

Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Forno de alvenaria para incremento da produtividade por meio do resfriamento  
externo do carvão vegetal

**Artur Queiroz Lana**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em  
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba  
2018

Artur Queiroz Lana  
Engenheiro Florestal

**Forno de alvenaria para incremento da produtividade por meio do resfriamento externo  
do carvão vegetal**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **JOSÉ OTÁVIO BRITO**

Tese apresentada para obtenção do título Doutor em  
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba  
2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Lana, Artur Queiroz

Forno de alvenaria para incremento da produtividade por meio do resfriamento externo do carvão vegetal / Artur Queiroz Lana. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. Piracicaba, 2018.

87 p.

Tese (Doutorado) -- USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Produção de carvão vegetal 2. Carbonização da madeira 3. Aumento da produção 4. Viabilidade técnica e econômica I. Título

## DEDICATÓRIA

A Deus por ter me tratado tão bem e me dado saúde, pela oportunidade de ter coragem e força para superar as adversidades da vida e por me permitir desfrutá-la.

A minha amada mãe, Soraya, pelo amor incondicional, pelo carinho e apoio nos momentos difíceis e por sempre acreditar em mim, obrigado Soraynha!

Ao meu pai, Júlio Lana, por todo amor e apoio, pelas palavras de incentivo que sempre me levaram adiante.

A melhor esposa do mundo, Ana Luiza, pelo amor incondicional, companheirismo, compreensão, cumplicidade, respeito, e por me fazer único e especial somente por merecer o seu amor. Obrigado por estar ao meu lado, dividindo sonhos e angústias, não importando o quão longe, sempre juntos para sempre. Te amo Ninha!

Aos meus irmãos Gabriel e Túlio, por todo incentivo, por servirem de inspiração, pelas alegrias compartilhadas e pelos inúmeros momentos divididos nessa vida, por ajudarem a me tornar quem sou.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor José Otávio Brito, pela orientação, apoio e oportunidades ao longos destes anos de convívio. Por compartilhar um pouco de sua experiência e conhecimentos.

Aos amigos do LQCE, dos Recursos Florestais e de Piracicaba, Carlos Rogério, Marina, Lucas KsKelvin, Netinho, Fafá, Giovana, Chicão, Flávia, Juliana, José Luiz Peña, Maiara Tetti, Wesley, Janice, Camila, Regina, e Ude pelo apoio e amizade nessa caminhada. E, em especial, ao grande amigo Ananias Dias Júnior por toda ajuda e por compartilhar grande parte desta jornada.

Aos companheiros de República Ary Neto, Felipe Cenoura e José Renato Drago. Obrigada pela amizade, acolhimento e pelas comilanças! Desejo toda sorte do mundo a vocês.

A Universidade de São Paulo (USP) e a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), pela infraestrutura e ensino gratuito de qualidade.

Ao Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE/ESALQ), pelo suporte na realização das análises e por todo apoio prestado como base para esta pesquisa.

A CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

A empresa DMV Reflorestamento pela parceria na concepção e financiamento do projeto, pelo apoio concedido para realização do experimento em campo.

Obrigado ao Mário, Valter e Marcos pela amizade, por toda ajuda no trabalho de campo e pelos bons momentos divididos na Fazenda Cabreúva.

## EPIGRAFE

*“If you’re going to try, go all the way.  
otherwise, don’t even start.  
if you’re going to try, go all the way.  
this could mean losing girlfriends,  
wives, relatives, jobs  
and maybe your mind.  
go all the way.  
it could mean not eating for 3 or 4 days.  
it could mean freezing on a park bench.  
it could mean jail, it could mean derision, mockery, isolation.  
isolation is the gift,  
all others are a test of your endurance,  
of how much you really want to do it.  
and you’ll do it  
despite rejection and the worst odds  
and it will be better than anything else  
you can imagine.  
if you’re going to try, go all the way.  
there is no other feeling like that.  
you will be alone with the gods  
and the nights will flame with fire.  
do it, do it, do it.  
all the way. all the way.  
you will ride life straight to perfect laughter,  
its the only good fight there is.*

Roll the dice - *“Charles Bukowski”*

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>7</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>10</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>11</b>
REFERÊNCIAS .....	13
<b>2. ASPECTOS DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL.....</b>	<b>15</b>
2.1. CENÁRIO ATUAL .....	15
2.2. PRINCIPAIS METODOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL.....	20
2.3. RESFRIAMENTO ARTIFICIAL DE FORNOS DE ALVENARIA.....	30
2.4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA .....	32
REFERÊNCIAS .....	34
<b>3. DESEMPENHO DE UM FORNO EXPERIMENTAL DE CARBONIZAÇÃO COM PRODUTIVIDADE INCREMENTADA PELO RESFRIAMENTO EXTERNO DO CARVÃO VEGETAL .....</b>	<b>39</b>
RESUMO.....	39
ABSTRACT .....	39
3.1. INTRODUÇÃO .....	40
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
3.4. CONCLUSÕES .....	66
REFERÊNCIAS .....	67
<b>4. VIABILIDADE ECONÔMICA DO FORNO “RAMPA” EM DIFERENTES CENÁRIOS.....</b>	<b>71</b>
RESUMO.....	71
ABSTRACT .....	71
4.1. INTRODUÇÃO .....	72
4.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	73
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	78
4.4. CONCLUSÕES .....	86
REFERÊNCIAS .....	87

## RESUMO

### **Forno de alvenaria para incremento da produtividade por meio do resfriamento externo do carvão vegetal**

O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo, entretanto, a maioria da produção é realizada em fornos de alvenaria rudimentares, de pequenas dimensões que, geralmente, não ultrapassam os 12m<sup>3</sup> de volume interno. Estes fornos são pouco engenheirados e utilizam pouca ou nenhuma tecnologia, o que reflete numa produtividade aquém do potencial de um carvão vegetal muito heterogêneo. Nesta transformação da madeira em carvão nos fornos de alvenaria está presente uma marcante dicotomia aonde, em uma primeira etapa, é necessário o aquecimento e a retenção do calor e, posteriormente, a dissipação da energia contida no sistema para retirada da carga produzida, o que acaba por elevar o tempo de produção e, conseqüentemente, reduzir a produtividade. É importante ressaltar que nesta fase inicial, da conversão propriamente dita, existe pouca ou nenhuma margem para redução de tempo, uma vez que é mais dependente das características da matéria-prima, visando assegurar a qualidade do produto final. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver um novo forno experimental de alvenaria para produção de carvão vegetal que proporcionasse ciclos mais curtos, elevando a produtividade e, simultaneamente, assegurando a qualidade do carvão. Assim, o foco da pesquisa foi dado a etapa de resfriamento, tendo sido traçadas estratégias para acelerar o arrefecimento do carvão vegetal que, neste caso, foi efetuado externamente ao forno, o disponibilizando mais rapidamente para o início de novo ciclo produtivo. O forno possibilitou a rápida remoção do carvão ainda aquecido, direcionando-o a um container metálico que, por sua vez, promoveu o resfriamento acelerado da carga de carvão produzida. O sistema desenvolvido possibilitou uma diminuição significativa do tempo da carbonização, reduzindo a etapa de resfriamento a apenas 2 horas no interior do forno e 10 horas no container. O carvão produzido apresentou características adequadas tanto para o uso siderúrgico quanto para cocção de alimentos. Além disso, o forno desenvolvido demonstrou melhor desempenho econômico quando comparado ao forno circular de superfície, apresentando viabilidade nos dois cenários analisados.

Palavras-chave: Carbonização; Resfriamento do carvão vegetal; Redução do ciclo; Viabilidade econômica



## ABSTRACT

### **Masonry kiln to increase productivity through the external cooling of charcoal**

Brazil is the largest producer and consumer of charcoal in the world, however, most of the production is carried out in rudimentary masonry kilns, of small dimensions that generally do not exceed 12m<sup>3</sup> of internal volume. These kilns are poorly engineered and use little or no technology, which reflects a productivity below the potential of a very heterogeneous charcoal. In this transformation of the wood into charcoal in the masonry kilns, there is a marked dichotomy in which, in a first step, heating and retention of the heat is necessary and, subsequently, the dissipation of the energy contained in the system to remove the cargo produced, which ends up raising production time and, consequently, reducing productivity. It is important to emphasize that in this initial phase, the conversion itself, there is little or no margin for reducing time, more subordinate to the characteristics of the raw material, and also aims to ensure the quality of the final product. In this context, the objective of this research was to develop a new masonry experimental kiln for the production of charcoal which contemplates shorter cycles, raising productivity and, simultaneously, ensuring the quality of the charcoal. Thus, the research focus was given to the cooling phase, and strategies were developed to accelerate the cooling of the charcoal, which, in this case, was externalized to the kiln, making it available more quickly for the beginning of a new productive cycle. The kiln allowed the rapid removal of the still heated charcoal, directing it to a metal container which promoted the accelerated cooling of the charcoal produced. The developed system made possible a significant reduction of the carbonization time, reducing the cooling stage to only 2 hours inside the kiln and 10 hours in the metallic container. The charcoal produced had adequate characteristics for both steel use and food cooking. In addition, the developed kiln showed a better economic performance when compared to the circular surface kiln, presenting viability in both analyzed scenarios.

Keywords: Carbonization; Charcoal cooling; Cycle reduction; Economic viability

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Os dez maiores produtores mundiais de carvão vegetal em 2016.....	<b>17</b>
<b>Figura 2.</b> Forno trincheira na Amazônia brasileira.....	<b>20</b>
<b>Figura 3.</b> Forno trincheira .....	<b>21</b>
<b>Figura 4.</b> Forno cupim .....	<b>22</b>
<b>Figura 5.</b> Fornos semiesféricos dispostos em linha.....	<b>23</b>
<b>Figura 6.</b> Forno de encosta .....	<b>24</b>
<b>Figura 7.</b> Forno de superfície .....	<b>25</b>
<b>Figura 8.</b> Forno retangular .....	<b>27</b>
<b>Figura 9.</b> Sistema Bricarbrás .....	<b>27</b>
<b>Figura 10.</b> Sistema DPC.....	<b>28</b>
<b>Figura 11.</b> Forno microondas.....	<b>28</b>
<b>Figura 12.</b> Retorta contínua para produção de carvão vegetal.....	<b>29</b>
<b>Figura 13.</b> Ilustração esquemática do projeto.....	<b>42</b>
<b>Figura 14.</b> Vista esquemática superior do forno.....	<b>42</b>
<b>Figura 15.</b> Vista esquemática anterior do forno .....	<b>42</b>
<b>Figura 16.</b> Vista esquemática posterior do forno .....	<b>43</b>
<b>Figura 17.</b> Esboço do container metálico.....	<b>43</b>
<b>Figura 18.</b> Correlação entre as temperaturas do termopar e pirômetro.....	<b>48</b>
<b>Figura 19.</b> Disposição do carvão vegetal no interior do container .....	<b>51</b>
<b>Figura 20.</b> Perfil térmico da 1ª carbonização .....	<b>55</b>
<b>Figura 21.</b> Perfil térmico da 2ª carbonização .....	<b>56</b>
<b>Figura 22.</b> Perfil térmico da 3ª carbonização .....	<b>57</b>
<b>Figura 23.</b> Perfil térmico do container metálico .....	<b>60</b>
<b>Figura 24.</b> Empenamento da tampa traseira.....	<b>66</b>

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1.</b> Materiais utilizados na construção do forno .....	<b>46</b>
<b>Tabela 2.</b> Temperaturas e tempos adotados para as carbonizações .....	<b>49</b>
<b>Tabela 3.</b> Valores médios da composição química estrutural das madeiras.....	<b>53</b>
<b>Tabela 4.</b> Umidade, densidade básica e diâmetro médio da madeira .....	<b>54</b>
<b>Tabela 5.</b> Tempo de conversão da madeira em carvão e de resfriamento no interior dos fornos .....	<b>59</b>
<b>Tabela 6.</b> Rendimentos gravimétricos .....	<b>61</b>
<b>Tabela 7.</b> Valores obtidos na análise imediata do carvão vegetal .....	<b>62</b>
<b>Tabela 8.</b> Características do carvão vegetal .....	<b>64</b>
<b>Tabela 9.</b> Custo detalhado de implantação do forno rampa .....	<b>79</b>
<b>Tabela 10.</b> Custo detalhado do forno circular de superfície.....	<b>80</b>
<b>Tabela 11.</b> Cálculo do número de fornos para 50 toneladas mensais de carvão vegetal.....	<b>80</b>
<b>Tabela 12.</b> Fluxo de caixa no Cenário 1, carvão destinado ao mercado de cocção .....	<b>81</b>
<b>Tabela 13.</b> Índices econômicos do Cenário 1, para o carvão destinado a cocção de alimentos .....	<b>82</b>
<b>Tabela 14.</b> Fluxo de caixa no Cenário 2, carvão destinado ao mercado siderúrgico .....	<b>84</b>
<b>Tabela 15.</b> Índices econômicos do Cenário 1, para o carvão destinado a siderurgia.....	<b>85</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A Bioenergia representada por florestas, resíduos agrícolas, biomassas processadas e biocombustíveis, é a maior fonte de energia renovável do planeta, respondendo pela maior parte da energia renovável dentro do mix de energia, representando 10% do fornecimento global (WEC, 2016). Além disso, a biomassa oferece a vantagem de ser convertida em combustível sólido, líquido e gasoso, sendo que os biocombustíveis líquidos são predominantes nas Américas, a lenha e o carvão vegetal na Ásia e África e, a utilização para a geração combinada de calor e energia, na Europa (WEC, 2016). O Brasil não se difere significativamente dos números de fornecimento energético global por biomassa, sendo que somente a lenha e o carvão vegetal foram responsáveis por aproximadamente 8% da oferta interna de energia em 2017 (BRASIL, 2018).

Segundo a Fundação das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2014) o carvão vegetal apresenta uma série de vantagens quando comparado a lenha, tais como: maior densidade energética; otimização do transporte e armazenamento; umidade inferior; menor liberação de fumaça e poluição de ambientes internos; além disso o carvão vegetal pode ser utilizado na siderurgia, na melhoria de propriedades do solo e na indústria química como adsorvedor; sendo altamente resistente a deterioração biológica e requerindo pouco ou nenhum preparo antes de ser utilizado.

A produção de carvão vegetal, entretanto, além da concorrência ainda enfrenta inúmeras dificuldades a serem superadas. Dentre as adversidades destacam-se: carência de mão de obra qualificada com conhecimento técnico, desarraigado do processo tradicional subjetivo a experiência prática do carbonizador; dificuldade de adequação das características da matéria-prima utilizada, como alta umidade e variação das dimensões; influência das variáveis ambientais como a temperatura e umidade relativa do ar, que dificultam uma produção mais homogênea; a falta de controle do processo de conversão que, associados aos demais fatores, culminam em baixo rendimento e baixa qualidade do produto.

Além dos desafios supracitados, em especial, destaca-se a diversidade de técnicas empregadas para carbonização, sendo que, a grande maioria do carvão ainda é fabricado de maneira arcaica e com pouco rendimento. Esta técnicas, frequentemente, levam a exposição do trabalhador a condições insalubres e poluem o ambiente com a liberação indiscriminada

de gases poluentes. A evolução do processo de carbonização não vem acompanhando o desenvolvimento tecnológico que aconteceu em outras áreas do campo nas últimas décadas.

De maneira geral, a falta de investimento para o progresso da produção de carvão vegetal pode ser creditada a sua desvalorização como fonte energética, a escassez de políticas públicas efetivas para o setor, aos estigmas advindos das produções mais primitivas e ao baixo valor agregado do carvão vegetal, sensível demais as intempéries do mercado nacional e global. Estes fatos acabam por desestabilizar economicamente o setor, suprimindo a constância de propósito para o desenvolvimento e melhoria das tecnologias.

O que se observa, na prática, diz respeito à ampliação dos fornos retangulares pelas grandes empresas e a utilização de queimadores para combustão de gases poluentes, havendo poucas investidas, em escala experimental, nos sistemas periféricos como: controle da carbonização por sistemas supervisórios de temperatura e automação de fornos; resfriamento artificial; secagem forçada da madeira; e recuperação dos gases gerados.

Algumas iniciativas objetivando a redução do tempo demandado para o resfriamento vêm sendo estudadas, como a utilização de tijolos com encaixes para construção de fornos e aplicação de argamassas especiais para revestimento externo e, menos frequente, interno dos fornos. Os objetivos destas melhorias estão focados na vedação dos fornos, minimizando a passagem de ar e oxigenação durante o resfriamento.

Além disso, alguns equipamentos para arrefecimento forçado de fornos retangulares já foram testados por empresas do setor siderúrgico e instituições de pesquisa, os denominados trocadores de calor. Os trocadores são dispositivos utilizados para transferir calor entre dois fluídos em diferentes temperaturas. Segundo Çengel et al. (2012), a transferência de calor ocorre por meio de um escoamento cruzado sobre bancos de tubos em que um fluido se moverá dentro dos tubos enquanto o outro se move perpendicularmente aos tubos, removendo o calor. Neste caso o fluido a ter energia dissipada é representado pelos gases do interior do forno e, o fluido para remoção da energia, pode ser composto por ar ou água. Deste modo, objetiva-se a redução do tempo de resfriamento, acarretando na redução de custos em função do menor número de fornos para suprir uma determinada demanda.

É diante da procura por fontes energéticas sustentáveis e da necessidade de melhoria nas tecnologias de produção de carvão vegetal que esta pesquisa objetivou desenvolver e avaliar uma nova metodologia de carbonização da madeira, visando o incremento da produtividade por meio da redução do tempo demandado para o resfriamento.

Para melhor compreensão este trabalho foi desenvolvido em capítulos:

Capítulo 1. Introdução Geral, anteriormente apresentada.

Capítulo 2. Aspectos da produção de carvão vegetal

Este capítulo explana brevemente sobre o cenário atual da produção de carvão vegetal, principais fornos utilizados, resfriamento artificial de fornos e mecanismos envolvidos na carbonização.

Capítulo 3. Desempenho de forno experimental de carbonização com produtividade incrementada pelo resfriamento externo do carvão vegetal

Neste capítulo foram avaliadas as curvas térmicas das carbonizações, os tempos e os rendimentos do processo, bem como as características da madeira utilizada e do carvão vegetal produzido.

Capítulo 4. Viabilidade econômica do forno “Rampa” em diferentes cenários

Neste capítulo foram simulados dois projetos, baseados nos fornos utilizados nesta experimentação, diante de diferentes cenários, visando fornecer subsídios para auxiliar na escolha de investimentos e futuras pesquisas.

## Referências

BRASIL (2018). Ministério de Minas e Energia. **Relatório Final: Balanço Energético Nacional 2018: ano base 2017**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2017. 294 p. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018.pdf>. Acessado em: 29 de out. 2018.

ÇENGEL, Y.A; GHAJAR, A.J. **Transferência de Calor e massa: uma abordagem prática**. 906 p. Porto Alegre: AMGH, 4 ed., 2012.

FAO - Fundação das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. **Bioenergy and food security rapid appraisal. Section 3: Charcoal**. 55p. 2014.

WEC – World Energy Council. 2016. **World Energy Resources 2016: Full Report**. 1028p. Disponível em: [https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources\\_Report\\_2016.pdf](https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources_Report_2016.pdf). Acessado em 25 de jul. 2018.



## **2. ASPECTOS DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL**

### **2.1. Cenário atual**

O crescimento populacional do planeta mais que dobrou desde 1970 (FAO), além disso, o desenvolvimento de nações e as altas taxas de consumo levam a uma maior utilização dos recursos naturais. A demasiada exploração destes bens tem levantado debates em todas as esferas da sociedade sobre a necessidade de um ponto ótimo de equilíbrio. Esta busca pela sustentabilidade visa garantir às futuras gerações o suprimento destes insumos naturais finitos, preservando a biodiversidade e a qualidade de vida na Terra.

É importante ressaltar que grande parte da exploração dos recursos naturais destinados à produção energética relaciona-se à extração de materiais fósseis. É fato que o consumo energético e o desenvolvimento da sociedade andam atrelados, sendo a disponibilidade de energia um fator intrínseco para mensuração do nível de prosperidade de uma população. Isto é dado em função de que a quantidade consumida se correlaciona ao bem-estar das pessoas, ao nível de industrialização e também oferece um forte indicativo da produção e movimentação econômica.

