



PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO

PROJETO BRA/14/G31 – Siderurgia Sustentável

PRODUTO 08

JOF – 1069/2019

Convocação 001/2018

LICITANTE: Instituto de Ciências Agrárias – ICA/UFMG

Montes Claros, 09/2020

Sumário

RESUMO EXPLICATIVO DO PRODUTO	4
1. INTRODUÇÃO	4
2. MAPEAMENTO DA PROPRIEDADE	6
3. INVENTÁRIO FLORESTAL.....	8
4. METODOLOGIA DA QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES.....	9
Processo de carbonização.....	9
Aplicação do Método MRV	10
Balanço de Carbono pelo <i>software</i> Charcoal System	13
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
Método MRV	16
Balanço de Carbono	19
Emissão da Siderurgia pela Carbonização	20
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	21
7. REFERÊNCIA	22

RESUMO EXPLICATIVO DO PRODUTO

A biomassa florestal possui características importantes para o setor energético, seja pela queima direta da madeira ou pela sua transformação em combustível (carvão vegetal). Visto a importância do carvão vegetal para a economia brasileira, principalmente, no setor siderúrgico, faz-se necessário desenvolver medidas de mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) durante o seu processo de produção. Neste sentido, este estudo teve como objetivo identificar e quantificar as emissões de GEE e o Balanço de Carbono referente à unidade demonstrativa instalada no Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, Montes Claros, MG. Assim, o produto de número 08, que deverá ser enviado ao PNUD até o dia 12 de outubro de 2020, traz o mapeamento da propriedade onde está instalada a unidade demonstrativa; os dados da empresa referente à principal fornecedora de matéria-prima, como por exemplo, estimativa da área e sua produtividade média; o registro dos resultados do monitoramento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), realizado segundo a metodologia de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) do Projeto Siderurgia Sustentável (rendimento gravimétrico com queima de gases); os relatórios do Balanço de Carbono da propriedade do seu principal fornecedor de madeira e as Emissões da Siderurgia pela Carbonização, calculados segundo a metodologia adotada pelo Projeto Siderurgia Sustentável, o *software* Charcoal System.

1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal assume uma posição de destaque na economia brasileira, principalmente em Minas Gerais, o Estado que mais produz e consome, onde contribui tanto nas siderúrgicas, para a produção de ferro-gusa, aço e ferro-liga, quanto como substituto do óleo combustível nas caldeiras e fornos de diversas indústrias (VALVERDE et al., 2012). O Brasil é responsável por 11% de todo o carvão produzido mundialmente. Da área total de 7,83 milhões de hectares de árvores plantadas no país, 12% pertence ao segmento de siderurgia a carvão vegetal (IBÁ, 2019).

Além de ser uma fonte renovável, o carvão vegetal representa grande importância para a indústria siderúrgica brasileira, tanto economicamente quanto sustentavelmente, substituindo os combustíveis fósseis. No entanto, durante o processo de carbonização da madeira há grandes emissões de gases potencialmente poluentes, especialmente em

relação às emissões de monóxido de carbono e metano, este último causador do efeito estufa e mais poluente que o dióxido de carbono (CARDOSO, 2010).

A maior parte do carvão vegetal produzido no Brasil é por pequenos e médios produtores, que utilizam fornos rudimentares de baixo rendimento e sem controle de emissões atmosféricas, como por exemplo, os fornos do tipo “rabo-quente”, que causam impactos econômicos, sociais e principalmente ambientais (DONATO, 2017). Entretanto, esses impactos podem ser minimizados por meio de tecnologias que melhorem o rendimento gravimétrico e que capturem ou queimem esses gases emitidos durante a carbonização.

Neste sentido, foi desenvolvido o sistema fornos-fornalha pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), com o intuito de obter melhor qualidade do processo de carbonização e do produto final. O sistema consiste na utilização de uma fornalha acoplada ao forno de alvenaria, o que possibilita a queima dos gases provenientes do processo. Além disso, o sistema colabora com o aumento do rendimento gravimétrico, obtido através de técnicas de controle da carbonização (OLIVEIRA et al., 2013).

De acordo van Elk (2010), a queima dos gases da carbonização, além de ser vantajosa ao meio ambiente, pode se tornar economicamente viável pela possibilidade de gerar projetos de créditos de carbono, pois há nesse processo redução da emissão, principalmente, de metano, que é cerca de duas vezes mais nocivo que o dióxido de carbono para o efeito estufa.

Visando medidas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa na siderurgia brasileira, surge o Projeto Siderurgia Sustentável, com a finalidade de desenvolver uma cadeia produtiva sustentável, estabelecendo a economia de baixo carbono na produção de carvão vegetal proveniente de florestas plantadas, e pelo incentivo da utilização do sistema fornos-fornalha (PNUD, 2018).

Desde modo, é necessário identificar e quantificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE), bem como, o balanço de carbono da propriedade, para assim comprovar a efetividade do sistema fornos-fornalha, principalmente, no que tange a redução de metano. A quantificação de GEE e o balanço de carbono avaliado neste relatório referem-se à unidade demonstrativa instalada no Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, Montes Claros, MG, por meio do método de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) e pelo *software* Charcoal System.

