultados devem conter requisitos indispensáveis, do ponto de vista regulatório. Primeiro, claro, a obrigatoriedade de que toda a biomassa carbonizada seja de origem certificadamente sustentável, para evitar qualquer conexão com desmatamento ilegal. Em segundo lugar, mas não menos importante, a própria tecnologia de carbonização teria que ser o estado mais avançado da técnica, abandonando as práticas tradicionais de fornos sem captura e tratamento de gases e vapores. Além de garantirem uma maior eficiência estequiométrica, os fornos com captura e destruição de metano por meio de tochas, sejam elas precedidas de retortas destilativas dos condensáveis (como foi demonstrado pelos projetos da RIMA e Vallourec), ou com queima completa de todos os subprodutos gasosos e condensáveis (como

⁹ Dissertação de mestrado de Felipe Ribeiro Bittencourt no programa SMARH.

foi o caso da ArcelorMittal e aparentemente também o da Plantar), garantem a salubridade dos ambientes de trabalho, e previnem a poluição atmosférica local e regional, e geram novas cadeias de valor econômica de subprodutos.

O aproveitamento do alcatrão insolúvel e licor pirolenhoso pela sua condensação e destinação como fonte de água e carboquímicos, os promove para a condição de coprodutos e não mais resíduos ou emissões atmosféricas descontroladas. Esse relatório preconiza o emprego dessa tecnologia como uma condição desejável ou mesmo indispensável para apoios financeiros à carbonização sustentável. Em projetos futuros esses “resíduos” devem ser considerados 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 produtivas.

Em suma, esse relatório recomenda que o escopo de apoios financeiros futuros para o setor seja expandido para contemplar o aproveitamento da biomassa sustentável de florestas energéticas homogêneas (espécies ou indivíduos monoclonais de rápido crescimento) ou biodiversas (ecossistemas nativos), associados à carbonização sustentável (destilativa ou não-destilativa, isto é, com queima dos GEE precedidos ou não da recuperação de condensáveis). Em tais mecanismos de mercado, o carvão vegetal deve ser visto não apenas como um potencial insumo para o setor siderúrgico, mas também como um potencial modal energético ligado a uma cadeia logística de longa distância (nacional ou internacional) capaz de fornecer o serviço de remoção e estocagem permanente de carbono (tecnologia CCS) ou para aproveitamento da sua energia como um sucedâneo dos combustíveis fósseis tradicionais em várias aplicações, inclusive a siderurgia.

Finalmente, salienta-se que o carvão vegetal deve ser visto sempre como um uso menos nobre do que outros que são mais valiosos do que ele. A carbonização da biomassa florestal, e os usos do carvão vegetal como modal energético ou de captura e estocagem de carbono (CCS) devem ser práticas incentivadas e obrigatórias para o aproveitamento máximo de toda a biomassa florestal que não possa ser aproveitada para seus outros usos mais nobres, quando não houver viabilidade econômica para esses outros usos prioritários. Em suma, a carbonização é uma atividade que deve estar dimensionada para promover o aproveitamento de toda biomassa florestal renovável para a qual não seja viável um outro uso mais nobre. Afinal, o não-aproveitamento de qualquer biomassa renovável deve ser vista como um desperdício de energia solar capturada pela vegetação, e uma perda irreversível da oportunidade de imobilizar o CO₂, que hoje se acumula em quantidades absurdamente elevadas na atmosfera terrestre como um produto excretado pelo consumo exacerbado dos combustíveis fósseis.

O não aproveitamento da biomassa florestal representa, no nosso entender, quase o mesmo que a não-preservação da vida que a floresta foi capaz de gerar. Deixar ecossistemas florestais se consumirem em incêndios florestais descontrolados, ou que toda e cada árvore se perca após a sua morte, deixando atuar

apenas a atividade microbiana que consome a energia solar capturada e reemite o CO₂ de volta para a atmosfera (ou, ainda pior, o metano, nos locais em que predominam as condições anaeróbias), é perder a oportunidade de usar a pirólise como o último, e talvez único recurso tecnológico que temos para diminuir o processo de acumulação de nossa excreta de CO₂ - o principal GEE responsável pelo aquecimento global, acidificação e hiperfertilização ou eutrofização dos ecossistemas continentais e oceânicos. Em suma, a pirólise da biomassa renovável é a oportunidade que temos de praticar a carbono-reciclagem, isto é, de tentar reequilibrar o ciclo do carbono que a atividade humana desequilibrou e continua desequilibrando pelo consumo exagerado dos combustíveis fósseis. A figura abaixo representa um potencial arranjo de uma economia de base florestal renovável carbono-recicladora. Ela pode servir de base para formulação de mecanismos financeiros nacionais e internacionais baseados na remuneração de resultados alcançados fazendo pagamentos dos serviços ambientais e climáticos de cada tonelada de CO₂ fixada e estocada (emissões negativas de GEE em armazenamentos controlados de biocarbono) e/ou usado como energia (emissões nulas) substituindo e poupando o consumo das nossas reservas de combustíveis fósseis.