Dentre as fontes de energia mais utilizadas se sobressaem as não renováveis que, em 2015, ofertaram 86% do total da energia primária do mundo, sendo as principais fontes: o petróleo responsável por 31%, o gás natural por 22% e o carvão mineral por 28%, sendo este último responsável pelo provimento aproximado de 39% da energia elétrica mundial daquele ano (IEA, 2017).

As projeções brasileiras apontam altas taxas de consumo energético, muito maiores que das últimas décadas, projetando a necessidade da expansão da oferta energética em duas vezes a atual capacidade total instalada até meados de 2032, especialmente ao que se refere a petróleo, gás natural, etanol e eletricidade (TOLMASQUIM et al., 2007). A participação das fontes renováveis na matriz energética nacional se manteve entre as mais elevadas do mundo em 2017, com 42,9% de participação, porém, ainda mais da metade, os 57,1% restantes, são providos por fontes não renováveis (BRASIL, 2018).

Outrossim, é que diante do alto consumo de energias não renováveis também está o atual debate sobre a acelerada taxa de aquecimento atmosférico e a intensificação de eventos climáticos catastróficos, em grande parte creditados aos gases de efeito estufa, advindos,



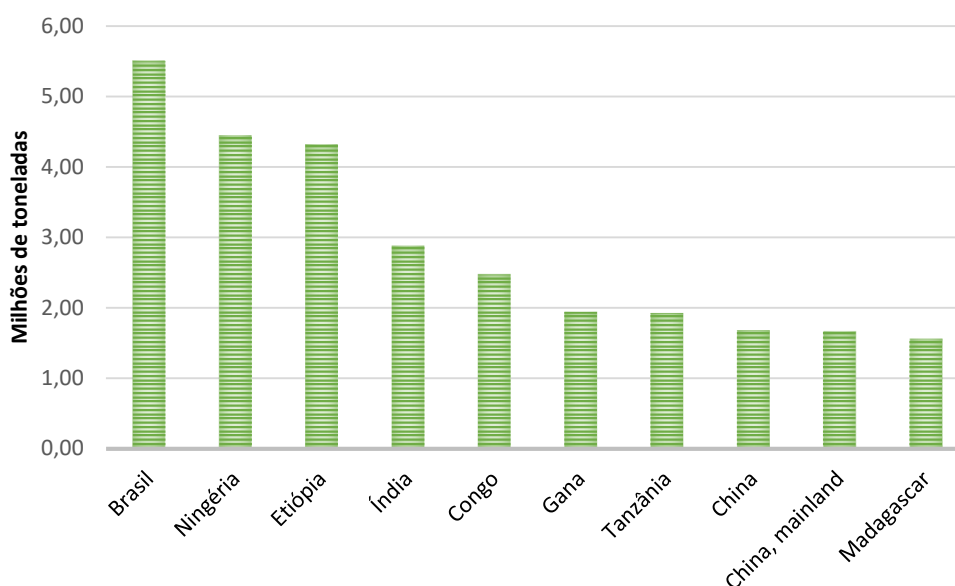
principalmente, da queima de combustíveis fósseis, que liberam grandes quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera. Uma das alternativas consideradas para reduzir os níveis CO<sub>2</sub> é a sua fixação biológica, por meio de vegetais fotossintéticos, acumulando-o na forma de biomassa. Diante da demanda energética, por tradição, simplicidade no seu uso e seu caráter renovável, é que a biomassa vem recuperando sua atratividade como fonte estratégica.

Dentre as biomassas, o carvão vegetal se destaca como importante fonte para o desenvolvimento sustentável. O carvão vegetal atua como agente redutor do minério de ferro e como fonte energética na indústria siderúrgica de ferro-gusa, aço e ferro-ligas, substituindo o carvão mineral, que já vem sofrendo restrições ecológicas na sua utilização. Além disso o carvão substitui outros combustíveis fósseis, como é o caso do gás natural ou gás liquefeito de petróleo para o preparo de alimentos.

De fato, a crise econômica mundial e a instabilidade política nacional dos últimos anos afetaram drasticamente o consumo de carvão vegetal no Brasil, reduzindo a 5,2 milhões de toneladas em 2017, o que representa cerca de 46% do consumo de 2006 (BRASIL, 2018). Segundo a Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2017), 84% do carvão vegetal foi produzido a partir de florestas plantadas de eucalipto no ano de 2016. Os principais destinos do carvão no ano de 2017 foram: a produção de ferro-gusa e aço (69%), a produção de ferro-ligas (12%), o uso residencial (10%), a produção de cimento (3%), o uso comercial (3%), seguido em menores percentuais para indústria química, metalurgia de não ferrosos e outros (BRASIL, 2018).

Segundo o Balanço Energético Nacional (Brasil, 2018), o carvão vegetal, que também atua como agente redutor do minério de ferro, respondeu por 14,6% da energia consumida nas indústrias de ferro-gusa e aço em 2017, percentual baixo quando comparado aos 46,1% providos pelo coque de carvão mineral, demonstrando a existência de mercado passível de ocupação pelo carvão vegetal.

O Brasil se destaca como maior produtor de carvão vegetal do planeta, responsável por aproximadamente 11% da produção global em 2016 (FAO). Os maiores produtores mundiais e suas respectivas produções são apresentados na Figura 1.



**Figura 1.** Os dez maiores produtores mundiais de carvão vegetal em 2016 (FAO).

No Brasil o setor que mais utiliza o carvão vegetal é a siderurgia de ferro-gusa, aço e ferro ligas, consumindo cerca de 81% do total, seguido pelo mercado residencial e comercial, aonde é utilizado principalmente para o preparo de churrasco, utilizando juntos cerca de 13% da produção nacional (BRASIL, 2018). Em 2017 houve uma contração de 6% do consumo em relação ao ano anterior, dando continuidade ao decréscimo que vem ocorrendo desde 2011 (BRASIL, 2018).

Algumas iniciativas que visam promover o crescimento sustentável da produção de carvão vegetal já foram realizadas, como o pioneirismo do estado de São Paulo em implementar um selo de qualidade para carvão vegetal, denominado Selo Premium. Derivado do Estudo do Grupo de Pesquisas Pró-Carvão (PRÓCARVÃO, 2002), o selo é de livre adesão e define normas de padrões mínimos de qualidade e produção do carvão vegetal, como base para Certificação de Produtos pelo Sistema de Qualidade de Produtos Agrícolas, Pecuários e Agroindustriais do Estado de São Paulo, promulgado na Resolução n°. 40, instituído pela Lei 10.481-99 (SÃO PAULO, 2015). De livre adesão, este selo visa promover boas práticas que, além de preservar a qualidade do produto, garante a qualidade de vida das pessoas envolvidas na produção e a preservação do meio ambiente. Outra iniciativa foi o “Pacto da Sustentabilidade” entre o Governo do Estado e as indústrias produtoras e consumidoras de carvão vegetal de Minas Gerais. Este objetivou a proteção da biodiversidade e conservação

dos recursos hídricos e do solo, servindo de base para a Lei Florestal Nº 18.365/209 implementada no Estado (MINAS GERAIS, 2009), que definiu o ano de 2018 como prazo limite para o fim do consumo de carvão oriundo de florestas nativas pelo setor siderúrgico de Minas Gerais.

Mesmo assim, pouco têm se visto na mudança das tecnologias empregadas para conversão da madeira. Brito (2011) relata que grande parte dos fornos utilizados no Brasil são esféricos do tipo “rabo-quente” e fornos de encosta. Além disso, Oliveira et al. (2013) relatam que os pequenos e médios produtores são responsáveis por 80% da produção de carvão vegetal, utilizando fornos de operação manuais e com baixa capacidade volumétrica, principalmente, devido ao alto investimento necessário para construção e operação dos fornos de maiores dimensões. No estado de São Paulo, praticamente toda a produção é feita em fornos de alvenaria de operação manual e de pequena capacidade. Num diagnóstico da cadeia produtiva do Estado de São Paulo, o grupo de pesquisas PróCarvão (PRÓCARVÃO, 2002) identificou que 67% dos fornos utilizados são do tipo “encosta”, 26% fornos de superfície e 6% fornos do tipo “rabo-quente”.

De maneira geral, os fornos com baixa capacidade volumétrica não possibilitam a mecanização do processo, em função de suas pequenas dimensões, ficando a cargo do operador o carregamento da lenha e descarregamento do carvão (OLIVEIRA, 2012). Este descarregamento manual infere em adentrar o forno e ter contato com o carvão vegetal e o material particulado suspenso. Mesmo com o uso de equipamentos de proteção individual, que podem prevenir parte da exposição, ainda existem condições severas de trabalho devido as altas temperaturas no interior do forno, que podem ultrapassar os 50°C dependendo da precipitação para abertura e descarregamento.

Vale salientar que o processo produtivo do carvão vegetal é bastante antagônico: inicialmente é requerido o aquecimento e retenção do calor no interior do forno e, num segundo momento, exige a dissipação desta energia para resfriamento e descarregamento. Isto restringe a gama de materiais construtivos passíveis de emprego na construção dos fornos que, além de terem baixo custo, devido ao baixo valor agregado do produto final, devem suportar grandes amplitudes térmicas, que variam de temperaturas ambientes até temperaturas superiores a 450°C. Então, o que mais se tem observado é a utilização de fornos construídos com tijolos maciços cerâmicos, em virtude do menor custo e da consolidação de algumas tecnologias ao longo dos anos. Nas últimas décadas observou-se a ampliação destes

sistemas, com a construção de fornos retangulares de alvenaria de grandes dimensões, contemplando a mecanização e o aumento da escala produtiva (OLIVEIRA et al., 2015). O maior forno de carvão vegetal do mundo está localizado na cidade de Turmalina, interior de Minas Gerais, pertencente a Aperam Bioenergia, nomeado de forno “FAP 2000”, com capacidade para dois mil estéreos de lenha (APERAM BIOENERGIA, 2018).

Os fornos de alvenaria, de maneira geral, apresentam longos ciclos de produção, derivados principalmente da dificuldade do resfriamento do sistema. O tempo médio de resfriamento de um grande forno pode durar de oito a quatorze dias (OLIVEIRA et al., 2015), levando mais tempo do que a carbonização em si. A Aperam BioEnergia possui diversos fornos com capacidade para cerca de 700 estéreos de lenha, o “RAC 700”, que leva aproximadamente 5 dias para conversão da madeira em carvão e 12 dias para o arrefecimento da massa de carvão vegetal (SANTOS, 2014).

Oliveira et al. (2015) afirma que uma alternativa para acelerar o resfriamento de fornos retangulares para a produção de carvão vegetal seria a utilização de trocadores de calor, aonde ocorre a retirada do ar aquecido de dentro do forno durante o resfriamento e a condução desse ar por um trocador de calor para, somente depois, retorná-lo a uma temperatura inferior para o interior do forno, acelerando a redução da temperatura interna do forno e diminuindo o tempo de resfriamento. Porém, os autores relatam que nesse processo é necessária a boa conservação dos fornos para vedação de entradas de ar, pois o oxigênio leva a focos de incêndio, assim, podendo até mesmo aumentar o tempo de resfriamento. Santos (2013) revela que, dentre os protótipos avaliados, alguns reduziram o tempo de resfriamento, porém, não se viabilizaram do ponto de vista econômico. Além disso, em modelos de trocadores gás – ar, o lado do ar pode representar uma resistência de troca de calor de 85%, sendo necessárias estratégias, como incorporação de aletas, para favorecer a troca (GIARDINI e TIBIRIÇA, 2016).

Esta delonga no processo leva a uma menor produtividade e a necessidade de um maior número de fornos para atender determinada demanda por carvão vegetal, aumentando o custo de construção das unidades produtoras, necessitando, assim, de novas abordagens para redução do tempo do ciclo da carbonização.

## 2.2. Principais metodologias para produção de carvão vegetal

### 2.2.1. Fornos de terra

Considerados como os fornos mais primitivos, os fornos de terra culminam num processo arcaico, de baixo rendimento da conversão de madeira em carvão, e alta contaminação por minerais do solo. Esta categoria de fornos tem praticamente custo zero em materiais, porém possui grande demanda de mão de obra. Apesar de extremamente rudimentar, este sistema ainda é utilizado em regiões mais remotas e menos desenvolvidas, como em países da África e Ásia, América central e mesmo no Brasil, onde ainda podem ser encontrados em atividade na região norte para aproveitamento de resíduos de serrarias (HARD RAIN PROJECT, 2018).

#### Forno trincheira

Um dos modelos mais antigos, o forno trincheira ou forno fossa, consiste basicamente numa abertura no solo onde a lenha é acomodada sobre algumas outras peças de madeiras suporte, chamadas popularmente de “cama” ou “travesseiros”. Após o carregamento, a lenha é coberta com uma camada vegetal, composta principalmente de folhas, galhos finos e capins, para, só então, serem revestidos com uma camada de terra. Ao longo da superfície são deixados alguns pontos descobertos para entrada de ar e exaustão da fumaça, que também pode ser realizada com auxílio de dutos. A acomodação da lenha na trincheira é ilustrada na Figura 2.



**Figura 2.** Forno trincheira na Amazônia brasileira (Hard Rain Project, 2018).

Neste tipo de forno a falta de controle do processo, realizado subjetivamente pela intuição do operador ao observar a coloração dos gases expelidos, acarreta em um carvão de baixa qualidade. O pequeno rendimento também deriva do fato de que, ao ser transformada em carvão, a madeira tem seu volume reduzido à metade aproximadamente, o que ocasiona desmoronamentos da parede de terra, levando a uma oxigenação indevida e combustão da madeira.

Também vale ressaltar que neste sistema existe uma larga contaminação do carvão por minerais não combustíveis do solo. Este método pode ser considerado um desperdício de recursos. Cardoso (2010) descreve-o como o sistema mais rústico de produção de carvão e destaca a sua vulnerabilidade a chuva e o seu rendimento baixo, em torno de 10 a 12%. Além disso existe a demora para conclusão do processo, que dura cerca de 8 a 12 dias, principalmente em função da dificuldade de vedação, que leva de entradas de ar indevidas durante o resfriamento. A Figura 3 ilustra o sistema descrito.



**Figura 3.** Forno trincheira (FAO, 2014).

### **Forno Cupim**

Também conhecido como forno meda ou balão, o forno cupim é considerado um sistema muito rústico de carbonização e se assemelha ao forno trincheira, sendo basicamente uma pilha de lenha recoberta por uma camada vegetal e outra camada de solo e água. O nome

é dado devido à semelhança visual com o cupinzeiro, um montículo constituído basicamente por aglomerado de terra, ninho de alguns termitídeos do gênero *Isóptera*. A principal diferença do forno trincheira é devido a lenha estar disposta sobre a superfície, arranjada na posição vertical. Os problemas também estão no baixo rendimento e na alta taxa de contaminação por minerais do solo, além da impossibilidade de utilização nos períodos chuvosos (PINHEIRO et al., 2006). Assim como o forno anterior a dispersão dos gases em diferentes pontos não permite seu aproveitamento. Outro grande problema encontrado no modelo é a dificuldade de vedação ao final do processo, levando a delonga do arrefecimento da massa de carvão produzida. A Figura 4 a seguir ilustra este modelo de forno.



**Figura 4.** Forno cupim (BIOCOAL, 2004).

### **2.2.2. Fornos de Alvenaria**

#### **Forno semiesférico, meia laranja ou “rabo-quente”**

Este tipo de forno de alvenaria é o mais encontrado ao longo do território nacional, principalmente, pelo seu baixo custo e simplicidade construtiva (SANTOS, 2012). Trata-se, basicamente, de uma semiesfera, construída em tijolos maciços cerâmicos e argamassa de barro, sobre uma superfície plana. Ele apresenta diversos orifícios para entrada de ar, conhecidos popularmente como “tatus”, e para saída dos gases da carbonização, as “baianas”



(PIMENTA e BARCELLOS, 2000). Mendes et al. (1982), relatam que este forno apresenta baixo rendimento gravimétrico devido ao seu controle empírico, acarretando numa baixa conversão da madeira em carvão vegetal, que pode variar de 20 a 28%. O tempo de produção é mais influenciados pela qualidade construtiva e pelo ambiente em que o forno está inserido, durando, geralmente, entre 5 a 7 dias (CARNEIRO e OLIVEIRA, 2013). Os numerosos orifícios ao longo de todo forno dificultam o controle adequado do processo bem como a vedação do forno para proceder o resfriamento ao final da carbonização, reduzindo o rendimento e inviabilizando o aproveitamento dos subprodutos voláteis. A livre dissipação da fumaça na atmosfera impede a minimização da poluição, promovendo um ambiente insalubre para o trabalhador. A Figura 5 a seguir ilustra o modelo descrito.



**Figura 5.** Fornos semiesféricos dispostos em linha (ALFENAS HOJE, 2014).

### **Forno de encosta**

Também conhecido como forno de barranco, este modelo se encontra mais presente em regiões de relevo acidentado, porém, alguns produtores aglomeram, compactam solo e constroem um muro de contenção para promover o desnível. Neste modelo abre-se um buraco na encosta e, a copa abobadada do forno apoia-se no desnível do terreno, o “barranco”, que faz o papel de parede do forno, reduzindo o custo com tijolos. As principais vantagens desse tipo de forno são o baixo custo e o bom rendimento, podendo chegar até



32% (BAER FILHO, 2008). Geralmente este modelo possui baixa capacidade de carga, de 4 a 7 estéreos de lenha, com resfriamento é muito lento (MENDES et al., 1982), podendo levar de 8 a 14 dias. O tempo elevado para realização de um ciclo é devido ao grande isolamento térmico promovido pelo solo ao redor do forno, o que dificulta o resfriamento da massa de carvão produzida, reduzindo sua produtividade. A Figura 6 ilustra este modelo de forno.



**Figura 6.** Forno de encosta (INPE, 2008).

### **Forno circular de superfície**

As principais inovações destes fornos, que gradualmente vem substituindo os demais descritos anteriormente, são: mais notavelmente o único ponto de exaustão da fumaça, o que possibilita seu aproveitamento; paredes perpendiculares ao solo, permitindo uma maior e melhor acomodação da lenha; e a admissão de ar atmosférico em pontos específicos e ao nível do piso, distribuídos ao longo do perímetro das paredes (OLIVEIRA, 2012). Além disso são de fácil operação, podendo ser controlados pela temperatura e pela observação visual das aberturas para entrada de ar.

Este modelo é de formato circular, de construção relativamente simples e de baixo custo, elaborado apenas com tijolos maciços de barro cozido e argamassa de barro e água, geralmente contendo uma cinta metálica envolvendo a base da copa, visando sua maior durabilidade. Seu volume interno pode variar expressivamente, podendo ser encontrado com 3 a 8 metros de diâmetro interno e alturas centrais de 2 a 5 m. Este tipo de forno apresenta

bom rendimento gravimétrico, vida útil satisfatória e custo razoável, comparado aos demais fornos de baixa capacidade volumétrica (OLIVEIRA, 2012). A Figura 7 a seguir ilustra o modelo supracitado. O ciclo neste modelo geralmente leva em torno de 6 a 7 dias (Lana, 2014), sendo aproximadamente a metade deste período destinado ao resfriamento, que ocorre naturalmente pela dissipação do calor no ambiente. Em comparação aos fornos anteriores, este modelo, por ter entradas específicas de ar, possui uma melhor vedação, porém, as características isolantes dos materiais construtivos ainda delongam o resfriamento da carga de carvão.



**Figura 7.** Forno de superfície (autor).

### **Forno retangular**

Este modelo vem sendo adotado, principalmente, pelas grandes empresas que utilizam carvão vegetal para produção de ferro-gusa, aço e outras ligas metálicas, como o silício metálico (CARDOSO, 2010). A produção em larga escala e a completa mecanização do processo são as principais vantagens destes fornos, que existem em diferentes dimensões, encontrados com capacidades variando entre 30 estéreos (st) de lenha até 2000 st, como o forno “FAP 2000”, que possui a estimativa de produção de 410 toneladas de carvão vegetal por mês (APERAM BIOENERGIA, 2018).