2. MAPEAMENTO DA PROPRIEDADE

O sistema fornos-fornalha foi instalado nas dependências da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, no Instituto de Ciências Agrárias – ICA, Montes Claros, MG (Figura 1). A área selecionada conta com um total de aproximadamente 5000 m² alocados próximo aos Laboratórios do Curso de Engenharia Florestal, especificamente na produção de energia (16° 41' S e 43° 50' W).



Figura 1. Área destacada em amarelo onde foi instalada a unidade demonstrativa (Fonte: Google Earth, 2019).

Anteriormente à instalação, preparou-se a propriedade para o recebimento da unidade demonstrativa. Desta forma, a área passou por uma limpeza geral do terreno, um ajuste do nivelamento do solo e terraplanagem (Figura 2).



Figura 2. Preparo da propriedade para o recebimento da unidade demonstrativa do projeto BRA/14/G31 – Siderurgia Sustentável.

Após a instalação do sistema fornos-fornalha, que ocorreu nos dias de 18 a 21 de dezembro de 2019, pode-se realizar o mapeamento da propriedade onde está instalada a unidade demonstrativa (Figura 3), a partir de imagens aéreas com o auxílio do equipamento drone.



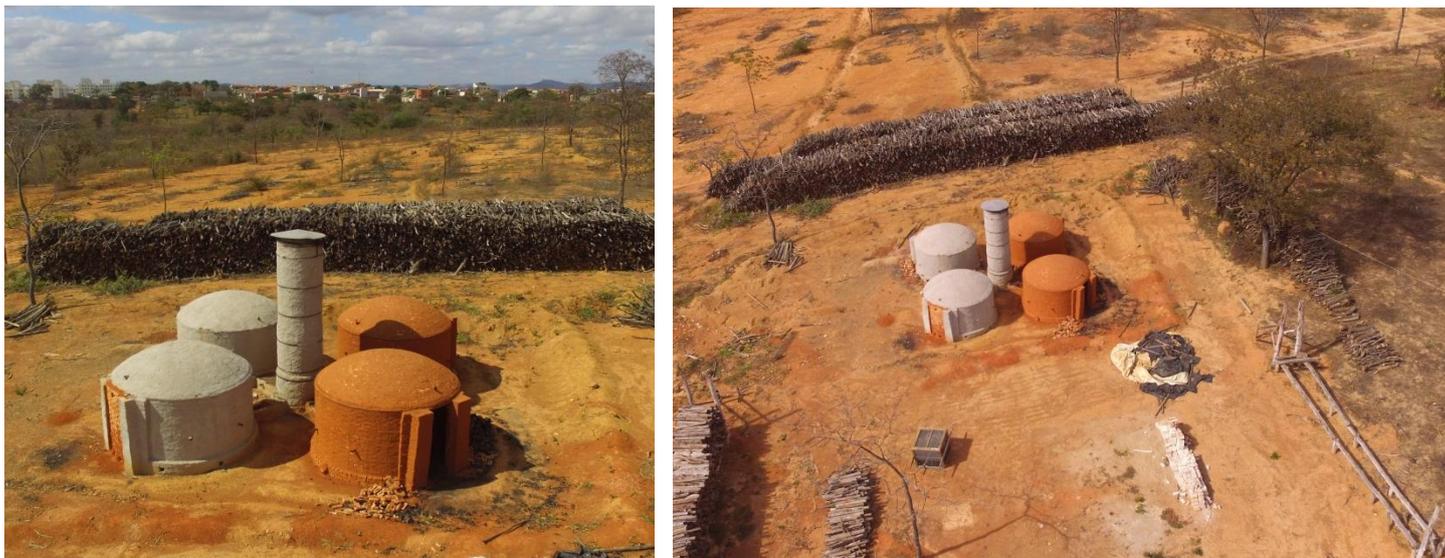


Figura 3. Imagens aéreas da propriedade onde está instalada a unidade demonstrativa do projeto BRA/14/G31 – Siderurgia Sustentável.

3. INVENTÁRIO FLORESTAL

O Inventário Florestal consiste em obter informações sobre as características quantitativas e qualitativas da floresta, além das características das áreas sobre as quais está se desenvolvendo. O tipo de inventário a ser utilizado irá depender de vários fatores. De acordo Soares et al. (2011), o inventário florestal completo pode fornecer diversas informações, dentre elas: a estimativa da área; descrição topográfica; mapeamento da propriedade; descrição de acessos; facilidade de transporte de madeira; estimativa da quantidade e qualidade de diferentes recursos florestais; e estimativa de crescimento, caso seja realizado mais de uma vez.

A elaboração do inventário florestal é uma etapa importante para realizar a neutralização das emissões de gases de efeito estufa gerados pela atividade de um empreendimento. Para o presente o projeto, como toda madeira utilizada até o momento para produção de carvão vegetal foi doada pela empresa Nova Esperança, não se fez necessário realizar o inventário florestal da propriedade onde está instalada a unidade demonstrativa, e sim do seu principal fornecedor de matéria-prima.

Entretanto, a empresa Nova Esperança, localizada em Montes Claros, MG, não possui um inventário florestal completo da sua propriedade. Foram então coletadas as seguintes informações: a estimativa da área de floresta plantada da empresa com o gênero *Eucalyptus* é de 500 ha; sua Área de Preservação Permanente (APP), que está inserida no bioma Cerrado, é de 125 ha; a estimativa de sua produtividade média é de

200 m³/ha; e a empresa possui todas as licenças necessárias para o corte e transporte da madeira.

