

JÚLIA MELO FRANCO NEVES COSTA

**TEMPERATURA FINAL DE CARBONIZAÇÃO E QUEIMA DOS GASES NA
REDUÇÃO DE METANO, COMO BASE À GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE
CARBONO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C837t
2012

Costa, Júlia Melo Franco Neves, 1988-
Temperatura final de carbonização e queima dos gases na
redução de metano como base à geração de créditos de
carbono / Júlia Melo Franco Neves Costa. – Viçosa, MG,
2012.
xi, 60f. : il. ; (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 53-60

1. Carbonização. 2. Temperatura. 3. Queima de gases.
4. Créditos de carbono. 5. Metano. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.98675

JÚLIA MELO FRANCO NEVES COSTA

**TEMPERATURA FINAL DE CARBONIZAÇÃO E QUEIMA DOS GASES NA
REDUÇÃO DE METANO, COMO BASE À GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE
CARBONO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de outubro de 2012.

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
(Coorientadora)

Laércio Antônio Gonçalves Jacovine
(Coorientador)

Benedito Rocha Vital

Solange de Oliveira Araújo

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por guiar todos os meus passos.

Aos meus amados pais, José e Mara, meus maiores exemplos, por sempre colocarem o estudo dos filhos em primeiro lugar; se cheguei até aqui foi *por* vocês e *para* vocês. E por serem minha força de continuar em frente, com seu apoio e amor incondicional.

Aos queridos irmãos Clarisse e Emanuel, pela grande amizade que nos une mais que os laços de sangue, e por estarem sempre ao meu lado, me ouvindo e me aconselhando.

Aos familiares pelas vezes que entenderem minha ausência e por sentirem orgulho de ter uma “mestranda” na família.

Aos amigos de Sete Lagoas e de Diamantina, por nunca o deixar de serem, independente de distância ou tempo, torcendo sempre pelo meu sucesso.

Especialmente aos amigos Ana e Renatinho por me incentivarem a trilhar os caminhos da pesquisa e por ser meu ponto de apoio em Viçosa com sua amizade e constantes ajudas.

Às companheiras de República, Regina, Ariadina, Carol, Camila, Érika e Ariany por dividirem comigo mais que o mesmo teto: as alegrias e dificuldades do dia-a-dia e o aprendizado da convivência, que fez nascerem inesquecíveis amizades.

Às grandes e verdadeiras amigas que fiz em Viçosa, Glau, Aninha, Flávia, Déborah, Juliana, por tornarem meus dias aqui tão alegres e também por segurarem a barra nos momentos difíceis.

Ao bolsista de iniciação científica Wagner, pela prontidão, eficiência e amizade; esse trabalho é um pouco seu pelo tanto que se dedicou.

A Jomar e Monique, que no pouco tempo em que estagiaram no laboratório me prestaram grande ajuda com muita descontração.

Aos amigos do Lapem Marco Túlio, Sálvio (Moiado), Tito, Artur, Thiago, Mateus, Miguel, Marcelo, Ivanildo, Bráulio, Renato pelos dias e noites seguidas “tomando conta do forno”, em que muito trabalhamos, trocamos experiência, contamos “causos” e demos risadas. Aprendi muito e me diverti com vocês nas madrugadas geladas do Lapem.

Aos demais amigos e funcionários do Lapem por formarem um ambiente de trabalho tão agradável como o nosso laboratório.

À minha orientadora Ana Márcia, que mesmo tendo uma orientada rebelde que fugiu um pouco da sua área, demonstrou interesse em participar ao máximo do trabalho, fazendo todo o possível para me dedicar sua ajuda, orientação e amizade.

À minha segunda orientadora Cassinha, pois seria injusto chamar de coorientadora quem tanto me auxiliou, ensinou, deu conselhos e sua amizade.

Ao professor Jacovine por seus valiosos conselhos e sugestões.

Ao professor Benedito pelo seu exemplo de sabedoria e trabalho e pelas suas contribuições.

À Solange pelas contribuições, pelo seu carinho e palavras de incentivo.

À UFV pela oportunidade e aos funcionários do DEF, em especial Ritinha e Alexandre pela sua dedicação e Chiquinho pela amizade.

À UFVJM pela formação acadêmica.

À STA Engenharia pelas análises dos gases.

À CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

À FAPEMIG pelo financiamento do projeto.

*Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para essa conquista, o meu sincero
muito obrigada!*

BIOGRAFIA

JÚLIA MELO FRANCO NEVES COSTA, filha de José dos Reis Rezende Costa e Mara de Melo Franco Neves, nasceu no dia 13 de abril de 1988, em Sete Lagoas, Minas Gerais.

Ingressou no curso de Engenharia Florestal no ano de 2005 na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, em Diamantina, concluindo-o em agosto de 2009.

Em agosto de 2010, ingressou no programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde obteve o título de Mestre em Ciência Florestal em 17 de outubro de 2012.

*“É preciso força pra sonhar e perceber que
a estrada vai além do que se vê”*

Los Hermanos

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO	ix
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 Mudanças climáticas e Protocolo de Quioto	4
3.2 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e Créditos de Carbono	5
3.3 Siderurgia brasileira a carvão vegetal	8
3.4 Carbonização da madeira.....	10
3.5 Gases da carbonização	12
3.6 Queima dos gases da carbonização	14
3.7 Evolução das tecnologias limpas de produção de carvão no Brasil.....	15
3.8 Metodologias de redução de metano na produção de carvão vegetal	18
4 MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1 Propriedades da madeira.....	21
4.2 Ensaio de laboratório: forno mufla.....	21
4.2.2 Propriedades do carvão vegetal	24
4.2.3 Análise estatística	24
4.3 Ensaio de campo: forno de alvenaria	25
4.3.1 Caracterização do sistema forno-fornalha	25
4.3.2 Carbonização da madeira	26
4.3.3 Amostragem e propriedades do carvão vegetal	28
4.3.4 Aplicação do modelo de regressão	29

4.3.5 Coleta e caracterização dos gases	29
4.3.5.1 Instrumentação do forno	29
4.3.5.2 Método de cálculo	31
4.3.6 Simulação de projeto de MDL.....	32
4.3.6.1 Redução das emissões	32
4.3.6.2 Créditos de carbono.....	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 Caracterização da madeira.....	34
5.2 Ensaio de laboratório: carbonizações em mufla	34
5.2.1 Rendimento dos produtos da pirólise	34
5.2.2 Propriedades do carvão vegetal	36
5.2.3 Quantificação e qualificação dos gases não condensáveis	37
5.3 Ensaio de campo: fornos de alvenaria.....	42
5.3.1 Rendimento e propriedades do carvão vegetal	42
5.3.2 Emissão de metano (Kg/tonelada madeira)	44
5.3.3 Aplicação da equação de regressão	45
5.3.4 Simulação do projeto de MDL	46
5.3.4.1 Emissões da linha de base	47
5.3.4.2 Emissões do projeto atividade.....	47
5.3.4.3 Redução das emissões	48
5.3.4.4 Créditos de carbono	49
6 CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

RESUMO

COSTA, Júlia Melo Franco Neves, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2012. **Temperatura final de carbonização e queima dos gases na redução de metano, como base à geração de créditos de carbono.** Orientadora: Ana Márcia Macedo L. Carvalho. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Laércio Antônio Gonçalves Jacovine.

A emissão de gases do efeito estufa no processo de produção de carvão vegetal é significativa, havendo, por conseguinte, grande potencial de inserção no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, com projetos que visem à sua redução. Torna-se necessária, contudo, a realização de estudos que embasem a caracterização dos gases emitidos durante o processo, especialmente em relação à quantidade de metano, por ser este o principal gás de efeito estufa com liberado na carbonização. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi estudar a temperatura final de carbonização na emissão dos gases não condensáveis da carbonização, com destaque para o metano, e a redução de metano obtida com a queima dos gases, de acordo com a metodologia de pequena escala AMSIIIK (UNFCCC, 2008), para obtenção de créditos de carbono. No primeiro caso, estudou-se a influência de três diferentes temperaturas finais de carbonização em forno elétrico tipo mufla, no fator de emissão de metano (Kg/tonelada de madeira seca). Os gases não condensáveis foram conduzidos a cada trinta minutos a um sistema de análise de gases (*gasboard* 3100), fornecendo leituras da composição percentual de CH₄, CO₂, CO, H₂, O₂ e hidrocarbonetos. Desse modo, foi possível estimar a massa emitida de cada gás, utilizando a média aritmética de cada leitura, e o balanço de massa. Aplicou-se o Teste de Tukey ($\alpha = 10\%$), seguidamente à análise de variância, para verificar o comportamento da emissão de metano (Kg/tonelada de madeira seca) em relação à temperatura final de carbonização em mufla. Os resultados obtidos mostraram uma alta correlação entre as variáveis, permitindo gerar uma equação por meio de análise de regressão ($\alpha = 5\%$), com R² de 0,903. No segundo caso, utilizou-se do sistema de análise de gases com aplicação de balanço de massa para estimar as emissões em forno de alvenaria. Foram realizadas duas carbonizações, uma com e outra sem queima dos gases, a fim de se determinar a redução da emissão de metano, convertendo a diferença em toneladas de CO₂e para créditos de carbono. Atingiu-se uma eficiência de queima de 99,8% da quantidade em massa de metano e uma redução de 7,58 Kg de CH₄ por tonelada de madeira seca processada, correspondentes a 21,45 tCO₂e em um ano.

ABSTRACT

COSTA, Júlia Melo Franco Neves, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, October 2012, **Final temperature carbonization and combustion gases at the reduction of methane, to generation of carbon credits**. Adviser: Ana Márcia Macedo L. Carvalho. Co-advisers: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Laércio Antônio Gonçalves Jacovine.

The emission of greenhouse gases in the process of charcoal production is significant, there are, therefore, great potential for inclusion in the Clean Development Mechanism, with projects aimed at their reduction. It is necessary, however, the studies on which to base the characterization of the gases emitted during the process, especially in relation to the amount of methane, as this is the main greenhouse gas released into with carbonization. Thus, the aim of this work was to study the final temperature carbonization in the issuance of non-condensable gases from carbonization, especially methane, and methane reduction obtained by burning gas, according to the small scale methodology AMSIIIK (UNFCCC, 2008), to obtain carbon credits. In the first case, we studied the influence of three different final temperatures carbonization furnace electric furnace type, the methane emission factor (kg / tonne of dry wood). The non-condensable gases were conducted every thirty minutes for a gas analysis system (gasboard 3100), providing readings of the percentage composition of CH₄, CO₂, CO, H₂, O₂ and hydrocarbons. Thus, it was possible to estimate the mass of each gas emitted using the arithmetic means of each reading, and the mass balance. We used the Tukey test ($\alpha = 10\%$), following the analysis of variance to assess the behavior of methane emission (kg/tonne of dry wood) in relation to the final temperature carbonization in muffle. The results showed a high correlation between variables, allowing to generate an equation using regression analysis ($\alpha = 5\%$), with R² of 0.903. In the second case, we used the system for analysis of gases with the application of mass balance for estimating emissions furnace brickwork. Two carbonizações were performed, one with and one without burning gases in order to determine the reduction of emissions of methane, converting the difference in tonnes CO₂e to carbon credits. A hit burning efficiency of 99.8% by weight of the amount of methane and a reduction of 7.58 kg of CH₄ per ton of dry wood processed, corresponding to 21.45 tCO₂e in a year.

1 INTRODUÇÃO

Discussões com enfoque na temática ambiental, em especial relacionadas à mudança do clima, têm estado em grande evidência nos últimos anos, interferindo diretamente na maior parte dos setores produtivos. Preocupados em cumprir metas estipuladas pelo Protocolo de Quioto, no caso dos países desenvolvidos, ou estimulados pelos incentivos econômicos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), inúmeros projetos vêm sendo implementados em todo o mundo com medidas que promovam a redução da emissão de gases do efeito estufa.

A produção de carvão vegetal no Brasil é feita nos moldes tradicionais, caracterizada por baixa eficiência energética e não recuperação dos gases liberados na carbonização, especialmente a realizada pelos pequenos e médios produtores associados ao mercado guseiro.

O resultado global das emissões de gases do efeito estufa (GEE) pelo segmento da produção de carvão vegetal, calculadas para o ano de 2006, foram de 12 Mt de CO₂e, o que representou 3,61% do total de emissões da matriz energética brasileira no mesmo ano, que foram de 332,42 Mt de CO₂e (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2010).

A utilização do MDL como norteador do desenvolvimento no setor viabilizaria a adoção de práticas operacionais mais eficientes e melhores tecnologias, além de possibilitar o maior aproveitamento dos produtos derivados e a redução das emissões a ele associadas.

No contexto do MDL, considera-se que o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄) são os dois gases mais danosos ao efeito estufa em termos quantitativos. Apesar da atividade de carbonização contribuir com a emissão de ambos os gases, o que torna o processo como potencialmente inserível no MDL, contabiliza-se a liberação apenas de metano, gás com potencial de aquecimento 25 vezes maior que a do CO₂, já que este último é sequestrado no desenvolvimento dos plantios florestais.

Estão disponíveis duas metodologias oficiais da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas – CQNUMC para redução de metano na produção de carvão vegetal, sendo uma associada ao aumento do rendimento gravimétrico, a AM0041 (UNFCCC, 2006), para projetos de grande escala, e a outra à captura e queima do metano, denominada AMSIIIK (UNFCCC, 2008), para projetos de pequena escala.

Não há, até o momento, projetos com registro ou em processo de validação no Brasil que empreguem a metodologia AMSIIIK (UNFCCC, 2008), aplicável àqueles que evitam a

liberação de CH₄, substituindo os métodos convencionais de produção de carvão por unidades de produção equipadas com sistemas de queima do gás gerado no processo. Esse documento também preconiza a realização de procedimentos laboratoriais que subsidiem a realização de estudos de regressão entre a emissão de metano e a temperatura final de carbonização.

Dessa forma, percebe-se a necessidade de avaliar a aplicação dessa metodologia, com um estudo dos parâmetros a ela relacionados, como a relação entre a temperatura e a emissão de metano e a redução de emissão desse gás na queima dos gases da carbonização em fornos de alvenaria de pequena escala.

Torna-se possível, assim, avaliar a inserção de um importante nicho da cadeia do carvão vegetal no contexto do MDL, o dos pequenos e médios produtores, que estão associados ao fornecimento do insumo para a produção independente de ferro-gusa. Esse seria um passo fundamental para se alcançar, de forma efetiva, a sustentabilidade no setor.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a redução de metano no processo de produção de carvão vegetal, com estudos da relação entre a temperatura final de carbonização e o fator de emissão do metano e da queima de gases em fornos de alvenaria, como base à geração de créditos de carbono para projetos de pequena escala.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a composição percentual de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) e hidrogênio (H_2) do gás não condensável (GNC) liberado durante o processo de carbonização em mufla;
- Determinar o rendimento gravimétrico em carvão (RGCV), o rendimento gravimétrico em gases condensáveis (RGGC) e em gases não condensáveis (RGNC), bem como as propriedades do carvão vegetal para diferentes temperaturas finais de carbonização;
- Quantificar, em massa, a fração de cada gás liberado, bem como o seu fator de emissão (Kg/t madeira) para diferentes temperaturas finais, utilizando um balanço de massa aplicável aos gases não condensáveis da madeira;
- Obter uma equação por meio de análise de regressão utilizando as variáveis Fator de emissão de metano e Temperatura final de carbonização, em escala laboratorial;
- Qualificar e quantificar os gases emitidos durante a carbonização da madeira em forno de alvenaria com e sem a queima dos gases;
- Determinar a massa de metano emitida em cada carbonização realizada em forno de alvenaria e transformá-la em fator de emissão (Kg/t madeira);
- Determinar o rendimento gravimétrico e as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal produzido em forno de alvenaria;
- Estimar a receita em créditos de carbono, resultantes da conversão para CERs (Certificados de Emissões Reduzidas) das toneladas de CO_2 e correspondentes à redução das emissões de metano com a queima dos gases, em um ano.

2 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Mudanças climáticas e Protocolo de Quioto

A partir da década de 1980, vêm crescendo as evidências científicas de que as ações antrópicas decorrentes do modelo de produção em vigor têm sido decisivas para o agravamento das ameaças ambientais que colocam em risco a integridade do planeta (CEBDS, 2002). Desde então, muito tem se discutido sobre questões como mudanças climáticas, aquecimento global e efeito-estufa.

A concentração atmosférica de gases de efeito estufa (GEE), dentre os quais merecem destaque o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o ozônio (O_3) e os hidrofluorcarbonos (CFCs), aumentou de forma acelerada após a Revolução Industrial e continua sob taxas crescentes até hoje. Tais gases, cujas principais fontes antropogênicas estão associadas às mudanças de uso da terra, à queima de combustíveis fósseis e às atividades industriais (APPS *et al.*, 1999) têm o poder de retenção de calor, interferindo no equilíbrio climático da Terra.

Calcula-se que a alteração na concentração dos GEEs poderá desencadear nos próximos cem anos, um aumento da temperatura média do planeta, entre 1,4 e 5,8°C (CENAMO, 2005). Consequências drásticas são esperadas com esse aquecimento, como a propagação de doenças tropicais, migração e extinção da biodiversidade, derretimento das calotas polares e aumento do nível médio dos oceanos, sendo que as duas últimas já podem ser observadas (NISHI *et al.*, 2005).

A preocupação com o clima deu início a uma série de reuniões de ordem mundial com o objetivo de discutir soluções para mitigação do avanço do aquecimento global. As respostas políticas internacionais só se tornaram concretas em 1992, pelas Nações Unidas, através da adoção de um tratado internacional, a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas – CQNUMC (FRANGETTO e GAZANI, 2002).