Distinto dos outros fornos de alvenaria, este tipo de forno adota um “exoesqueleto” em concreto armado, que torna mais onerosa sua construção, responsável pela sustentação da estrutura de tijolos. Esta estrutura sustenta além das copas e paredes, as portas de grandes dimensões, possibilitando a movimentação de máquinas para o carregamento da lenha e o descarregamento do carvão. As saídas específicas de exaustão da fumaça propiciam a existência de equipamentos periféricos para aproveitamento dos gases, com o maior destaque para as fornalhas de combustão dos gases (CARDOSO, 2010).

Estes modelos apresentam rendimento variando entre 30 e 35% (CARNEIRO e OLIVEIRA, 2013). Em alguns fornos é possível encontrar câmaras externas de combustão, mais raramente encontradas nos fornos circulares de superfície. As câmaras externas são utilizadas para oxigenação do forno e queima de madeira para fornecimento de energia para secagem parcial e ignição da madeira enfornada (ARRUDA, 2005).

É importante salientar que um dos problemas dos fornos retangulares é a dificuldade de resfriamento. Fávero et al. (2007) relatam que normalmente o tempo necessário para carbonização da madeira gira em torno de quatro dias e, o resfriamento o dobro, cerca de oito dias. Assim, um ciclo completo, incluído carga de madeira, ignição, carbonização, resfriamento e descarga do carvão, pode se prolongar por mais de 12 dias, indo de encontro aos dados de Raad (2004), que declara uma duração do processo entre 12 a 15 dias.

As grandes dimensões destes fornos dificultam a identificação de pequenas fissuras, formando canais para entrada de ar que dificultam o resfriamento. Para contornar o problema são aplicadas várias vezes ao longo do resfriamento barreiras, uma mistura muito diluída de solo argiloso e água. Além disso tem se investido na utilização de argamassas para revestimento, favorecendo a vedação, o que evitaria a necessidade de aplicação da barreira. Deve se ressaltar que os materiais construtivos, de características isolantes, dificultam as trocas térmicas com o ambiente, delongando o resfriamento natural da massa de carvão no interior do forno. A Figura 8 ilustra o forno retangular.



**Figura 8.** Forno retangular (CI FLORESTAS, 2016).

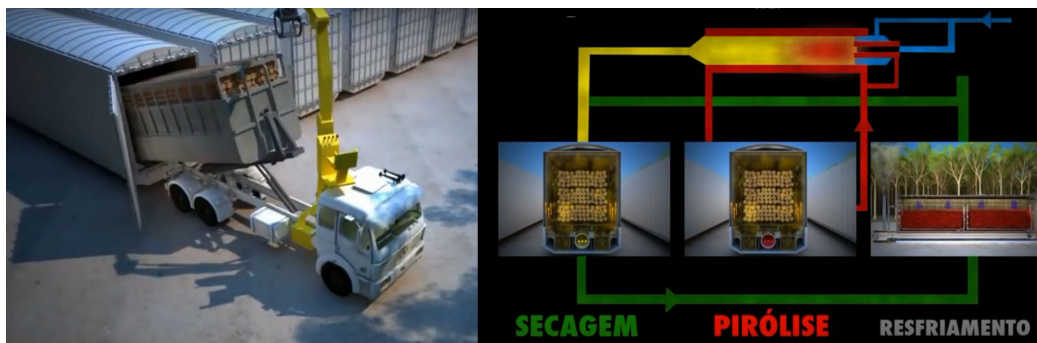
### 2.2.3 Outras tecnologias

Além dos modelos descritos ainda existem outras tecnologias, como os fornos metálicos. Dentre eles está o forno do tipo “container”, desenvolvido na década de 1980 (FERREIRA, 1988). Este modelo propicia a mecanização do sistema e, mais notadamente, o rápido resfriamento, tendo em vista que os cilindros metálicos possuem maior condutividade térmica, promovendo uma dissipação mais rápida da energia contida. A Figura 9 ilustra o modelo.



**Figura 9.** Sistema Bricarbrás (Barcellos, 2002).

Outro sistema, também desenvolvido nacionalmente, é o sistema de produção DPC, abreviação em inglês para o que significa: secagem, pirólise e resfriamento. Este é o nome das etapas da fabricação do carvão que, neste processo, acontecem simultaneamente e em reatores distintos. De acordo com Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (BRASIL, 2015), o processo DPC consiste em fornos retangulares equipados com caçambas em estrutura de chapa de aço carbono, com capacidade para cerca de 24 estéreos de madeira, sendo também dotado de um queimador de gases, que são reaproveitados nos reatores. A Figura 10 ilustra o sistema DPC e seu sistema do fluxo de gases.



**Figura 10.** Sistema DPC (DPC Processos Termoquímicos, 2018).

Outra tecnologia é o forno microondas, desenvolvido pela Ondatec (ONDATEC, 2018). Segundo o site da fabricante o forno detém alta tecnologia para efetuar a carbonização contínua da madeira e, simultaneamente, aproveitar energeticamente o gás da pirólise. A Figura 11 ilustra o forno microondas em sua denominada “Unidade de produção de Energia e Carvão” (UPEC-250), com 42 metros de comprimento total.



**Figura 11.** Forno microondas (ONDATEC, 2018).



É relevante ressaltar que nenhuma destas tecnologias está largamente difundida e/ou utilizada no cenário nacional. O elevado investimento inicial para implantação pode ser um fator determinante para a não proliferação destes sistemas, além de razões técnicas e econômicas, que necessitam ser avaliadas em cada caso.

Além dos fornos citados ainda é possível se encontrar diferentes tecnologias. Uma outra opção para produção de carvão vegetal são as retortas contínuas, formadas basicamente por cilindros metálicos verticais, onde a madeira é introduzida no topo e passa por todas etapas de produção do carvão (secagem, carbonização e resfriamento) até a conclusão do processo na base.

As retortas contínuas são as mais eficientes na conversão de carvão vegetal, podendo chegar a 38% (RAAD, 2004). Inicialmente elas foram utilizadas para produzir alcatrão vegetal para uso energético e abastecimento da indústria de carboquímicos, porém, perderam mercado para a indústria do petróleo, se atendo basicamente a produção de carvão vegetal para o uso doméstico (BRASIL, 2015). A Figura 12 ilustra a retorta contínua “Bordet Plant” da empresa Bordet Frères, em Leuglay na France. No Brasil existe uma iniciativa denominada “Carboval” da empresa Valourec, implementada em 2008 em Minas Gerais.



**Figura 12.** Retorta contínua para produção de carvão vegetal (BORDET FRÈRES, 2018).

### 2.3. Resfriamento artificial de fornos de alvenaria

Os modelos construídos em alvenaria são os fornos mais difundidos e adotados na produção de carvão vegetal. Nestes fornos, majoritariamente, o resfriamento ocorre naturalmente, pela simples dissipação da energia contida na estrutura do forno e massa de carvão no ambiente ao redor, transferindo calor da parede do forno para o exterior. Deste modo, o resfriamento da carbonização leva tempo equivalente ou superior ao da etapa de conversão.

Para minimizar o tempo de resfriamento têm se adotado diferentes abordagens. Dentre elas podemos citar melhorias construtivas nas estruturas dos fornos, como a utilização de tijolos com encaixes que permitem um melhor assentamento das peças, reduzindo a espessura da argamassa de união dos tijolos, locais com maior incidência de fissuras, aprimorando a vedação dos fornos para impedir a passagem de ar durante o resfriamento. Além disso, o revestimento de fornos com argamassa especial, resistente a chuva e dilatação, tem sido efetuado com intuito de favorecer a vedação do forno. Deste modo, é possível eliminar ou reduzir substancialmente, a aplicação da “barrela”, constituída por solo argiloso diluído em água.

Neste procedimento de “barrela” a água evaporada removeria parte da energia contida nas paredes e, as partículas de solo dissolvidas vedariam possíveis fissuras, impedindo a passagem de oxigênio para o interior do forno. Oliveira et al. (2015), entretanto, afirmam que o “barrelamento”, além de pouco tecnificado, implica em ganho insignificante de tempo no resfriamento de fornos retangulares, apresentando apenas efeito sobre a vedação. Nestes fornos retangulares, que possuem maiores dimensões, a “barrela” é feita em diferentes momentos durante o resfriamento, podendo ser aplicada até doze vezes, variando de acordo com a qualidade construtiva do forno. A “barrela” de grandes fornos demanda maquinário e combustível, matéria-prima e mão de obra para pulverização, o que acarreta no aumento do custo de produção.

Oliveira Filho et al. (2010) aplicaram vapor d’água provido por uma caldeira aquatubular, injetado por tubos metálicos em um forno retangular de 9,6 m<sup>3</sup> de volume interno. A injeção de vapor ocorreu durante o resfriamento, entre as faixas de temperaturas de 480°C e 120°C, o que durou cerca de 13 horas, depois procedendo o resfriamento natural por mais 37 horas, até que a temperatura média do forno fosse inferior a 60°C. Os autores

verificaram uma redução de 14 horas no tempo total de resfriamento, cerca de 16% do tempo de total de carbonização, conforme obtido por Cardoso (2010) em um forno com dimensões semelhantes, onde se efetuou apenas o resfriamento natural. Vale ressaltar que este procedimento necessita de equipamentos (caldeira e tubulações metálicas), elevando o custo de produção, além de consumir eletricidade e água, recursos geralmente escassos nas plantas de carbonização. A aplicação excessiva de vapor pode elevar o teor de água no carvão, sendo que quanto maior a umidade menor é o poder calorífico útil, dificultando seu acendimento e reduzindo a quantidade de energia liberada. Além disso, quantidades elevadas de água no carvão geram maiores expansões de gases, podendo comprometer seu uso nos alto-fornos siderúrgicos.

Além das técnicas descritas, algumas empresas e institutos de pesquisas vêm estudando o uso de trocadores de calor para resfriamento acelerado de fornos de carbonização da madeira. Os trocadores são equipamentos que proporcionam troca de calor acentuada entre dois fluidos com temperaturas diferentes, evitando se misturem, sendo amplamente utilizados em sistemas de aquecimento residencial, instalações de condicionadores de ar e em processos químicos (SABINO E TIBIRIÇA, 2018). Neste caso, os gases do forno são removidos durante o resfriamento e direcionados a um trocador de calor, retornando posteriormente ao forno com temperatura inferior.

Oliveira et al. (2015) avaliaram 3 tipos diferentes de trocadores de calor acoplados a fornos retangulares de 320 m<sup>3</sup>. O primeiro modelo consistiu na retirada do ar quente do interior do forno durante o período de resfriamento e sua condução por dutos metálicos instalados na parte externa do forno, com movimentação do gás realizado por exaustor centrífugo. O segundo modelo, semelhante ao primeiro, utilizou água em seções do tubo para aumentar a troca de calor, de modo a acentuar a transferência térmica, contando com dois tanques de 9.000 L para imersão parcial dos tubos. O terceiro modelo aumentou em 300% a área de troca de calor, utilizando um maior número de tubos de menores diâmetros, imersos em dois tanques com capacidade para 55 mil litros de água, com uso de um exaustor de 10 c.v. para movimentação dos gases. O primeiro sistema apresentou uma redução de 24 horas, passando para 7 dias ao invés dos 8 dias obtidos no resfriamento natural, reduzindo 12,5% do tempo de resfriamento. O segundo sistema apresentou tempo médio de resfriamento de 5 dias, 3 dias a menos que a média do resfriamento natural do forno, reduzindo o resfriamento em 38%. O terceiro modelo obteve resfriamento de 6,9 dias quando adotado o fluxo



convencional para os gases e de 8,9 dias para o fluxo invertido, sendo que o resfriamento natural foi em média 10,2 dias. Este último modelo propiciou a redução máxima de 43% do tempo de resfriamento. Ressalta-se que em todos os testes houve incidência de focos de incêndio durante o descarregamento do carvão.

Dependendo do fluxo de vazão forçada de exaustão dos gases a pressão negativa gerada no interior do forno pode ocasionar oxigenação indevida, dada à existência de porosidade natural da construção. Além disso, o mal estado de conservação, com presença de trincas, e a má vedação das entradas de ar do forno, podem comprometer o uso destes equipamentos.

Santos (2013) obteve redução de 60% do tempo de resfriamento com a utilização de um trocador de calor tubular gás/ar, aplicado em um forno de 9 st de madeira, não constatando alteração das propriedades do carvão devido ao uso de trocador. O mesmo autor relata que dentre os protótipos de trocadores de calor avaliados para resfriamento de fornos de carbonização, alguns apresentaram viabilidade técnica, porém, não se viabilizaram economicamente.

É importante ressaltar que estes trocadores consomem energia elétrica e algumas vezes água, comumente escassa em praças de carbonização, acarretando aumento dos custos de produção. Mais além, o caráter ácido dos gases da carbonização pode levar a corrosão destes equipamentos, demandando materiais construtivos mais adequados e mais onerosos. Além da corrosão, a incrustação de alcatrão condensado e deposição de particulados oriundos do interior do forno podem demandar manutenções mais frequentes destes equipamentos.

#### **2.4. Fundamentação teórica da carbonização da madeira**

A madeira quando submetida ao calor se degrada em diferentes compostos. Este processo é comumente denominado de termodegradação, termólise ou pirólise da madeira. Brito (1990) afirma que a pirólise da madeira é um dos processos mais antigos de que o homem tem percepção, e que quando esta termodegradação é controlada, podem ser obtidos diferentes produtos. De fato, quando uma biomassa é exposta a ação do calor em uma atmosfera controlada (isenta ou com pouca concentração de oxigênio) se obtém o carvão vegetal, um produto com elevada concentração de carbono sólido.

A madeira é constituída majoritariamente pelos seguintes compostos químicos: celulose, hemiceluloses, ligninas, que consistem elementarmente de carbono, oxigênio, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e inorgânicos. Mezerette e Girard (1996) classificam em três categorias os subprodutos da carbonização: pós e partículas em suspensão, gases não condensáveis e compostos orgânicos condensáveis. Diversos componentes podem ser encontrados nos gases como: vapor d'água, ácido acético, álcool metílico, alcatrão leve, alcatrão pesado, acetona, fenóis, aldeídos e hidrocarbonetos mais leves em geral (CARDOSO, 2010).

Acerca do processo, há referências que diferenciam algumas fases dentro da carbonização, de acordo com as reações físico-químicas dos elementos da madeira quando submetidas a determinadas temperaturas. Estas fases são descritas separadamente para fins de estudos e melhor compreensão, entretanto, pela dificuldade de se obter uma temperatura homogênia em todo interior do forno, ou mesmo numa única peça de madeira, as fases acabam por ocorrerem simultaneamente, sendo uma predominante em cada dado momento.

Rezende (2006), propõe que numa primeira fase ocorre a secagem da madeira, variando da temperatura ambiente até 110°C, havendo somente liberação de vapor de água. A segunda fase varia de 110 até os 250°C, já incorrendo na liberação da água de constituição, devido à lise de celulose e hemiceluloses. Na terceira fase, entre 250 e 350°C, eleva-se a taxa de decomposição destes componentes, com maior perda de massa e presença de gases, óleo e água. O autor considera que em 350°C o carvão apresenta cerca 75% de carbono fixo, considerando quase finalizado o processo. Na sua quarta fase descrita, de 350 a 500°C, ocorre a diminuição das emissões e elevação do teor de carbono.

Oliveira et al. (2013), ao pesquisarem a otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas, fazem semelhante divisão para aplicação prática num forno de superfície circular. Os autores descrevem que a primeira fase é endotérmica, variando de 100 a 150°C, ocorrendo majoritariamente a secagem da madeira e liberação de vapor de água. A segunda fase ainda é endotérmica, com temperaturas entre 150 a 275°C, havendo principalmente a degradação de hemicelulose, com início da liberação de gases. A terceira fase é exotérmica e quando o carvão é formado. Ela varia de 275 a 400°C, decorrendo a degradação da celulose, o componente em maior quantidade na madeira, com liberação de grande quantidade de gases. Os autores afirmam que a quarta e última fase também é

exotérmica, compreendendo temperaturas de 400 a 470°C e, assim como para Rezende (2006), há redução das emissões e elevação de teor de carbono no carvão formado.

A qualidade do carvão vegetal para fins energéticos é correlacionada a fatores inerentes a matéria-prima, ao processo e as variáveis ambientais (CARDOSO, 2010). Dentre os quais se destacam as características da madeira utilizada e sua umidade, desejável abaixo de 30%; o controle do processo, que deve ter taxa de aquecimento e temperatura final adequados; o modelo de forno utilizado e o arranjo da lenha em seu interior, que influenciam na circulação interna dos gases; e a condições externas do ambiente como temperatura e umidade relativa.

## Referências

ALFENAS HOJE. 2014. Produção de carvão vegetal no Brasil e o atual estágio das tecnologias para aproveitamento dos gases do processo. Disponível em: [http://www.alfenashoje.com.br/noticia.asp?id\\_noticia=7764](http://www.alfenashoje.com.br/noticia.asp?id_noticia=7764) Acessado em: 05 de jun. 2018.

APERAM BIOENERGIA, 2018. Aperam BioEnergia investe em inovação e sustentabilidade. Disponível em: <http://aperambioenergia.com.br/aperam-bioenergia-investe-em-inovacao-e-sustentabilidade/>. Acessado em 25 de jul. 2018.

ARRUDA, T.P.M. **Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares**. 2005. 44p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - Minas Gerais.

BAER FILHO, R. **Aspectos econômicos, ambientais e técnicos de três tecnologias para produção de carvão vegetal**. 2008. Monografia (Engenharia Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

BIOCOAL. 2004. Traditional Earth Mound Kiln & charcoal consumption. Disponível em: <https://www.biocoal.org/earth-mound-kiln/>. Acessado em: 05 de jun. 2018.

BORDET FRÈRES, 2018. Charbon de bois. Disponível em: <http://www.bordet-freres.fr/>. Acessado em 07 de jun. 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Relatório Final: **Balanco Energético Nacional 2017: ano base 2016**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2017. 296 p. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2017.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf). Acessado em: 25 de jul. 2018.

BRASIL (2018). Ministério de Minas e Energia. **Relatório Final: Balanco Energético Nacional 2018: ano base 2017**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2017. 294 p. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018.pdf>. Acessado em: 29 de out. 2018.

BRASIL. Ministério da ciência, tecnologia e inovação. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015. 154p. Disponível em:

[https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Carvao\\_Vegetal\\_WEB\\_02102015\\_10225.PDF/a3cd6c7c-5b5b-450a-955b-2770e7d25f5c?version=1.3](https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Carvao_Vegetal_WEB_02102015_10225.PDF/a3cd6c7c-5b5b-450a-955b-2770e7d25f5c?version=1.3). Acessado em: 25 de jul. 2018.

BRITO J.O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. Documentos Florestais. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, 9: 1-19, 1990.

BRITO, J. O. Situação e desafios do uso da madeira para energia no Brasil. In: II Encontro brasileiro de silvicultura, 46 p., 2011, Campinas. **Anais...** Campinas: SP, Semana Florestal Brasileira, 2011. Disponível em: <http://www.ipef.br/eventos/2011/eps.asp>. Acessado em: 25 de jul. 2018.

CARDOSO, M. T. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira**. 2010. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2010.

CARNEIRO, A. C. O.; OLIVEIRA, A. C. **Produção Sustentável de Carvão Vegetal**. 39p. v1. 1. ed. Viçosa - MG, 2013.

CI FLORESTAS. 2016. Carvão Vegetal Reúne Especialistas em Minas. 2016. Disponível em: [www.ciflorestas.com.br/conteudo.php?tit=carvao\\_vegetal\\_reune\\_especialistas\\_em\\_minas&id=12667](http://www.ciflorestas.com.br/conteudo.php?tit=carvao_vegetal_reune_especialistas_em_minas&id=12667). Acessado em: 11 de dez. 2016.

OLIVEIRA FILHO, D.; TEIXEIRA, C. A.; SILVA, J. S.; REIS, H. O.; VOROBIEFF, C. L. Resfriamento rápido de fornos de carbonização. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1023-1032, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v30n6/a04v30n6>. Acessado em: 30 de out. 2018.

DPC Processos Termoquímicos. Disponível em: <http://dpcbiomassa.com.br/>. Acessado em: 30 de out. 2018.