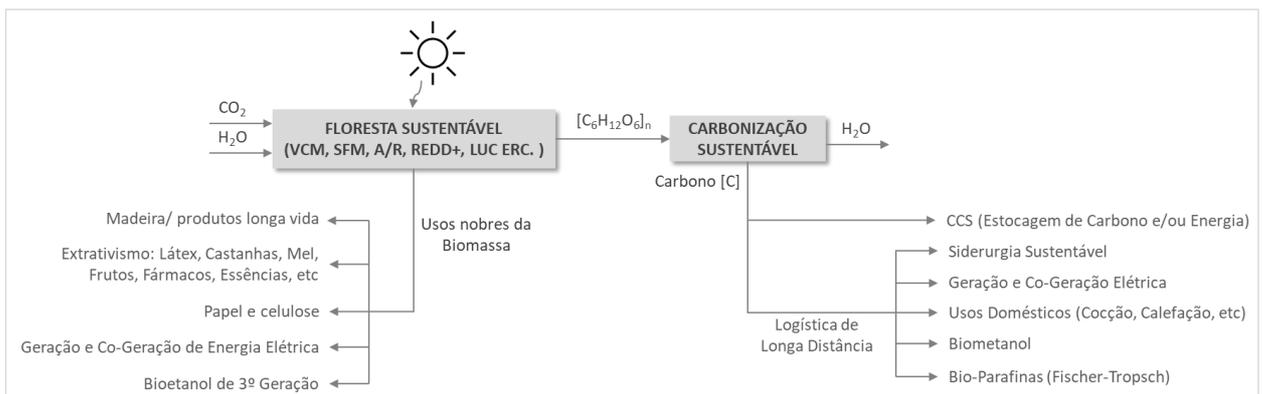


Figura 13: Possível arranjo de cadeia produtiva de aproveitamento econômico da biomassa florestal sustentável usando-se dos princípios da carbono-reciclagem, para fins de formatação de sistemas de apoio financeiro por resultados

9. 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.
- Chum, H., A. Faaij, J. Moreira, G. Berndes, P. Dhamija, H. Dong, B. Gabrielle, A. Goss Eng, W. Lucht, M. Mapako, O. Masera Cerutti, T. McIntyre, T. Minowa, K. Pingoud: Bioenergy. **Chapter 2: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation** [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2011.
- 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
- IPCC. "Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of...", 2018 and IPCC "Climate Change and Land", 2019.
- Motta, M. F. C. **Uso de biochar de eucalipto na produção de cana-de açúcar**. Montes Claros, MG, 2020

- 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.
- Silva, A. L. **Qualidade do carvão vegetal proveniente de sistema forno-fornalha**. Jerônimo Monteiro, ES, 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 de julho de 2021.
- UNFCCC *Decision 3/CMP.6. Further guidance relating to the clean development mechanism*. Disponível em: < <https://unfccc.int/resource/docs/2010/cmp6/eng/12a02.pdf#page=2>>. Acesso em: 30 de setembro de 2021.
- UNFCCC. *Decision -/CMP.7. Materiality standard under the clean development mechanism*. Disponível em: <https://unfccc.int/files/meetings/durban_nov_2011/decisions/application/pdf/cmp7_cdm_.pdf>. Acesso em: 30 de setembro de 2021.
- Vilela, A. O. **Desenvolvimento e validação técnica, de um forno industrial de carbonização, modelo container 2ª geração**. Belo Horizonte, MG, 2014
- 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.
- UNFCCC. *Methodological tool. Project and leakage emissions from road transportation of freight*. Disponível em: < <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-03-v3.pdf>>. Acesso em: 06 de outubro de 2021.

- UNFCCC. *Methodological tool. Tool to calculate project or leakage CO₂ emissions from fossil fuel combustion.* Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-12-v1.1.0.pdf>>. Acesso em: 06 de outubro de 2021.
- UNFCCC. *Methodological tool. Tool to calculate baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption.* Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-05-v1.pdf>>. Acesso em: 06 de outubro de 2021.