A CQNUMC entrou em vigor em 1994 e, desde então, os países signatários da Convenção reúnem-se anualmente nas chamadas Conferências das Partes – COPs, em cuja terceira realização, no ano de 1997, foi apresentada a primeira medida efetiva de controle da emissão dos GEE, o Protocolo de Quioto (TOLÊDO, 2010).

O Protocolo de Quioto estabelece metas de redução das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) em 5,2% com relação aos níveis verificados em 1990, no período entre 2008 e

2012. O compromisso dessa redução foi atribuído aos países desenvolvidos, considerados os principais responsáveis pelos elevados níveis atuais, resultado de mais de 150 anos de atividade industrial (UNFCCC, 2012).

Apesar dos avanços ambientais alcançados desde a assinatura do Protocolo de Quito, não havia, ainda, previsão de renovação desse primeiro período de creditação do Protocolo, que vence em dezembro de 2012. Durante a COP 17, a conferência do clima de Durban, na África do Sul, realizada em dezembro de 2011, ocorreram históricos avanços contra as emissões de gases-estufa. A conferência, por meio de um documento intitulado “Plataforma de Durban”, estabeleceu um calendário de novas medidas para o combate ao aquecimento global, que deverão ser definidas e criadas até 2015 e que passarão a vigorar, em caráter obrigatório para todos os países, a partir de 2020. Dentre as medidas discutidas, destaca-se o “Fundo verde do clima”, que destinará anualmente 100 bilhões às ações de combate às emissões e promoção de ações de adaptação às mudanças climáticas nos países em desenvolvimento (ABRAF, 2012).

As decisões tomadas em Durban tiveram a importante e decisiva participação do Brasil, que já vinha desenvolvendo ações voltadas para minimizar os efeitos das mudanças climáticas. No final de 2009, na COP 15, realizada em Copenhague, o Brasil assumiu, de acordo com seu Plano nacional de Mudanças do clima, uma meta de redução de 36,1 a 38,9% de suas emissões totais de GEE conforme critérios do mecanismo do NAMA (National Appropriated Mitigation Actions ou Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas) (ABRAF, 2012).

3.2 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e Créditos de Carbono

A fim de possibilitar a implementação dos seus propósitos de redução de emissões e ao mesmo tempo assegurar uma transição economicamente viável para a adoção desse novo padrão, o Protocolo de Quioto estabeleceu a criação de mecanismos comerciais (chamados de Mecanismos de Flexibilização) para facilitar que os países do Anexo I (países desenvolvidos) e suas empresas cumpram suas metas de cortes nas emissões (CEBDS, 2002). O Comércio de Emissões e a Implementação Conjunta são mecanismos que envolvem o comércio ou a transferência de cotas de emissão entre os países do Anexo I.

Além desses, há o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que é o único que prevê a participação de países do Não-Anexo I, uma vez que permite que países do Anexo I

financiem projetos de redução ou comprem os volumes de redução de emissões resultantes de iniciativas desenvolvidas nos países não industrializados, contribuindo para o seu desenvolvimento sustentável (TOLÊDO, 2010).

Porém, para que futuros projetos possam ser certificados, esses deverão atender ao critério de adicionalidade ambiental, como estipulado no item 5, do Artigo 12 do Protocolo de Quioto. Esse artigo requer que as reduções na emissão de GEE sejam adicionais àquelas que ocorreriam na ausência das atividades do projeto certificado e devem ser reais, mensuráveis e proporcionar benefícios de longo prazo para a mitigação das mudanças climáticas. Isso significa que é necessário avaliar as emissões de GEE e mostrar que, caso o projeto não seja implementado, tais emissões serão maiores (NISHI *et al.*, 2005), conforme ilustrado na Figura 1.

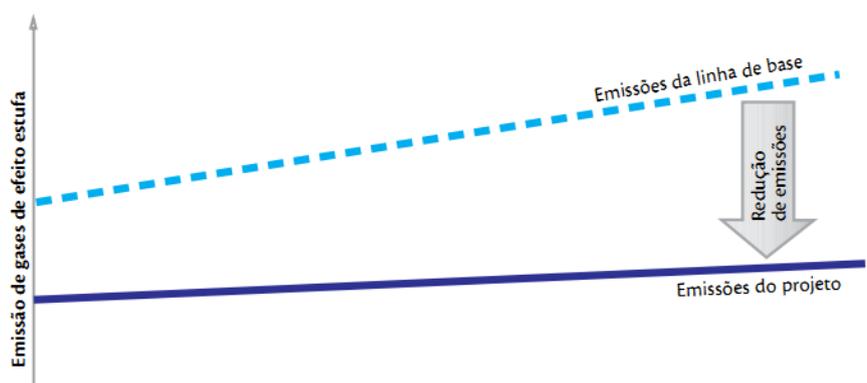


Figura 1. Conceito de Adicionalidade (CGEE, 2008)

De maneira geral, os projetos de MDL podem ser divididos em duas categorias: (i) “projetos de redução de emissão”, através do aumento da eficiência energética, do uso de fontes e combustíveis renováveis e da adoção de melhores tecnologias para o processo produtivo de um modo geral; e (ii) projetos de remoção de CO₂ atmosférico, ou, como são usualmente chamados, de “sequestro de carbono”, relacionados à captação e estocagem de carbono em ecossistemas florestais (CENAMO, 2005).

As quantidades referentes à remoção de GEE atribuídas ao projeto são medidas em tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), calculado de acordo com o Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potencial- GWP). Essa unidade é utilizada para uniformizar as quantidades dos diversos GEE em termos de CO₂e, possibilitando que reduções de diversos gases sejam comparadas e somadas (FVG, 2002).

Uma vez comprovada a efetiva redução de emissão desses gases, os participantes de projetos podem auferir certificados que comprovem a dita redução; tais certificados são denominados Certificados de Emissões Reduzidas (COTTA e TONELLO, 2006)

Entretanto, até o alcance dessa fase, os projetos devem passar por uma série de etapas no chamado “Ciclo de Aprovação do MDL”, que pode ser resumido da seguinte maneira: 1) planejamento da atividade do projeto de MDL pelos participantes do projeto; 2) elaboração do Documento de Concepção do Projeto (DCP) pela parte interessada com base nas metodologias utilizadas no projeto pelo Conselho Executivo (CE) do MDL, que deve conter a descrição das atividades do projeto, incluindo seus limites e a metodologia da linha de base; 3) validação do projeto por uma Entidade Operacional Designada (EOD) ou “certificadora” credenciada no CE; 4) aprovação pela Autoridade Nacional Designada (AND), que no caso do Brasil é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC), presidida pelo Ministério de Ciência e Tecnologia; 5) aceitação e registro do projeto no Conselho Executivo; 6) verificação e certificação, novamente por uma certificadora credenciada (EOD); e, finalmente, 7) emissão dos Certificados de Emissões Reduzidas pelo Conselho Executivo (BRASIL, 2002).

A comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) a partir da criação de um valor transacionável para as reduções de GEE, culminou no surgimento de um novo mercado: o chamado mercado de créditos de carbono (ROCHA, 2003), que saiu do papel em 2005, quando o Protocolo de Quioto finalmente entrou em vigor.

A regulamentação desse comércio é regida pelo sistema econômico *Cap and Trade*, que determina a quantidade de gás carbônico que determinado segmento econômico ou país pode emitir, além de permitir que as empresas que reduziram suas emissões acima do necessário negociem seus créditos. Para o Brasil, tal sistema de uma forma geral, não se configura como risco à competitividade industrial mundial, devido à matriz energética limpa, e ao fomento às atividades de base florestal, representando grande potencial de redução de emissões de GEE (ABRAF, 2012).

Paralelo ao mercado de carbono nos moldes do Protocolo de Quioto, surgiu o mercado de crédito voluntário, visando a atender a demanda de organizações e empresas que pretendem reduzir suas emissões para fora e além do mercado de cumprimento, sendo as principais entidades que normalizam este mercado o *Voluntary Carbon Standard (VCS)*, *Climate, Community & Biodiversity Standard (CCBS)*, *CarbonFix*, *Plan Vivo*, *Chicago*

Climate Exchange (CCX), California Climate Action Reserve (CCAR) e American Carbon Registry (ACR) (LOPES, 2009).

Na comparação realizada por Hamilton *et al.* (2010) acerca do volume e valores negociados de créditos de carbono oriundos de projetos florestais no Brasil entre os mercados Quioto e Não - Quioto (voluntário), mostrou-se que o mercado regulamentado de Quioto representou apenas 7,8 % dos créditos negociados, enquanto que os mercados voluntários representaram 92,2 % do mercado.

Atualmente o mercado de carbono encontra-se fragilizado e em baixa. Isso se deve, segundo analistas, à crise econômica na Europa (incluindo a desvalorização do euro), gerando, como consequência, uma baixa demanda de CERs. No entanto, algumas medidas estão sendo tomadas para elevar a atratividade do mercado, como o cancelamento de parte das *allowances* (permissões), o que implicará aumento da demanda de CERs, e a retomada dos níveis de produção industrial. A continuidade de Quioto (e do MDL) também favorece a atratividade de investidores para os projetos, e certamente contribuirá para a elevação dos valores dos CERs (ABRAF, 2012).

3.3 Siderurgia brasileira a carvão vegetal

Quando se trata da participação de fontes renováveis na matriz energética nacional, o Brasil é um país à frente, apresentando média de 44,1% contra 13,3% de média mundial. Dentre os renováveis, somente a lenha e o carvão vegetal representam 9,7% na oferta interna de energia (BRASIL, 2012).

A quase totalidade do carvão vegetal produzido no Brasil é destinada ao mercado interno, para atender à demanda da indústria siderúrgica. Esta é responsável pela utilização de aproximadamente 84% do insumo produzido, sendo 72% destinado à produção de ferro-gusa e aço e 12% à produção de ferro-ligas (EPE, 2011).

A siderurgia a carvão vegetal no país compreende as grandes usinas integradas produtoras de aço, cuja cadeia abrange desde a manutenção de base florestal própria, passando pelas etapas de carvoejamento, redução do minério de ferro, refino e laminação; e as usinas independentes, produtoras apenas de ferro gusa.

Dos 25 milhões de toneladas de ferro-gusa produzidas no Brasil em 2009, 19 milhões de toneladas (75%) foram produzidas pela siderurgia a coque (carvão mineral) e 6 milhões de

toneladas (25%) foram produzidas a partir do carvão vegetal; destes, 70% pelos produtores independentes e 30% pelas usinas integradas a carvão vegetal (AMS, 2011).

Na rota que utiliza o coque como redutor, há emissões de CO₂ e remoção de O₂ em todas as fases da cadeia, totalizando uma emissão de 1.883 kg de CO₂ e uma remoção de 1.274 kg de O₂ por tonelada de ferro-gusa ao longo de toda a cadeia. Já na cadeia que utiliza o carvão vegetal como redutor totaliza-se uma remoção líquida de 1.111 kg de CO₂ e a emissão de 164 kg de O₂ por tonelada de ferro-gusa (CGEE, 2010).

Os concorrentes brasileiros no mercado internacional de gusa, sem exceção, utilizam como redutor o coque, combustível não renovável de baixo custo e com elevada capacidade poluidora. Os produtores nacionais de ferro gusa, ao contrário, utilizam predominantemente o carvão vegetal, redutor renovável e com baixo grau de poluição. Entretanto, essas qualidades ambientais competitivas ainda não são devidamente exploradas pelos produtores nacionais, nem valorizadas pelos mercados compradores (ABRAF, 2012).

Há, portanto, vários desafios a serem enfrentados pelo setor e pelos governos, como ampliar a produção do “aço verde”, com incentivos à produção florestal, de forma a contribuir para a redução de emissões de gases de efeito estufa, e ao mesmo tempo promover maior agregação de valor aos produtos siderúrgicos “verdes”, mediante medidas que permitam a redução de assimetrias que comprometem a competitividade do setor (ABRAF, 2012).

Essas medidas certamente devem envolver paralelamente a modernização da indústria de produção de carvão vegetal, com adoção de políticas públicas que regulamentem o emprego de tecnologias voltadas à redução das emissões de GEE, com aproveitamento energético dos subprodutos, bem como ao alcance de melhores rendimentos gravimétricos.

Justifica-se essa preocupação pelo fato de que, apesar da grande importância histórica e econômica no país, respondendo por quase um terço da produção mundial, o carvão vegetal ainda é produzido em sua grande maioria, como há um século atrás. Os sistemas tradicionais não dispõem de controle eficiente da carbonização, sendo baseado em fatores subjetivos, como a cor da fumaça, resultando em rendimentos gravimétricos em torno dos 25 %.

Em 2008 foi desenvolvido um plano setorial para redução das emissões da siderurgia, encomendado pelo Departamento de Competitividade Industrial do Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC) (MMA, 2011). A Figura 2 retrata os cenários projetados pelo estudo: cenário de base (BAU), sem intervenção política, baseado na extrapolação linear das tendências históricas de crescimento de emissões; cenário de intervenção 1, com ações para substituir madeira de floresta nativa por floresta plantada;

cenário de intervenção 2, com ações para controle das emissões de metano no processo de carbonização; e cenário de intervenção 3, que combina as ações para expansão das florestas plantadas com ações para melhoria do processo de carbonização.

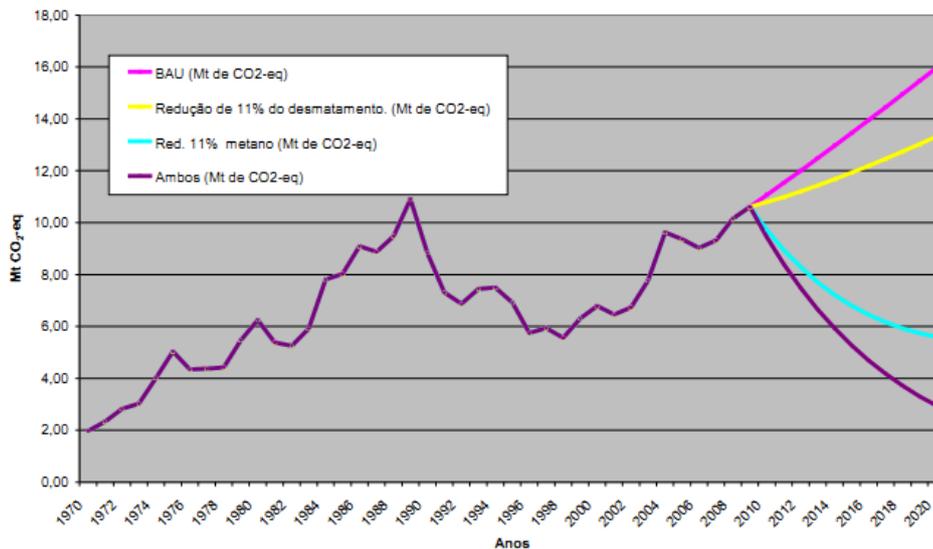


Figura 2. Projeção das emissões de CO₂ na produção do carvão vegetal empregado na fabricação do ferro gusa (MMA, 2011).

Segundo as estimativas do estudo, que faz parte do compromisso voluntário de redução de emissões firmado no Acordo de Copenhague, as emissões da siderurgia poderão ser reduzidas em 81,6%, se combinadas as ações de substituição de florestas nativas por plantadas e redução de metano na produção de carvão (MMA, 2011).

3.4 Carbonização da madeira

A carbonização ou pirólise da madeira é caracterizada pela decomposição térmica parcial da mesma em ambientes ausentes ou com restrição de oxigênio.

O objetivo maior da carbonização é concentrar carbono no resíduo sólido, sendo para tanto necessária a ocorrência de vários processos, tanto físicos como químicos (ALMEIDA e REZENDE, 1982). Esses processos são iniciados pela secagem da madeira, após a qual se segue a fase de pirólise propriamente dita, em que são produzidos além do carvão vegetal, os gases condensáveis e não condensáveis.

O processo de carbonização pode ser entendido ao se estudar o comportamento dos três principais componentes da madeira: a celulose, as hemiceluloses e a lignina (OLIVEIRA

et al., 1982), uma vez que tais constituintes químicos reagem de formas diversas ao processo de aquecimento.

Nos estudos desenvolvidos por Yang *et al.* (2007), Shen *et al.* (2010), Rowell e LeVan-Green (2005), é relatado para a celulose um comportamento de estabilidade térmica até os 300°C aproximadamente. A partir desta temperatura ela se decompõe abruptamente em uma estreita faixa, com perda de massa máxima perto dos 355°C, e degradada quase que totalmente já aos 380-400°C.

A fase principal de perda de massa para a celulose é posterior à das hemiceluloses, na medida em que mais energia é necessária para a despolimerização das cadeias de celulose e quebra das ligações entre os monômeros (LIAO, 2003).

De acordo com Oliveira (2009), as hemiceluloses são menos estáveis à ação do calor, devido à estrutura ramificada, com presença de grupos hidroxilas laterais, bem como à sua condição amorfa. Por isso sua faixa de decomposição está entre 220° e 315°C, com perda de massa máxima próxima dos 268°C segundo Yang *et al.* (2007).

O componente da madeira de maior estabilidade térmica é a lignina, devido à sua aromaticidade, ao tamanho e ao arranjo de sua estrutura (HAYKIRI-ACMA *et al.*, 2010). A decomposição térmica da lignina ocorre em uma ampla faixa de temperatura, podendo ser considerada como um conjunto de várias reações paralelas (MÜLLER-HAGEDORN *et al.*, 2003).

Os produtos e a cinética da pirólise da lignina refletem a complexidade de sua estrutura molecular, na qual diferentes unidades monoméricas estão ligadas por vários tipos de ligações e esses fatores explicam porque a lignina não origina um produto principal (CORTEZ *et al.*, 2008).