FÁVERO, G. C.; VALLE, R. M.; DUARTE, T. M. Análise térmica de um sistema de combustão de alcatrão em fornos retangulares para secagem da madeira. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007, Cusco. **Anais...**, Peru: PUCP, 2007, 343-347.

FAO. Faostat. Statistics Database. Disponível em: <http://www.fao.org/statistics/en>. Acessado em 25 de jul. 2018.

FERREIRA, L. H. C. **Desenvolvimento de uma retorta metálica para carbonização da madeira**. 1988. 47p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 1988.

GIARDINI, L. F. M. R.; TIBIRIÇA, A. M. B. Modelagem e simulação cfd de trocador de calor para condicionamento de ar. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 2, n. 4, p. 040-042, 2016. Disponível em: <https://jcec.ufv.br/index.php/req2/article/view/140/166>. Acessado em: 30 out. 2018.

HARD RAIN PROJECT. 2018. Roadmap to a sustainable future. Disponível em <http://www.hardrainproject.com/hrpl?n=6247>. Acesso: 05 de jun. 2018.

IBÁ – Indústria brasileira de árvores. **Relatório Anual: ano base 2016**. 80 p. Brasília, 2017. Disponível em: [https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf). Acessado em: 29, out. 2018.

IEA – International Energy Agency. **Key world energy statistics: 2017**. 97 p. Paris, 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>. Acessado em: 29, out. 2018.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Pesquisador do INPE desenvolve sistema para eliminar fumaça das carvoarias. 2008. Disponível em: [http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod\\_Noticia=1690](http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=1690). Acessado em: 30 de out. 2018.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: **Produção e utilização do carvão vegetal**. 1982. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. p. 75-89. 1982.

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

MINAS GERAIS. **Lei nº18.365**, de 01 de setembro de 2009. Altera a Lei nº 14.309, de 19 de junho de 2002, que dispõe sobre as políticas florestal e de proteção à biodiversidade no Estado, e o art. 7º da Lei Delegada nº 125, de 25 de janeiro de 2007, que dispõe sobre a estrutura orgânica básica da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMAD, e dá outras providências.

OLIVEIRA, A.C. CARNEIRO, A.C.O.; BARCELOS, D.C.; RODRIGUEZ, A.V.; AMARAL, B.M.N.; PEREIRA, B.L.C. Resfriamento artificial em fornos retangulares para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 39, n. 4, p. 769-778. 2015.

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

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. 74p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2012.

ONDATEC, 2018. Tecnologia do carvão limpo. Disponível em: <http://www.ondatec.com/>. Acessado em 25 de jul. 2018.

PIMENTA, A.S.; BARCELLOS, D.C. **Como produzir carvão para churrasco**. Viçosa: Centro de Produções Técnicas, 2000. 76p.

PINHEIRO, P.C.C.; SAMPAIO, R.S.; REZENDE, M.E.A; VIANA, E.A. **Produção de carvão vegetal: Teoria e Prática**. 2006. Belo Horizonte - MG. 1ª edição, 120p.

PRÓVARVÃO - Programa de qualificação e certificação do carvão vegetal no estado de São Paulo. **Relatório descritivo SEBRAE**. São Paulo. 2002. 63p.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *Eucalyptus spp***. 2004. 115p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2004.

REVISTA FATOR BRASIL, 2007. Carvão vegetal. Disponível em: [http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver\\_noticia.php?not=9429](http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=9429). Acessado em 28 de jul. 2018.

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental**. Belo Horizonte, 2006. Curso: Fundamentos e práticas da carbonização da biomassa, ministrado durante o Seminário: Prática, logística, gerenciamento e estratégias para o sucesso da conversão da matéria lenhosa em carvão vegetal para uso na metalurgia e indústria.

SABINO, Millena Gomes; TIBIRIÇÁ, Álvaro Messias Bigonha. Modelagem e simulação cfd de trocadores de calor compactos tipo tubo aletados com aletas modificadas. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, [S.l.], v. 4, n. 2, p. 0214-0219, jul. 2018. Disponível em: <https://jcec.ufv.br/index.php/req2/article/view/361/495>. Acessado em: 31 out. 2018.

SÃO PAULO. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. **Resolução nº 40 SAA**, de 14 de dezembro de 2015. Diário Oficial do Poder Executivo, São Paulo, SP (2015 dez).

SANTOS, ÉZIO. Queima de Gases da Carbonização e Recuperação de Licor Piro lenhoso - Aperam BioEnergia, 31p. 2014. In: III Fórum Nacional Sobre Carvão Vegetal. Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte - MG. Disponível em: <http://www.sif.org.br/evento/forum-nacional-sobre-carvao-vegetal>. Acessado em: 19 set. 2017.

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

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos Estudos - CEBRAP**, São Paulo, n. 79, p.47-69, nov. 2007.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: OLIVEIRA, J. T. S; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Jerônimo Monteiro – ES. 2008. p. 196-246.



### **3. DESEMPENHO DE UM FORNO EXPERIMENTAL DE CARBONIZAÇÃO COM PRODUTIVIDADE INCREMENTADA PELO RESFRIAMENTO EXTERNO DO CARVÃO VEGETAL**

#### **Resumo**

Este capítulo objetivou a análise de uma nova metodologia para se elevar a produtividade de carvão vegetal em fornos de alvenaria. Para tanto, foi idealizado um sistema que possibilitasse o resfriamento acelerado do carvão vegetal, tendo sido desenvolvido um forno que promovesse o rápido descarregamento do carvão, ainda em altas temperaturas, seguido por sua imediata proteção em um container metálico. Na avaliação do forno foram determinadas as curvas térmicas e os tempos da carbonização. Além disso foram analisados os rendimentos gravimétricos e as características do carvão vegetal obtido. O design do forno possibilitou o rápido descarregamento do carvão vegetal, por gravidade, desvinculando o contato humano direto com o carvão nesta etapa. Assim sendo, o arrefecimento acelerado resultou em redução significativa do tempo total da carbonização. As curvas térmicas delineadas promoveram bons rendimentos de carvão vegetal, porém, ainda com variações, indicando a necessidade de mais estudos e a possibilidade de ganhos. As características do carvão foram adequadas tanto para cocção de alimentos quanto para uso siderúrgico, exceto pela baixa densidade a granel, derivada da baixa densidade da madeira utilizada nos testes.

Palavras-chave: Elevação da produtividade; Redução do ciclo; Arrefecimento acelerado

#### **Abstract**

This chapter aimed at the analysis of a new methodology to raise the productivity of charcoal in masonry kilns. For this purpose, a system was developed to enable the accelerated cooling of the charcoal. A kiln was developed to promote the rapid unloading of the charcoal, even at high temperatures, followed by its immediate protection in a metal container. In the evaluation of the kiln the thermal curves and the carbonization times were determined. In addition, the gravimetric yields and charcoal characteristics obtained were analyzed. The kiln design made it possible to rapidly discharge the charcoal, by gravity, disassociating direct human contact with the charcoal at this stage. Thus, accelerated cooling resulted in a significant reduction in the total carbonization time. The delineated thermal curves promoted good yields of charcoal, but still with variations, indicating the need for further studies and the possibility of gains. The charcoal characteristics were suitable for both food cooking and steel use, except for the low bulk density, derived from the low density of the wood used in the tests.

Keywords: Productivity increase; Cycle reduction; Accelerated cooling



### 3.1. Introdução

O carvão vegetal é uma importante fonte energética que pode ser utilizada no lugar do gás liquefeito de petróleo e do gás natural na cocção de alimentos, além de ser substituto do carvão mineral na produção de ferro-gusa, aço e ferro-ligas. O Brasil sobressai como o maior produtor e, simultaneamente, maior consumidor de carvão vegetal do mundo, o que se revela nas 5,2 milhões de toneladas produzidas em 2017 (BRASIL, 2018). No ano de 2016 foram consumidos mais de 21,46 milhões de metros cúbicos de madeira para produção de carvão (IBÁ, 2017).

É importante lembrar que, apesar dos números apresentado pelo setor, grande parte do carvão vegetal ainda é oriundo de fornos rudimentares, com baixa capacidade volumétrica e ciclos longos (BRITO, 2011). A maior parte da produção é realizada por pequenos e médios produtores, em fornos arcaicos e de baixo rendimento (OLIVEIRA et al., 2013). A pouca adoção de sistemas otimizados pode ser em função, principalmente, dos elevados custos de implementação, atrelados aos paradigmas da produção e ao desconhecimento de outras tecnologias e suas respectivas viabilidades.

Também é importante salientar que nos fornos de alvenaria a etapa de resfriamento do carvão vegetal tem superior ao tempo de conversão da madeira em carvão. Oliveira et al. (2015) descrevem que o tempo de resfriamento de um forno retangular variar de oito a quatorze dias, levando mais tempo que a etapa de conversão. As características da madeira utilizada são preponderantes no estabelecimento da condução e do tempo necessário para carbonização, determinantes na qualidade do produto final. Sendo que há pouca margem para redução de tempo na etapa de conversão da madeira em carvão, diante da consideração de que ciclos menores poderiam elevar a quantidade produzida, surge um grande desafio, o arrefecimento acelerado do carvão produzido.

Algumas iniciativas para resfriamento artificial de fornos já foram realizadas por empresas e instituições de pesquisa, focando principalmente em trocadores de calor, para transferir a energia térmica dos fornos para o ambiente mais rapidamente (OLIVEIRA et al., 2015). Os trocadores, contudo, ainda se encontram em estudo e não foram adotados amplamente no país. Segundo Santos (2013), dentre os protótipos avaliados, alguns apresentaram viabilidade técnica, porém, não se viabilizaram do ponto de vista econômico. Este mesmo autor menciona que o sistema, composto pelas paredes do forno e pela massa

de carvão vegetal, concentram uma grande quantidade de energia a ser dissipada ao final da carbonização, sendo que as paredes de alvenaria, por apresentarem características isolantes, dificultam esta transferência de calor.

Atualmente, a maioria dos fornos resfria naturalmente, pela simples dissipação do calor no ambiente. A alternativa mais aplicada para tentar acelerar o resfriamento é a aplicação da “barrela”, que consiste na pulverização da mistura de água e barro pulverizada nas paredes dos fornos. Neste caso, a água evaporada removeria parte da energia contida nas paredes e, as partículas do barro dissolvidas, vedariam possíveis fissuras, impedindo a passagem de oxigênio para o interior do forno. Oliveira et al. (2015), entretanto, afirmam que a “barrela”, além de pouco tecnicizada, implica em ganho insignificante no tempo de resfriamento dos fornos retangulares, apresentando apenas efeito sobre a vedação.

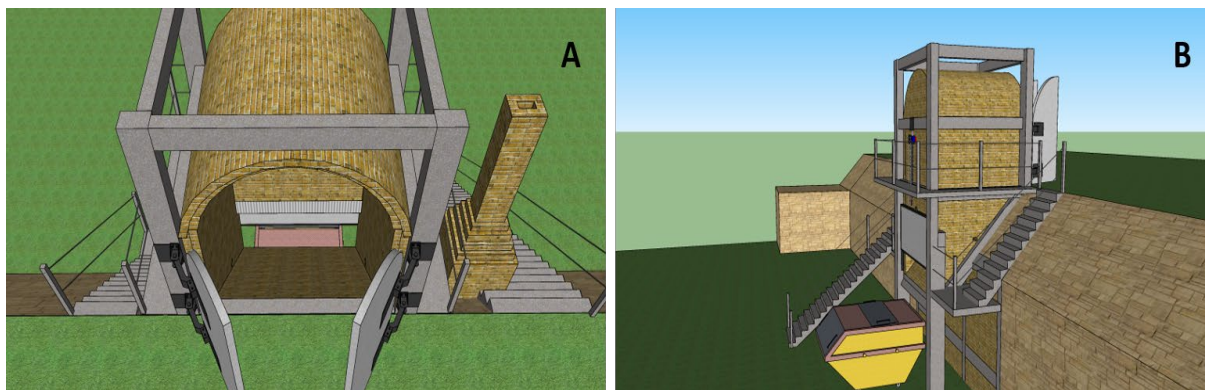
Neste contexto, compreende-se que o resfriamento dos fornos de carbonização construídos em alvenaria é um desafio que merece atenção especial, como aspecto relevante na definição de artifícios que possam contribuir para o aumento da produtividade.

A hipótese levantada foi a de que é possível se reduzir o tempo de carbonização em fornos de alvenaria mediante o resfriamento acelerado da massa de carvão produzida. Deste modo, idealizou-se um sistema que permitisse o descarregamento rápido do carvão por gravidade, ainda em altas temperaturas, sendo seu resfriamento efetuado externamente ao forno, o disponibilizando para início de uma nova carbonização.

### **3.2. Material e métodos**

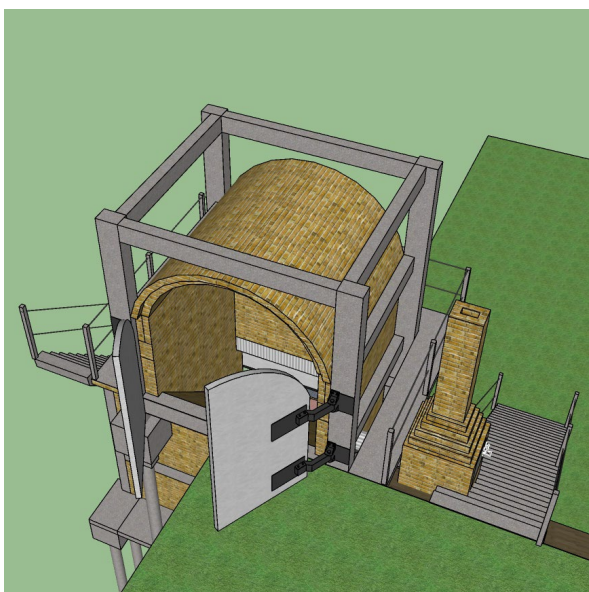
O projeto foi implementado em uma área experimental localizada no município de Barra do Chapéu, São Paulo. O clima na região é do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen. Utilizou-se madeira de plantios seminais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*, de 6,5 e 5,5 anos, respectivamente, provenientes de plantios da área experimental.

Diferentemente dos modelos conhecidos, o forno foi desenvolvido com o piso angulado em 45°, visando propiciar o escoamento rápido do carvão vegetal, para seu descarregamento em altas temperaturas, de modo a minimizar o tempo de contato com oxigênio do ar atmosférico e evitar a sua combustão. Esta inclinação foi determinada por meio de testes preliminares e deu nome ao protótipo “RI-01” de “Forno Rampa”. A Figura 13 ilustra esquematicamente o sistema.

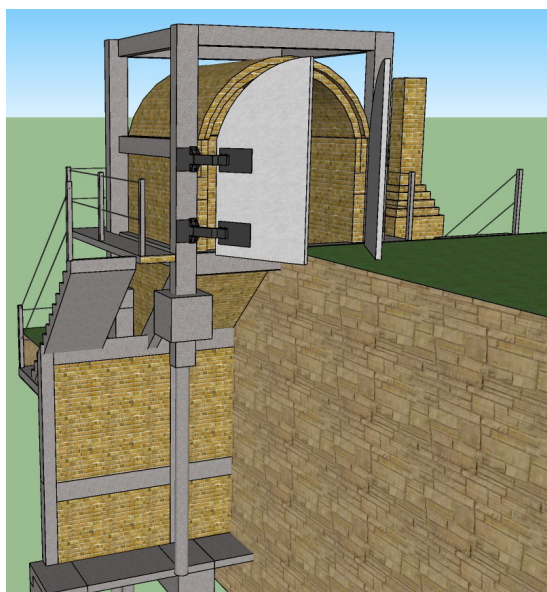


**Figura 13.** Ilustração esquemática do projeto. Vista superior frontal (A); vista oblíqua posterior (B).

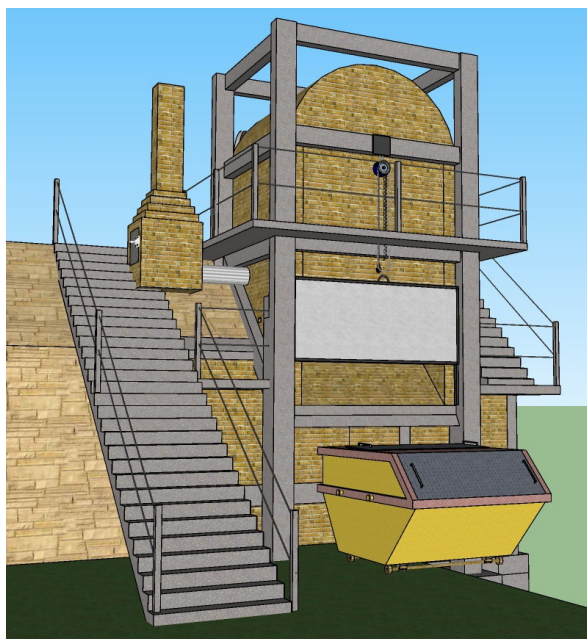
O forno foi construído com volume interno de  $16,55 \text{ m}^3$ , com altura total da estrutura de concreto de 7,75 m. Suas medidas internas foram de 2,30 m de largura, 2,20 m de comprimento, altura interna frontal livre de 2,4 m e altura interna posterior livre de 4,80 m. A capacidade máxima de enformamento foi de aproximadamente 13,24 estéres de lenha (st), correspondentes a 80% da ocupação do volume interno total do forno. As Figuras 14 a 17 ilustram o sistema formatado com objetivo de reduzir o ciclo de carbonização, por meio da remoção expedita do carvão vegetal por gravidade e do seu resfriamento externo em container metálico.



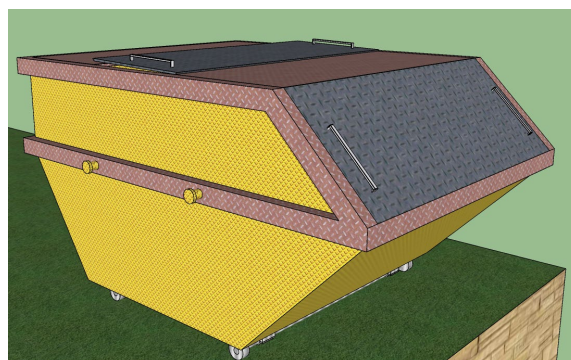
**Figura 14.** Vista esquemática superior do forno.



**Figura 15.** Vista esquemática anterior do forno.



**Figura 16.** Vista esquemática posterior do forno.



**Figura 17.** Esboço do container metálico.

Foi construída uma estrutura em concreto armado, responsável pela sustentação das portas frontais, da tampa traseira e de toda estrutura de alvenaria. Então foi feito um contra-piso de lajotas e vigotas pré-fabricados, cobertos por concreto armado de 10 cm de espessura, o qual foi revestido de tijolos cerâmicos maciços com dimensões de 19 x 9 x 4,5 cm.

A argamassa para assentamento dos tijolos foi formulada a partir de testes práticos com diferentes proporções de seus componentes, em função do solo disponível no local. As diferentes formulações testadas foram submetidas a altas temperaturas e avaliadas empiricamente. O objetivo foi estabelecer uma argamassa que oferecesse aderência entre os tijolos e resistência às amplitudes térmicas, apresentando o mínimo de fissuras possíveis, para assegurar uma melhor sustentação e vedação. Dentre as argamassas testadas foi selecionada aquela que apresentou a melhor performance, consistindo dos seguintes componentes nas respectivas proporções: 9 latas de 18 litros contendo solo argiloso local peneirado, 3 latas de 18 litros de areia média lavada e peneirada, 20 kg de cimento, 10 kg de açúcar, e água em quantidade suficiente para deixá-la homogênea e maleável para o assentamento dos tijolos.

A copa e paredes foram construídas com tijolos cerâmicos maciços, revestidas por um fino reboco externo interno do forno de 2 a 5 mm, e externo de 10 mm, e concedendo a estrutura de alvenaria a espessura total aproximada de 20,35 cm.

Para promoção de isolamento térmico do concreto armado, a viga de sustentação da parede posterior foi revestida por manta cerâmica ( $128 \text{ kg m}^{-3}$ ), a qual foi recoberta por chapa inox de 2 mm, fixada nas paredes por porcas e parafusos. A chapa teve a função de proteção da manta contra choques mecânicos e abrasão pelo contato com a madeira e carvão.