Portanto, todos estes dados coletados pela empresa fornecedora foram essenciais para realizar o Balanço de Carbono do Projeto BRA/14/G31 - Siderurgia Sustentável, e assim avaliar a eficiência e contribuição do sistema fornos-fornalha para a mitigação dos gases de efeito estufa.

4. METODOLOGIA DA QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E REMOÇÃO DE CARBONO

Processo de carbonização

A carbonização da madeira foi realizada no dia 09 de março de 2020 em um dos fornos do sistema fornos-fornalha, instalado na unidade demonstrativa do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, Montes Claros – MG. Utilizou-se 4.462,7 kg de madeira de *Eucalyptus* sp. para encher o forno, com densidade de 500 kg/m³ e classes de diâmetro variando entre 6,3 e 15,9 cm. O ciclo de carbonização e monitoramento do sistema seguiu a metodologia e orientações do manual de operação de sistema fornos-fornalha (2019).

Primeiramente, realizou-se a ignição da fornalha, para aumentar a retirada de gases de dentro dos fornos, e depois houve a ignição destes. O processo de carbonização levou em média 3 dias e foi realizado em quatro fases, sendo classificadas pela faixa de temperatura e fenômeno que ocorria na madeira – I fase endotérmica (160°C a 170°C por 12h, liberação de vapor de água e secagem da madeira); II fase endotérmica (250°C a 270°C por 12h, degradação das hemiceluloses e eliminação de gases); III fase exotérmica (340°C a 350°C por 24h, degradação da celulose, grande produção de gases e formação do carvão vegetal); e IV fase exotérmica (350°C a 360° por 18h, redução da emissão de gases e aumento da concentração de carbono no carvão vegetal).

Para controlar a temperatura do sistema, utilizaram-se tijolos visando diminuir ou aumentar a entrada de ar pelos “tatus” do forno, respeitando o tempo e a temperatura de cada fase da carbonização. Durante o processo também foi realizado o abastecimento da fornalha e o monitoramento da temperatura dos gases nos dutos utilizando o pirômetro. Após o fechamento da entrada de oxigênio para dentro do forno, ocorreu o processo de resfriamento, de forma natural, pelos 4 dias seguintes.

Finalizado o processo de carbonização, cerca de 66 horas até o resfriamento total,

foi realizado o descarregamento do forno. Todo o material foi classificado e pesado: atíços (139,3 Kg), carvão vegetal (1.106,00 Kg) e finos (130,9 Kg). Posteriormente, determinou-se o teor de umidade (2,86%) e a densidade a granel (168,10 kg/m³) do carvão vegetal.

Aplicação do Método MRV

A avaliação do sistema fornos-fornalha com base na metodologia de Mensuração, Relato e Verificação (MRV), foi realizada a partir de dois *clusters*: aqueles referentes ao rendimento gravimétrico e aos queimadores de gases da carbonização. O *cluster* 3, referente à troca de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis, a unidade de produção de carvão vegetal por si só não é contemplada, visto que, no presente projeto só foi analisado o processo de produção do carvão.

O *cluster* com base no rendimento gravimétrico considera que a atividade de mitigação se baseia na inovação tecnológica dos processos de produção, que devido ao aumento do rendimento gravimétrico, ocasiona a redução de emissão de metano (CH₄). Já o *cluster* com base no uso de queimadores de gases se baseia na atividade dos queimadores instalados e operados com a finalidade de reduzir o gás metano (CH₄) emitido durante o processo de carbonização da madeira.

Há dois tipos de queimadores: o de queima contínua, onde todos os fornos ligados à fornalha apresentam carbonização sincronizada, havendo assim disponibilidade e queima contínua de gases. E o queimador “não-contínuo”, em que somente um forno ou mais fornos não estão sincronizados, havendo assim a presença de vapor d’água nas duas primeiras fases da carbonização, restringindo-se a terceira fase uma maior emissão e queima de metano (CH₄), sendo “não-contínua” a disponibilidade de combustível para queima. Para o presente projeto foi considerado o queimador “não-contínuo”, visto que só ocorreu uma carbonização no processo.

De acordo com estudos realizados pela ONU (2010) com base nas metodologias “ACM0021 - *Reduction of emissions from charcoal production by improved kiln design and/or abatement of methane*” e “AM0041 - *Mitigation of Methane Emissions in the Wood Carbonization Activity for Charcoal Production*” (CDM, 2011), considerou-se para equação de regressão, que expressa à relação estatística entre as emissões de metano e o rendimento gravimétrico, os valores de 217,12 para o parâmetro A e 534,76 para o parâmetro B. A partir destes, obteve-se o fator de emissão da linha de base e do presente projeto. Consideraram-se dados do forno tipo “rabo-quente” como linha de

base, com 26% de rendimento gravimétrico e emissão de 78 Kg de CH₄ por tonelada de carvão (CGEE, 2015).