Resumindo o processo de carbonização, de acordo com vários pesquisadores, entre eles Oliveira *et al.* (1982), Lepage (1987), Trugilho *et al.* (2001), a ocorrência dos fenômenos durante a evolução térmica se divide em quatro fases distintas:

- Fase A: até 200°C, predomina o fenômeno de secagem da madeira, com liberação de vapor d'água, ácido acético, ácido fórmico, glioxial e traços de CO₂;

- Fase B: entre 200°C e 280°C, são liberados os mesmos gases da fase A, com moderação na quantidade de vapor d'água e aparecimento de CO. Até esta fase as reações são de natureza endotérmica.

- Fase C, entre 280° e 500°C, as reações passam a ser de natureza exotérmica. Há liberação de CO, CH₄, formaldeído, ácido fórmico, ácido acético, metanol, H₂ e alcatrões.

Ocorrem reações de pirólise secundária entre os produtos da pirólise primária e o carvão já está formado.

- Fase D, a partir de 500°C, ocorrem reações secundárias catalisadas pelo leito do carvão, como a reação entre a H₂O e o CO₂ formando CO, H₂ e formaldeído.

De maneira geral, os parâmetros relacionados ao processo de carbonização bem como a matéria- prima utilizada determinam o rendimento gravimétrico dos produtos e a qualidade do carvão vegetal. Em relação aos parâmetros, quanto maior a temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento maior será o rendimento gravimétrico em carvão e menor o rendimento em gases. A maximização deste parâmetro também acarreta diminuição da densidade e na resistência do carvão vegetal, devendo-se buscar um equilíbrio entre as variáveis de modo a obter um produto com qualidade para atender as exigências do setor siderúrgico com menor perda possível em produtividade.

3.5 Gases da carbonização

Os poluentes contidos nos gases da carbonização podem ser classificados em três categorias: pós e partículas em suspensão, gases não condensáveis e compostos orgânicos condensáveis (MEZERETTE e GIRARD, 1996).

Os compostos orgânicos condensáveis ou COC são os principais compostos poluentes presentes nos gases da carbonização. Durante a decomposição térmica da madeira, parte do produto volátil proveniente do leito de reação pode ser condensada, e com isso obtém-se o licor pirolenhoso. Esse licor, por decantação, é separado em duas fases: uma aquosa, contendo álcoois, cetonas e vários compostos de baixo peso molecular; e outra fase viscosa, chamada alcatrão vegetal, composta de água, fenóis voláteis (creosoto de madeira) e piche (CASTRO, 1982).

A fração liberada como gases não condensáveis, é constituída, prioritariamente, por dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), hidrogênio (H₂) e hidrocarbonetos (C_nH_n) (BECIDAN *et al.*, 2007).

As proporções entre os compostos produzidos na carbonização dependem do método de pirólise empregado, que variam em relação aos parâmetros do processo e das características específicas da biomassa empregada (DEMIRBAS, 2000). De modo geral, temperaturas e taxas de aquecimento elevadas maximizam o rendimento em gases.

O rendimento em gases não condensáveis aumenta linearmente com a elevação da temperatura, variando de 18 a 42%, para as temperaturas de 400 a 700°C (SHEN *et al.*, 2010). Esse comportamento reflete o fato de que a formação dos gases da pirólise é favorecida por reações térmicas como as de craqueamento, despolimerização, descarboxilação e oxidação, que são, portanto, favorecidas pelo aumento de temperatura da pirólise (TACCINI, 2011).

A emissão de gases não condensáveis foi dividida por González *et al.* (2003) em duas zonas distintas. A primeira ocorre entre 275 e 425°C e se caracteriza pela ocorrência dos maiores picos de emissão de CH₄, CO e CO₂. A segunda zona ocorre a temperaturas acima de 450°C, apresentando baixas concentrações de óxidos de carbono, CH₄ e H₂. Alguns autores preferiram resumir a emissão de gases não condensáveis como significativa acima de 150°C, sendo que a maior parte ocorre principalmente a baixas temperaturas, entre 200 e 500°C (TIHAY e GILLARD, 2003; FU *et al.*, 2009; GREENBERG *et al.*, 2006).

Esse tipo de estudo, que envolve a caracterização e qualificação dos gases liberados nos processos térmicos é possível através de uma análise térmica, conhecida como EGA (Evolved Gas Analysis) e sua quantificação é possível através da técnica de pulso (PTA– Pulse Thermal Analysis) aliada ao sistema de espectrometria de massa (MS – Mass Spectrometer), que são acoplados junto à saída dinâmica de gás dos aparelhos de termogravimetria (TG), Análise Térmica Diferencial (DTA), Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) (RODRIGUES e MARCHETTO, 2002).

A liberação de CO₂ a baixas temperaturas ocorre principalmente pela quebra das ligações C=O, C-O e C-C das ramificações da cadeia principal das hemiceluloses, com pico ao redor de 280°C. Já em altas temperaturas, com máximo próximo aos 500°C, sua emissão está relacionada ao craqueamento e reforma de ligações COOH, C=O, C-C e OH situadas nas cadeias alifáticas de fenilpropano da lignina (YANG *et al.*, 2007)

A emissão de CO também está relacionada com quebras dos grupos presentes nas ramificações das hemiceluloses até os 450°C. Acima dessa temperatura, decorre da quebra de unidades monoméricas da lignina (ligações aril-éter) e, após os 600°C, também é formado pelo craqueamento do alcatrão (WANG *et al.*, 2009). A emissão de H₂ também está relacionada a essa reação.

A lignina é o componente que mais contribui para a emissão de CH₄. Abaixo dos 500°C, ocorre a quebra de seus grupos metoxila (O-CH₃) e metileno (CH₂) e, a temperaturas elevadas, a ruptura de seus anéis aromáticos (YANG *et al.*, 2007; FU *et al.*, 2010). Além

disso, o CH₄ é formado pela ocorrência de reações secundárias entre os componentes gasosos, notadamente as de metanopiranólise ao redor dos 700°C (TIHAY e GILLARD, 2003).

Os estudos de EGA aliados ao sistema de espectrometria de massa demonstram, em geral, que todos os principais componentes gasosos – CO₂, CO, CH₄, H₂ – exibem um perfil com dois picos máximos de emissão, ou um pico máximo seguido por outro menor, ou ainda, pequenas emissões ao longo do tempo de carbonização (TACCINI, 2011).

3.6 Queima dos gases da carbonização

Segundo Pimenta e Barcellos (2004), vários subprodutos podem ser obtidos da carbonização da madeira via condensação de gases ou ainda é possível promover-se à queima integral das emissões, e com isso reduzir ou eliminar a liberação de compostos poluentes para a atmosfera.

Os gases da carbonização são substâncias combustíveis ricas em carbono e hidrogênio que, sob condições adequadas de temperatura e pressão, são capazes de, na presença de oxigênio, sofrer reações químicas, ocorrendo a liberação de energia sob a forma de luz e calor (CARDOSO *et al.*, 2010). Dessa forma, o alcance da combustão completa desse combustível promoveria a oxidação de todo carbono a dióxido de carbono (CO₂), e do hidrogênio à água.

Além de reduzir os teores de gases nocivos ao ambiente, como o CH₄, gás de efeito estufa com grande potencial de aquecimento global, e o CO, que afeta indiretamente esse processo por participar de reações fotoquímicas que alteram os níveis de GEE na atmosfera (PENNISE *et al.*, 2001), a combustão dos gases diminui consideravelmente o aspecto visual e o efeito tóxico da emissão, cuja inalação pode desencadear doenças respiratórias e carcinomas, o que contribui positivamente para as condições de trabalho nas proximidades. Outra vantagem é a liberação de energia térmica em sua reação, com grande potencial de aproveitamento.

A redução de metano na produção do carvão, por sua vez, promove uma adicionalidade ambiental ao projeto, tornando-o elegível no MDL. O aumento dos níveis de CO₂ resultante da reação de combustão, não é negativo nesse aspecto, pois, muito embora este seja um importante GEE, não está representado nas emissões líquidas da carbonização, na medida em que os plantios florestais promovem o sequestro desse gás, atingindo pois, um saldo positivo de remoção.

Diante disso, percebe-se que o processo de combustão dos gases da carbonização é uma alternativa viável para a sustentabilidade do setor, pois, além das vantagens já expostas, gera um adicional de calor suficiente para a secagem da lenha, diminuindo a necessidade de madeira para obtenção da mesma quantidade de carvão (COLOMBO *et al.*, 2006). Esse ganho em rendimento gravimétrico é mais um fator que, por si só, já contribui para a redução das emissões, comprovado por vários estudos que demonstram uma relação linear negativa entre as emissões de CH₄ e o rendimento gravimétrico na produção de carvão vegetal.

Desse modo, uma redução nas emissões de CH₄ decorrentes do processo de carbonização pode se dar por meio da implementação de melhorias tecnológicas e operacionais no projeto dos fornos e na operacionalização do sistema, que aumentem a eficiência do processo, resultando em maior rendimento, menor custo de produção e menor impacto ambiental (DUBOC *et al.*, 2007).

As tecnologias atuais de fornos que promovem a queima dos gases liberados na carbonização incluem a instalação de um dispositivo denominado fornalha. De acordo com Magalhães (2007), elas são projetadas para assegurar a queima completa do combustível de modo eficiente e contínuo, visando ao aproveitamento da energia liberada, com o maior rendimento térmico possível.

O projeto de uma fornalha deve se basear nos três T's da combustão: temperatura, turbulência e tempo, para propiciar uma mistura ar-combustível homogênea, na dosagem ideal e no tempo correto, e permitir o aquecimento do combustível até a sua ignição autossustentável e combustão completa (LOPES, 2002; MELO, 2003). Segundo os mesmos autores, as reações nas quais aparece monóxido de carbono nos produtos são incompletas e trazem prejuízos quanto ao aproveitamento energético do combustível em cerca de 70%.

A combustão dos gases no interior da fornalha só se efetiva depois de transcorrida a etapa inicial do processo de carbonização, na qual há uma grande liberação de vapor d'água em função da secagem da madeira. À medida que a temperatura de carbonização se eleva, reduz-se a liberação de vapor e aumenta a de gases com alto poder calorífico, fornecendo, portanto, gás combustível para o processo da queima.

3.7 Evolução das tecnologias limpas de produção de carvão no Brasil

Já há alguns anos Brito (1990) ressaltava a necessidade de alterações na sistemática de produção do carvão vegetal no Brasil, com a adoção de amplo espectro de soluções para a

recuperação de subprodutos da carbonização, ainda que isso exigisse um significativo investimento inicial, pois a sociedade moderna não mais admite, em qualquer que seja a atividade, a não agregação de custos relacionados à minimização dos impactos ao ambiente.

Na Europa, para atendimento às leis ambientais, tecnologias para produção de carvão em escala industrial, dotadas de mecanismos para a recuperação dos subprodutos de forma contínua, foram substituindo as formas de produção altamente poluidoras. Na realidade, essas tecnologias não são recentes, como o processo Reichert Lurgi e o Sific Lambriotte, que foram criados em 1935 e 1947, respectivamente (PENEDO, 1982). As barreiras prováveis para sua adoção na Europa àquela época foram os altos custos de implantação e operação, aliados à pressão incipiente dos organismos ambientais, situação que se configura até hoje no cenário brasileiro (SANTOS e HATAKEYAMA, 2012).

A absorção de inovações tecnológicas com vistas à produção sustentável de carvão vegetal no Brasil é recente, embora este esteja entre os maiores produtores mundiais do insumo.

Os fornos retangulares da Vallourec & Mannesman com capacidade volumétrica de 200 estéreos marcaram o início da modernização dos fornos de alvenaria, com o sistema de recuperação de alcatrão e o controle de carbonização utilizando pirometria de infravermelho.

Em 2001 aplicou-se o conceito de “incineração da fumaça” quando Barcellos (2002) avaliou o desempenho de um forno tipo Container com capacidade de 1,5st de lenha, dotado de fornalha para combustão dos gases. A fornalha, cuja construção foi baseada em modelos destinados à secagem de grãos, mostrou-se eficiente na queima dos gases, atingindo temperaturas superiores a 700°C na saída dos gases da câmara de combustão.

A evolução do conceito dos fornos tipo container deu origem ao processo de carbonização em cilindros metálicos verticais (PCCMV), que tem uma unidade de produção localizada no estado do Paraná. É um processo semicontínuo de produção de carvão, que consiste basicamente no carregamento de um cilindro metálico com madeira previamente cortada em tamanho uniforme e com teor de umidade reduzido. Os gases liberados são canalizados para uma fornalha e após a sua queima o gás quente resultante do processo é utilizado para a secagem da lenha (COLOMBO *et al.*, 2006).

A partir de 2006, a tecnologia de queima de gases chegou às grandes empresas, valorizada pelos ganhos ambientais, energéticos e econômicos, sendo introduzida com a instalação de queimadores em sistemas de fornos de alvenaria. Estão em processo de estudo para otimização de sua eficiência, incluindo o teste de diversos modelos e materiais,

diferentes potenciais térmicos e sistemas de exaustão natural ou forçada (BARCELLOS, 2010), além do aproveitamento da energia térmica gerada no processo, seja para secagem da madeira a ser introduzida nos fornos ou para cogeração de energia elétrica.

A instalação de queimadores de gases da carbonização destinados a pequenos produtores começou a ser estudada por Cardoso *et al.* (2010), que avaliou um sistema forno-fornalha em termos de redução de emissões, rendimento e propriedades do carvão vegetal. O autor procedeu à análise qualitativa e quantitativa dos gases através de cromatografia gasosa e à avaliação das propriedades físicas e químicas do carvão vegetal, bem como o seu rendimento gravimétrico e verificou que a queima dos gases na fornalha se mostrou eficiente, pois reduziu em mais de 90% a emissão de metano e monóxido de carbono ao mesmo tempo em que não acarretou perda de rendimento em carvão.

Oliveira (2012) avaliou um sistema de três fornos circulares de superfície, com capacidade de 12 estéreos, acoplados a uma fornalha central. O autor testou a eficiência da queima dos gases da carbonização pela fornalha e verificou que a mesma funcionou adequadamente durante um terço do tempo de carbonização, mostrando-se eficiente para redução dos gases do efeito estufa.

Já existem no Brasil tecnologias sustentáveis e mais avançadas de produção de carvão vegetal que, no entanto, exigem altos investimentos e por isso, têm sua implantação ainda limitada. Como exemplo há o processo de carbonização semi-contínua DPC (Dry-Pyrolysis-Carbonization), tecnologia em fase experimental no país, no qual as funções de secagem da madeira, carbonização e resfriamento do carvão vegetal se processam simultânea e independentemente em no mínimo três reatores (Figura 3):

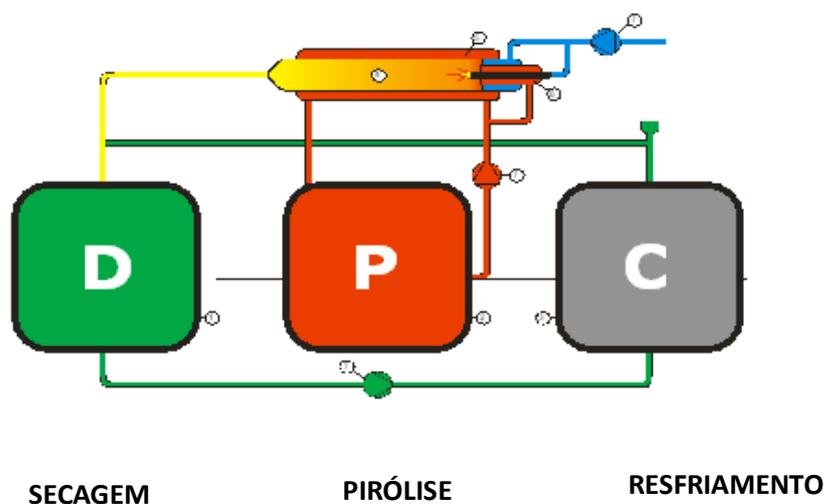


Figura 3. Esquema dos reatores das fases de secagem, pirólise e resfriamento da tecnologia DCP (Dry-Pyrolysis-Carbonization)

Os gases emitidos durante a pirólise são queimados numa câmara de combustão, e a energia térmica gerada é aproveitada tanto na secagem da madeira como na fase endotérmica da pirólise, evitando, assim, a queima parcial da carga, o que eleva o rendimento gravimétrico (LÚCIO *et al.*, 2006).

3.8 Metodologias de redução de metano na produção de carvão vegetal

Para atestar a adicionalidade de um projeto a ser submetido aos trâmites do MDL é necessária a aplicação de metodologias que promovam a quantificação dos GEE tanto no cenário linha de base como no cenário do projeto (CARDOSO *et al.*, 2011). Tais metodologias são disponibilizadas pela Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas e diferenciadas quanto ao porte (pequena ou larga escala) e à natureza ou escopo da atividade do projeto (UNFCCC, 2012).

Para a atividade ser considerada de pequena escala, é necessário atender ao limite de redução de emissões de até 60.000 tCO₂e ao ano; a partir desse montante, o projeto passa a ser considerado como de grande escala (UNFCCC, 2012).

As metodologias são aprovadas pelo Conselho Executivo e criadas de duas maneiras: preparadas por grupos técnicos do próprio Conselho (abordagem *top-down*) ou propostas por terceiros (abordagem *bottom up*). A abordagem *top-down* é utilizada essencialmente para atividades de pequena escala. Novas metodologias para projetos de grande escala são necessariamente submetidas ao Conselho Executivo por terceiros, passando por um processo de aprovação (CGEE, 2008).