As portas frontais tiveram as dimensões de 2,48 m de altura, 1,23 m de largura e 0,1 m de espessura, tendo sido projetadas de modo a permitir o enformamento mecanizado. Elas foram construídas utilizando formas de madeiras confeccionadas no local. As formas foram preenchidas até a metade com concreto de traço para resistência FCK25, substituindo-se a brita por cinasita (vermiculita expandida), devido ao seu caráter mais isolante. Então foi colocada uma tela metálica soldada de 10 por 10 cm (bematel - Q196), para auxiliar na sustentação, depois as formas acabaram de ser preenchidas. As estas telas e aos vergalhões dos pilares frontais foram fixadas chapas de espera (de 4 mm de espessura por 20 cm de altura e 30 cm de comprimento), aonde foram posteriormente soldadas as dobradiças da porta do tipo gonzo (pinos cilíndricos).

Na parte interna das portas foi instalada manta cerâmica com 50,8 mm de espessura e densidade de  $128 \text{ kg/m}^3$ , fixada com parafusos e barras chatas metálicas, para aumentar o isolamento térmico.

A tampa traseira, por onde foi feito a retirada do carvão vegetal do forno, foi confeccionada de maneira semelhante as portas, porém o marco de cantoneira metálica do tipo “u” serviu como forma. As suas dimensões foram de 120 x 230 x 7 cm (altura x comprimento x espessura), que resultaram em um peso estimado de 450 kg. A tampa traseira foi concebida para movimentar na vertical pelo uso de uma talha de correntes manual, fixada numa das vigas superiores. Ao final do processo, ao se erguer a tampa, era liberado o escoamento do carvão produzido.

Ao longo das paredes foram instalados 15 poços metálicos de fundo ocluso, para monitoramento das temperaturas com pirômetro (termômetro infravermelho). Os poços foram constituídos em cilindros metálicos de aço carbono com fundo fechado em aço inox, dado sua maior condutibilidade térmica e maior resistência a deformação e deterioração em altas temperaturas. Os poços foram dispostos na estrutura de alvenaria, a saber: 4 posicionados na copa, 5 em cada uma das paredes laterais e 1 na parede posterior do forno. As medições das temperaturas procederam a cada duas horas.

Para oxigenação do forno foram deixadas duas aberturas (12 por 8 cm) para entrada de ar atmosférico, uma em cada parede lateral e ao nível do piso, centralizadas em relação as portas e fundo do forno. Além dessas aberturas, uma terceira de mesmas proporções foi posicionada no alto da parede posterior do forno, 15 cm abaixo da copa, para auxiliar na ignição da lenha enforada.

A exaustão dos gases foi efetuada na lateral direita do forno, distante 40 cm da porta frontal, ao nível do piso. O gás da carbonização foi guiado por um duto de aço carbono de 2 mm de espessura, 0,25 m de diâmetro interno e 1 m de comprimento, contendo válvula borboleta para controle do fluxo, até a fornalha. A fornalha foi construída em tijolos maciços cerâmicos. Na sua base foi feita a câmara de combustão de 0,4 m de largura por 0,5 m de comprimento e 0,8 m de altura, com paredes de espessura de 20 cm. A câmara de combustão foi dotada de uma porta metálica quadrada com aresta de 0,35 m, por onde era colocado a lenha para combustão, a base da porta foi deixada uma entrada de ar de quadrada de 10 cm por 10 cm, para fornecer oxigênio para combustão. Acima desta câmara procedeu-se o estrangulamento e, sobre este, instalou-se uma chaminé de 2 m de altura, com 0,2 m por 0,2 m de dimensões internas, e parede com 0,10 cm de espessura.

O container para o resfriamento externo do carvão foi confeccionado a partir de uma caçamba estacionária de 7 m<sup>3</sup>, de medidas padronizadas pela NBR 14728 (ABNT, 2005). A caçamba teve chapas metálicas soldadas na parte superior para sua oclusão, de modo a evitar a entrada de ar e oxigenação do carvão quente depositado. Foram instaladas canaletas metálicas de 1 cm de largura e 0,5 cm de profundidade na caçamba, que serviram como encaixes das tampas. A caçamba continha duas tampas, uma superior, por onde adentrava o carvão, e outra posterior, para remoção. A canaleta superior foi preenchida por areia para melhor vedação, aonde a tampa era encaixada para fechamento do container. A tampa posterior foi vedada com argamassa de solo argiloso e água. Neste container foram instaladas rodas metálicas maciças para facilitar a sua movimentação.

Na Tabela 1 são apresentados os materiais utilizados para construção e as respectivas quantidades.

**Tabela 1.** Materiais utilizados na construção do forno

<b>Estrutura</b>	<b>Item</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	
<b>Concreto armado</b>	Madeira para formas	m <sup>3</sup>	2	
	Pregos	kg	4	
	Blocos - muro de arrimo	unidade	1000	
	Vergalhão 1/4" - 6,3 mm (12 m)	barra	10	
	Vergalhão 3/8" / 16mm (12 m)	barra	12	
	Cimento	saco 50kg	30	
	Estribos	unidade	250	
	Arame Recozido	kg	3	
	Areia	m <sup>3</sup>	10	
	Laje treliçada (piso forno e passarela)	m <sup>2</sup>	15	
<b>Alvenaria</b>	Brita número 1	m <sup>3</sup>	10	
	Malha metálica piso - Tela 196	m <sup>2</sup>	6	
	Tijolos cerâmicos maciços	unidade	8000	
	Areia	m <sup>3</sup>	6	
	Açúcar	kg	120	
	Cimento	saco 50kg	5	
	<b>Portas frontais</b>	Dobradiças - gonzo	unidade	4
		Trinco	unidade	1
		Malha metálica	m <sup>2</sup>	6
		Areia	m <sup>3</sup>	0,4
Cimento		saco 50kg	2,5	
Vermiculita expandida (cinasita)		m <sup>3</sup>	0,4	
Manta Cerâmica 2"		m <sup>2</sup>	6	
Parafuso - fixação da manta		unidade	36	
<b>Tampa traseira</b>	Barra chata 6m - 1 x 3/16" - fixação manta	barra	8	
	Moldura metálica (perfil u)	unidade	1	
	Malha metálica	m <sup>2</sup>	3	
	Areia	m <sup>3</sup>	0,2	
	Cimento	saco 50kg	1	
	Vermiculita expandida (cinasita)	m <sup>3</sup>	0,2	
	Cantoneira batente (2,3 m)	m	1	
Cantoneira canaletas guias (1,4m)	m	2		

Diante de possíveis influências das características da madeira e do clima local, visando estabelecer referência para se verificar a eficiência do novo sistema, foi construído um segundo forno, do tipo circular de superfície. Este forno foi elaborado em alvenaria de tijolos cerâmicos maciços e argamassa do solo local e areia média lavada, na proporção de 2:1. O

projeto implantado foi descrito por Oliveira et al. (2013), caracterizado por 3 m de diâmetro interno e 2,2 m de altura central, apresentando volume interno total aproximado de 12 m<sup>3</sup>. A opção por este modelo como parâmetro foi em função da sua consolidação na produção de carvão vegetal, diante da sua grande difusão entre produtores. Além disso, este modelo já possui condução definida, tendo sido aplicados os procedimentos para máximos rendimentos e qualidade do carvão descritos por Lana (2014).

As temperaturas dos fornos foram monitoradas no período compreendido entre 7:30 e 22:30 horas, sendo este procedimento adotado devido a indisponibilidade de mão de obra para acompanhamento 24 horas, e com intuito de se aproximar o máximo possível da realidade dos pequenos e médios produtores. Assim sendo, foi adotada uma oxigenação mais restrita durante o período noturno, para evitar elevação demasiada de temperatura e excesso de queima da carga, tendo como objetivo assegurar boa produtividade e qualidade do carvão, mesmo que isso implicasse em uma maior delonga do processo.

Foram realizadas 25 carbonizações preliminares com o objetivo de estabelecer o processo operacional do sistema, em busca do menor tempo de ciclo, maior taxa de conversão e melhor qualidade do carvão. Depois, a partir dos melhores resultados, realizou-se mais 3 carbonizações para obtenção dos parâmetros de desempenho do sistema desenvolvido.

Ressalta-se que durante os testes preliminares avaliou-se os seguintes aspectos, a saber: local e procedimento da ignição, quantidade e posicionamento das entradas de ar atmosférico, definição da condução por pirometria, determinação da curva ideal de carbonização, determinação do local de exaustão dos gases do forno e estabelecimento da metodologia de descarregamento e resfriamento.

### **3.2.1. Caracterização da madeira**

As propriedades da madeira foram determinadas a partir de cinco árvores representativas dos diâmetros médios dos plantios de cada espécie. Destas árvores foram retirados dois discos com espessura aproximada de 5 cm cada, as alturas de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do fuste comercial. As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Química, Celulose e Energia do Departamento de Ciências Florestais, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (LQCE/ESALQ/USP). O teor de extrativos totais foi determinado de acordo com a NBR 14853 (ABNT, 2010), substituindo o etanol/benzeno por etanol/tolueno; o teor de



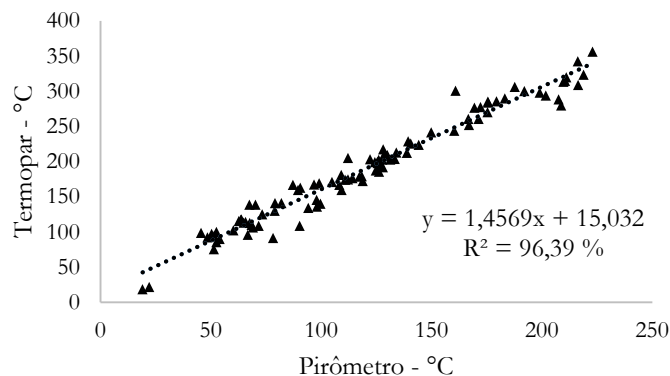
lignina total, dado pela soma da lignina insolúvel, foi aferida conforme descrito pela TAPPI T 222 om-02 (TAPPI, 2002), e solúvel, determinada conforme Goldschmid (1971). O percentual de cinzas foi determinado de acordo com a NBR 8112 (ABNT, 1986). Por diferença obteve-se o teor de carboidratos totais.

Para as carbonizações foram utilizadas toras de madeira de um metro de comprimento. Diante de possíveis influências de variações da umidade da madeira, em função do tempo, local de secagem, posição nas pilhas e dos diâmetros, a cada ciclo se determinou a umidade pelo método da secagem em estufa, seguindo as normas da NBR 14929 (ABNT, 2002), e a densidade básica pela aplicação da NBR 11941 (ABNT, 2003). O diâmetro médio das toras foi determinado pela mensuração direta com régua graduada.

### 3.2.1. Carbonização da madeira

A condução das carbonizações foi feita com a utilização de pirômetro com temperatura aferidas a cada duas horas, seguindo as fases que são apresentadas na Tabelas 2. As fases contendo a faixa de temperatura ideal e tempo de permanência foram definidas com base em experimentos prévios de Oliveira (2012) e Lana (2014), e adaptadas ao modelo de forno.

Nos testes preliminares se determinou a diferença entre a temperatura aferida pelo pirômetro nos poços e a temperatura interna aferida por termopar do tipo “k”, para eliminar desvios de calibração do pirômetro. A partir dos dados foi realizada a regressão linear apresentada na Figura 18, que apresenta o gráfico, a equação do modelo, a linha de tendência e o coeficiente de determinação. É possível visualizar uma forte correlação, alto coeficiente de determinação, entre as temperaturas mensuradas em cada método.



**Figura 18.** Correlação entre as temperaturas do termopar e pirômetro.

Observa-se que em temperaturas mais elevadas a uma diferença entre as temperaturas se acentua, ou seja, o pirômetro apresentou menores valores para temperaturas mais acentuadas no interior do forno. O desconhecimento deste fato poderia incorrer em uma condução inadequada, com temperaturas superiores às desejadas. Esta diferença provavelmente se deve ao fato de que os pirômetros de radiação, em especial, são calibrados em relação a um corpo negro, diferente da superfície espelhada do aço inox utilizado nos poços de aferição de temperatura. Neste caso um fator de correção deve ser empregado quando a medição é realizada em um corpo com emissividade diferente. Para isso deve-se conhecer a emissividade da superfície que está sendo medida, o que é um fator de incerteza, visto que a emissividade varia com o estado da superfície, temperatura, etc. Assim, adotou-se a correlação acima para construção das faixas de temperatura para as mensurações com o pirômetro, apresentadas na Tabela 2, que expões as temperaturas médias para os poços das paredes superiores e copa, mais distantes das entradas de ar, bem como os tempos de duração para cada fase de carbonização.

**Tabela 2.** Temperaturas e tempos adotados para as carbonizações

<b>Fase</b>	<b>Temperaturas para pirometria</b>	<b>Temperaturas internas termopar</b>	<b>Duração em horas</b>
<b>1</b>	60 - 100 °C	102 – 160 °C	24
<b>2</b>	100 – 175 °C	160 – 270 °C	12 – 16
<b>3</b>	175 – 250 °C	270 – 380 °C	24
<b>4</b>	250 – 265 °C	380 – 400 °C	10 – 16

### **3.2.1. Procedimentos para carbonização**

Antes de se iniciar o carregamento de cada carbonização realizava-se uma inspeção visual do forno para que, quando necessário, se efetuasse alguma manutenção na estrutura de alvenaria para garantir a vedação. Também era procedida a limpeza do batente da tampa traseira e, posteriormente, assentada nova argamassa feita de solo argiloso local e água para

que, ao ser abaixada, a tampa obtivesse completa vedação em sua base. Após este procedimento, esta mesma argamassa de barro era utilizada para vedação de todos os espaços vazios entre a tampa e o forno, aplicada em todo entorno da tampa.

Uma das principais vantagens do projeto foi a possibilidade de mecanização do carregamento da madeira com o auxílio de uma garra florestal. Neste caso, por se tratar de um estudo, atrelado ao pequeno volume interno do forno experimental e diante do elevado custo do maquinário demandado, optou-se pelo carregamento manual. O arranjo da lenha foi realizado na horizontal, como no enforamento mecanizado. A madeira foi acomodada sobre travessieiros (toras de madeiras posicionadas em sentido contrário para permitir a circulação de gases no interior do forno). A disposição até o nível do solo foi feita na transversal. Acima do nível do solo a madeira foi posicionada no sentido longitudinal, onde as toras empilhadas, caso se acomodassem devido à gravidade, ficassem apoiadas nas paredes laterais. Esta configuração permitiu a melhor ocupação do forno.

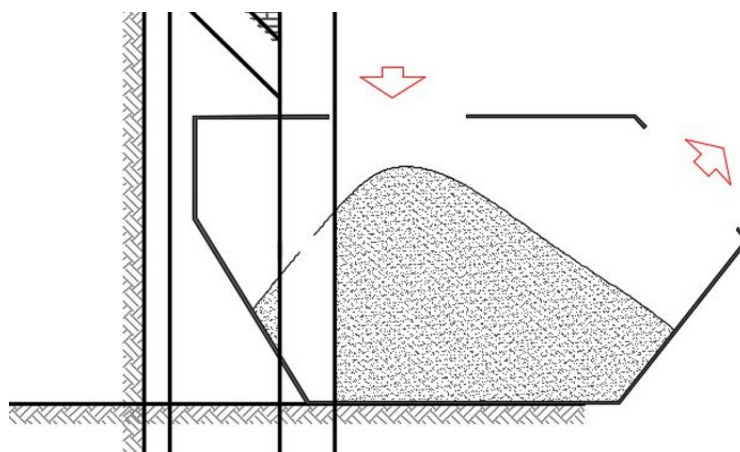
Após o carregamento foi efetuado o fechamento de uma das portas, aplicando argamassa de barro e água em suas bordas. A outra permaneceu aberta para ignição da carbonização.

Em seguida foi feita a combustão de resíduos de madeira na fornalha, iniciando a sucção dos gases do interior do forno. Simultaneamente foi feita a ignição da lenha enforada pela porta frontal, mediante a combustão de uma pequena pilha de galhos finos e cascas secas, posicionados ao centro e mais ao fundo do forno. O local da ignição foi escolhido em função da maior quantidade de lenha contida na porção posterior do forno, devido ao piso angulado, e pela maior distância à saída dos gases, onde finaliza a carbonização. Todas as aberturas para admissão de ar atmosférico permaneceram completamente abertas no início do processo por cerca de 3 horas, assim como a abertura superior posicionada ao topo na parede posterior, que auxiliou na retirada da fumaça durante a ignição. A abertura superior era vedada completamente após este período. As entradas de ar nas bases das paredes laterais eram obstruídas parcialmente por tijolos, de acordo com as temperaturas aferidas no momento. Este controle de oxigenação foi responsável por controlar o progresso da temperatura.

Ao final da carbonização todas as entradas de ar atmosférico foram obstruídas completamente, por duas horas, com objetivo de redução da temperatura da massa de carvão, minimizando regiões de carvão incandescente, em alta temperatura. Então, a tampa

posterior do forno foi erguida com uso da talha manual de correntes, o que deu sequência a descarga dos produtos para o container metálico.

O container foi posicionado logo abaixo do forno, parcialmente inserido sob o piso, em cerca de 70 centímetros (Figura 19), com a abertura para recebimento do carvão logo abaixo da tampa do forno. Apesar do volume suficiente e do posicionamento estratégico, não foi possível o aproveitamento total do interior do container, o carvão extravasou mesmo havendo regiões do container ainda não preenchidas, localizadas nas porções superiores mais afastadas do local de entrada do carvão. Isto ocorreu em virtude da forma geométrica assumida pela pilha de carvão descarregado, ilustrada esquematicamente na Figura 19.



**Figura 19.** Disposição do carvão vegetal no interior do container.

O enformamento médio foi de 8 estéreis de lenha para as avaliações do sistema. Esta quantidade propiciou volume de carvão vegetal suficiente para ser acomodado no interior do container.

### 3.2.2. Perfil térmico do forno

Para traçar o perfil térmico de cada carbonização as temperaturas foram aferidas a cada duas horas nos poços metálicos, com auxílio de um pirômetro (termômetro digital infravermelho), com amplitude de mensuração variando de -50 a 550°C. De posse dos dados foram obtidas as médias das temperaturas para copa, porção superior de cada parede lateral, porção inferior de cada parede lateral e parede posterior.

### 3.2.3. Perfil térmico do container

Para determinação do perfil térmico de resfriamento coletou-se a maior temperatura registrada pelo pirômetro em cada uma das laterais e na parte superior do container.

### 3.2.4. Estudo dos tempos e rendimento do processo

Para avaliar a redução de tempo dos ciclos de carbonização foram aferidos os tempos das etapas de conversão, resfriamento e tempo total. Após verificadas as pressuposições de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Levene,  $\alpha = 0,05$ ), procedeu-se o teste T de Student ( $\alpha = 0,05$ ) para comparação entre os tempos dos modelos de fornos.

Para determinação dos rendimentos mássicos em carvão vegetal, atíços (madeira semicarbonizada) e finos (partículas de granulometria inferior a 20 mm), foi utilizada a fórmula matemática apresentada na Equação 1.

$$RGx = 100 \times \frac{Mx}{Mms} \quad (\text{eq. 1})$$

Em que:

x = produto (carvão vegetal, atíços ou finos)

RGx = rendimento gravimétrico do produto x, em %

Mx = massa do produto x, em kg

Mms = massa de madeira seca enfiada, em kg

A massa de madeira seca foi obtida indiretamente por meio da quantificação do volume de madeira enfiada e da densidade básica. A mesma metodologia estatística utilizada no estudo dos tempos foi aplicada para comparação dos rendimentos.

### 3.2.5. Caracterização do carvão vegetal

Após cada ciclo de produção, ao longo da retirada do carvão do container e seu ensacamento, cerca de 5 kg de carvão vegetal eram recolhidos para as análises de suas características. Os parâmetros avaliados do carvão vegetal e as respectivas normas aplicadas foram:

- Análise química imediata para determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, realizada segundo a norma NBR 8112 (ABNT, 1986)
- Densidade a granel, adaptada da NBR 6922 (ABNT, 1981), utilizando uma caixa com medidas de 30 x 20 x 10 cm (comprimento x largura x profundidade)
- Poder Calorífico Superior, de acordo com os procedimentos preconizados na NBR 8633 (ABNT, 1984), determinado em um calorímetro digital IKA C-2000
- Teor de umidade, seguindo os princípios da NBR 14929 (ABNT, 2002)
- Friabilidade, classificação do carvão vegetal quanto a geração de finos, de acordo com os procedimentos descritos por Oliveira et al. (1982).