O valor referente ao potencial de aquecimento global do gás metano (GWP), é de que para cada 1 tonelada de CH₄ é assumido o valor de 21 toneladas de CO₂ equivalente (IPCC, 1996). As equações utilizadas neste projeto para determinar as emissões da linha de base em toneladas de CO₂ equivalente, foram as seguintes:

$$BE_y = EF_{CH_4,BL} \times GWP_{CH_4} \times P_{charcoal,y}$$

$$EF_{CH_4,BL} = (A - B \times Y_{BL,i})$$

Fonte: PNUD, 2018

Onde:

- BE_y = Emissões da linha de base no ano y (tCO₂e/ano);
- $EF_{CH_4,BL}$ = Fator de emissão do metano na linha de base (tCH₄/t carvão vegetal);
- GWP_{CH_4} = Potencial de aquecimento global do metano (tCO₂e/tCH₄);
- $P_{charcoal,y}$ = Produção de carvão vegetal durante o ano y (t carvão vegetal/ano);
- $Y_{BL,i}$ = Média ponderada do rendimento gravimétrico de linha de base da carbonização (tonelada de carvão vegetal/ tonelada de madeira/base seca);
- A, B = parâmetros da equação de regressão que expressa a relação estatística entre as emissões de metano e o rendimento gravimétrico da carbonização.

Para estimar as emissões de gases de efeito estufa provenientes do sistema fornos-fornalha, aplicou-se as seguintes equações:

$$PE_y = EF_{CH_4,BP} \times GWP_{CH_4} \times P_{charcoal,y}$$

$$EF_{CH_4,BP} = (A - B \times Y_{P,i})$$

Fonte: PNUD, 2018

Onde:

- PE_y = Emissões do projeto no ano y (tCO₂/ano);
- $EF_{CH_4, BP}$ = Fato de emissão do metano no cenário do projeto (tCH₄/t carvão vegetal);
- GWP_{CH_4} = Potencial de aquecimento global do metano (tCO₂e/tCH₄);
- $P_{charcoal, y}$ = Produção de carvão vegetal durante o ano y (t carvão vegetal/ano);
- $Y_{P, i}$ = Média ponderada do rendimento gravimétrico da carbonização (tonelada de carvão vegetal/ tonelada de madeira/base seca);
- A, B = parâmetros da equação de regressão que expressa a relação estatística entre as emissões de metano e o rendimento gravimétrico da carbonização.

Para o *cluster* referente à utilização dos queimadores de gases, considerou-se que a atividade de mitigação teve como base a instalação e operação de queimadores do gás metano (CH₄). Utilizaram-se as seguintes equações:

$$PE_y = EF_{CH_4, P} \times GWP_{CH_4} \times P_{charcoal, y} \times \left[\frac{B_{total, y} - B_{qual, b, y} - B_{qual, c, y}}{B_{total, y}} + \frac{B_{qual, b, y}}{B_{total, y}} \times (1 - \eta_{PJ, b}) \right]$$

$$EF_{CH_4, BP} = (A - B \times Y_{P, i})$$

Fonte: PNUD, 2018

Onde:

- PE_y = Emissões do projeto no ano y (tCO₂/ano);
- $EF_{CH_4, BP}$ = Fator de emissão do metano no cenário do projeto (tCH₄/t carvão vegetal);
- GWP_{CH_4} = Potencial de aquecimento global do metano (tCO₂e/tCH₄);
- $P_{charcoal, y}$ = Produção de carvão vegetal durante o ano y (t carvão vegetal/ano);
- $Y_{P, i}$ = Média ponderada do rendimento gravimétrico da carbonização (tonelada de carvão vegetal/ tonelada de madeira/base seca);

- A, B = parâmetros da equação de regressão que expressa a relação estatística entre as emissões de metano e o rendimento gravimétrico da carbonização.
- $B_{total,y}$ = Número total de “fornadas” operadas pelo projeto durante o ano;
- $B_{qual,b,y}$ = Número de “fornadas” que passaram pelo queimador de maneira não contínua. Caso não haja a operação de maneira não contínua, o número de “fornadas” = 0;
- $B_{total,c,y}$ = Número de “fornadas” que passaram pelo queimador de maneira contínua. Caso não haja a operação de maneira contínua, o número de “fornadas” = 0;
- $\eta_{PJ,b}$ = eficiência de destruição de metano pelo queimador em operações não contínuas = 50%.

Todos os cálculos realizados para o rendimento gravimétrico e os queimadores de gases da carbonização foram processados nas planilhas referentes a cada *cluster*, desenvolvidas no estudo de Mendes (2018), utilizando-se o programa Excel® (ANEXO I e II).

Balanco de Carbono pelo *software* Charcoal System

O *software* Charcoal System (2020), desenvolvido pelo Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), permite quantificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE), as remoções de carbono e a viabilidade técnica e econômica na produção de carvão vegetal. O sistema possui caráter inovador e grande relevância no auxílio de tomada de decisões, além de fazer parte dos esforços do Projeto Siderurgia Sustentável para incentivar a adoção de tecnologias produtivas mais limpas e eficientes.

A metodologia do Charcoal System consiste no cadastro realizado com informações do produtor rural e de sua propriedade. O *software* considera as emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), sendo que, os resultados são convertidos para a unidade-padrão tCO₂e (toneladas de dióxido de carbono equivalente), de acordo com o Potencial de Aquecimento Global (PAG) de cada um desses gases. As emissões então são calculadas pela combinação entre o grau de realização de uma atividade, e de seu fator de emissão específico, ou seja, uma

medida que expressa a intensidade de uma fonte emissora e o fator de emissão é o coeficiente que corresponde à emissão por cada unidade do dado e da atividade relacionada (SILVA, 2019).