Até o ano de 2011, apenas duas metodologias oficiais da UNFCCC estavam disponíveis para redução de GEE na produção de carvão vegetal, incluídas no escopo de “Indústria de transformação”. São elas a AM0041, para projetos de grande escala e a AMSIIK, para projetos de pequena escala.

- AM0041 “Mitigation of Methane Emissions in the Wood Carbonization Activity for Charcoal Production” (UNFCCC, 2006):

Esta metodologia prevê créditos de carbono a produtores que, via melhorias na conversão da madeira em carvão, com consequente ganho em rendimento gravimétrico reduzam a emissão de GEE. Essa metodologia estabelece que as emissões da linha de base devem ser estimadas através da coleta de dados *in loco*, que são utilizados para estudos de regressão, adotando-se como premissa que a emissão de CH₄ (variável dependente) é inversamente proporcional ao Rendimento gravimétrico em carvão (RGC) (variável independente). Dessa maneira, pode-se estimar a redução da emissão de metano obtida com o aumento do rendimento alcançado no projeto em virtude da adoção de novas tecnologias, em relação à linha de base.

- AMSIIK “Avoidance of methane release from charcoal production by shifting from traditional open-ended methods to mechanized charcoaling process” (UNFCCC, 2008):

A referida metodologia é aplicável a projetos que evitem a liberação de CH₄, substituindo os métodos convencionais de produção de carvão por novas unidades de produção equipadas com sistemas de captura e queima do gás gerado no processo.

Para a estimativa das emissões da linha de base, a metodologia AMSIIK propõe o estudo de equações utilizando a relação direta entre a emissão de CH₄ (variável dependente) e a temperatura final de carbonização (variável independente), partindo da premissa que o RGC é inversamente proporcional à temperatura final de carbonização. Essas análises de regressão devem ser realizadas com dados coletados em laboratório e correlacionadas com as temperaturas encontradas nas carbonizações realizadas nas carvoarias, válidas apenas para processos produtivos arcaicos, que no Brasil são conhecidos como Medas ou Caieiras. No caso da utilização de fornos de alvenaria, a metodologia propõe que o fator de emissão (KgCH₄/t madeira) deve ser estimado com base em avaliações *in loco*, feitas a partir da análise da concentração de metano na emissão, transformando-a para massa emitida, assim como na AM0041.

Recentemente, em 2012, foi aprovada a metodologia ACM0021 (UNFCCC, 2012) “Reductions of emissions from charcoal production by improved kiln design and/or

abatement of methane”, que se aplica a projetos que reduzam a emissão de metano através da substituição dos fornos tradicionais por outros de concepção melhorada e/ou instalação de sistema de recuperação e queima do gás gerado. Essa metodologia é destinada a projetos de grande escala e une os preceitos das duas anteriores. Há dessa forma, uma ampliação do potencial de redução das emissões para grandes produtores, na medida em que promove a inclusão da queima de gases, processo que exige a adoção de tecnologia mais acessível a este grupo.

A ACM0021 também utiliza a premissa da relação negativa entre a emissão de CH₄ (variável dependente) e o RGC (variável independente), como subsídio ao cálculo das emissões da linha de base.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, situada no município de Viçosa, Minas Gerais. Foram realizados dois experimentos, sendo um na condição de laboratório – carbonização em mufla, e outro em condição de campo – forno de alvenaria.

4.1 Propriedades da madeira

Tanto para as carbonizações em mufla e em forno de alvenaria utilizou-se madeira de *Eucalyptus* spp., com aproximadamente 8 anos de idade, provenientes de plantios comerciais da *Hyla Madeira*, situada no município de Paula Cândido, MG.

Para o cálculo do teor de umidade da madeira base seca foram selecionadas 12 toras representando as seguintes classes diamétricas: 12-16 cm, 17-20 cm, 21-25 cm, verificadas no volume total de madeira. Dessas toras foram retirados discos nas posições de 25%, 50%, 75% do comprimento total, os quais foram colocados em estufa com circulação forçada de ar a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até atingirem massa constante.

O poder calorífico superior da madeira foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), em duplicatas, utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática IKA300. A densidade básica da madeira foi determinada pelo método de imersão em água, de acordo com a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003) e Vital (1984).

4.2 Ensaio de laboratório: forno mufla

Foram realizadas pirólises de *Eucalyptus* spp a 0% de umidade em forno elétrico tipo mufla, analisando-se o conteúdo do gás liberado durante todo o processo até as temperaturas de 400°C , 550°C e 700°C . Para as três temperaturas finais foram aplicadas três repetições, totalizando nove carbonizações.

Cada carbonização foi feita utilizando aproximadamente 250g de madeira na forma de cavacos e taxa média de $1,67^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ de aquecimento, representando os incrementos de 50°C a cada 30 minutos. A temperatura inicial foi 100°C , e o tempo total de cada carbonização

variou de acordo com a temperatura final utilizada, sendo de 3,5 horas para a temperatura de 400°C, 5 horas para a temperatura de 550°C e 6,5 horas para 700°C. Nestas temperaturas houve um período de estabilização de 30 minutos antes da finalização do processo.

Na saída da mufla foi conectado um sistema de recuperação dos gases condensáveis, utilizando um condensador tubular resfriado à água acoplado a um recipiente de coleta (quitasato), conforme representado na Figura 1.

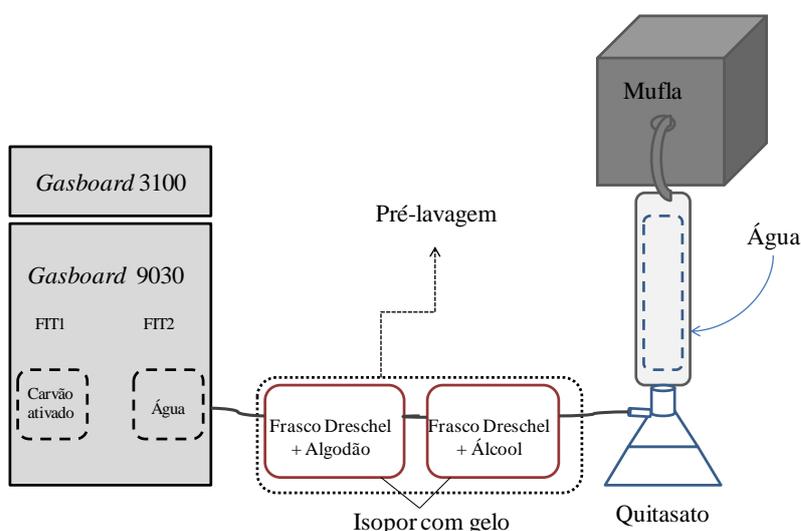


Figura 1. Caracterização do sistema de tratamento e análise dos gases não condensáveis.

Os gases não condensáveis foram succionados por uma bomba através de uma mangueira acoplada na saída do quitasato, sendo conduzidos até o sistema de condicionamento de gases *gasboard 9030 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co., LTDA*. Previamente à chegada ao equipamento, os gases passaram por um processo de pré-lavagem, que consistiu em um frasco lavador do tipo Dreschel com álcool e num segundo com algodão, conforme Figura 1, ambos envolvidos com gelo armazenado em isopor. Esse sistema foi desenvolvido a fim de evitar que possíveis gotículas de alcatrão que porventura não tivessem condensado no quitasato, viessem a fazê-lo na tubulação do *gasboard*, saturando o aparelho.

Após a pré-lavagem, os gases não condensáveis seguiram para o *gasboard 9030*, no qual passaram por uma lavagem em água, resfriamento a 4°C num desumidificador (*chiller*), e posteriormente por um cilindro contendo carvão ativado e algodão. Em seguida, procedeu-se à última limpeza dos gases, sendo esta mais refinada, por meio de filtros de precisão,

denominados FIT1 e FIT2, os quais retêm impurezas menores que 3um e 1um, respectivamente.

Depois do tratamento, uma amostra dos gases não condensáveis foi admitida a cada 50°C, correspondendo a intervalos de 30 minutos, com vazão de 1L/min até o sistema online de análise de gás *gasboard 3100 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co., LTDA*. Este forneceu leituras da composição percentual base volume de CH₄, CO₂, CO, H₂, O₂ e hidrocarbonetos de cadeia pequena (C_nH_n), correspondendo a um total de 7, 10 e 13 registros para as temperaturas de 400, 550 e 700°C, respectivamente.

A média dos dados de concentração obtidos para as três repetições até a temperatura final de 700°C foi utilizada para a confecção de curvas percentuais de liberação de cada componente gasoso mediante a evolução da temperatura, caracterizando todo o processo de carbonização em termos de emissão.

Após as carbonizações, foram determinadas a massa de carvão, gases condensáveis e gases não condensáveis, sendo este último obtido por diferença com base na massa seca da madeira.

Com base nos dados obtidos de concentração de cada gás, que corresponde à média aritmética das leituras pontuais, e o de massa dos gases não condensáveis, foi possível mensurar a massa total (g) de cada componente do gás não condensável emitida nas três temperaturas finais, utilizando o balanço de massa descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Balanço de massa dos gases não condensáveis.

Fonte: Taccini (2010) adaptado da metodologia AMSIIIK

Massa Específica dos GNC (kg gás/m³ gás)
$\rho_{\text{gas}} = [(44/0,224) * X_{\text{CO}_2}(1)] + [(28/0,224) * X_{\text{CO}}(1)] + [(2/0,224) * X_{\text{H}_2}(1)] + [(16/0,224) * X_{\text{CH}_4}(1)]$
Massa de Cada GNC (g)
$P_{\text{CO}_2} = [(44/0,224) * X_{\text{CO}_2} / \rho_{\text{gas}}] * M_{\text{GNC}}(2)$
$P_{\text{CO}} = [28/0,224 * X_{\text{CO}} / \rho_{\text{gas}}] * M_{\text{GNC}}(2)$
$P_{\text{H}_2} = [(2/0,224) * X_{\text{H}_2} / \rho_{\text{gas}}] * M_{\text{GNC}}(2)$
$P_{\text{CH}_4} = [(16/0,224) * X_{\text{CH}_4} / \rho_{\text{gas}}] * M_{\text{GNC}}(2)$
(1) X _{CO₂} ; X _{CO} ; X _{H₂} ; X _{CH₄} - % de cada gás
(2) M _{GNC} - Massa dos gases não condensáveis

O valor obtido para cada gás foi posteriormente transformado em fator de emissão (Kg gás/t madeira) com base na massa de madeira seca utilizada em cada carbonização.

4.2.2 Propriedades do carvão vegetal

A densidade relativa aparente do carvão foi determinada pelo método hidrostático, por meio da imersão em mercúrio, conforme descrito por Vital (1984). Foram realizadas nove determinações de densidade por tratamento e a densidade aparente média foi obtida pela média aritmética.

O poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal foi determinado por meio da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984).

A determinação dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) seguiu os procedimentos preconizados na norma NBR 8112 (ABNT, 1986), substituindo-se o cadinho de platina por cadinho de porcelana e a temperatura para determinação do teor de cinzas de 750°C para 600°C.

4.2.3 Análise estatística

Os dados do delineamento inteiramente casualizado com três tratamentos e três repetições foi submetido à análise de variância (ANOVA) a 10% de significância pelo teste F, visando identificar possível influência da temperatura final de carbonização nas variáveis Rendimento Gravimétrico em Carvão (RGCV), Rendimento Gravimétrico em Gases Condensáveis (RGGC), Rendimento Gravimétrico em Gases Não-Condensáveis (RGNC), e no fator de emissão em massa de CH₄, CO₂, CO, H₂ e O₂. As propriedades do carvão vegetal produzido sob as três temperaturas também foram objetos de análise estatística ($\alpha=0,1$).

Quando estabelecidas diferenças significativas, aplicou-se o teste Tukey em nível de 90% de probabilidade.

Para determinar as correlações existentes entre as variáveis: Temperatura final de carbonização em mufla e Rendimento Gravimétrico em Carvão (RGC); e o fator de emissão do metano (kgCH₄/t mad), foi empregado o coeficiente de correlação de Pearson, considerando-se o nível 95% de probabilidade. Tendo sido significativas, foram feitas análises de regressões lineares, avaliando os modelos considerando o coeficiente de determinação (R^2), a significância da regressão pelo teste F.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa STATISTICA 8.0.

4.3 Ensaio de campo: forno de alvenaria

As carbonizações em forno de alvenaria foram realizadas de tal forma a simular um projeto de MDL de pequena escala, estimando a redução de emissão dos gases de efeito estufa, em especial a do gás metano, com utilização de fornalha para combustão dos gases gerados.

Com base na metodologia AMSIIIK (UNFCCC, 2008), considerou-se como cenário linha de base, a carbonização conduzida sem promover a queima dos gases na fornalha, ou seja, liberando-os na atmosfera pela chaminé, tal como é feito nos métodos tradicionais frequentemente utilizados.

Já no cenário alvo, considerou-se a carbonização em que se promoveu a combustão dos gases no interior da fornalha.

4.3.1 Caracterização do sistema forno-fornalha

O forno utilizado, com capacidade aproximada de 10 estéreos de madeira, é um protótipo de forno retangular da ArcelorMittal Bioenergia. Possui quatro aberturas, de cada lado do forno, na base do mesmo, sendo uma de maior dimensão destinada à ignição do processo e as demais para controle da carbonização.

A fornalha utilizada para a queima dos gases tem dimensões externas de 1 x 1 m, e possui uma abertura lateral junto à base (0,12 x 0,12 m), para admissão de ar e outra frontal de 0,30 x 0,30 m para adição de resíduos. A câmara de combustão da fornalha e a chaminé compõem um único conjunto cilíndrico, formado por módulos de aço conectados por flanges, com um diâmetro interno de 60 cm e uma altura total de 460 cm.

A conexão entre o forno e a fornalha foi feita por um duto metálico com 0,30 m de diâmetro interno. O controle da vazão dos gases se deu por válvulas do tipo “borboleta” e “guilhotina”, chapas metálicas instaladas no interior do duto, com movimento horizontal de 360° e vertical, respectivamente.

As características mencionadas podem ser observadas na Figura 5.

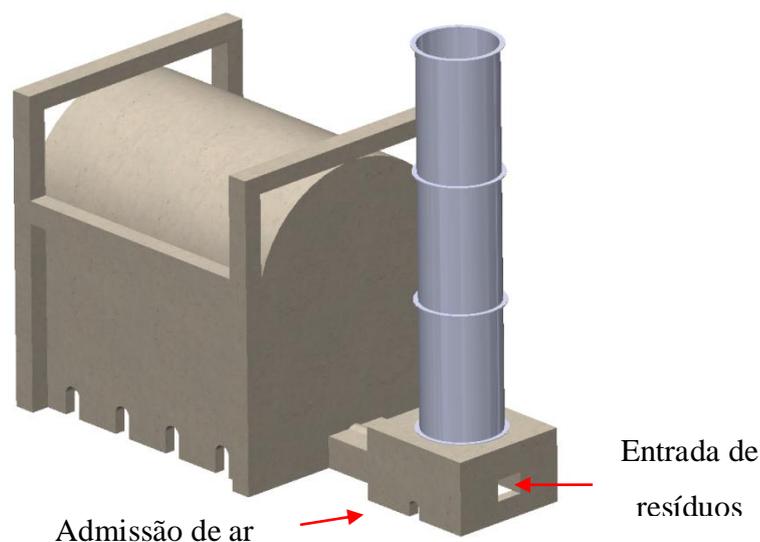


Figura 5. Vista em perspectiva do sistema forno-fornalha.

O conjunto câmara de combustão e chaminé foi revestido internamente com manta cerâmica aderida por argamassa refratária, a fim de reduzir a perda de calor no interior da fornalha durante a queima dos gases, bem como retardar a depreciação dos materiais utilizados.

A manta de fibra cerâmica utilizada foi a Kaowool Spun 1400 da Morgan Thermal Ceramics constituída de Al_2O_3 (35%), SiO_2 (50%), Zirconia (15%), Fe_2O_3 , CaO, MgO (0,05%). As propriedades da manta são: limite máximo de uso a 1426°C , limite contínuo de uso a 1315°C , ponto de fusão a 1760°C , e contração linear de 4,0% a temperatura limite.

4.3.2 Carbonização da madeira

O forno foi carregado de forma manual, com a madeira na posição vertical até a altura aproximada de 2,0 m e o restante foi completado com tocos de madeira na horizontal. Em seguida, procede-se à ignição do forno, utilizando uma abertura superior localizada na porta e as aberturas laterais.

O controle da carbonização foi feito com base no monitoramento de temperatura, no controle das entradas de ar, e na passagem dos gases pelo duto de conexão forno-fornalha, através da “borboleta”, que restringe a vazão dos gases de acordo com o ângulo de abertura.

Para o monitoramento da temperatura foi utilizado um sistema de termopares do tipo k instalados no forno da seguinte forma: dois na copa, um mais próximo à porta e o outro à

chaminé, um na lateral superior esquerda e outro na lateral inferior direita; além de um ponto situado na região frontal acima da porta, onde foi instalado um cilindro metálico para medição com sensor infravermelho de temperatura (modelo TD 980, ICEL).

Tomando como referência principalmente as temperaturas da copa, conduziram-se as carbonizações de acordo com as faixas teóricas de degradação térmica (Tabela 2) propostas por Oliveira (2012), elevando a temperatura em intervalos de tempo pré-estabelecidos através da abertura dos controladores de ar, objetivando a temperatura final de 450°C.

Tabela 2. Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização no sistema forno-fornalha, mensuradas na cúpula do forno.