### 3.2.6. Avaliações estruturais do forno

Após o período experimental o forno foi inspecionado para averiguação de possíveis danos em sua estrutura, no intuito de avaliar a adequação dos materiais construtivos.

## 3.3. Resultados e discussão

### 3.3.1. Características da madeira

Na Tabela 3 são apresentados os percentuais dos valores médios da composição química das madeiras utilizadas nas carbonizações.

**Tabela 3.** Valores médios da composição química estrutural das madeiras

Espécie	Extrativos (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Carboidratos (%)
<i>E. grandis</i>	3,6 (0,6)	22,4 (2,8)	0,59 (0,03)	73,7
<i>E. saligna</i>	2,2 (0,5)	22,0 (1,8)	0,63 (0,04)	75,1
Valor médio	2,9	22,2	0,61	74,4

Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão amostral.

De maneira geral, as composições de ambas espécies utilizadas foram semelhantes. Os teores de extrativos foram próximos aos encontrados na literatura para o gênero, sendo que quanto menor o teor de extrativos melhor a madeira para produção de carvão, uma vez que a maioria destes compostos se degradam a temperaturas menores (PEREIRA, 2012).

O teor de lignina da madeira foi inferior ao desejado para produção de carvão vegetal, recomendado acima de 28% (Pereira et al., 2013). Oliveira et al. (2010) ressaltam que madeiras com altos teores de lignina produzem carvões com melhores propriedades mecânicas, maiores teores de carbono fixo e menores teores de voláteis e cinzas.

As madeiras do gênero *Eucalyptus*, comumente, possuem teor de cinzas inferior a 1% (BARCELLOS et al., 2005). Quanto menos cinzas melhor, já que reduzem o poder calorífico, uma vez que não participam da combustão. Rocha (2011) afirma que altos teores de cinzas podem comprometer o uso do carvão como, por exemplo, para fabricação de ferro-ligas especiais, que se tornam menos maleáveis e mais susceptível a trincas e fissuras.

Madeiras com menores teores de carboidratos são desejáveis para produção de carvão vegetal, já que apresentam menor resistência a degradação térmica, não contribuindo significativamente no rendimento gravimétrico (YANG et al. 2007). Além disso, este teor é inversamente proporcional ao teor de lignina, que, dentre os componentes fundamentais da madeira, são mais estáveis termicamente devido sua estrutura condensada, sendo creditado a lignina a maior parte do carvão vegetal formado (WANG et al., 2009).

Na Tabela 4 são apresentadas as características da madeira utilizada em cada carbonização.

**Tabela 4.** Umidade, densidade básica e diâmetro médio da madeira

<b>Carbonização</b>	<b>Umidade (% b.s.)</b>	<b>Densidade básica (g cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Diâmetro médio (cm)</b>
<b>1</b>	47,6	397,1	12,8
<b>2</b>	63,4	428,0	14,4
<b>3</b>	54,0	407,5	13,6
<b>Média</b>	<b>55,0 (7,9)</b>	<b>410,9 (15,7)</b>	<b>13,6,34 (0,8)</b>

Em que: b.s. = base seca. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão amostral.

A presença da água na madeira representa a redução de seu poder calorífico útil, em razão da energia necessária para evaporá-la. Alta umidade reduz o rendimento em carvão, prolonga o tempo de carbonização, diminui a resistência mecânica e a qualidade do produto final, aumentando as trincas e, conseqüentemente, a friabilidade do carvão vegetal (ARRUDA et al., 2011; ASSIS et al., 2016). As umidades aferidas foram acima do recomendado para produção de carvão vegetal, em que são desejáveis valores inferiores a 30% (BRAND et

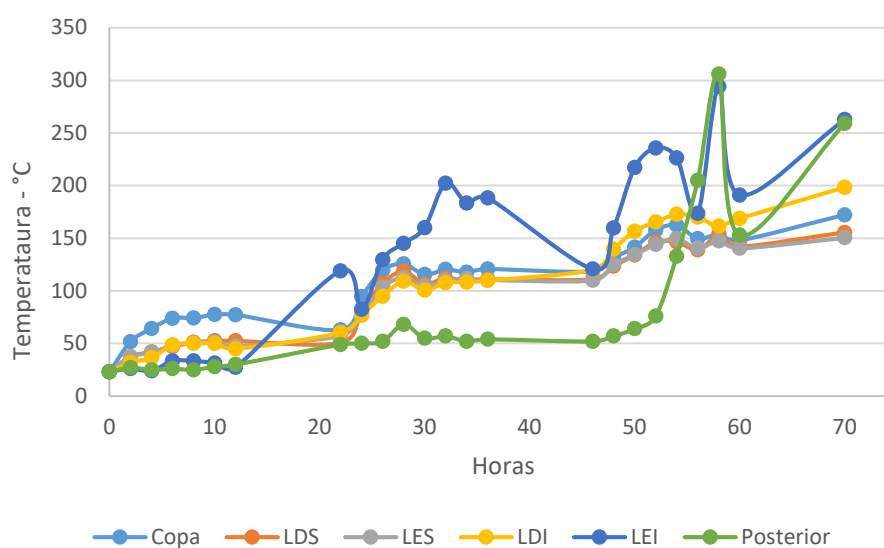
al.,2015). Carneiro e Oliveira (2013) afirmam que os valores de umidade para produção de carvão variam entre 30 e 40%.

Um dos principais índices de qualidade para destinação da madeira é a sua densidade básica que, neste caso, ficou abaixo do recomendado para produção de carvão vegetal, ideal acima de  $550 \text{ kg m}^{-3}$  (OLIVEIRA et al., 2010). Brito (1993) afirma que a densidade da madeira afeta diretamente o potencial produtivo de carvão vegetal, e correlaciona uma maior produção a partir da ocupação do forno por madeiras mais densas, com maior quantidade de massa para um determinado volume. Madeiras mais densas correlacionam a maiores teores de lignina, que estão associados a maiores densidades do carvão vegetal (SANTOS, 2008).

Os diâmetros da madeira utilizada neste experimento se assemelharam aos usuais para produção de carvão vegetal, situados entre 8 e 20 cm (CARNEIRO E OLIVEIRA, 2013). Quanto maiores as bitolas das toras maior o percentual de cerne e formação de carvões mais friáveis (PEREIRA, 2012).

### 3.3.2 Perfil térmico do forno

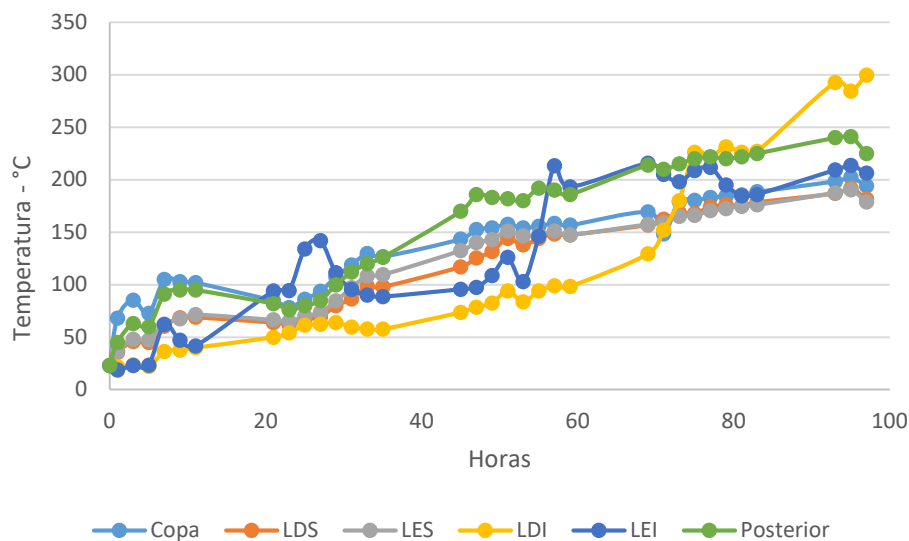
Nas Figuras 20 a 22 são apresentadas as temperaturas médias obtidas nas diferentes regiões do forno. Na Figura 20 é apresentada o perfil térmico da primeira carbonização.



**Figura 20.** Perfil térmico da 1ª carbonização. LDS = lateral direita superior; LES = lateral esquerda superior; LDI = lateral direita inferior; LEI = lateral esquerda inferior.



A primeira carbonização teve duração total de 70 horas, dentro do prazo estimado para a carbonização. A copa apresentou temperatura adequada e as paredes laterais superiores apresentaram temperaturas inferiores, porém próximas a estipulada de 60°C, na primeira fase da carbonização. Já na segunda fase somente a parede posterior não ficou dentro da faixa estipulada. Na terceira e quarta fases houveram grandes oscilações de temperatura na lateral esquerda inferior, indicando ocorrência de incêndios no local. Além disso houve a elevação da temperatura na parede posterior, indicando a chegada da frente de carbonização. Observou-se que a lateral esquerda inferior, a partir da 12ª hora, avançou consideravelmente e ultrapassou a amplitude térmica prevista e, mais ao final, também a parede posterior, que pontualmente excedeu a temperatura estipulada, com temperatura máxima próximas de 300°C.

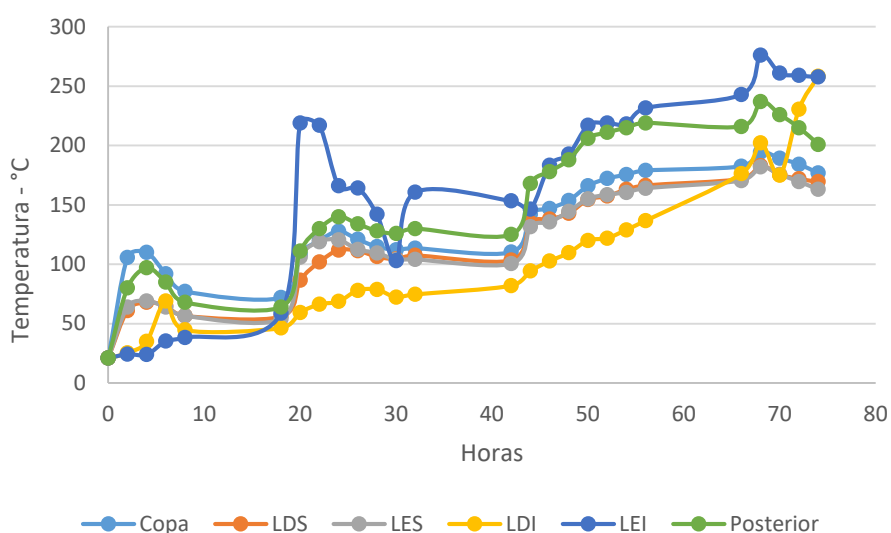


**Figura 21.** Perfil térmico da 2ª carbonização. LDS = lateral direita superior; LES = lateral esquerda superior; LDI = lateral direita inferior; LEI = lateral esquerda inferior.

A segunda carbonização finalizou 97 horas após ignição, levando mais tempo do que previsto, provavelmente devido a maior umidade da madeira utilizada. De acordo com a Figura 21, foi possível observar que alterações realizadas na condução, com uma maior oxigenação, levou a maioria das regiões a manterem nas faixas de temperaturas estipuladas, exceto a lateral esquerda inferior que, novamente, apresentou uma grande oscilação. A lateral

direita inferior se manteve em baixas temperaturas até a septuagésima hora. Vale salientar que foi observado uma maior aproximação entre as curvas, indicando uma maior homogeneidade de temperaturas no interior do forno.

Segundo Oliveira (2012), para um melhor processo de carbonização e qualidade do produto final, o forno deve ter temperaturas internas mais homogêneas quanto possível. Então, são desejáveis que as curvas de temperaturas das diferentes regiões do forno sejam próximas e com incremento progressivo quando em mudança de fases, sem grandes oscilações, indicando a correta condução do processo.



**Figura 22.** Perfil térmico da 3ª carbonização. LDS = lateral direita superior; LES = lateral esquerda superior; LDI = lateral direita inferior; LEI = lateral esquerda inferior.

A terceira carbonização teve duração de 74 horas, dentro do prazo estimado. Foi possível observar maior homogeneidade das temperaturas das diferentes regiões do forno quando comparadas a primeira carbonização, demonstrado pela Figura 22.

Considerando todas as carbonizações, observou-se variações de temperaturas nas áreas inferiores das paredes laterais, reflexo de períodos de combustão. Este processo é natural em fornos de alvenaria, uma vez que parte da carga enforada sofre combustão para liberar energia para conversão do restante da madeira em carvão, porém, não deve ocorrer em excesso, uma vez que levaria a redução do rendimento em carvão (CARNEIRO et al., 2011).

Observou-se em todas as carbonizações a oscilação de temperaturas em uma das regiões laterais inferiores e o retardo da elevação de temperatura na outra região inferior da parede oposta, mesmo se aplicando diversas ações para coibir o fato. Este comportamento está estreitamente relacionado a dinâmica dos fluidos e a disposição angulada do piso. Apesar da ignição ter sido efetuada no topo da pilha de madeira, não se observou o desenvolvimento padrão de carbonização como em outros fornos de alvenaria, em que ocorre o aumento da temperatura na parte superior em direção a base. Este evento pode ser devido ao desprendimento de pequenos pedaços de carvão incandescente do alto da pilha que, ao caírem no piso inclinado, movimentavam em direção a porção mais inferior, dando ignição na madeira no local. Também contribuiu para intensificar o fenômeno a tendência de posicionamento inferior do ar atmosférico admitido que, por ser mais denso que os demais gases presentes no interior do forno, tende a ficar nas porções inferiores onde há brasas, fomentando a combustão.

Em testes preliminares foram realizadas a exaustão dos gases nos pontos mais baixo do piso por dutos instalados nas paredes e direcionados a uma fornalha, retirando os gases na porção inferior de cada uma das laterais. Esta disposição de remoção de gases evitou o comportamento as significativas oscilações de temperaturas nas paredes laterais inferiores, porém, não se observou incrementos de rendimento gravimétrico em carvão significativos. Esta tiragem de gases inferior não foi adotada como padrão para o protocolo final de operação, uma vez que demandou necessidade constante de abastecimentos na fornalha, mesmo no período noturno, em que não havia acompanhamento do sistema. O desabastecimento da fornalha levava ao resfriamento e ausência de empuxo para retirada dos gases, delongando a carbonização.

### **3.3.1. Estudo dos tempos e rendimentos**

Na Tabela 5 são apresentados os tempos obtidos para conversão da madeira em carvão e de resfriamento no interior dos fornos Rampa e de superfície. O tempo total foi dado pelo somatório dos tempos supracitados.

**Tabela 5.** Tempos de conversão da madeira em carvão e resfriamento no interior dos fornos

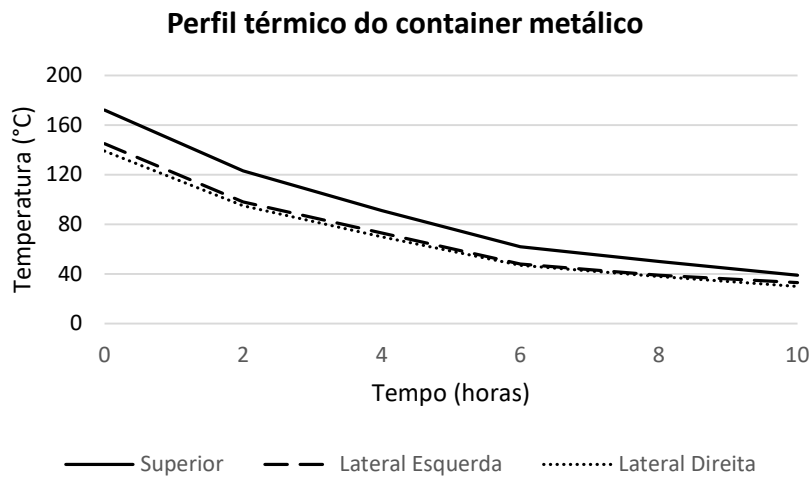
Forno	Carb.	Conversão (h)	Resfriamento (h)	Total (h)
Rampa	1	70	2	72
	2	97	2	99
	3	74	2	76
	<b>média</b>	<b>80,3</b> (14,6) <b>a</b>	<b>2</b>	<b>82,3</b> (14,6) <b>b</b>
Superfície	1	88	54	142
	2	64	42	106
	3	66	48	114
	<b>média</b>	<b>72,7</b> (13,3) <b>a</b>	<b>48</b>	<b>120,7</b> (18,9) <b>a</b>

Em que: Carb. = Carbonização. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão amostral. Médias seguidas por letras iguais não diferenciam pelo teste T com 95% de probabilidade, dentro da mesma coluna.

O tempo de conversão foi estatisticamente igual para ambos os fornos. Todavia, o tempo total foi inferior para o forno rampa em comparação ao forno de superfície, demonstrando a possibilidade da realização de mais carbonizações em um mesmo intervalo de tempo. Os tempos obtidos no forno de superfície são semelhantes aos apresentados no estudo de Lana (2014), que utilizou este mesmo modelo de forno com mesmas dimensões. O percentual de tempo médio demandado para o resfriamento no interior do forno circular de superfície em relação ao tempo total foi de 40%, enquanto o percentual médio do tempo de resfriamento do carvão no interior do forno rampa foi de apenas 3% em relação ao tempo total. O percentual do forno rampa foi derivado do tempo de duas horas em que o carvão permaneceu dentro do forno após o fechamento de todas as aberturas de entrada de ar e da válvula borboleta do duto da retirada de gases. Este procedimento foi adotado para eliminar possíveis incêndios e redução de grandes regiões de carvão em brasa, antes de proceder o descarregamento no container metálico.

O tempo obtido para o escoamento do carvão do forno para o container foi de um minuto, contabilizado a partir do início da abertura da tampa traseira até o fim do escoamento do carvão por gravidade. Tal fato indica que a declividade do piso foi suficiente para efetuar a rápida remoção do carvão, reduzindo seu contato com o ar atmosférico e minimizando perdas ocasionadas por combustão.

A Figura 23 a seguir apresenta o perfil térmico do container metálico durante o resfriamento do carvão vegetal.



**Figura 23.** Perfil térmico do resfriamento em container metálico.

O tempo médio de resfriamento do carvão no container metálico foi de aproximadamente 10 horas (temperaturas inferiores a 50°C), mais rápido do que em estruturas de alvenaria, tendo sido fundamental para reduzir o tempo total da carbonização. O resfriamento mais rápido foi devido a maior condutividade térmica do container, construído em aço. Segundo Young e Freedman (2015) o coeficiente de condutividade térmica do aço carbono é de aproximadamente 50,2 W/m.K; enquanto o tijolo da alvenaria apresenta um coeficiente inferior, de aproximadamente 0,69 W/m.K. Dadas as possíveis variações do tempo de resfriamento do carvão no container, em função das condições climáticas atmosféricas, foi adotado o tempo mínimo de 12 horas para retirada do carvão.

Além do tempo, outro importante fator a ser avaliado para validação de um forno é o rendimento médio em carvão vegetal. Na Tabela 6 são apresentados os resultados dos rendimentos gravimétricos.

**Tabela 6.** Rendimentos gravimétricos

Forno	Rendimento gravimétrico - %			
	Carb.	Carvão Vegetal	Atiços	Finos
Rampa	1	32,8	2,2	7,3
	2	30,4	1,4	8,6
	3	27,8	2,5	6,1
	<b>média</b>	<b>30,3</b> (2,5) <b>a</b>	<b>2,0</b> (0,6) <b>b</b>	<b>7,3</b> (1,3) <b>a</b>
Superfície	1	27,2	9,9	4,1
	2	30,1	8,1	5,7
	3	27,2	7,1	3,8
	<b>média</b>	<b>28,2</b> (1,7) <b>a</b>	<b>8,4</b> (1,41) <b>a</b>	<b>4,5</b> (1,0) <b>a</b>

Em que: Carb. = Carbonização. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão amostral. Médias seguidas por letras iguais não diferenciam pelo teste T com 95% de probabilidade, dentro da mesma coluna.