Como foi realizada apenas uma carbonização no presente projeto, determinou-se o balanço de carbono, utilizando o *software* Charcoal System, para um cenário anual com queimador “não-contínuo”, sendo 4 ciclos/mês. Os dados solicitados pelo *software* foram os seguintes:

- **Madeira**

O clone de eucalipto utilizado para a carbonização foi o I144, com teor de umidade de 21,7% e densidade básica de 500 kg/m³. Foram enforcada 9 m³/forno (4,5 t/forno) de madeira por ciclo (Figura 4).

The screenshot displays the Charcoal System software interface. At the top, the browser address bar shows the URL: <https://dev-charcoalsystem.herokuapp.com/home/emissoes/madeira>. The page header includes 'Charcoal System' and 'Instituto de Ciências Agr...'. The main content area is titled 'Madeira' and contains the following data:

- Madeira enforcada por ciclo: 11.6 st/forno, 9.0 m³/forno, 4.5 t/forno
- Qualidade:
 - Material Genético: Outro
 - Teor de umidade base seca (U%): < 30%
 - Densidade Básica: 500,0
- Produção:
 - Fator de Empilhamento (m³/st): 0.7764577995185962
 - Madeira enforcada por ciclo: 9 m³/forno

Figura 4. Dados da madeira utilizados no *software* Charcoal System para obter o balanço de carbono da unidade demonstrativa.

- **Carvão vegetal**

Para a produção de carvão vegetal foi considerado 4 ciclos/mês, sendo 7 meses na estação seca com produção de 6,5 mdc/forno (1,3 t/forno) por ciclo, e 5 meses na estação chuvosa com produção de 4,9 mdc/forno (1 t/forno). Foram gerados 4% de atíço e 10% de finos. De acordo com o *software*, o carvão vegetal apresentou 201,7 kg/mdc de densidade a granel, 75,3% de carbono fixo, 1,6 m³/mdc de rendimento volumétrico, e 36% de rendimento gravimétrico (Figura 5).

Charcoal System | Instituto de Ciências Agr... | N.º 1 - 4 Fornos | PROJETO SIDERURGIA SUSTENTÁVEL

Carvão Vegetal

CANCELAR | LIMPAR | SALVAR | PRÓXIMO →

Total de madeira enformada: 1.728,0 m³/ano, 2.225,5 st/ano, 864,0 t/ano
 Produção total de carvão: 1.118,0 mdc/ano, 225,5 t/ano
 Geração total de finos: 86,4 t/ano, 35,0 t/ano

Produção

Produtividade do forno

Duração média do ciclo de carbonização (dias): 3
 Período de inatividade (dias/mês): 18
 Produtividade média (ciclos/mês): 4,0

Período de produção (estação seca)

Período útil de utilização do forno (meses/ano): 7
 Produção por ciclo (mdc/forno): 6,5 | Produção por ciclo (t/forno): 1,3
 Produção por ano (mdc/ano): 728,0 | Produção por ano (t/ano): 146,8

Período de produção (estação chuvosa)

Período útil de utilização do forno (meses/ano): 5
 Produção por ciclo (mdc/forno): 4,9 | Produção por ciclo (t/forno): 1,0
 Produção por ano (mdc/ano): 390,0 | Produção por ano (t/ano): 78,7

Qualidade

Densidade à granel (kg/mdc)

Densidade à granel (kg/mdc): 201,7

Teor de carbono fixo (%)

Teor de carbono fixo (%): 75,3

Rendimento volumétrico (RV)

Rendimento Volumétrico

Rendimento Volumétrico: 1,6
 Unidade: m³/mdc

Rendimento gravimétrico (RG)

Rendimento Gravimétrico

Parâmetro da estimativa do RG: Característica da carbonização e teor de...
 Rendimento Gravimétrico (%): 36,0

Coprodutos

Produção de Atiços

Geração de atiços (%): 4,0 | Geração total de atiços (t/ano): 35,0

Produção de Finos

Unidade de produção de carvão (UPC) - forno

Geração de finos (%): 10 | Geração total de finos (t/ano): 86,4

Copyright © Código Font 2020.

Figura 5. Dados do carvão vegetal utilizados no *software* Charcoal System para obter o balanço de carbono da unidade demonstrativa.

- **Remoção de carbono**

Toda madeira utilizada na carbonização foi doada pela empresa Nova Esperança, localizada em Montes Claros, MG, que trabalha com matéria-prima para energia e possui todas as licenças necessárias para o corte e transporte do eucalipto. A empresa possui 500 ha de floresta plantada, 125 ha de Área de Preservação Permanente (APP) que está inserida no bioma cerrado, e sua produtividade média é de 200 m³/há.

O *software* Charcoal System registou que, de acordo com a produtividade média da empresa e produção do projeto, para atender a demanda anual de madeira para carbonização a área colhida deverá ser de 8,6 ha de floresta plantada e para a Área de Preservação Permanente destinar 1,7 ha (Figura 6).