Apêndice I

Projeto 2 – ArcelorMittal: Instalação de sistema para controle de temperatura e fluxo de ar

Quantificação de emissões

I. Aquisição de Energia Elétrica

Dados:

Quantidade de Eletricidade Consumida no período do projeto [MWh]	155
Fator de Emissão Energia Elétrica [tCO ₂ e/MWh] ¹⁰	0,075
Média da perda técnica na transmissão e distribuição da Energia Elétrica ¹¹	0,075

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

$$E_{EE} = 155 \cdot 0,075 \cdot (1 + 0,075)$$

$$E_{EE} = \mathbf{12,50 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

¹⁰ Fator de emissão SIN (Sistema Interligado Nacional) para o ano do projeto (2019)

¹¹ Perdas sobre a Energia Injetada (2018), ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)

Apêndice II

Projeto 1 – Plantar Florestal: Implementação de sistema supervisorio para controle de processo

Quantificação de emissões

I. Combustão Móvel

Dados:

Coeficiente de emissão de CO ₂ do combustível [t CO ₂ e /m ³]	2,42
Quantidade de combustível queimado máximo [m ³]*	4,0

$$PE_{FC,j,y} = \sum_i FC_{i,j,y} \cdot COEF_{i,j}$$

$$PE_{FC,j,y} = 4,00 \cdot 2,42$$

$$PE_{FC,j,y} = 9,70 \text{ tCO}_2\text{e}$$

*Cálculo do coeficiente de emissões do Diesel¹²:

Dados 2018:

FracBio	0,088	CNPE 2016
DensityDiesel [kg/m ³]	840	BEN 2015
NCVdiesel [TJ/Gg]	43	IPCC 2006
EFCO2Diesel [kg/TJ]	74.100	IPCC 2006

$$tCO_2/m^3 = \frac{(1 - FracBio) \cdot DensityDiesel \cdot NCVdiesel \cdot EFCO2Diesel}{10^9}$$

$$tCO_2/m^3 = \frac{(1 - 0,088) \cdot 840 \cdot 43 \cdot 74100}{10^9} = 2,4410$$

¹² Fonte: CLIMAS (WayCarbon) – calculado a partir dos valores de Diesel utilizado em maquinários e considerando a média dos anos de atividade do projeto (2018 e 2019).

Dados 2019:

FracBio	0,1	CNPE 2016
DensityDiesel [kg/m ³]	840	BEN 2015
NCVdiesel [TJ/Gg]	43	IPCC 2006
EFCO2Diesel [kg/TJ]	74.100	IPCC 2006

$$tCO_2/m^3 = \frac{(1 - FracBio) \cdot DensityDiesel \cdot NCVdiesel \cdot EFCO_2Diesel}{10^9}$$

$$tCO_2/m^3 = \frac{(1 - 0,1) \cdot 840 \cdot 43 \cdot 74100}{10^9} = 2,4088$$

Fator utilizado: média dos 2 anos de projeto (2018 e 2019): **2,42 tCO₂/m³**

Apêndice III

Projeto 1 – Rima: Instalação de sistema para combustão de gases residuais

Quantificação de emissões

I. Aquisição de Energia Elétrica

Dados:

Quantidade de Eletricidade Consumida no período do projeto [MWh]	18,6
Fator de Emissão Energia Elétrica [tCO ₂ e/MWh] ¹³	0,06835
Média da perda técnica na transmissão e distribuição da Energia Elétrica ¹⁴	0,075

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

$$E_{EE} = 18,6 \cdot 0,06835 \cdot (1 + 0,075)$$

$$E_{EE} = 1,37 \text{ tCO}_2\text{e}$$

II. Combustão Móvel

Dados – Transporte de Licor Pirolenhoso:

Transporte de Licor Pirolenhoso

Distância percorrida da origem ao destino da carga no período do projeto [km] ¹⁵	1.564
Massa total da carga transportada no período analisado [t]	14,535
Fator de emissão padrão para o combustível e veículo utilizado [gCO ₂ /t km]	129

$$PE_{TR,t} = \sum_f D_{c,t} \cdot FR_{c,t} \cdot EF_{CO_2,Padr\tilde{a}o} \cdot 10^{-6}$$

$$PE_{TR,t} = 1564 \cdot 14,535 \cdot 129 \cdot 10^{-6}$$

$$PE_{TR,t} = 2,93 \text{ tCO}_2\text{e}$$

¹³ Média do fator de emissão SIN (Sistema Interligado Nacional) para os anos de projeto (2019 e 2020)

¹⁴ Perdas sobre a Energia Injetada (2018), ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)

¹⁵ Considerando distância ida e volta, por conservadorismo.