Não houve diferença significativa entre os rendimentos em carvão vegetal entre os fornos. O forno rampa apresentou maior variação, refletido no maior desvio padrão da média amostral. O rendimento mássico de carvão se destaca entre os principais fatores responsáveis por toda a logística da produção, visto que a partir dele se elabora o planejamento da quantidade de madeira a ser comprada ou da área demandada para o plantio, das dimensões do local de armazenamento para racionalização dos estoques frente ao requerido pelo mercado, etc.

O controle das temperaturas otimiza a quantidade de madeira convertida em carvão, minimizando sua degradação em excesso. Os valores de rendimento em carvão aferidos para ambos os fornos ficaram abaixo de valores médios encontrados em fornos com sistemas de supervisão da temperatura para o controle de carbonização, vistos os 32% obtidos por Oliveira et al. (2013) e 33% por Lana (2014). Nestes trabalhos, diferente deste experimento, houve o acompanhamento 24 horas por dia do forno. Vale ressaltar que o baixo rendimento pode estar associado ao baixo teor de lignina da madeira, diretamente correlacionado ao rendimento em carvão (VALE et al., 2010; PROTÁSIO et al., 2012; COSTA et al., 2014).

O rendimento gravimétrico em atiços foi superior no forno de superfície, indicando a necessidade de mais tempo ou maior temperatura antes de se encerrar a carbonização. O baixo percentual de atiços do forno rampa pode ser atribuído a seu design, uma vez que o

indicativo de que a maior parte da madeira foi convertida, é a elevação das temperaturas nas regiões inferiores, em que se concentra proporcionalmente uma menor quantidade de lenha.

O teor de finos foi estatisticamente igual para os modelos de fornos. Entretanto, o valor superior obtido para o forno rampa pode ser devido a fraturas das peças de carvão durante o descarregamento, em que ocorre a queda no container metálico. Estes valores obtidos não foram discrepantes de valores comumente encontrados na produção de carvão, se assemelhando aos teores de finos encontrados por Oliveira et al. (2013).

### 3.3.2. Característica do carvão vegetal

Na Tabela 7 são apresentados os valores obtidos na análise química imediata do carvão vegetal.

**Tabela 7.** Valores obtidos na análise imediata do carvão vegetal

Forno	Carb.	Análise Imediata (%)		
		Carbono Fixo	Materiais Voláteis	Cinzas
Rampa	1	72,7	26,4	0,89
		79,8	19,2	1,01
	2	81,3	17,5	1,29
		81,7	17,6	0,69
	3	76,9	22,1	0,95
		75,9	23,2	0,99
<b>média</b>		<b>78,0</b> (3,5)	<b>21,0</b> (3,5)	<b>1,0</b> (0,2)
Superfície	1	73,9	24,8	1,3
		76,1	22,9	1,03
	2	71,1	28,1	0,76
		72,4	26,9	0,74
	3	76,4	23,2	0,35
		75,5	24,2	0,3
<b>média</b>		<b>74,2</b> (2,2)	<b>25,0</b> (2,1)	<b>0,8</b> (0,4)

Em que: Carb. = carbonização. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão amostral.

É fato que a composição do carvão vegetal interfere e até mesmo limita a sua utilização. A título de comparação, a norma do Selo Premium para o carvão vegetal do estado de São Paulo determina que a umidade deve estar abaixo de 5%, o teor de carbono fixo acima de 75% e o teor de materiais voláteis e cinzas inferiores à 23,5% e 1,5%, respectivamente (SÃO PAULO, 2003).

O teor de carbono fixo correlaciona ao poder calorífico do carvão, sendo uma das características químicas de maior influência no uso final. Este teor varia em função de fatores como temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e composição química da madeira, sendo a temperatura final o principal parâmetro que regula sua concentração (PROTÁSIO et al., 2012). O teor de carbono fixo apresenta uma relação inversamente proporcional ao rendimento gravimétrico, uma vez que altos teores requerem maior degradação da madeira.

O teor de carbono fixo aferido para o forno rampa foi satisfatório, 3% acima do mínimo requerido pelo Selo Premium, sendo também adequado para siderurgia, em que deve ser superior a 75% (ROSILLO-CALLE e BEZZON, 2005). O teor de carbono fixo afeta o consumo específico de redutor e, conseqüentemente, a produção de ferro-gusa. O forno de circular de superfície, entretanto, apresentou um teor de carbono fixo abaixo do desejável. A elevação moderada da temperatura final de carbonização seria suficiente para contornar o problema, como demonstrado nos estudos de Oliveira et al. (2013) e Lana (2014), que obtiveram o teor de carbono fixo aproximado de 82 e 79%, respectivamente, para este mesmo modelo de forno.

O teor de materiais voláteis do carvão proveniente do forno rampa foi adequado a norma do Selo Premium e está entre os valores presentes na literatura, situando entre 20% e 30%. Santos (2008), afirma que o teor de materiais voláteis no carvão situa-se entre 20 e 25% e que porcentagens inferiores a 25% são desejadas para o uso siderúrgico. Altos teores de voláteis ocasionam a produção de muita fumaça, além da menor eficiência energética, indesejável para o uso doméstico do carvão (FREDERICO, 2009). O forno de superfície apresentou teor de material volátil acima do recomendado. A elevação da temperatura final de carbonização reduziria este teor, inversamente proporcional ao teor de carbono fixo.

O teor de cinzas está relacionado aos minerais da madeira de origem e/ou a contaminações externas como, por exemplo, solo durante a movimentação do carvão. Este teor deve ser o menor possível, uma vez que as cinzas reduzem o poder calorífico por não participarem da combustão. Além disso, altos teores de cinzas podem ocasionar corrosão e



incrustações em equipamentos metálicos, exigindo limpezas e manutenções mais frequentes (OSBORN, 1992). Então, é possível se afirmar que os teores de cinzas aferidos para os carvões de ambos os fornos foram satisfatórios.

Os teores de umidade, poder calorífico superior, densidade a granel a friabilidade são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8.** Características do carvão vegetal

Forno	Carb.	Umidade (b.u. %)	PCS (cal g <sup>-1</sup> )	D. granel (kg m <sup>-3</sup> )	Friabilidade (%)
Rampa	1	4,7	8279	146,4	11,1
		4,8	8101	148,6	11,2
	2	5	8053	150,4	11,1
		5,6	8082	145,7	10,4
	3	4,6	7857	146,9	8,7
		4	8032	147,6	10,7
<b>média</b>		<b>4,8</b> (0,5)	<b>8067,3</b> (135,5)	<b>147,6</b> (1,7)	<b>10,5</b> (1,0)
Superfície	1	5,6	7733	143,4	10,9
		5	7800	146,5	10,4
	2	5,6	7610	137,4	10,2
		5,3	7452	141,2	11,1
	3	4,3	7913	131,1	10,7
		4,7	7893	133,4	12,3
<b>média</b>		<b>5,1</b> (0,5)	<b>7733,5</b> (177,0)	<b>138,8</b> (5,9)	<b>10,9</b> (0,7)

Em que: Carb. = carbonização; b.u. = base úmida; PCS = poder calorífico superior; D. granel = densidade a granel. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão amostral.

Os carvões produzidos por ambos os fornos apresentaram umidade de equilíbrio higroscópico análogos aos valores encontrados em literatura, se assemelhando aos encontrados em mais de 30 marcas comerciais de carvão para churrasco presentes no estudo de Dias Júnior (2018). Santos (2008) relata que o carvão utilizado como termo redutor na siderurgia apresenta variação de 1 a 6%.

O poder calorífico superior do carvão do forno de superfície apresentou maior variação e foi inferior ao encontrado para o forno rampa. O maior poder calorífico está fortemente

associado ao maior teor de carbono fixo do carvão, sendo características que se correlacionam diretamente (PROTÁSSIO et al., 2012). Além disso, todas as carbonizações, para ambos fornos, apresentaram valores superiores ao mínimo recomendado para cocção, de 7000 kcal kg<sup>-1</sup> (DIAS JÚNIOR et al., 2015), e se assemelharam aos números encontrados para carvão vegetal (DIAS JÚNIOR, 2018).

As análises das densidades a granel de ambos os fornos exibiram resultados próximos, entretanto, nos dois modelos ela foi inferior aos valores desejáveis, que seriam aqueles acima de 200 kg/m<sup>3</sup> (SANTOS, 2008). Esta baixa densidade está correlacionada a baixa densidade da madeira utilizada, de 411 kg/m<sup>3</sup>.

Tal como as densidades, as friabilidades de ambos os fornos foram semelhantes e classificadas como pouco friáveis, entre 10 e 15%, de acordo com a classificação da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC (OLIVEIRA et al., 1982). A baixa friabilidade implica em menores perdas durante o descarregamento dos fornos, carregamento dos caminhões e transporte, no peneiramento, disposição e utilização, que podem ultrapassar os 25% (OLIVEIRA et al., 1982).

### **3.3.3. Avaliações estruturais do forno**

De maneira geral a estrutura de alvenaria apresentou pouca avaria, com fissuras diminutas na copa e poucos danos por abrasão na argamassa de revestimento interno. Somente foram constatadas maiores desagregações dos componentes da argamassa e de tijolos em regiões próximas as admissões de ar atmosférico, aonde ocorrem temperaturas mais acentuadas.

Vale ressaltar que as altas temperaturas ocorriam, frequentemente, próximas a tampa de descarregamento, posicionada na parte inferior do forno. Esta tampa não somente vedava o forno como, também, sustentava parcialmente a massa enfiada, uma vez que a angulação do piso direcionava a ela parte do peso. Estas altas temperaturas e a força exercida levaram a deformação parcial da tampa, que arqueou ao longo dos testes (Figura 24), apresentando, também, pequenas fissuras.



**Figura 24.** Empenamento da tampa traseira.

No intuito de melhorias físicas do projeto recomenda-se a substituição do açúcar utilizado na massa por silicato de sódio alcalino; a redução do arqueamento da copa do forno para melhor homogeneização das temperaturas internas; a utilização do arco romano em tijolos maciços cerâmicos no lugar da viga de concreto armado, para sustentação da parede posterior, visando garantir uma maior vida útil. Também se recomenda o uso de materiais construtivos mais adequados para a tampa traseira do forno.

### **3.4. Conclusões**

As faixas de temperatura estipuladas e a utilização do pirômetro nas carbonizações resultaram em carvão vegetal com qualidade satisfatória para siderurgia e cocção de alimentos, exceto pela baixa densidade a granel, correlacionada a baixa densidade da madeira.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi satisfatório e, provavelmente, pode ser elevado utilizando madeira com menor teor de umidade e maior teor de lignina.

O container metálico reduziu substancialmente o tempo demandado para o resfriamento da massa de carvão produzida.

O sistema projetado possibilitou a significativa redução do tempo demandado para realização de um ciclo de carbonização da madeira em fornos de alvenaria.

## Referências

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**: Carvão Vegetal - Determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro, 1981. 2p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: Madeira - Determinação do material solúvel em etanol-tolueno, em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010. 7p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14782**: Caçamba estacionária de aplicação múltipla operada por poliguindaste. Rio de Janeiro, 2005. 10 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2002. 3p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.
- ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, pp 949-955, 2011.
- ASSIS, M. R. BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P.F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, v.1, n.3, pp 519-536, 2016.
- BARCELLOS, D. C., COUTO, L. C., MULLER, M. D. The state of the art of eucalypt timber quality for energy production: a focus on silvicultural treatments. **Biomassa & Energia** 2 (2), 141-158. 2005.
- BRAND, M.A.; RODRIGUES, A.A.; OLIVEIRA, MACHADO, M.S.; ZEN, L.R. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região serrana sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v.39, n.6, pp. 1165-1173, 2015.
- BRASIL (2018). Ministério de Minas e Energia. **Relatório Final: Balanço Energético Nacional 2018: ano base 2017**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2017. 294 p. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018.pdf>. Acessado em: 29 de out. 2018.
- BRITO, J. O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **IPEF**, 1993. 6 p. (Circular Técnica, 181).
- BRITO, J. O. Situação e desafios do uso da madeira para energia no Brasil. In: II Encontro brasileiro de silvicultura, 46 p., 2011, Campinas. **Anais...** Campinas: SP, Semana Florestal Brasileira, 2011. Disponível em: <http://www.ipef.br/eventos/2011/ebs.asp>. Acessado em: 25 de jul. 2018.
- COSTA, T.G.; BIANCHI, M.L.; PROTÁSIO, T.P., TRUGILHO, P.F.; PEREIRA, A.J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **CERNE**, v.20, n.1, pp. 37-46, 2014.

DIAS JÚNIOR, A. F. **Carvão vegetal para cocção de alimentos: aspectos mercadológicos e de qualidade para o consumo**. 2018. 105p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2018.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; BRITO, J. O.; MILAN, M. Desdobramento da função de qualidade na avaliação da qualidade do carvão vegetal utilizado para cocção de alimentos. **Floresta & Ambiente**, v. 22, n. 2, 2015.

FAO. Faostat. Statistics Database. Disponível em: <http://www.fao.org/statistics/en>. Acessado em 25 de jul. 2018.

FREDERICO, P. G. U. Influência da densidade e composição química da madeira sobre a qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDIWING, C. H. (Eds). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. John Wiley e Sons, 1971. Cap. 6.

IBÁ – Indústria brasileira de árvores. **Relatório Anual: ano base 2016**. 2017. 80 p. Disponível em: [http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf). Acessado em: 25 de jul. 2018.

LANA, A.Q. **Desenvolvimento e avaliação de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira**. 2014. 69p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2014.

OLIVEIRA, A.C. CARNEIRO, A.C.O.; BARCELOS, D.C.; RODRIGUEZ, A.V.; AMARAL, B.M.N.; PEREIRA, B.L.C. resfriamento artificial em fornos retangulares para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 39, n. 4, p. 769-778. 2015.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; ALMEIDA, W.A.; PEREIRA, B.L.C.; CARDOSO, M.T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. 2010. **Scientia Forestalis**, v.38, n.87, pp. 431-439, 2010.

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

OLIVEIRA, J. B.de.; VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P. A. Produção de Carvão Vegetal - aspectos técnicos. In: **Produção e utilização de carvão vegetal**. 1982. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC. 1982.

OSBORN, G. Review of sulphur and chlorine retention in coal-fired boiler deposits. **Fuel**, v.71, pp.131-142, 1992.

PEREIRA, 2012. **Qualidade da madeira de eucalyptus para a produção de Carvão vegetal**. 2012. 103p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2012.

PEREIRA, B.L.C.; CARNEIRO, A.C.O.; CARVALHO, A.M.M.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, A.C.; FONTES, M.P.F. Influence of Chemical Composition of *Eucalyptus* Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **BioResources**, v.8, n.3, p 4574-4592. 2013.

PROTÁSIO, T. P., TRUGILHO, P. F., NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Canonical correlation analysis between characteristics of Eucalyptus wood and charcoal. **Scientia Forestalis** v.40, n.95, pp. 317-326, 2012.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: Fórum nacional sobre carvão vegetal, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2008.

SANTOS, I.S.S. **Resfriamento artificial de carvão vegetal em fornos de alvenaria**. 2013. 98p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2013.

SÃO PAULO. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Resolução nº 10 SAA, de 11 de julho de 2003. **Diário Oficial do Poder Executivo**, São Paulo, SP (2003 jul).

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011. 84p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG. 2011.

ROSILLO-CALLE, F.; BEZZON, G. Produção e uso industriais do carvão vegetal. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira**. Campinas, SP: Unicamp, 2005. 447 p.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **T 222 om-02. Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. 2002, 5p.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relationships among chemical properties, physical and energy wood properties of five cerrado species. **Ciência Florestal** v.20, n.1, pp 137-145, 2010.

YANG, H., YAN, R., CHEN, H., LEE, D.H., AND ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v.86, 1781-1788. 2007.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **University Physics with Modern Physics**. Santa Bárbara: Pearson, 14 ed. 2015.

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**, n. 27, p. 562–567, 2009.



## 4. VIABILIDADE ECONÔMICA DO FORNO “RAMPA” EM DIFERENTES CENÁRIOS

### Resumo

O objetivo deste capítulo foi avaliar economicamente o desempenho do forno “Rampa”, de resfriamento rápido do carvão vegetal. Para tanto, realizou-se o levantamento dos custos de implantação dos modelos de fornos “Rampa” e circular de superfície para uma produção mensal de 50 toneladas de carvão vegetal. Foram traçados dois cenários, o primeiro sendo o carvão remunerado pelo mercado de cocção de alimentos e o segundo pelo mercado siderúrgico. O horizonte de planejamento foi de 15 anos, a uma taxa mínima de atratividade de 7,5% a.a. Foram avaliados os seguintes indicadores econômicos: Lucratividade (L); Valor Presente Líquido (VPL); Valor Anual Equivalente (VAE); Período de Recuperação do Investimento (PRI); Retorno Sobre o Investimento (ROI); Taxa Interna de Retorno Modificada (MTIR); e a Razão Benefício Custo (B/C). Em ambos os cenários abordados a produção de carvão vegetal dos dois conjuntos de fornos foram viáveis economicamente por todos indicadores. O sistema de fornos “Rampa” apresentou melhor desempenho econômico que os fornos de superfície nos dois mercados avaliados, ou seja, apresentaram maior lucro. Os fornos “Rampa” apresentaram melhores índices nos dois cenários, exceto para o Período de Retorno do Investimento e Taxa Interna de Retorno Modificada, influenciados pelo menor dispêndio financeiro para implantação do sistema de fornos circulares de superfície.

Palavras-chave: Viabilidade econômica; Carbonização da madeira; Mercado de carvão vegetal

### Abstract

The objective of this chapter was to evaluate economically the performance of the kiln "Ramp", of fast charcoal cooling. For that, the costs of implanting the "Rampa" and circular surface kilns were determined for a monthly production of 50 tons of charcoal. Two scenarios were drawn, the first one being charcoal paid by the food cooking market and the second by the steel market. The planning horizon was 15 years, with a minimum attractiveness of 7.5% p.a. The following economic indicators were evaluated: Profitability (L); Net Present Value (VPL); Equivalent Annual Value (VAE); Payback Period (PRI); Return on Investment (ROI); Modified Internal Rate of Return (MTIR); and the Benefit / Cost Ratio (B/C). In both scenarios, the production of charcoal from the two sets of kilns was economically viable by all indicators. The "Rampa" kilns system presented better economic performance than the surface kilns in the two evaluated markets, that is, they presented higher profit. The "Rampa" kilns presented better economic indices in both scenarios, except for the Payback Period and Modified Internal Rate of Return, influenced by the lower financial expenditure for the implementation of the circular surface kilns system.

Keywords: Economic feasibility; Wood carbonization; Charcoal market



#### 4.1. Introdução

Apesar do protagonismo do Brasil na produção de carvão vegetal, grande parte da produção nacional é realizada em fornos rudimentares de alvenaria, sem agregação de tecnologia, caracterizada pela baixa produtividade e emissão de poluentes. Estes fornos, frequentemente, apresentam tempo de resfriamento elevado, que geralmente ultrapassam o tempo de carbonização. Nas últimas décadas houve melhorias significativas na fabricação de carvão vegetal, principalmente com a adoção de fornos retangulares de alvenaria, que permitiram a mecanização da produção de carvão vegetal. Entretanto, a dificuldade de resfriamento da massa de carvão permanece, levando a busca de soluções para acelerar a etapa de arrefecimento.

Dentre as pesquisas para minimizar o tempo de resfriamento do carvão em fornos de alvenaria se destaca o uso de trocadores de calor, equipamentos que elevam a transferência energética entre fluidos sem que eles se misturem. Oliveira et al. (2015) avaliaram 3 tipos diferentes de trocadores de calor acoplados a fornos retangulares de 320 m<sup>3</sup>, observando uma redução máxima do tempo de resfriamento de 43%. Santos (2013), obteve redução de 60% do tempo de resfriamento com a utilização de um trocador de calor tubular gás/ar, aplicado em um forno retangular com capacidade aproximada para 9 st de madeira. Os trocadores de calor, entretanto, possuem um elevado custo construtivo, além de consumirem energia elétrica e, em alguns casos, água. Dentre os trocadores já testados, alguns apresentaram viabilidade técnica, porém, não se viabilizaram economicamente (SANTOS, 2013).