The screenshot shows the 'Remoção de Carbono' (Carbon Removal) screen in the Charcoal System. The interface includes a top navigation bar with 'Charcoal System' and 'Instituto de Ciências Agr...' and a project dropdown 'Nº 1 - 4 Fornos'. The main content area is divided into two columns: 'Floresta Plantada' (Planted Forest) and 'Floresta Nativa' (Native Forest). In the 'Floresta Plantada' section, there are input fields for 'Demanda de madeira' (1728.0 m³/ano, 2225.5 st/ano, 864.0 t/ano) and 'Produtividade' (200 m³/ha). A calculation result shows 'Área de floresta plantada' as 8.6 ha. In the 'Floresta Nativa' section, there are dropdowns for 'Localização' (Demais regiões do país) and 'Bioma' (Cerrado). Below, there are input fields for '% de Reserva Legal (RL)' (20,0) and 'Reserva Legal (em ha)' (1,7). A final field shows 'Área de preservação permanente (ha)' as 1,7. Buttons for 'CANCELAR', 'LIMPAR', 'SALVAR', and 'PRÓXIMO' are visible at the top right. A sidebar with icons is on the left, and a copyright notice 'Copyright © Código Font 2020.' is at the bottom center.

Figura 6. Dados da remoção de carbono utilizados no *software* Charcoal System para obter o balanço de carbono da unidade demonstrativa.

Além do relatório técnico do Balanço de Carbono (ANEXO III), o *software* Charcoal System disponibilizou o relatório de Emissões da Siderurgia pela Carbonização (ANEXO IV), que tem como finalidade indicar a quantidade de gases de efeito estufa que é emitido para a produção de uma tonelada de ferro-gusa. Deste modo, com base no teor de carbono fixo e da produção líquida de carvão vegetal, tem-se a quantidade total de carbono fixo que será utilizada no processo produtivo dentro da siderurgia.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Método MRV

Como foi realizada apenas uma carbonização, a média ponderada do rendimento gravimétrico (YP) para o método MRV foi de 30,78% (Tabela 1), sendo considerado satisfatório, já que a média nacional é de 26% de acordo com os dados do CGEE (2015). Os resultados encontrados também corroboram com valores mencionados na

literatura: Cardoso et al. (2010) de 28,3%, Donato (2017) de 33,6% para madeira fina e 31,6% para madeira grossa.

Tabela 1. Parâmetros da carbonização e rendimento gravimétrico do carvão vegetal obtido no sistema forno-fornalha

CARBONIZAÇÕES	MADEIRA		CARVAO VEGETAL		R.G. (%) $Y_{P,i}$	U. (%) MADEIRA	U. (%) CARVÃO
	MASSA ÚMIDA	MASSA SECA	MASSA ÚMIDA	MASSA SECA			
	(toneladas)	(toneladas)	(toneladas)	(toneladas)			
1	4,462	3,494	1,106	1,075	30,78	21,70	2,86

Presume-se com o passar do tempo e desenvolvimento do projeto melhorar os valores referentes ao rendimento gravimétrico, com treinamentos constantes possibilitando maior experiência dos operadores da carbonização.

A quantificação das emissões de gases de efeito estufa realizado pelo método MRV, demonstrou que houve redução da emissão dos gases metano e dióxido de carbono durante a carbonização da madeira pelo projeto siderurgia sustentável, com a utilização do sistema fornos-fornalha, em relação aos fornos do tipo “rabo-quente” (CGEE, 2015), (Tabela 2).

Tabela 2. Dados de emissões referentes a uma carbonização do projeto no ICA/UFMG e da linha de base para os *clusters* de rendimento gravimétrico e de queimadores

Parâmetros	Unidade	Cluster Rendimento Gravimétrico		Cluster Queimadores	
		Linha de Base (Forno "Rabo Quente")	Projeto (Sistema Forno Fornalha)	Linha de Base (Forno "Rabo Quente")	Projeto (Sistema Forno Fornalha)
Soma da Produção de Carvão de Todas UPC	$(P_{charcoal,y})$ toneladas	1,075	1,075	1,075	1,075
Rendimento Gravimétrico	(Y_P) %	26	30,78	26	30,78
Fator de Emissão	tCH ₄ / t Carvão	0,078	0,0525	0,078	0,0525
Eficiência do Queimador	%	-	-	-	50,00

Metano Não Destruido	%	-	-	100	50,00
Emissão Total	toneladas CO ₂ e	1,763	1,186	1,763	0,593
Redução Total de Emissões	toneladas CO ₂ e	0	0,577	0	1,17
Emissão por Tonelada	ton. CO ₂ e/ ton. de Carvão	1,64	1,10	1,64	0,551
Redução de Emissões	ton. CO ₂ e/ ton. de Carvão	-	0,54	-	1,089

A emissão total na linha de base (fornos “rabo-quente”), foi de 1,763 toneladas de CO₂e para a produção total de 1,075 toneladas de carvão vegetal. Já o sistema fornos-fornalha apresentou emissão de 1,186 toneladas de CO₂e, ocorrendo assim uma redução de emissão de 0,577 toneladas de CO₂e. Visto que, seu fator de emissão foi de 0,0525 toneladas de metano por tonelada de carvão produzido, apresentando emissão menor que o valor de 0,078 toneladas de metano/tonelada de carvão produzido pela linha de base.

Considerando a redução de emissão de 50% do gás metano pela metodologia ACM0001 para queimadores “não-contínuos”, o projeto siderurgia sustentável apresentou 0,593 toneladas de CO₂ equivalente, com uma redução de 66,40% de emissão quando comparado à linha de base. Houve assim uma redução de 1,089 toneladas de CO₂e por tonelada de carvão produzido. Donato (2017), por meio da combustão de gases poluentes, obteve redução de 244,65 kg de emissões de CO₂ equivalente.