Dados – Alcatrão Vegetal:

Distância percorrida da origem ao destino da carga no período do projeto [km]	2.800
Massa total da carga transportada no período analisado [t]	11,628
Fator de emissão padrão para o combustível e veículo utilizado [gCO ₂ /t km] ¹⁶	129

$$PE_{TR,t} = \sum_f D_{c,t} \cdot FR_{c,t} \cdot EF_{CO_2,Padr\tilde{a}o} \cdot 10^{-6}$$

$$PE_{TR,t} = 2800 \cdot 11,628 \cdot 129 \cdot 10^{-6}$$

$$PE_{TR,t} = \mathbf{4,20 \text{ tCO}_2\mathbf{e}}$$

¹⁶ A metodologia sugere fator de emissão de 129 [gCO₂/ t km] para veículos pesados

Apêndice IV

Projeto 2 – Rima: Elevação da Capacidade Produtiva

Quantificação de emissões

I. Aquisição de Energia Elétrica

Dados:

Quantidade de Eletricidade Consumida no período do projeto [MWh]	84,0
Fator de Emissão Energia Elétrica [tCO ₂ e/MWh] ¹⁷	0,0745
Média da perda técnica na transmissão e distribuição da Energia Elétrica ¹⁸	0,075

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

$$E_{EE} = 84,0 \cdot 0,0745 \cdot (1 + 0,075)$$

$$E_{EE} = 5,79 \text{ tCO}_2\text{e}$$

II. Combustão Móvel

Dados – Transporte de Licor Pirolenhoso:

Transporte de Licor Pirolenhoso

Distância percorrida da origem ao destino da carga no período do projeto [km] ¹⁹	1.564
Massa total da carga transportada no período analisado [t]	27,477
Fator de emissão padrão para o combustível e veículo utilizado [gCO ₂ /t km]	129

$$PE_{TR,t} = \sum_f D_{c,t} \cdot FR_{c,t} \cdot EF_{CO_2,Padr\tilde{a}o} \cdot 10^{-6}$$

$$PE_{TR,t} = 1564 \cdot 27,477 \cdot 129 \cdot 10^{-6}$$

$$PE_{TR,t} = 5,54 \text{ tCO}_2\text{e}$$

¹⁷ Média do fator de emissão SIN (Sistema Interligado Nacional) para os anos de projeto (2018 e 2019)

¹⁸ Perdas sobre a Energia Injetada (2018), ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)

¹⁹ Considerando distância ida e volta, por conservadorismo.

Dados – Alcatrão Vegetal:

Distância percorrida da origem ao destino da carga no período do projeto [km]	2.800
Massa total da carga transportada no período analisado [t]	22,291
Fator de emissão padrão para o combustível e veículo utilizado [gCO ₂ /t km] ²⁰	129

$$PE_{TR,t} = \sum_f D_{c,t} \cdot FR_{c,t} \cdot EF_{CO_2,Padr\tilde{a}o} \cdot 10^{-6}$$

$$PE_{TR,t} = 2800 \cdot 22,291 \cdot 129 \cdot 10^{-6}$$

$$PE_{TR,t} = \mathbf{8,05 \text{ tCO}_2\mathbf{e}}$$

²⁰ A metodologia sugere fator de emissão de 129 [gCO₂/ t km] para veículos pesados

Apêndice V

Projeto 1 – Vallourec: Ampliação da capacidade de substituição de combustível fóssil

Quantificação de emissões

I. Aquisição de Energia Elétrica

Dados:

Consumo de energia adicional por tonelada de pelota produzida [kWh]	1
Produção de Pelota no período do projeto [ton]	2.089.074
Quantidade de Eletricidade Consumida no período do projeto [kWh]	2.089.074
Quantidade de Eletricidade Consumida no período do projeto [MWh]	2.089
Fator de Emissão Energia Elétrica [tCO ₂ e/MWh] ²¹	0,0745
Média da perda técnica na transmissão e distribuição da Energia Elétrica	0,075

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

$$E_{EE} = 2089 \cdot 0,0745 \cdot (1 + 0,075)$$

$$E_{EE} = \mathbf{167,31 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

II. Combustão Móvel

Dados:

Distância percorrida da origem ao destino do resíduo no período do projeto [km] ²²	436
Massa total de moinha transportada no período analisado [t]	55.988
Fator de emissão padrão para o combustível e veículo utilizado [gCO ₂ /t km] ²³	129
Emissão pelo transporte de resíduo no projeto [tCO ₂ e]	3.148,99

$$PE_{TR,t} = \sum_f D_{c,t} \cdot FR_{c,t} \cdot EF_{CO_2,Padr\tilde{a}o} \cdot 10^{-6}$$

$$PE_{TR,t} = 436 \cdot 55988 \cdot 129 \cdot 10^{-6}$$

$$PE_{TR,t} = \mathbf{3.148,99 \text{ tCO}_2\text{e}}$$

²¹ Média do fator de emissão SIN (Sistema Interligado Nacional) para os anos de projeto (2018 e 2019)

²² Considerando distância ida e volta, por conservadorismo.

²³ A metodologia sugere fator de emissão de 129 [gCO₂/ t km] para veículos pesados



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