Fonte: Oliveira (2012)

Fase	Faixa de temperatura	Tempo de manutenção	Fenômeno
I	100-150°C	15-16 horas	Liberação de vapor d'água- secagem da madeira, fase endotérmica
II	150-274°C	11-12 horas	Degradação das hemiceluloses, fase endotérmica.
III	275-400°C	23-24 horas	Degradação da celulose, grande produção de gases, fase exotérmica. Formação do carvão vegetal
IV	400-450°C	17-18 horas	Redução da produção de gases, fase exotérmica. Fixação do carbono no carvão

Simultaneamente à ignição do forno, a fornalha foi acesa utilizando como combustível resíduos lignocelulósicos. Pretendeu-se, dessa forma, criar um gradiente de temperatura, facilitando a retirada dos gases do interior do forno pela chaminé, inclusive na carbonização sem queima. Na carbonização com queima de gases, a fornalha necessitou de abastecimentos posteriores até o momento em que a temperatura dos gases se aproximou de 120°C, a partir do qual o poder calorífico e a vazão do combustível gasoso foram suficientes para sustentar a combustão.

Ao final do processo de carbonização, quando o volume de gases e a temperatura interna do forno se reduziram, procedeu-se ao seu fechamento, para início da etapa de resfriamento. A vedação total do forno foi realizada, fechando-se os controladores de ar e descendo a guilhotina até ao nível do solo, evitando a entrada de oxigênio para o interior do forno. O processo de resfriamento se deu de forma natural, com acompanhamento das temperaturas através dos termopares. Considerou-se a temperatura de 60°C adequada para abertura da porta.

O descarregamento foi realizado com o auxílio de um garfo metálico apropriado, o qual consegue separar o carvão propriamente dito da porção com granulometria inferior a 12,7mm, classificada como finos. O carvão foi colocado em sacos de ráfia de 50 litros e pesado separadamente à porção de finos e a de atíços (madeira parcialmente carbonizada). Dessa forma pôde-se determinar o rendimento gravimétrico em carvão (RGCV), o rendimento gravimétrico em atíços (RGT) e o rendimento gravimétrico em finos (RGF) em relação à massa de madeira seca.

4.3.3 Amostragem e propriedades do carvão vegetal

Os procedimentos para a determinação da densidade a granel do carvão vegetal, conforme a norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981) foram realizados simultaneamente à pesagem do mesmo durante o descarregamento: utilizando-se uma caixa de madeira com massa e volume interno conhecido (0,216m³), pesou-se a massa correspondente à máxima ocupação do recipiente com o carvão, descontando o peso da caixa, a fim de se obter a razão entre esse valor e o volume da caixa.

Para composição dos demais ensaios, físicos e químicos, seguiu-se a preparação da amostra geral, baseada na norma ABNT NBR 6923 (ABNT, 1981), com homogeneização e quarteamo de uma porção de carvão vegetal representativa do forno e retirada de uma alíquota de 20 litros.

A densidade relativa aparente foi determinada conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 9195 (ABNT, 1985).

Para determinação do poder calorífico superior e composição química imediata, as amostras de carvão vegetal foram preparadas conforme a norma NBR 6923 (ABNT, 1981). O poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal foi determinado por meio da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984). A determinação dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) seguiu os procedimentos preconizados na norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

Realizou-se o teste de tamboramento do carvão vegetal, para classificá-lo em termos da sua friabilidade, qual seja a capacidade de geração de finos sob a ação combinada de abrasão e queda. Para tanto, uma amostra de 500 gramas de carvão classificado entre 60 mm e 20 mm foi introduzida num tambor rotatório de aço, de 30 cm de diâmetro, e submetida a 500 rotações a 30 rpm. Após o teste, obteve-se a porcentagem com granulometria inferior a 20

mm, que foi comparada à escala de classificação sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), para carvão vegetal, citado por Oliveira *et al.* (1982).

4.3.4 Aplicação do modelo de regressão

A equação de regressão obtida a partir dos dados coletados nas carbonizações em mufla foi aplicada para estimar as emissões no cenário linha de base da carbonização em forno de alvenaria, utilizando a temperatura final de carbonização como variável independente. Tal parâmetro foi monitorado pelos termopares instalados, com registros a intervalos de 30 minutos, permitindo a confecção de um perfil térmico para o forno.

4.3.5 Coleta e caracterização dos gases

4.3.5.1 Instrumentação do forno

Foram considerados dois pontos de aquisição dos dados de concentração, temperatura e pressão dos gases, sendo um na saída do forno, mais precisamente no duto de conexão do mesmo com a fornalha, e outro na chaminé, ilustrado na Figura 6, que exhibe o modelo tridimensional computacional do forno, com destaque para as regiões amostradas. A Figura 7 mostra detalhadamente a instrumentação utilizada, para medição de temperatura, pressão e vazão.

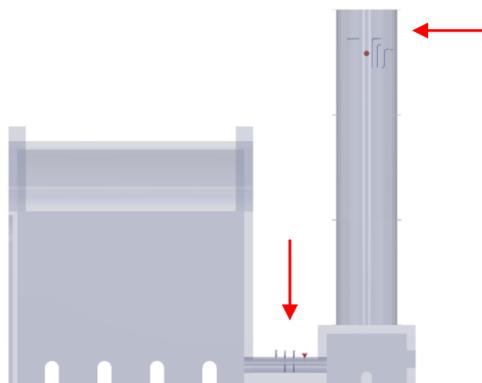


Figura 6. Modelo do forno.

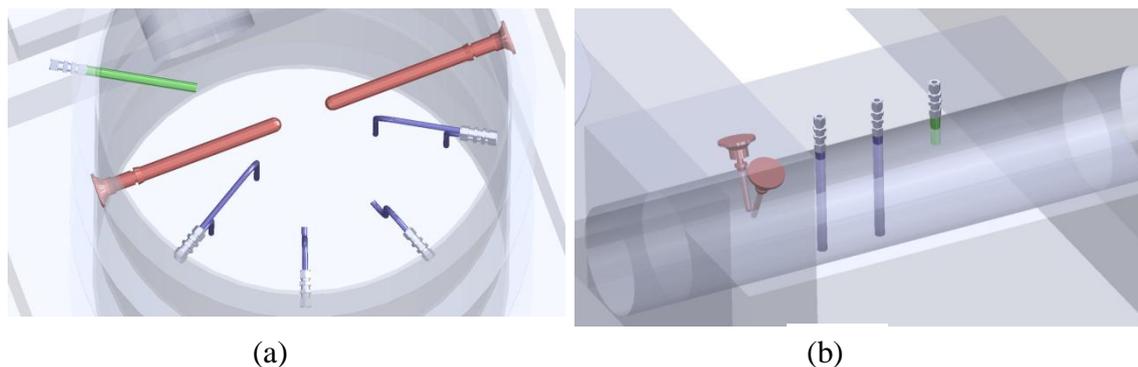


Figura 7. Pontos de instrumentação na saída da chaminé (a) e na saída do forno (b).

A temperatura dos gases foi medida através da instalação de termoresistores PT1000 e de termopares tipo J e K com comprimento de 90mm nas duas saídas analisadas, e a pressão dinâmica por meio de um sistema de pitot, através da qual se pode estimar a velocidade de escoamento do fluido, e obter um valor de vazão, utilizando a área da secção da tubulação de escape.

A análise de emissões foi realizada por fração volumétrica dos gases, medida utilizando tecnologia NDIR (Non-Dispersive Infrared) para CO, CO₂ e CH₄ e tecnologias TCD (Thermal Conductivity Detector) e ECD (Electron Capture Detector) para concentrações de H₂ e O₂ (Tabela 3).

Tabela 3. Especificações de medição para cada gás.

Gás	Método	Faixa	Resolução	Incerteza
CO ₂	Micro-flow NDIR	0-25%	0,01%	≤ 2%
CO	Micro-flow NDIR	0-75%	0,01%	≤ 2%
CH ₄	Micro-flow NDIR	0-25%	0,01%	≤ 2%
H ₂	TCD	0-40%	0,01%	≤ 3%
O ₂	ECD	0-25%	0,01%	≤ 3%

Para referência dos dados coletados, fez-se necessária a coleta das condições ambientais de pressão, temperatura e umidade. Para temperatura utilizou-se o CI LM35, que tem incerteza de 0,5°C e faixa de -55 a 150°C. A pressão absoluta foi obtida através de um transdutor piezo-resistivo, com faixa de medição de 0-200 kPa e um erro máximo de 2,5% e a umidade relativa pelo sensor capacitivo HIH4004, com erro máximo de 2%.

A medição foi realizada de forma contínua, gerando uma amostragem de alta frequência para o conteúdo gasoso, temperatura e vazão, de forma a caracterizar inteiramente o processo.

A aquisição dos dados contou com um sistema desenvolvido pela National Instruments, o CompactDAQ, responsável pela coleta dos sinais de todos os sensores necessários para as medições e armazenamento dos dados num microcomputador.

4.3.5.2 Método de cálculo

A sequência para obtenção da vazão mássica de cada gás de interesse pode ser observado na Figura 8. Os dados de temperatura, pressão e porcentagens volumétricas foram coletados. Os demais foram obtidos indiretamente através de uma rotina de cálculo iterativa, baseada em cada vetor experimental adquirido.

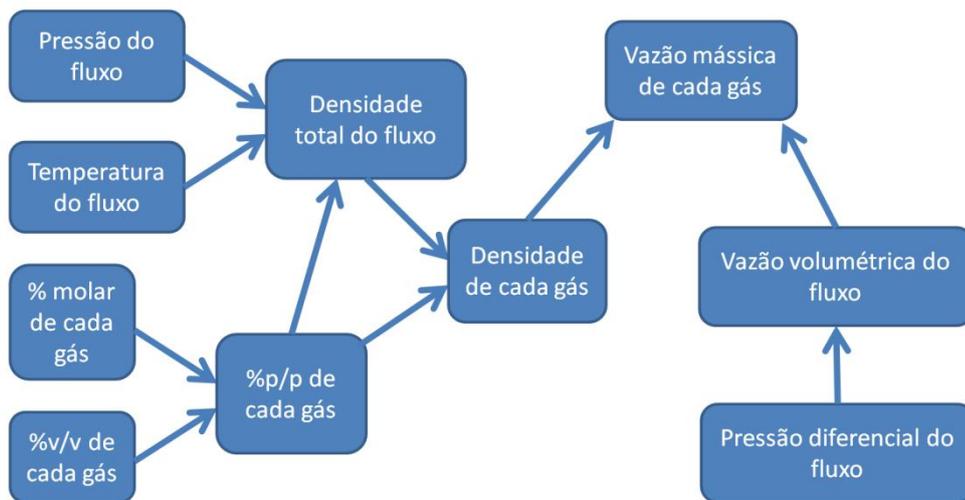


Figura 8. Fluxograma da rotina de cálculo dos parâmetros de interesse.

Por meio da pressão diferencial do fluxo, foi possível encontrar a velocidade de escoamento do mesmo. Tendo-se as características dimensionais da tubulação, determinou-se a vazão volumétrica do gás. A partir da porcentagem em massa molar de cada gás medido, em conjunto com o percentual em volume dos mesmos, calculou-se a porcentagem em massa de cada gás presente no fluxo. Ao se combinar esses dados com as condições de temperatura e pressão, obtiveram-se as densidades total e parciais do fluxo, que juntamente com as vazões volumétricas, resultaram nas vazões mássicas dos gases.

4.3.6 Simulação de projeto de MDL

4.3.6.1 Redução das emissões

A estimativa da redução das emissões decorrente da implementação do projeto, foi calculada pela diferença entre as emissões da linha de base e as emissões do projeto.

$$\mathbf{RE = EB - (EP + Fuga)}$$

Onde:

RE = Redução das emissões em um ano (tCO₂e)

EB = Emissões da linha de base durante um ano (tCO₂e)

EP = Emissões diretas das atividades do projeto durante um ano (tCO₂e)

Fuga = Emissões por substituição de tecnologia ultrapassada

/

Emissões de linha de Base (EB)

$$\mathbf{EB = Q_{mp} * (M_b - M_d) * GWP_{CH_4}}$$

Onde:

EB_y = Emissões da linha de base em um ano (tCO₂e)

Q_{mp, y} = Quantidade de matéria-prima em base seca (t) utilizada nas novas instalações durante um ano;

M_{b,y} = Fator de emissão do metano para fabricação de carvão no método convencional considerado (t de CH₄ /t matéria prima)

M_{d,y} = Fator para explicar os requisitos legais que regem a emissão de metano nos métodos tradicionais de produção de carvão considerado (t de CH₄ /t matéria prima)

GWP_{CH₄} = Potencial de Aquecimento Global do CH₄ (25)

Emissões das atividades do Projeto (EP)

$$EP_y = EP_{\text{transp1}} + EP_{\text{transp2}} + EP_{\text{poder}} + EP_{\text{fugitivo}} + EP_{\text{apoio}}$$

Onde:

EP_y = Emissões diretas das atividades do projeto em um ano (tCO₂e)

EP_{transp1} = Emissões de transporte nos pontos de coleta de matéria-prima em um ano (tCO₂e)

EP_{transp2} = Emissões de transporte nos pontos de consumo em um ano (tCO₂e)

EP_{poder} = Emissões de eletricidade ou de consumo de diesel em um ano (tCO₂e)

EP_{fugitivo} = As emissões fugitivas de captura e queima ineficiente no projeto de fabricação do carvão durante um ano (tCO₂e)

EP_{apoio} = As emissões de combustíveis fósseis, para manter a incineração dos gás de carbonização, durante um ano (tCO₂e)

4.3.6.2 Créditos de carbono

Com base no resultado da redução das emissões alcançada durante o período de um ano, em toneladas de CO₂e, tornou-se possível estimar a receita adquirida com a comercialização dos CER's, de acordo com a cotação da tonelada de CO₂e. Além disso, esse valor embasou a estimativa do potencial de redução da emissão de gases do efeito estufa em Minas Gerais na produção de carvão vegetal ligada ao fornecimento desse insumo para a produção independente de ferro-gusa, segmento este com maior associação aos impactos ambientais e sociais relacionados ao setor. Para isso, utilizou-se o dado fornecido pela AMS, de consumo de carvão vegetal pelos produtores independentes de ferro-gusa em 2011, em metros de carvão, o qual foi transformado para a massa de carvão consumida, em toneladas, utilizando um valor médio de densidade a granel. Posteriormente, foi estimada a massa de madeira utilizada nessa produção de carvão, com base num dado de rendimento gravimétrico médio. Assim, com o fator de redução de emissão obtido neste estudo (KgCO₂e/t madeira) foi possível estimar a redução dos gases de efeito estufa em um ano em Minas Gerais com a adoção da tecnologia de queima dos gases da carbonização.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da madeira

A densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp.* utilizada tanto nos ensaios laboratoriais quanto nas carbonizações em forno de alvenaria foi de 0,49g/cm³. Tal valor é inferior ao considerado por Brito (1983) como ideal para a produção de carvão vegetal, em torno dos 0,54g/cm³, classificado como densidade média. O poder calorífico superior foi de 4.444 Kcal/kg, valor compreendido entre as faixas encontradas na literatura para clones de eucalipto.

5.2 Ensaio de laboratório: carbonizações em mufla

5.2.1 Rendimento dos produtos da pirólise

Os resultados em porcentagem para os rendimentos gravimétricos em carvão, gases condensáveis e gases não condensáveis estão apresentados na Tabela 4, e ilustrados na Figura 9.

Tabela 4. Rendimento gravimétrico em base seca dos produtos da carbonização de diferentes temperaturas finais.

Temperatura Final (°C)	RGCV (%)	RGGC (%)	RGNC (%)
400	36,18 a	47,33 b	14,52 b
550	30,05 b	49,47 ab	20,47 a
700	27,72 c	51,10 a	21,17 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, a 90% de probabilidade pelo teste Tukey.

Onde: RGCV: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal, RGGC: Rendimento gravimétrico em gases condensáveis e RGNC: Rendimento gravimétrico em gases não condensáveis.

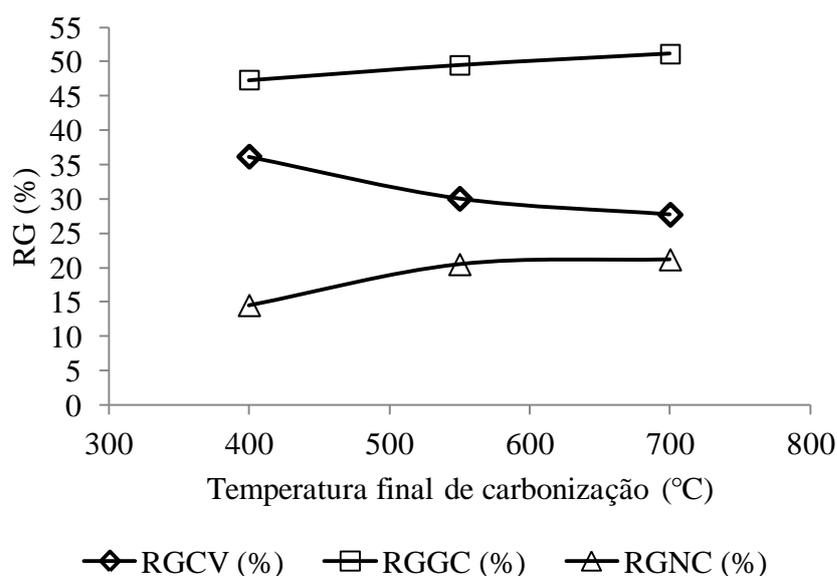


Figura 9. Rendimentos gravimétricos dos produtos da carbonização da madeira.

Onde: RGCV: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal, RGGC: Rendimento gravimétrico em gases condensáveis; RGNC: Rendimento gravimétrico em gases não condensáveis.