Estes resultados evidenciam a contribuição do sistema fornos-fornalha para a mitigação dos gases de efeito estufa, principalmente CH₄ e CO, que são liberados na atmosfera. Pois, além de proporcionar o aumento do rendimento gravimétrico, há a redução das emissões do metano no processo de carbonização.

Balanço de Carbono

De acordo com os resultados gerados pelo *software* Charcoal System, para uma produção anual de 255 t/ano de carvão vegetal, com a utilização do sistema fornos-fornalha e queimador “não-contínuo”, o projeto siderurgia sustentável estará emitindo 2,774 t/ano de metano, ou seja, 69,359 toneladas de CO₂ equivalente, e 221,574 t/ano de dióxido de carbono. Totalizando assim a emissão de 290,933 tCO₂e/ano, sendo 1,290 tCO₂e por tonelada de carvão vegetal produzido (Tabela 3).

Para a remoção do carbono, o estoque total de florestas plantadas e nativas da empresa Nova Esperança que doou a madeira para o projeto, estará removendo 1.495,507 tCO₂e anualmente, sendo, 1.488,960 tCO₂e de estoque de floresta plantada e 6,547 tCO₂e de floresta nativa.

A partir dos dados de toda a emissão de gases gerados pelo sistema (290,933 tCO₂e/ano) e remoção total das florestas (1.495,507 tCO₂e/ano), foi possível calcular o balanço de carbono total. Este apresentou um valor positivo de 1.204,574 tCO₂e/ano, logo, a empresa possui vegetação suficiente para neutralizar as emissões de gases de efeito estufa gerados pelo sistema fornos-fornalha. Já que, um balanço de carbono positivo indica maior remoção em relação às emissões.

Tabela 3. Balanço de carbono realizado pelo *software* Charcoal System para o projeto siderurgia sustentável.

Produção de carvão vegetal e coprodutos			
Produção líquida de carvão		Coprodutos	
Anual	1.118,0 mdc/ano	Atiços	35,0 t/ano
Anual	225,5 t/ano	Finos	86,4 t/ano
Emissões de GEE			
CH₄		CO₂	
Anual	69,359 tCO ₂ e	Anual	221,574 tCO ₂ e
Por ciclo	1,445 tCO ₂ e	Por ciclo	4,616 tCO ₂ e
Por tonelada de carvão	307,580 kgCO ₂ e	Por tonelada de carvão	982,585 kgCO ₂ e
MDC	62,039 kgCO ₂ e	MDC	198,187 kgCO ₂ e
Emissão total de GEE			
Anual		290,933 tCO ₂ e	
Por ciclo		6,061 tCO ₂ e	
Por tonelada de carvão		1,290 tCO ₂ e	
MDC		0,260 tCO ₂ e	
Remoção de carbono			
Floresta plantada		Floresta nativa	
Estoque total	1.488,960 tCO ₂ e	Anual	6,547 tCO ₂ e

Remoção total	
Anual	1.4985,507 tCO ₂ e
Balanco de Carbono total	
Emissão total de GEE	290,933 tCO ₂ e/ano
Remoção total	1.495,507 tCO ₂ e/ano
Balanco de carbono	1.204,574 tCO ₂ e/ano

É importante salientar que o incremento anual de carbono relativo às florestas de produção só faz sentido quando se considera que haverá rotação florestal na propriedade e, portanto, se manterá sempre um incremento médio na área. Mesmo considerando que a madeira será utilizada para fins energéticos sua contabilização no balanço se justifica. Pois, a emissão da queima do carvão vegetal é compensada pela estocagem de carbono que houve durante o crescimento da floresta, o que não ocorre, por exemplo, com o carvão mineral, que possui apenas emissão (ALVES, 2014).

Os valores das emissões de CO₂ equivalente para a produção de uma fornada de carvão vegetal apresentados pelo *software* Charcoal System (1,290 tCO₂e) foram semelhantes ao calculado pelo método MRV (1,186 t/CO₂e), mostrando assim a eficiência e contribuição do sistema fornos-fornalha para a mitigação dos gases de efeito estufa.

Apesar de ainda ocorrer emissões de CO₂, mesmo que reduzidas, durante a produção de carvão vegetal, este contribui para a redução do aquecimento global, pois, além de garantir o suprimento energético para a produção de aço a partir de florestas plantadas, a substituição do coque mineral pelo carvão vegetal implica na redução da emissão de 17,98t de CO₂ e 7 kg de SO₂ para a produção de 1 tonelada de aço (FERREIRA, 2000).

Emissão da Siderurgia pela Carbonização

O *software* Charcoal System também disponibilizou o relatório referente a Emissão da Siderurgia pela Carbonização (Tabela 4), que expressa a quantidade de gases de efeito estufa que é emitida para a produção de uma tonelada de ferro-gusa, ou seja, as emissões do processo de carbonização.

Tabela 4. Emissão da Siderurgia pela Carbonização realizada pelo *software* Charcoal System para o projeto siderurgia sustentável.