Observa-se que houve uma redução significativa no rendimento em carvão vegetal com a elevação da temperatura, enquanto que no que concerne ao rendimento em gases, embora tenha se notado aumento, este não se mostrou tão expressivo. O aumento do rendimento em gases condensáveis foi pouco expressivo de acordo com a temperatura final, diferenciando-se apenas entre a menor e a maior temperatura estudadas, e a do rendimento em gases não condensáveis foi significativa entre 400 e 550°C, estabilizando a partir desta última temperatura até os 700°C.

Vale salientar que a tendência observada de decréscimo de rendimento em carvão e aumento dos rendimentos em gases condensáveis e não condensáveis já é um resultado consolidado, há muito estudada por diversos autores, como Almeida (1983).

Pinheiro e Sèye (1998) apresentaram rendimentos em carvão variando de aproximadamente 32% a 350°C até 23% aos 600°C em pirólise de *Eucalyptus camaldulensis*.

Já em relação ao rendimento em líquido condensado, este e outros autores, como Becidan *et al.* (2007) descreveram uma relação quadrática com ponto de máximo nas temperaturas entre 400°C e 600°C para resíduos diversos, justificada pela forte reação de craqueamento a altas temperaturas. Tais resultados contrariam os obtidos neste estudo, que demonstra elevação do rendimento em gases condensáveis com o aumento da temperatura.

Essa tendência foi similar ao encontrado por Taccini (2011), que observou uma estabilização do rendimento em gases condensáveis a partir dos 600°C.

No que se refere ao rendimento em gases não condensáveis, há um consenso entre os autores supracitados sobre a elevação progressiva à custa da redução do rendimento em carvão e gases condensáveis. Relatou-se o aumento de 12,6% a 39% para 400 e 700°C, respectivamente, no estudo de González *et al.* (2003), Valente *et al.* (1985) e Oliveira (1982), que verificaram um efeito de ganho de rendimento em gases não condensáveis mais pronunciado em temperaturas mais baixas, caracterizando uma tendência de estabilização.

5.2.2 Propriedades do carvão vegetal

Os valores médios das propriedades do carvão vegetal produzido nas diferentes temperaturas estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores médios das propriedades do carvão de *Eucalyptus* spp. em função da temperatura de carbonização.

Temperatura Final (°C)	Densidade				
	Aparente (g/cm ³)	PCS (Kcal/Kg)	Materiais Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
400	0,29 a	6615 c	32,08 a	0,22 b	67,66 c
550	0,27 b	7383 b	17,27 b	0,25 b	84,27 b
700	0,30 a	8158 a	10,34 c	1,08 a	88,57 a

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si, a 90% de probabilidade pelo teste Tukey.

Os valores de densidade estão de acordo com a tendência relatada por Trugilho e Silva (2001), de que o comportamento dessa variável em relação ao aumento da temperatura segue uma parábola passando por um ponto de mínimo. Em seu estudo ele conseguiu definir tais valores mínimos de densidade separadamente para cerne e alburno de madeira de jatobá, bem como as temperaturas correspondentes. Oliveira e Almeida (1980) encontraram resultados semelhantes para *Eucalyptus grandis*. Esse fenômeno é atribuído ao fato de que entre 300°C e 500°C a perda de massa em forma de voláteis é bem maior do que a redução nas dimensões do carvão, ocasionando um decréscimo na densidade; em contraposição a partir dos 600°C a contração é maior do que a perda de massa, o que acarreta aumento na densidade aparente.

Neste estudo, a densidade aparente foi menor na temperatura de 550°C (0,268g/cm³) do que nas temperaturas de 400°C e de 700°C, com 0,295 e 0,301g/cm³ respectivamente, não

se podendo afirmar, contudo, que este corresponde ao ponto de mínimo, pois foram testados poucos valores de temperatura.

Os valores decrescentes de materiais voláteis concomitantemente ao aumento em carbono fixo em função da elevação na temperatura é uma tendência relatada por diversos autores, como Silva e Brito (1989) e Valente *et al.* (1985). À medida que ocorre a liberação dos materiais voláteis com o aumento da temperatura concentra-se carbono no produto sólido, havendo aumento no teor de carbono fixo. Dessa forma, há também um incremento do poder calorífico superior, já que o carbono é um elemento mais energético do que os demais, que são volatilizados em altas temperaturas (exceto o hidrogênio). Esses resultados também foram obtidos por Trugilho e Silva (2001).

5.2.3 Quantificação e qualificação dos gases não condensáveis

Além de possibilitarem a determinação da composição em massa de cada gás presente no conteúdo do GNC, por meio da sua média e posterior transformação para massa, as leituras pontuais no *gasboard* permitiram a construção de curvas percentuais de liberação de cada gás ao longo da evolução da temperatura, caracterizando todo o processo de pirólise em termos de emissão (Figura 10).

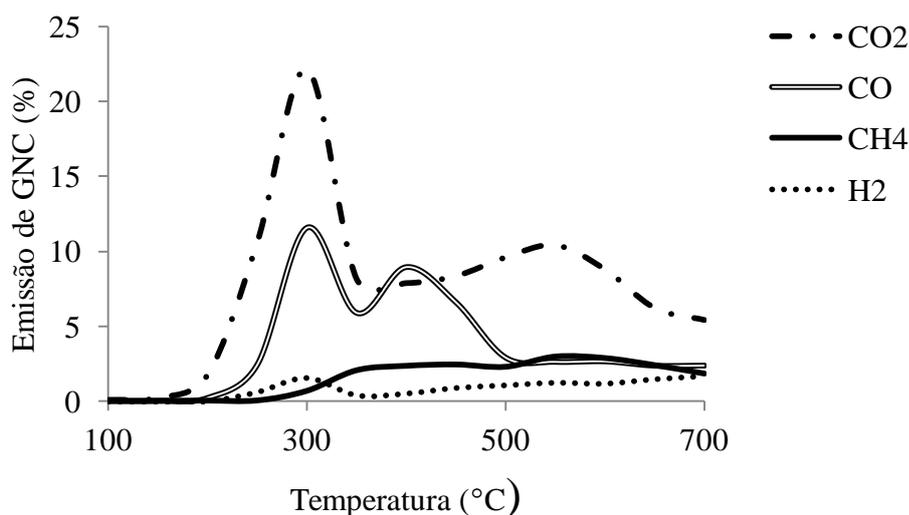


Figura 10. Composição percentual dos gases não condensáveis da carbonização.

Observa-se que a liberação de CO₂ e CO, notadamente os principais produtos gasosos da carbonização, se tornou significativa a partir dos 200°C, atingindo picos próximos a 22% e 12% respectivamente aos 300°C. A concentração de CO atingiu um novo pico aos 400°C, de

menor magnitude, ultrapassando, contudo, a concentração de CO₂ nessa temperatura e estabilizou-se a partir de 500°C a patamares inferiores.

Nota-se, na Figura 10, que os gases H₂ e CH₄ têm uma menor contribuição percentual na composição dos gases não condensáveis da carbonização. O H₂ começa a ter uma liberação mais significativa próximo dos 500°C, com alcance de 1,7% aos 700°C, apresentando, porém, um pico de concentração isolado em temperatura inferior, com valor de 1,5% aos 300°C. Já o CH₄ mostrou uma evolução contínua a partir dos 300°C, chegando aos 3% na temperatura de 550°C, estabilizando em valor próximo a essa concentração.

Di Blasi *et al.* (1999), Klose *et al.* (2000) e González *et al.* (2003), registraram comportamento similar de liberação dos mesmos gases para diferentes tipos de biomassas.

González *et al.* (2003) descreveram detalhadamente a formação dos produtos da pirólise, destacando duas zonas bem distintas, também observadas neste estudo: uma de óxidos de carbono e metano a temperaturas mais baixas (275-425°C), e outra com liberação de metano, hidrogênio e menores concentrações de óxidos de carbono a temperaturas mais elevadas (450°C).

No mesmo estudo, os autores observaram também a ocorrência de dois pontos de máximo na curva de H₂, um a 350°C e outro a 750°C; dois picos em temperaturas coincidentes nas curvas de CO e CH₄, por volta dos 330-360°C e depois entre 510-550°C, e, na do CO₂, um bem diferenciado a 330°C e outro menor entre 510-520°C. Essa sucessão de dois picos é atribuída à decomposição térmica da hemicelulose (primeiro pico) e celulose (segundo pico), embora uma menor fração dos gases gerados corresponda à decomposição térmica da lignina que se inicia a 200°C e se prolonga até 500-600°C.

Becidan *et al.* (2007) descreveram o mesmo comportamento e atribuem a maior participação de CO₂ e CO na composição dos gases não condensáveis da carbonização e sua tendência de decréscimo ou estabilização a altas temperaturas, ao fato de serem os principais produtos da degradação da celulose e das hemiceluloses, principais componentes da biomassa que se decompõem quase totalmente em temperaturas inferiores a 400°C.

Já o comportamento de crescimento progressivo da concentração de H₂ e CH₄ entre 400°C e 700°C, se deve ao fato de resultarem de reações secundárias, ou seja, ocorridas entre os produtos voláteis da pirólise e catalisadas pelo leito do carvão vegetal em formação, ou ainda da degradação da lignina, componente de maior estabilidade térmica, que se decompõe a pequenas taxas sob ampla faixa de temperatura. O H₂ é formado pelo craqueamento do alcatrão e o CH₄ inicialmente pela quebra dos grupos metoxílicos da lignina e depois pela

ruptura dos seus anéis aromáticos (YANG *et al.*, 2007). A partir dos 700°C o CH₄ também resulta de reações secundárias, notadamente as reações exotérmicas de metanopiranólise entre os componentes gasosos da carbonização (TIHAY e GILLARD, 2003).

Os resultados de emissão em massa (Kg/ tonelada de madeira seca) dos gases estudados para as três temperaturas finais, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Composição em massa dos gases não condensáveis da carbonização para três temperaturas finais.

Temperatura Final (°C)	Fator de Emissão (Kg/t madeira seca)			
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄
400	97,14 b	43,20 b	0,36 c	4,50 c
550	137,09 ab	56,65 a	0,69 b	10,30 b
700	139,25 a	57,87 a	0,91 a	13,70 a

Valores seguidos de mesma letra não diferem entre si, a 90% de probabilidade pelo teste Tukey.

Observa-se que a emissão de CO₂ apresentou elevação em relação ao aumento da temperatura final, no entanto se diferenciou significativamente apenas entre a maior e a menor temperatura. A liberação de CO aumentou de forma significativa de 400°C para 550°, demonstrando uma tendência de estabilização a partir desta temperatura. Os gases H₂ e CH₄ em contrapartida apresentaram características semelhantes em termos de emissão, aumentando significativamente de acordo com a elevação da temperatura final de carbonização.

O comportamento geral de aumento da emissão de praticamente todos os gases em função do aumento da temperatura é relatado por Tihay e Gillard (2003). Isso se justifica quando se analisa separadamente as reações envolvidas na produção de cada gás, as quais são favorecidas pela temperatura. O H₂ é produzido por craqueamento de produtos voláteis, o CH₄ é produzido por craqueamento e reações de despolimerização, e os gases CO e CO₂ por descarboxilação e reações de despolimerização ou reações de oxidação secundárias de carbono (GONZÁLEZ *et al.*, 2003).

Taccini (2011) obteve valores médios de 102,68; 90,99; 0,09 e 7,84 Kg/tonelada para CO₂, CO, H₂ e CH₄, respectivamente, para temperatura final de carbonização de 500°C.

Os valores de emissão de metano (Kg/tonelada de madeira) foram correlacionados com a temperatura final de carbonização, demonstrando uma relação direta significativa,

possibilitando estudo de regressão com esta variável, de acordo com o que preconiza a metodologia AMSIIK (UNFCCC, 2008) para estimação de linhas de base (Figura 11).

A análise de variância da regressão indicou que ela foi significativa a 5% pelo teste F (P-valor = $8,55 \times 10^{-5}$).

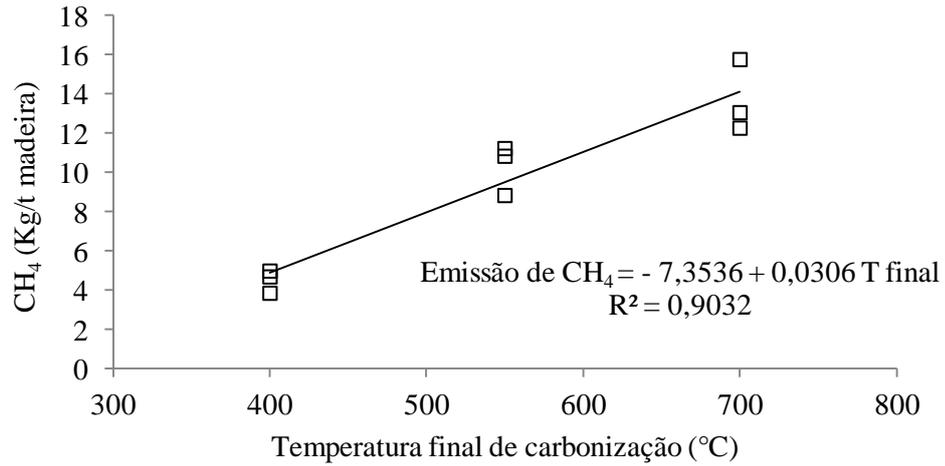


Figura 11. Ajuste de reta entre emissão de CH₄ (Kg/t madeira) e temperatura final de carbonização.

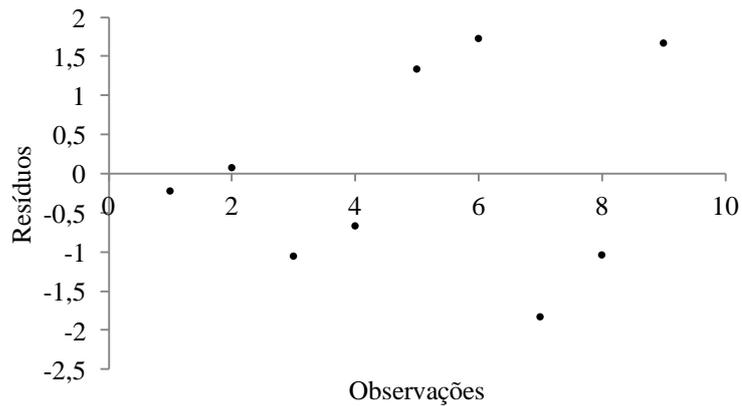


Figura 12. Distribuição dos resíduos entre valores observados e estimados pela equação da reta de regressão.

Observa-se a partir dos resultados obtidos do ajuste, tais como a distribuição dos resíduos e o alto coeficiente de determinação, que as variáveis estão intimamente relacionadas.

Portanto a equação obtida com o ajuste de reta da regressão (Figura 11) pode ser utilizada quando se deseja conhecer a liberação de metano de um projeto que substituirá fornos arcaicos, nos quais é impossível fazer coleta e análise das emissões, por fornos com fornalha para a queima dos gases. Neste caso, necessita-se conhecer apenas a temperatura final de carbonização, que é em geral a temperatura máxima alcançada, sendo este um parâmetro de fácil inferência, mesmo para os pequenos produtores.

No Brasil, empresas interessadas em pleitear créditos de carbono ajustaram modelos que utilizam a relação inversa entre emissão de metano e rendimento gravimétrico em carvão, seguindo os preceitos da metodologia AM0041 (UNFCCC, 2006), destinada a projetos de grande escala.

Embasada nessa relação, a metodologia AMSIIK justifica o uso da temperatura final como variável independente, partindo da premissa que o RGCV é inversamente proporcional à temperatura final de carbonização e, como consequência, a emissão de CH₄ é diretamente proporcional à temperatura final de carbonização.

Deve-se ressaltar, contudo, que esses três fatores estão intimamente relacionados: o aumento da temperatura favorece as reações térmicas que ocasionam a formação de metano, ao mesmo tempo em que provoca uma maior degradação nos componentes da madeira, reduzindo o rendimento. Há, portanto, uma real justificativa para utilizar a temperatura como variável independente no modelo, além de simplesmente sua relação inversa com o rendimento em carvão.

Além disso, a escolha da temperatura como parâmetro de inferência para a emissão de metano numa metodologia de pequena escala, em detrimento do rendimento gravimétrico em carvão, possivelmente deve-se muito mais a sua facilidade de obtenção, que faz parte de uma premissa do MDL, a simplificação dos projetos de pequena escala.

Não há nenhum registro nacional de documentos de concepção (DCP) de projetos que utilizem a metodologia AMSIIK. Mas, em escala global, pode-se citar o DCP intitulado “Coconut Shell charcoaling and Power generation at Badalgama, Sri Lanka”, cuja equação de regressão em função da temperatura final foi utilizada para estimar as emissões de metano da linha de base, a qual produziu carvão de cascas de coco em fornos em Medas ou Caieiras. De acordo com o modelo ajustado obteve-se um valor de 10-15 Kg de CH₄ liberado quando do

processamento de uma tonelada de cascas de coco, mantendo-se a temperatura na faixa usual de temperatura final em seus fornos, que é de 500-550°C (UNFCCC, 2008b).

5.3 Ensaio de campo: fornos de alvenaria

5.3.1 Rendimento e propriedades do carvão vegetal

Na Tabela 7, estão apresentados os valores em porcentagem do rendimento em carvão vegetal, em atíços (madeira parcialmente carbonizada) e em finos, sobre a massa de madeira seca, obtidos para as carbonizações com e sem queima de gases em forno de alvenaria.

Tabela 7. Rendimento gravimétrico das carbonizações realizadas em forno de alvenaria.

Carbonização	Rendimento (%)		
	Carvão vegetal	Atíço	Finos
Com queima	30,86	2,91	3,15
Sem queima	32,49	2,29	1,99

De modo geral rendimentos gravimétricos em carvão acima de 30% são considerados satisfatórios para as tecnologias atualmente disponíveis no Brasil. Os resultados obtidos neste trabalho, com rendimentos em carvão próximos a essa média, além de baixo rendimento em atíços e finos, apontam para uma condução adequada do processo de carbonização, com controle de temperatura dentro das faixas pré-estabelecidas.

Cardoso *et al.* (2010) obteve um rendimento gravimétrico em carvão vegetal de aproximadamente 29% no sistema forno-fornalha e Oliveira (2012) obteve uma média de 32% para esse parâmetro no sistema de três fornos circulares acoplados a uma fornalha central.

A Tabela 8 apresenta os valores médios das propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal produzido nas duas carbonizações.

Tabela 8. Propriedades do carvão vegetal

Carbonização Da madeira	Umidade (%)	Densidade aparente (kg/m ³)	Densidade granel (kg/m ³)	Friabilidade (%)	Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	Análise Química Imediata		
						TMV	TC	TCF
Com queima	5,26	340,73	154,32	15,52	7026	26,92	0,29	72,70
Sem queima	5,04	373,72	146,6	12,32	7092	24,25	0,20	75,54
Média	5,15	357,22	150,42	13,92	7059	25,58	0,24	74,12

Onde: TMV: Teor de Materiais Voláteis; TCZ: Teor de Cinzas e TCF: Teor de Carbono Fixo

Os valores de densidade média a granel e de densidade aparente média obtidos, de 357 kg/m³ e 150,42 kg/m³, são considerados baixos para uso siderúrgico, cujos valores indicados por Santos (2008) são de 200 kg/m³ para densidade a granel e para a densidade aparente acima de 400 kg/m³. Esses resultados estão relacionados com a baixa densidade da madeira utilizada neste experimento (490 kg/m³).

A umidade de equilíbrio higroscópico média, de 5,15%, está em conformidade com as especificações do setor, podendo variar de 1 a 6%, sendo 4% o valor ideal relatado por Santos (2008).

O poder calorífico superior (PCS), com valor médio de 7.059 kcal/kg foi inferior ao obtido por Cardoso *et al.* (2010) e Oliveira (2012), cujos valores médios são de 7.929 kcal/kg e 8.114 kcal/kg, mas ainda estão na faixa de valores normalmente encontrados na literatura e indicados para uso siderúrgico e doméstico.

De acordo com a classificação do Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), para carvão vegetal, citado por Oliveira *et al.* (1982), o carvão produzido na carbonização com queima foi enquadrado na friabilidade média, enquanto o da carbonização sem queima como pouco friável.

O teor de cinzas do carvão produzido tanto na carbonização com queima quanto na sem queima de gases foi baixo, o que é favorável para sua utilização em especial para o uso siderúrgico, visto que a presença de inorgânicos no carvão deprecia a qualidade do ferro-gusa e aumenta o volume de escória. O valor de carbono fixo, 74,12%, está um pouco inferior à faixa desejada, que de acordo com Santos (2008) está compreendida entre 75 e 80%.

5.3.2 Emissão de metano (Kg/tonelada madeira)

A Tabela 9 apresenta os resultados de fator de emissão em metano para as duas carbonizações realizadas, sendo uma sem a queima dos gases na fornalha e a outra promovendo a combustão dos mesmos.

Tabela 9. Fator de emissão de CH₄ (Kg/t madeira) para carbonizações com e sem a queima de gases pela fornalha.

Carbonização	Sem queima dos gases	Com queima dos gases
Emissão de CH₄ (Kg/t de madeira seca)	7,58	0,01

A emissão de metano na carbonização sem queima dos gases por tonelada de madeira seca foi de 7,58 Kg, correspondentes aos 17,906 Kg de CH₄ emitidos durante todo o processo, cuja massa seca de madeira enforada foi de 2,36t.

Para a carbonização com queima, na qual se utilizou 2,36t de madeira seca, foram emitidos 0,0236 Kg de metano, o que significa 0,01Kg de CH₄/t de madeira.

Comparando os valores de carbonização sem queima e com queima percebe-se uma combustão eficiente dos gases, pois em relação ao metano houve uma redução equivalente a 99,8% de emissão em massa. Cardoso *et al.* (2010) relatou uma redução de 96% do metano após a queima dos gases, enquanto Halouani e Farhat (2003) conseguiram eliminar totalmente as emissões de gases combustíveis por incineração, numa planta de quatro forno metálicos ligados a uma unidade de queima.

Os valores de fator de emissão de CH₄ estão de acordo com os apresentados no Documento de Concepção do Projeto da empresa Plantar, que também fez medições *in loco*, e obteve em média uma emissão de 10,54 Kg CH₄ por tonelada de madeira, com valores variando entre 4,83 até 17,68 Kg/t (UNFCCC, 2007). Também estão em consonância com os fatores de emissão da Vallourec & Mannesman, cujos valores vão de 7,76 a 30,86 Kg/t de madeira (UNFCCC, 2011).

A grande variação dos valores obtidos pelas empresas reflete alguns fatores inerentes ao processo de carbonização em fornos de alvenaria, que não ocorrem nas pirólises controladas de laboratório. Esses fatores se referem em geral ao controle das entradas de ar, que determinam a temperatura dentro do forno e a velocidade de carbonização. Esses

parâmetros interferem diretamente na emissão dos gases em geral e no rendimento em carvão e são de difícil controle, visto a rusticidade da condução dos mesmos, sendo na maior parte feita de forma subjetiva.

Devido à dificuldade de controle relatada, muitas vezes as carbonizações são conduzidas sob altas taxas de aquecimento, havendo rápida liberação de gases e atingem elevadas temperaturas finais, maximizando a ocorrência das reações térmicas que levam à formação dos gases. Ao mesmo tempo, essa forma de condução implica baixos rendimentos gravimétricos, destacando mais uma vez, portanto, a relação intrínseca entre as duas variáveis (temperatura e rendimento em carvão) que culminam em elevada emissão de metano.

5.3.3 Aplicação da equação de regressão

A equação de regressão desenvolvida a partir dos ensaios de laboratório foi aplicada na carbonização em forno de alvenaria, utilizando o valor de temperatura final observado nesse ensaio como variável independente, uma vez que tal parâmetro foi monitorado durante todo o processo. De acordo com a Figura 13, observa-se que temperatura máxima atingida foi de 444°C, na sexagésima oitava hora, pertencente à última fase, para a qual estava programada a temperatura final de 450°C.

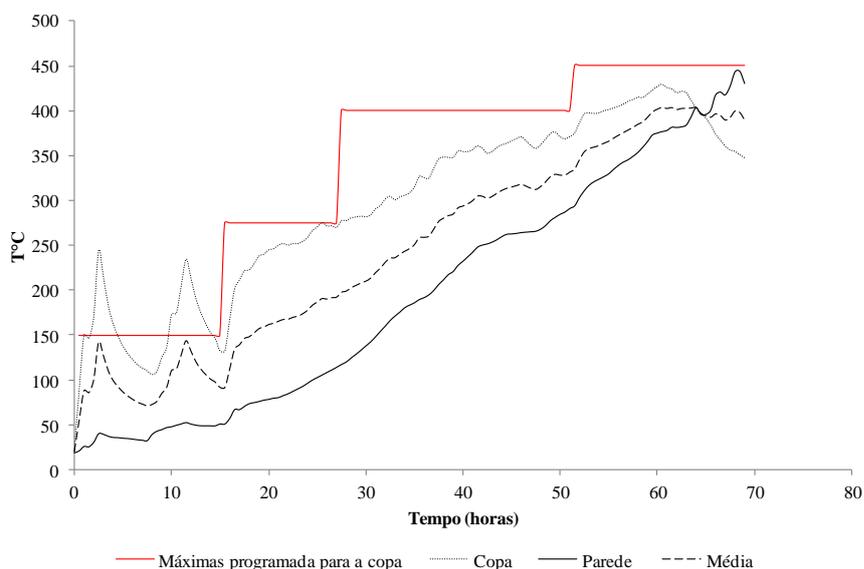


Figura 13. Perfil térmico do forno na carbonização sem queima dos gases.

Utilizando essa temperatura como variável independente na equação:

Emissão de $\text{CH}_4 = - 7,3536 + 0,0306 T_{\text{final}}$, obteve-se uma emissão de 6,23 Kg CH_4/t madeira.

Apesar de subestimar ligeiramente a emissão determinada com análise *in loco*, com base no valor de 7,58kg/t madeira encontrado na carbonização sem queima, essa poderia ser uma alternativa para estimação de linha de base em projetos de pequena escala, mesmo em fornos de alvenaria.

Também se pode inferir que a condução da carbonização seguindo as faixas teóricas de degradação térmica é um bom instrumento para redução da emissão de metano, na medida em que promove a manutenção da temperatura sob valores pré-estabelecidos (Figura 11), e ainda objetiva a maximização do rendimento em carvão, ou seja, possibilita o controle dos dois parâmetros determinantes na liberação do gás.

Verifica-se que apenas nas primeiras horas de carbonização não foi possível manter a temperatura dentro do patamar desejado, uma vez os termopares localizados na copa do forno registraram picos correspondentes à ocorrência de regiões em processo de combustão na massa de madeira enforada. Ressalta-se que esse evento geralmente se dá até a estabilização da temperatura no interior do forno.

5.3.4 Simulação do projeto de MDL

Conforme descrito na metodologia, a redução de emissões durante um ano para o projeto em questão foi estimada pela subtração entre as emissões do cenário linha de base e as emissões do projeto atividade em conjunto com as emissões de fuga, as quais foram desconsideradas, conforme a equação a seguir:

$$\text{RE} = \text{EB} - (\text{EP} + \text{Fuga})$$

5.3.4.1 Emissões da linha de base

Tabela 10. Emissões da linha de base referentes ao período de um ano.

EB	=	Q_{mad}	*	(M_b - M_b)	*	GWP_{CH4}
tCO₂e		t		t CH₄/t mad		
21,451	=	113,2	*	0,00758 - 0	*	25

Onde: EB = Emissões da linha de base em um ano; Q_{mad} = Quantidade de madeira utilizada durante um ano; M_{b,11} = Fator de emissão do metano; M_{b,11} = Fator legal captura e queima do metano; GWP_{CH4} = Potencial de aquecimento global do metano

A quantidade de madeira utilizada nas instalações durante um ano (Q_{mad}) foi calculada considerando uma média da massa enforada nas duas carbonizações, cujo valor foi de 2358 Kg ou 2,36 ton. Logo, anualmente, a massa de madeira corresponde ao produto de 4 carbonizações ao mês, totalizando 48 ao ano, pela massa média de 2,36 t por fornada.

O fator de emissão de metano para fabricação de carvão pelo método convencional (M_b) corresponde ao valor descrito na Tabela 9 para carbonização sem queima (7,58Kg CH₄/mad), transformado para t CH₄/t madeira.

O fator para explicar os requisitos legais para a captura e queima de metano na instalação tradicional de produção de carvão (M_d) foi desconsiderado, por não estar presente na legislação nacional.

Dessa forma, as emissões da linha base durante um ano foram estimadas em 18,02 tCO₂e.

5.3.4.2 Emissões do projeto atividade

$$EP = EP_{\text{transp1}} + EP_{\text{transp2}} + EP_{\text{eletricidade}} + EP_{\text{fugitivo}} + EP_{\text{apoio}}$$

As emissões relativas ao transporte da madeira e do carvão vegetal foram desprezadas, uma vez que não há distância incremental em relação ao projeto linha de base. Também as emissões de eletricidade foram consideradas nulas, pois o projeto proposto não prevê consumo extra de energia, seja com novas instalações ou com periféricos para o forno.

Em relação às emissões de combustíveis gastos para manter a incineração dos gases na fomalha (EP_{apoio}), estes se referem a combustíveis fósseis, portanto não se aplicam ao estudo

em questão, visto que se utilizou apenas combustíveis de origem renovável. É válido ressaltar, no entanto, que foram gastos aproximadamente 150Kg de biomassa, principalmente atícios para manutenção da chama na fornalha, notadamente nas primeiras horas de carbonização, correspondente à fase de secagem da madeira.

Portanto as emissões do projeto no ano corresponderão apenas às emissões de captura e queima ineficientes do metano (EP_{fugitivo}), cuja equação está descrita na Tabela 11.

Tabela 11. Emissões do projeto atividade referentes ao período de um ano.

EP	=	EP_{fugitivo}				
tCO₂e		1-(CFE_{projeto})	*	EM_{projeto}	*	GWP_{CH4}
				t		
0,00282	=	0,1	*	0,00113	*	25

Onde: EP= Emissões do projeto durante um ano; EP_{fugitivo} = Emissões fugitivas de captura e queima ineficientes do metano; CFE_{projeto} = Eficiência do dispositivo de captura e queima do metano; EM_{projeto} = Emissões diretas do projeto em um ano; GWP_{CH4} = Potencial de Aquecimento Global do metano.

No cálculo das emissões fugitivas de captura e queima ineficientes do metano está presente o valor de CFE_{projeto} , que corresponde à eficiência do equipamento de captura e queima do metano, considerado 0,9, valor padrão estabelecido pela metodologia AMSIIIK, na falta de outro valor mais apropriado. Consideram-se também as emissões diretas do projeto (EM_{projeto}), correspondentes ao produto dos 0,0236 Kg de metano por carbonização com queima por quatro carbonizações ao mês, totalizando 48 ao ano e o Potencial de Aquecimento Global do metano.

Desse modo, as emissões do projeto somaram pouco mais de 2 kg ou 0,00238 t de CO₂e, valor ínfimo que reflete a eliminação de quase a totalidade do metano com a queima dos gases da carbonização.

5.3.4.3 Redução das emissões

De posse dos valores de emissões da linha de base e emissões do projeto procedeu-se ao cálculo para estimar a redução de emissões alcançada em um ano (Tabela 12).

Tabela 12. Redução de emissões com a implementação do projeto para o período de um ano.

RE	=	EB	-	EP	-	Fuga
tCO₂e		tCO₂e		tCO₂e		tCO₂e
21,448	=	21,45	-	0,00282	-	0

Onde: RE = Redução de emissões em um ano ; EB = Emissões da linha de base; EP = Emissões do projeto atividade.

A redução de emissões durante um ano foi de 21,448 tCO₂e, que corresponde praticamente ao valor das emissões da linha base, já que as emissões do projeto foram quase nulas.

5.3.4.4 Créditos de carbono

As 21,448 tCO₂e reduzidas durante um ano com a implementação do projeto equivalem ao mesmo valor em CERs. Considerando um preço de €1,50 por tonelada de tCO₂e (Instituto Carbono Brasil, 2012), a receita em créditos carbono estimada com a utilização de fornalha para a queima de gases é de €32,17 equivalente a R\$ 84,00.

Num horizonte de dez anos, período para o qual um projeto é aprovado para receber créditos de carbono, a receita total seria de aproximadamente R\$840,00.

Considerando uma unidade de produção de carvão com bateria de 50 fornos de mesma capacidade, esse valor seria de R\$ 4.200,00 relativos à redução de 1.072 tCO₂e que seriam liberados na atmosfera caso não fosse promovida a queima dos gases no processo de carbonização.

Essa redução é expressiva em termos de sustentabilidade, já a receita com a comercialização dos CERs se apresenta como um valor irrisório, refletindo a baixa cotação atual dos créditos de carbono, principalmente quando se considera os custos referentes à elaboração do projeto. Até chegar à obtenção dos créditos, contabilizam-se os custos de elaboração do Documento de Concepção do Projeto (DCP), Validação, Aprovação, Registro, Monitoramento, Verificação e Registro, cuja soma corresponde à quantia de US\$50.000 (ou R\$100.000), considerando os custos mínimos de cada etapa definidos pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2008).

Para arcar com esse valor, seria necessário contabilizar a receita referente à redução conjunta de aproximadamente 1.190 fornos de mesmo porte deste estudo, o que se torna um

grande entrave à inserção do pequeno e médio produtor de carvão vegetal nos moldes do MDL, visto que em média o pequeno produtor possui 12 fornos e o médio 100 fornos por unidade produtora de carvão (UPC).

No entanto, essa inclusão é determinante para o alcance da sustentabilidade no setor, pois, se considerar o consumo de carvão vegetal no segmento da produção independente de ferro-gusa, que normalmente utiliza o insumo dos pequenos e médios produtores de carvão vegetal, foram 8.994.720 mdc no ano de 2011, somente em Minas Gerais (AMS, 2012). Levando-se em conta a expressividade desse número, é interessante pensar no potencial de redução da emissão de gases do efeito-estufa com a absorção de tecnologias como a queima de gases por esse nicho da cadeia produtiva.

Considerando uma densidade média a granel de 200kg/m³ obtém-se uma quantidade em massa de 1.798.944 t de carvão consumido pelo segmento. Utilizando uma média de 30% para o rendimento gravimétrico em carvão em relação à massa de madeira chega-se a um valor de 5.996.480 t de madeira utilizada.

A redução de 21,45 t de CO₂e em um ano quando processadas 113,2 t madeira, permitiu estimar um fator para expressar a redução de emissão, cujo valor foi de 0,19 tCO₂e por tonelada de madeira.

Dessa forma, o potencial de redução de CO₂e estimado na produção de carvão referente ao segmento de produção independente de ferro-gusa em Minas Gerais, para o ano de 2011, é de aproximadamente 1,14 milhões de toneladas.

Num estudo intitulado “Levantamento de Oportunidades Concretas de projetos de Baixo Carbono no Brasil” financiado pelo Banco Mundial, estimou-se que o país tem potencial de redução de 37.388.152 tCO₂e em 10 anos, com a queima de metano na produção de carvão vegetal de acordo com a metodologia AMSIIIK, gerando uma receita de US\$374 milhões com a venda de CERs nesse período (ICF-FIDES, 2010).