Produção de carvão vegetal		Carbono fixo	
Anual	1.118,0 mdc/ano	Teor	75,3%

Anual	225,5 t/ano	Total	169,8 tCarbono fixo
Balanco de Carbono			
Anual	1.204,574 tCO ₂ e/ano		
Carbono fixo	7,0940 tCO ₂ e/t Carbono fixo		
Demanda para produção de gusa			
0,45 tCarbono fixo/t gusa			
Emissão da Siderurgia pela Carbonização			
3,1923 tCO ₂ e/t gusa			

Para uma produção anual de carvão vegetal, com teor de carbono fixo de 75,3%, o projeto estará produzindo 169,8 toneladas de carbono fixo. Já que, a demanda para produção de gusa é de 0,45 tCarbono fixo/t gusa, a emissão da siderurgia pela carbonização será de aproximadamente 3 tCO₂e/t gusa, valor consideravelmente baixo, evidenciando assim a eficiência do queimador no sistema fornos-fornalha.

Esta eficiência está relacionada ao funcionamento constante da câmara de combustão presente na fornalha durante o ciclo de carbonização. Visto que, o sistema fornos-fornalha utiliza o queimador “não-contínuo”, considera-se uma redução de 50% de CH₄ durante o processo. Que é caracterizado pela queima dos gases na câmara de combustão da fornalha durante as quatro fases da carbonização em que há somente um forno ou mais não sincronizados, havendo assim, uma maior intensidade de vapor d’água nas duas primeiras fases, limitando a emissão e queima de CH₄ (CDM, 2019).

6. CONSIDERAOES FINAIS

Os dados obtidos tanto pelo método de Mensuração, Relato e Verificação (MRV), quanto pelo *software* Charcoal System, foram importantes para quantificar a redução dos Gases de Efeito Estufa (GEE) e o Balano de Carbono do Projeto BRA/14/G31 - Siderurgia Sustentável pelo sistema fornos-fornalha implantado no ICA/UFMG. Pois, mostraram em números o que é evidenciado numa praa de carbonização que faz o uso de queimadores, como por exemplo, a melhor qualidade de trabalho pela redução de fumaa, e conseqüentemente, diminuição do odor, demonstrando assim a contribuição da fornalha para a mitigação dos GEE. Além de indicar uma quantidade consideravelmente baixa de emissão da siderurgia pela carbonização.

Deve-se ressaltar também, que os resultados serão fundamentais para a apresentação do projeto nos próximos eventos, como mais uma forma de demonstrar aos produtores de carvão vegetal que há possibilidades de atender a DN 227 com baixo

custo e investimento, além da facilidade na operação do sistema e rendimento da atividade. Já que esta Deliberação Normativa tem como finalidade estabelecer procedimentos para que os empreendimentos reduzam emissões atmosféricas dos fornos de produção de carvão vegetal e adotem mecanismo de avaliação da qualidade do ar no seu entorno.

7. REFERÊNCIA

ALVES, E. B. B. M.; **Mudanças climáticas: percepção do produtor, balanço de carbono em propriedades rurais e neutralização de evento da Universidade Federal de Viçosa**. 122f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, 2014.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELLOS, D. C. (2010). Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, Lavras.

CDM Methodology Booklet November up to EB 63. **AM0041 Mitigation of Methane Emissions in the Wood Carbonization Activity for Charcoal Production**. 2011.

CDM Methodologies Booklet - Eleventh edition - Information up to EB 105. **ACM0001 Flaring or use of landfill gas, do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**, 2019.

Charcoal System. (2020). LAPEM/UFV, Viçosa. Disponível em: < <https://dev-charcoalsystem.herokuapp.com/login>> Acesso em: 20 de agosto de 2020.

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

DONATO, D. B. (2017). **Desenvolvimento e avaliação de desempenho de uma fornalha para combustão dos gases da carbonização da madeira**. 191 f. Tese (Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ELK, A. G. P. Van. **Mudanças climáticas, lixo, energia**. São Paulo, 2010.

FERREIRA, O. C; Emissão de gases de efeito estufa na produção e no uso do carvão vegetal na siderurgia. **Economia e Energia**, Belo Horizonte, v.3, n. 21, 2000.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, **IBÁ: Relatório 2019 – Ano base 2018**. São Paulo, SP, 2019.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. (1996). **Mudanças Climáticas 1995: Segundo Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas**.

MENDES, M. **Aplicação da metodologia mrv para quantificação das emissões do sistema forno-fornalha no contexto do projeto siderurgia sustentável**. Monografia. Universidade Federal De Viçosa. 57p. 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, et al. **Produção Sustentável de carvão vegetal: manual de operação de sistema fornos-fornalha**. Brasília, DF, MMA, 2019.

PNUD – Programa Das Nações Unidas Brasil. (2018). **Siderurgia Sustentável – Produção de Carvão Vegetal**.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. (2013). Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa - MG.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. (2010). **Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima - MDL - DCP versão 4**. Projeto Energia Verde Carbonização.

SILVA, L. B. **Sistema para cálculo do balanço de carbono e viabilidade técnica e econômica na produção de carvão vegetal**. Dissertação, Universidade Federal de Viçosa, julho de 2019.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO. F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. 2. Ed. Viçosa: Editora UFV. 2011.

VALVERDE, S. R.; MAFRA, J. W. A; MIRANDA, M. A.; SOUZA, C. S.; VASCONCELOS, D. C. (2012). **Silvicultura brasileira: oportunidades e desafios da economia verde**. Rio de Janeiro: **FBDS**.