Diante disso percebe-se a importância da viabilização de projetos de pequena escala, com a valorização do preço pago pelos CERs, e com outros mecanismos, como a união dos produtores para elaboração de um projeto em comum, em forma de associações ou cooperativas, por exemplo. Isso é aceito pela UNFCCC e já vem acontecendo em países como a Índia, Bolívia e Paraguai, onde auxiliadas por incentivo internacional pequenas propriedades reuniram-se para pleitear créditos de carbono (TORRES, 2011).

Mais além, a mudança do perfil potencialmente poluidor da produção de carvão, tem que resultar de esforços feitos para a inserção do Brasil numa economia de baixo carbono, não

exclusivamente por meio da geração de créditos de carbono, mas também pela gestão dos gases de efeito estufa dentro das organizações, leis estaduais e federais, linhas de financiamento especiais, dentre outros, contemplando o desenvolvimento de projetos de baixo carbono, com foco ou não no MDL (ICF-FIDES, 2010).

Uma boa opção para incentivar os produtores de carvão vegetal a reduzir suas emissões seria utilizar os princípios da Neutralização do carbono. Assim, promovendo-se a queima dos gases da carbonização, eles estariam neutralizando as emissões de outras atividades, como por exemplo, a utilização de combustíveis fósseis em motores. Dessa forma, no carvão produzido pode-se utilizar o rótulo de “carbono zero”, promovendo um “marketing ambiental”, que poderia ser responsável pela conquista de mercado, principalmente internacional.

Além disso, somente as vantagens inerentes à queima dos gases da carbonização, por si só, já poderiam ser responsáveis pela adoção da tecnologia, desde que houvesse uma divulgação adequada. Além de melhorar as condições de trabalho, a energia liberada no processo de combustão dos gases pode ser aproveitada na secagem da lenha a ser utilizada, reduzindo o tempo de carbonização e melhorando o rendimento gravimétrico em carvão, ou ainda na cogeração de energia elétrica, gerando receita adicional.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo permitiram inferir alguns aspectos relevantes elencados a seguir

- O fator de emissão de metano (KgCH_4/t madeira) tem alta correlação com a temperatura final de carbonização, resultando em equações com bons ajustes de reta, que podem estimar a emissão de linhas de base, como preconiza a metodologia AMSIIK;

- A utilização de faixas teóricas de degradação da madeira na condução da carbonização pode contribuir para redução da emissão de metano, por promover o controle da temperatura em patamares e buscar o aumento do rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

- A redução da emissão de metano representa a eficiência de queima do gás com a utilização de fornalha, havendo, portanto uma contribuição efetiva desse instrumento na mitigação dos gases do efeito-estufa, além de melhorar consideravelmente os aspectos de saúde e segurança do trabalho.

- A geração de receita com a comercialização dos créditos de carbono é pequena, principalmente quando comparada aos custos de elaboração do projeto, necessitando existir outros mecanismos para viabilizar ou incentivar a queima de metano na produção de carvão vegetal em pequena escala.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, J.M. Efeito da temperatura sobre rendimento e propriedade dos produtos da carbonização de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Viçosa, 1983. 34p. (Dissertação de mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1983.
- ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A. O Processo de carbonização contínua da madeira. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p.143-156.
- APPS, M. J., KURZ, W. A., BEUKEMA S. J., J.S., BHATTI. Carbon budget of the Canadian forest product sector. *Environmental Science and Policy*, 2, 25-41. 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6922** Carvão vegetal: Determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro, 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6923** Carvão vegetal: amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro, 1981. 15p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 9165** Carvão vegetal: determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985. 8 p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 8112** Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633** Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941** Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. 2012. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2011**. Brasília, 2012. 130p.
- ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Anuário estatístico 2011**. Belo Horizonte, 2012.
- BARCELLOS, D. C. **Forno Container para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição**. 2002. 72p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2002
- BARCELLOS, D. C.; PIMENTA, A. S.; SILVA, J. de S.; COUTO, L. C. Desempenho de um forno de carbonização semi contínuo tipo container para produção de carvão vegetal. **Revista Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 183-189, 2004.
- BARCELLOS, D.C. Avanços tecnológicos da produção de carvão. II Fórum Nacional sobre produção de carvão vegetal. Sete Lagoas, MG, out 27-29, 2010.

BECIDAN, M.; SKREIBERG, O.; HUSTAD, J. Products distribution and gas release in pyrolysis of thermally thick biomass residues samples. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 78, p. 207–213, 2007.

BRASIL. MCT – MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. “**Mecanismo de desenvolvimento limpo – Guia de orientação**”. Brasília, 2002.

BRASIL. MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional: resultados preliminares ano base 2011**. Brasília, 2012.

BRITO, J. O. Carvão vegetal no Brasil: Gestões econômicas e ambientais. São Paulo, Energia, n 64, maio/junho 1990.

BRITO, J. O. Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise. 1992. Tese (Doutorado)- Universidade Federal de São Paulo, Piracicaba, SP, 1992.

BRITO, J. O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **IPEF**, Piracicaba, Circular Técnica, n. 181, 1993.

BROWNE, F. L. **Theories of the combustion of wood and its control**. A Survey of the Literature. Madison: Forest Products Laboratory, 1958. 68p. (Report, 2136)

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELLOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. 2010. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

CARDOSO, E. R.; SANTOS, G. C.; SANTOS, A. O. Potencial de redução de emissão de gases do efeito estufa na agroindústria do médio norte de mato Grosso-Brasil. IX Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica. Brasília, DF, out 4-8, 2011.

CARVALHO JUNIOR, J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. Florianópolis-SC, 2007. 176p.

CASTRO, P. F. Obtenção do Alcatrão Vegetal em Fornos de Alvenaria. In: PENEDO, W.R. et al. Eds. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, 1982. p.191-196

CENAMO, M. C. O Mercado de Carbono e as Oportunidades para o Agronegócio Brasileiro. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA). São Paulo, 2005. 4p.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDO ESTRATÉGICOS. **Manual de Capacitação sobre Mudança do Clima e Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)** – Brasília, DF. 2008

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDO ESTRATÉGICOS. **Incremento do Carvão Vegetal Renovável na Siderurgia brasileira: Relatório Final**. Brasília, DF. 2010

COLOMBO, S. F. O.; PIMENTA, A. S.; HATAKEYAMA, K. Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13., 2006, Bauru-SP. Anais... Bauru: UNESP, 2006.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - CEBDS. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. Rio de Janeiro, 2002. 35p. Disponível em: <<http://www.cebds.com/mudancasclimaticas/roteiro-mdl.pdf>>. Acesso em: 2 de maio de 2010.

CORTEZ, L. A., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Ed: Unicamp, Campinas, 2008, 732p.

COTTA, M. K.; TONELLO, K. C. Os projetos florestais no contexto das mudanças climáticas.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., Campinas, 2006.

DI BLASI, C.; SIGNORELLI, G.; DI RUSSO, C.; REA, G. Product distribution from pyrolysis of wood and agricultural residues. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 38, p. 2216-2224, 1999.

DUBOC, E.; COSTA, C. J.; VELOSO, R. F.; OLIVEIRA, L. dos S.; PALUDO, A. Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 37p. (Documentos, 197).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. 2011. **Balanco Energético Nacional 2011: Ano Base 2010**. Rio de Janeiro, 2011. 266p. Disponível em: <<http://www.ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 25 out. 2011.

FRANGETTO, F.W.; GAZANI, F.R. **Viabilização jurídica do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil - O Protocolo de Quioto e a cooperação internacional**. São Paulo: Peirópolis; Brasília, DF: IIEB - Instituto Internacional de Educação no Brasil, 2002. 477 p.

FU, P.; HU, S.; XIANG, J.; SUN, L.; YANG, T.; ZHANG, A.; ZHANG, J. Mechanism study of rice straw pyrolysis by fourier transform infrared technique. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 3, n. 17, p. 522-529, 2009.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS – FGV, 2002. O mecanismo de desenvolvimento limpo: guia de orientação. Coordenação geral Ignez Vidigal Lopes. Rio de Janeiro, Fundação Getúlio Vargas, 2002. 90p.

GOLDSTEIN, I. S. Degradation and protection of Wood from thermal attack. In: NICHOLAS, D. D. (Ed) **Wood deterioration and its prevention by preservative treatment**. Syracuse: Syracuse University, 1973. 380p.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O PAPEL**, v. 47, n.8, p.36-38, 1986.

GONZÁLEZ, J. F.; ENCINAR, J. M.; CANITO, J. L.; SABIO, E.; CHACÓN, M. Pyrolysis of cherry stes: energy uses of the different fractions and kinetic study. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 67, p. 165-190, 2003.

GREENBERG, J.P.; FRIEDLI, H.; GUENTHER, A.B.; HANSON, D.; HARLEY, P.; KARL, T. Volatile organic emissions from the distillation and pyrolysis of vegetation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Kreissparkasse Northeim, v. 6, p. 81–91, 2006.

HALOUANI, K; FARHAT, H. Depollution of atmospheric emissions of wood pyrolysis furnaces. **Renewable Energy**, v.28, n.1, p. 129-138, 2003.

HAMILTON, K. et al. **State of the Forest Carbon Markets 2009: Taking Root & Branching Out**. Ecosystem Marketplace, 2010. 88p.

HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S.; KUCUKBAYRAK, S. Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v.91, p. 759–764, 2010.

ICS-FIDES. **Levantamento de Oportunidades Concretas de Projetos de Baixo Carbono no Brasil**. 2010.

INSTITUTO CARBONO BRASIL. O mercado de carbono entre 27 de novembro e 04 de dezembro 2012. Disponível em: <http://www.institutocarbonobrasil.org.br/analise_financeira/noticia=732572>. Acesso em: 03 dez 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Share of total primary energy supply in 2008: energy statistics, 2010. Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/stats/pdf_graphs/29TPESPI.pdf>. Acesso em 01 ago. 2011.

JUVILLAR, J. B. Tecnologia de Transformação da Madeira em Carvão. In: PENEDO, W.R. et al. Eds. **Uso da Madeira para Fins Energéticos**. Belo Horizonte: Fundo Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, 1982. p.67-82.

KLOSE, W.; DAMM, S.; WIEST, W. Pyrolysis and activation of different woods Thermal analysis (TG/EGA) and formal kinetics. **IV International Symposium of Catalytic and Thermochemical Conversions of Natural Organic Polymers**, Krasnoyarsk, 2000.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ JUNIOR, W.A. **Principles of Wood science and technology. I. Solid Wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. 592p.

LEPAGE, E.S.; OLIVEIRA, A.M.F.; LELIS, A.T.; LOPEZ, G.A.C.; CHIMELO, J.P.; OLIVEIRA, L.C.S.; CAÑEDO, M.D.; CAVALCANTE, M.S.; IELO, P.K.Y.; ZANOTTO, P.A.; MILANO, S. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 1986. v. 1, 342 p.

LIAO, Y. F. **Mechanism study of cellulose pyrolysis**. Tese de Pós Doutorado, ZheJiang University, HangZhou, China.

LOPES, I. **Review of Forestry Carbon Standards - Development of a tool for organizations to identify the most appropriate forestry carbon credit**. 2009. 114 p. Dissertação (MSc Environmental Policy) - Imperial College London, 2009.

LOPES, R. P. **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto de ar.** 2002. 220p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.

LÚCIO, A. **DPC: uma tecnologia inovadora e altamente competitiva em constante evolução.** Seminário: Prática, Logística, Gerenciamento e Estratégias para o Sucesso da Conversão da Matéria Lenhosa em Carvão Vegetal para Uso na Metalurgia e Indústria. Belo Horizonte, nov 27-28, 2006.

MAGALHÃES, E. A. **Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa.** 2007. 213f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

MELO, F. A. O. **Projeto, construção e avaliação de uma fornalha para aquecimento de ar utilizando combustíveis particulados finos.** 2003. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/smcq_climaticas/_arquivos/plano_setorial_siderurgia___sumrio_executivo_04_11_10_141.pdf> Acesso em: 30 de agosto de 2012.

MEZERETTE, C.; GIRARD, P. **Environmental Aspects of Gaseous Emissions from Wood Carbonization and Pyrolysis Processes.** Centre Technique Forestier Tropical, France, 20 p. 1996.

MÜLLER-HAGEDORN, M; BOCKHORN, H.; KREBS, L.; MÜLLER, U. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 68, n. 1, p. 231-249, 2003.

NISHI, M. H. et al. Influência dos Créditos de Carbono na Viabilidade financeira de três Projetos Florestais. **Revista Árvore**, v.29, n.2, p.263-270, 2005.

OLIVEIRA, A. C. M. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal.** 2012. 73p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2012.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade.** Belo Horizonte, 1982. p.62-102.

OLIVEIRA, R. L. M. **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal.** 2009. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2009.

PENEDO, W. R. **Produção e utilização de carvão vegetal.** Belo Horizonte: CETEC, 1980. 393p. (Série. Publicações Técnicas, n. 8).

PENNISE, D. M.; SMITH, K. R; KITHINJI, J. P.; REZENDE, M. E.; RAAD, T. J.; ZHANG, J.; FAN, C. Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal

making in Kenia and Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. D20, p. 24143-24156, 2001.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D.C. **Atualização em carvão vegetal**. Apostila. Viçosa: UFV, 2004. 95p.

PINHEIRO, P. C. C.; SÈYE, O. Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. 1998. **53º Congresso Anual da ABM**, Belo Horizonte, MG, 1998.

RAAD, T.J.; PINHEIRO, P.C.C.; YOSHIDA, M.I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus spp*. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, abr.-jun. 2006

ROCHA, M. T. **Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT**. 2003, 213p. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – ESALQ, Piracicaba/SP, 2003.

RODRIGUES, G.V.; MARCHETTO, O. Análises térmicas. In: **XVII Seminário “Aplicação da Técnica de Análise Térmica voltada para Institutos Acadêmicos e Indústria”**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Netzsch CD-ROM.

ROWELL, R.M., S. LEVAN-GREEN, 2005. Thermal properties. In: **Hand book of wood chemistry and wood composites**, Rowell, R.M. (Ed.). Boca Raton: CRC Press, p.121-138.

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

SANTOS, M. A. S. Parâmetros da qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: **Fórum nacional de carvão vegetal**. 2008, Belo Horizonte. Disponível em: <painelflorestal.com.br/exibeNews.php?id=1784>. Acesso em: 31 agosto, 2012

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

SILVA, D. A.; BRITO, J. O. Qualidade do carvão vegetal oriundo de madeiras amazônicas. Balbina. **Acta Amazônica**, Manaus, v.19 (único), p.525-530, 1989.

TACCINI, M. M. **Estudo das metodologias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, referentes à avaliação de emissões de gases de efeito estufa na produção de carvão vegetal**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2011.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **Preparation of wood for chemical analysis** - Tappi T 264 cm-97. Atlanta: Tappi Press, 1997.

TIHAY, V.; GILLARD, P. Pyrolysis gases released during the thermal decomposition of three Mediterranean species. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, n. 88, p. 168–174, 2003.

TOLÊDO, D. P. **Análise técnica, econômica e ambiental de *acrocomia aculeata* (jacq.) lodd. ex mart. e *jatropha curcas* l. como alternativa de culturas para o produtor rural na cadeia produtiva do biodiesel.** 2010. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

TORRES, C. M. M. E. **Análises técnica e econômica da geração de créditos de carbono em projetos florestais na região de Viçosa, MG.** 127p. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2011.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 114-201, jul./dez. 2001.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de Jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Approved baseline and monitoring methodology AM0041 “Mitigation of methane emissions in the wood carbonization activity for charcoal production”: version 01. 2006. 63 p. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0014/14282.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2011.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Indicative simplified baseline and monitoring methodologies for selected small-scale CDM project activity categories AMSIIIK “Avoidance of methane release from charcoal production by shifting from traditional open-ended methods to mechanized charcoaling process”: version 04. 2008a. 28 p. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/filestorage/CDMWf_AM_ZBFK5T27N1DE9P6WT0J7DUPLEQ1VLM/EB44_repan19_AMS_III.K_ver04.pdf?t=RWN8MTI5MTA2MDIwNC45Mg==|ntXa6ksuwIOiWiEax4bxh_mCQjM=>>. Acesso em: 10 mar. 2011

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Formulário do documento de concepção de projeto (MDL-DCP) versão 3: Coconut Shell charcoaling and power generation in Badalgama, Sri Lanka, versão número 10. 2008b.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Overview of Project Activity Cycle.** < <http://unfccc.int/2860.php> > Acesso em 10 mar. 2011.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Formulário do documento de concepção de projeto (MDL-DCP): versão 03: Mitigação de emissões de metano na produção de carvão vegetal da Plantar, Brasil; versão número: 6. 2007. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0012/12896.pdf>.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Formulário do documento de concepção de projeto (MDL-DCP): versão 03: Mitigação de emissões de

metano na produção de carvão vegetal da V&M Florestal, Minas Gerais, Brasil, versão número 1. 2011.

VALENTE, O. F.; ALMEIDA, J. M.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M. Efeito da temperatura de carbonização nos rendimentos e nas características do carvão vegetal produzido. **Revista Árvore**, Viçosa, v.9, n.1, p. 28-39, 1985.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21p. (Boletim técnico, 1).

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis, **Fuel**, Amsterdam, n. 86, p. 1781– 1788, 2007.

WANG, S.; WANG, K.; LIU, Q.; GU, Y.; LUO, Z.; CEN, K.; FRANSSON, T. Comparison of the pyrolysis behavior of lignins from different tree species. **Biotechnology Advances**, Amsterdam, n. 27, p. 562–567, 2009.