Neste contexto, entende-se que o resfriamento mais rápido do carvão vegetal ainda merece atenção especial, como aspecto importante para definição de estratégias que elevem a produtividade. Então, foi concebido um forno de alvenaria experimental, denominado "Forno Rampa". Esta nova tecnologia possibilitou o resfriamento externo do carvão vegetal em container metálico, praticamente eliminando o resfriamento no interior do forno, o disponibilizando para uma nova carbonização mais rapidamente, aumentando a produtividade.

Ressalta-se que a adoção e disseminação de novas tecnologias demanda a análise econômica do investimento, utilizando uma série de técnicas e critérios de avaliações que comparam as despesas e receitas do projeto, determinando sua implantação ou não (REZENDE e OLIVEIRA, 2013). De acordo com Keelling (2014), o estudo de viabilidade de projetos é uma das etapas mais importantes para o seu sucesso.

Os projetos de viabilidade econômica analisam custos e rendimentos, variáveis necessárias para o planejamento futuro, como o incremento de áreas de plantio. Estes projetos fornecem subsídios para estimar os custos de produção, preços de fatores e produtos, demanda, etc. (SILVA et al., 2005). De maneira geral, um único índice econômico não é suficiente para determinar a aceitação ou não de um projeto. Desta forma, o conjunto de variáveis econômicas deve ser observado para o embasamento da tomada de decisão para instalação de um empreendimento, ou alternativas para aplicação do capital.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade econômica da produção de carvão vegetal em dois conjuntos de fornos. O primeiro conjunto constituído por fornos do modelo “Rampa” e o segundo por fornos circulares de superfície, estabelecendo assim um comparativo entre uma nova tecnologia e outra já consolidada.

#### **4.2. Material e Métodos**

Foram construídos e avaliados dois diferentes modelos de fornos para produção de carvão vegetal, “Rampa” e circular de superfície, os quais forneceram os dados para realização desta análise.

Foram estabelecidos dois diferentes conjuntos de fornos, o primeiro composto por unidades do modelo “Rampa”, contando com cerca de 16 m<sup>3</sup> de volume interno. O segundo por fornos circulares de superfície, com aproximadamente 12 m<sup>3</sup> de volume interno. A ocupação de lenha assumida foi de 80% do volume interno dos fornos. A adoção do forno de superfície como parâmetro foi em função da sua presença em estudos e sua consolidação no mercado, dada a sua grande difusão entre os produtores rurais, que frequentemente, o adotam em detrimento aos fornos “rabo-quente”, de encosta e outros modelos mais arcaicos.

O fator de conversão de estéreo (st) para m<sup>3</sup> de madeira utilizado foi de 0,65, e considerou a carbonização de madeira com densidade de 500 kg m<sup>-3</sup> para produção de carvão com aproximadamente 200 kg m<sup>-3</sup>. O custo do estéreo da madeira foi de R\$38,70, conforme valor de fechamento apontado em doze de julho de 2018 (NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2018).

A vida útil adotada para o forno de superfície foi de 5 anos, período superior ao adotado no estudo feito por Carneiro et al. (2012). Este mesmo tempo de vida útil foi assumido para estrutura de alvenaria do forno “Rampa”, sendo a do concreto armado estipulado em 15 anos. O custo da reforma do forno rampa foi o dispêndio necessário para

construção da alvenaria somado ao custo do container metálico, uma talha manual de correntes e mais 10 dias de mão de obra. O custo de manutenção anual foi 5% do valor de implantação de cada projeto.

Além disso, para remuneração da mão de obra encarregada da operação dos fornos aplicou-se o salário mínimo do estado de São Paulo (R\$ 1.108,38), acrescido em mais 100% destinados aos encargos trabalhistas, 13º salário e férias, totalizando o custo mensal de R\$ 2.216,76 por funcionário. Foram empregados 2 e 3 funcionários para operação dos fornos “Rampa” e circular de superfície, respectivamente.

Ao tempo total de carbonização foram adicionadas 8 horas para o forno de superfície e 4 horas para o forno “Rampa”, suficientes para realizar as operações de carregamento, descarregamento, fechamento e eventuais manutenções. No investimento inicial do conjunto “Rampa” foi adicionado o valor de R\$100 mil, destinados à aquisição de maquinários (trator, carreta agrícola, garra florestal para carregamento e peneira mecânica). No sistema de fornos de superfície foram adicionados R\$50 mil para aquisição de maquinários (trator, carreta agrícola, peneira mecânica), em função da dispensa da garra florestal e, conseqüentemente, menor demanda de potência do trator. Também foram adicionados a ambos os projetos R\$30 mil para construção de abrigo para estoque.

Para cálculo do número de fornos para as análises estabeleceu-se a produção de 50 toneladas de carvão por mês, considerando a média de rendimento gravimétrico em carvão vegetal obtida nas carbonizações dos modelos estudados. Ressalta-se que o rendimento em carvão pode ser maior, visto a alta umidade e baixo teor de lignina da madeira utilizada.

Os projetos foram avaliados num horizonte de planejamento de 15 anos, com uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 7,5% a.a., superior a atual taxa SELIC de 6,40% a.a., em julho de 2018.

Foram considerados os seguintes cenários para as avaliações:

**Cenário 1** – Este cenário contempla a remuneração para o carvão vegetal de R\$0,90 kg<sup>-1</sup>, referente ao valor do carvão vendido a granel para empacotamento. Este valor de venda corresponde a cerca de 25% do valor médio do quilograma empacotado vendido no varejo, conforme estudo de Dias Júnior (2018), que avaliou diversas marcas de carvões para churrasco.

**Cenário 2** – Neste cenário foi considerada a remuneração do carvão destinado à siderurgia, vendido a R\$0,75 kg<sup>-1</sup>, correspondente a R\$150,00 por m<sup>3</sup> de carvão, assumido como média para o mercado industrial, em que o carvão historicamente já atingiu a cifra de R\$ 250,00 por m<sup>3</sup>.

A análise econômica se deu pela avaliação dos seguintes indicadores: Lucratividade (L); Valor Presente Líquido (VPL); Valor Anual Equivalente (VAE); Taxa Interna de Retorno (TIR); Retorno Sobre o Investimento (ROI); Período de Recuperação do Investimento (PRI); e a razão Benefício Custo (B/C).

Rezende e Oliveira (2013) relatam que a lucratividade é um indicador que demonstra a eficiência operacional de um negócio, podendo ser expressa como uma porcentagem que indica a proporção dos rendimentos de um determinado empreendimento.

$$L = \frac{\text{Lucro líquido}}{\text{Receita total}} \times 100 \quad (\text{eq. 2})$$

O valor presente líquido (VPL) de um projeto de investimento pode ser entendido como a diferença positiva entre receitas e custos, atualizado de acordo com determinada taxa de desconto (REZENDE e OLIVEIRA, 2013). Ou seja, o VPL corresponde a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa do projeto. O projeto será economicamente viável quando o VPL for maior que zero.

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j(1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j(1+i)^{-j} \quad (\text{eq. 3})$$

Em que:

R<sub>j</sub> = receita no final do ano j, ou do período de tempo considerado;

C<sub>j</sub> = custo no final do ano j, ou do período de tempo considerado;

i = taxa de desconto;

n = duração do projeto, em anos.

O Valor Anual Equivalente (VAE) é uma parcela periódica e constante que paga o VPL do investimento, ao longo do horizonte de planejamento. O VAE transforma o valor atual do projeto em um fluxo de receitas ou custos periódicos e contínuos. Valores positivos para esse critério indicam a viabilidade do projeto, quanto maior o VAE mais viável o projeto (REZENDE e OLIVEIRA, 2013).

$$VAE = VPL(i) \div [1 - (1 + i)^{-n}] \quad (\text{eq. 4})$$

Em que:

i = taxa de desconto;

n = duração do projeto, em anos.

A Taxa Interna de Retorno é a taxa de desconto que iguala o valor presente das receitas ao valor presente dos custos, ou seja, iguala o VPL a zero. Além disso, a TIR pode também ser entendida como a taxa percentual de retorno do capital investido (SILVA et al., 2005). Barbieri et al. (2007), entretanto, afirmam que o modelo matemático concebido para a TIR, permite (ainda que não explicitamente) supor que os fluxos de caixa intermediários, se positivos, sejam remunerados por uma taxa de juros igual a TIR, bem como os fluxos de caixa negativos sejam também financiados pela mesma taxa. Por isso, segundo Kassai et al. (1999), quando a TIR obtida for substancialmente diferente das taxas de mercado, a sua interpretação como taxa de retorno do investimento não é verdadeira.

Quando a TIR for muito discrepante das taxas de mercado, ela pode ficar distante de indicar a verdadeira rentabilidade do projeto de investimento. Segundo Barbieri et al. (2007), a TIR só representará a medida exata do retorno do investimento num fluxo de apenas dois pontos, característico de algumas aplicações financeiras, nas quais todo o investimento acontece na data “zero” e toda a receita concentrada na data “n”. Neste caso, admitindo-se que o somatório das receitas supera o investimento, a equação da TIR modificada (MTIR) dará como resultado uma taxa de juros positiva, representando, com exatidão, o retorno do investimento (BARBIERI et al., 2007).

Para cálculo da MTIR a fórmula matemática aplicada foi a seguinte:

$$MTIR = \left( \frac{-VPL(\text{taxa } r, \text{valores}[\text{positivos}]x(1 + \text{taxa } r)^n)}{VPL(\text{taxa } f, \text{valores}[\text{negativos}]x(1 + \text{taxa } f))} \right)^{\frac{1}{n-1}} - 1 \quad (\text{eq. 5})$$

Em que:

taxa r = taxa de reinvestimento = TMA

taxa f = taxa de financiamento = 12%

n = tempo

De maneira simples, seria correspondente a seguinte equação:

$$MTIR = \frac{Vt}{Vac} - 1 \quad (\text{eq. 6})$$

Em que:

Vt = valor terminal considerando a taxa de reinvestimento;

Vac = valor atual dos custos, considerando a taxa de financiamento;

Dentre as vantagens da utilização da MTIR está a presunção de que os défices de caixa são financiados a um custo médio ponderado do capital dispendido e, além disso, assume que os superávits ao longo do projeto são remunerados a uma taxa coerente de mercado. A MTIR pode ser comparada a um investimento financeiro do capital frente a uma taxa de juros conhecida, sendo bom critério para confrontar alternativas.

O Retorno Sobre Investimento (ROI – Return On Investment, em inglês) é uma técnica simples, e por isso muito utilizada. Ela consiste em medir os rendimentos obtidos a partir de uma determinada quantia de recursos investidos. Em suma, representa, basicamente, a relação entre o lucro e prejuízo obtido em relação ao capital investido (ATKINSON et al., 2000).

$$ROI = \left[ \sum_{j=0}^n R_j - \sum_{j=0}^n C_j \right] \div \sum_{j=0}^n C_j \quad (\text{eq. 7})$$

Em que:

R<sub>j</sub> = receita no final do ano j, ou do período de tempo considerado;

C<sub>j</sub> = custo no final do ano j, ou do período de tempo considerado;

n = duração do projeto, em anos.

Período de Recuperação do Investimento (PRI) consiste no tempo em que determinado investimento obtém um retorno maior do que o capital investido.

$$PRI = T, \text{ quando } \sum_{j=0}^T FC_j = PV \quad (\text{eq. 8})$$

Em que:

T = tempo;

FC<sub>j</sub> = Fluxo de caixa no período de tempo j;

PV = investimento inicial.

O PRI simples não leva em consideração a taxa de juros, nem a inflação do período ou o custo de oportunidade. O PRI descontado, entretanto, considera a taxa de juros como fator a ser determinante do tempo de retorno do capital investido.

A Razão Benefício/Custo (B/C) estabelece a relação entre o valor atual das receitas e o valor atual dos custos.

$$\frac{B}{C} = \sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j} \div \sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j} \quad (\text{eq. 9})$$

Em que:

R<sub>j</sub> = receita no final do ano j, ou do período de tempo considerado;

C<sub>j</sub> = custo no final do ano j, ou do período de tempo considerado;

i = taxa de desconto;

n = duração do projeto, em anos.

Segundo Rezende e Oliveira (2013), pode-se dizer que quando a razão B/C é maior que 1 o projeto pode ser aceito, garantindo um valor atual líquido positivo. Entretanto, uma observação a ser feita é de que esta avaliação apresenta diversas limitações, dentre as quais se destaca a insensibilidade à escala e a duração do projeto.

#### 4.3. Resultados e discussão

Na Tabela 9 são apresentados os custos envolvidos na construção do forno rampa.

**Tabela 9.** Custo detalhado de implantação do forno rampa

<b>Estrutura</b>	<b>Item</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>R\$/Unidade</b>	<b>Subtotal R\$</b>	
<b>Preparo terreno</b>	Retroescavadeira	horas	16	100	1600	
	Madeira para formas	m <sup>3</sup>	2	400	800	
	Pregos	kg	4	15	60	
	Blocos - muro de arrimo	unidade	1000	2	2000	
	Vergalhão 1/4" - 6,3 mm (12 metros)	barra	10	20	200	
	Vergalhão 3/8" / 16mm (12 metros)	barra	12	110	1320	
	Cimento	saco	30	18	540	
	<b>Concreto armado</b>	Estribos	unidade	250	1	250
		Arame Recozido	kg	3	10,9	32,7
		Areia	m <sup>3</sup>	10	85	850
Laje treliçada (piso forno e passarela)		m <sup>2</sup>	15	35	525	
Brita número 1		m <sup>3</sup>	10	80	800	
Malha metálica piso - Tela 196		m <sup>2</sup>	6	45	270	
Betoneira - aluguel		diária	30	25	750	
<b>Alvenaria</b>		Tijolos cerâmicos maciços	unidade	3500	0,55	1925
	Areia	m <sup>3</sup>	2	80	160	
	Açúcar	kg	50	1,5	75	
	Cimento	saco	3	18	54	
	<b>Portas frontais</b>	Dobradiças - gonzo	unidade	4	150	600
Trinco		unidade	1	100	100	
Malha metálica		m <sup>2</sup>	6	45	270	
Areia		m <sup>3</sup>	0,4	80	32	
Cimento		saco	2,5	18	45	
Vermiculita expandida (cinasita)		m <sup>3</sup>	0,4	212	84,8	
Manta Cerâmica 2"		m <sup>2</sup>	6	83	498	
Parafuso - fixação da manta		unidade	36	2,5	90	
Barra chata 6m - 1 x 3/16"		barra	8	27	216	
<b>Tampa traseira</b>	Moldura metálica (perfil u)	unidade	1	250	250	
	Malha metálica	m <sup>2</sup>	3	45	135	
	Areia	m <sup>3</sup>	0,2	80	16	
	Cimento	saco	1	18	18	
	Vermiculita expandida (cinasita)	m <sup>3</sup>	0,2	212	42,4	
	Cantoneira batente	m	1	75	75	
	Cantoneira canaletas guias	m	2	50	100	
<b>Mão de obra</b>	Pedreiro	diária	20	300	6000	
	Ajudante 1	diária	20	100	2000	
	Ajudante 2	diária	20	100	2000	
<b>Outros</b>	Container	unidade	1	4000	4000	
	Talha manual de correntes – 2 ton.	unidade	1	450	450	
				<b>Total</b>	<b>29.233,90</b>	

Na Tabela 10 são apresentados os custos envolvidos na construção do forno de superfície.



**Tabela 10.** Custo detalhado do forno de superfície

Item	Unidade	Quantidade	R\$/Unidade	subtotal (R\$)
<b>Tijolos cerâmicos maciços</b>	unidade	3000	0,55	1650
<b>Areia</b>	m <sup>3</sup>	1	80	80
<b>Cantoneira porta</b>	70 cm	1	50	50
<b>Barra chata - cinta copa</b>	10 m	1	120	120
<b>Barra rosqueada 30 cm</b>	unidade	1	10	10
<b>Pedreiro</b>	diária	2	300	600
<b>Ajudante 1</b>	diária	2	100	200
<b>Ajudante 2</b>	diária	2	100	200
			<b>Total</b>	<b>2.910,00</b>

Na Tabela 11 são apresentados os valores assumidos e calculados para determinação do número de fornos necessários para uma produção de 50 toneladas.

**Tabela 11.** Cálculo do número de fornos para 50 toneladas mensais de carvão vegetal

Item	Rampa	Superfície
Volume interno do forno (m <sup>3</sup> )	16,55	12
Estéreos (st) de lenha por carbonização	13,24	9,6
m <sup>3</sup> de madeira por carbonização	8,61	6,24
kg de madeira por carbonização	4303	3120
Rendimento gravimétrico (%)	30,3	28,2
Carvão produzido (kg)	1304	878
Tempo de carbonização (dias)	3,68	5,78
Carbonizações por mês (30 dias)	8,15	5,60
Carvão produzido por forno mês (Ton.)	10,63	4,91
Nº de fornos para 50 toneladas de carvão mês	4,71	10,18
<b>Nº de fornos necessários</b>	<b>5</b>	<b>11</b>
<b>Toneladas de Carvão ano<sup>-1</sup></b>	<b>638</b>	<b>649</b>

Para uma produção mínima e próxima de 50 toneladas foram necessários 5 fornos rampa e 11 unidades do tipo superfície, que refletiram numa capacidade produtiva mensal aproximada de 53 e 54 toneladas de carvão, respectivamente.

### 4.3.1. Resultados Cenário 1

Na Tabela 12 é apresentado o fluxo de caixa para os dois conjuntos de fornos durante os 15 anos do horizonte de projeto para o Cenário 1, que considera o carvão destinado a cocção de alimentos.

**Tabela 12.** Fluxo de caixa no Cenário 1, carvão destinado ao mercado de cocção

Ano	Fornos Rampa				Fornos de Superfície			
	Custo	Receita	Saldo ano	Acumulado	Custo	Receita	Saldo ano	Acumulado
<b>0</b>	258	0	<b>-258</b>	<b>-258</b>	112	0	<b>-112</b>	<b>-112</b>
<b>1</b>	310	574	264	5	356	584	228	116
<b>2</b>	310	574	264	269	356	584	228	344
<b>3</b>	310	574	264	533	356	584	228	572
<b>4</b>	310	574	264	797	356	584	228	800
<b>5</b>	310	574	264	1061	356	584	228	1028
<b>6</b>	327	574	247	1308	386	584	198	1226
<b>7</b>	310	574	264	1572	356	584	228	1454
<b>8</b>	310	574	264	1836	356	584	228	1682
<b>9</b>	310	574	264	2100	356	584	228	1910
<b>10</b>	310	574	264	2364	356	584	228	2138
<b>11</b>	327	574	247	2611	386	584	198	2336
<b>12</b>	310	574	264	2875	356	584	228	2564
<b>13</b>	310	574	264	3139	356	584	228	2792
<b>14</b>	310	574	264	3403	356	584	228	3020
<b>15</b>	310	574	264	3666	356	584	228	3248

\*Os valores apresentados estão em  $10^{-3}$  R\$.

Observou-se o maior custo no ano 0 para os fornos “Rampa”, devido ao maior dispêndio financeiro com estrutura física dos fornos e maquinários para carregamento da madeira.

O conjunto de fornos “Rampa” apresentou saldo acumulado positivo no primeiro ano de operação, porém inferior ao conjunto de fornos circulares de superfície, que obteve R\$116 mil em saldo. Esta diferença é devida ao menor capital dispendido para implantação dos fornos circulares de superfície.

Observou-se que no quarto ano o saldo acumulado praticamente se iguala para ambos os conjuntos de fornos, sendo superior para o modelo “Rampa” a partir do quinto ano. Os 6º e 11º anos apresentam saldos inferiores em função das reformas. O maior custo anual do

sistema superfície é derivado do seu maior consumo de lenha, impulsionado, principalmente, pelo seu menor rendimento gravimétrico e maior dispêndio com mão de obra.

**Tabela 13.** Índices econômicos do Cenário 1, para o carvão destinado a cocção de alimentos

Índice	Modelo de Forno	
	Rampa	Superfície
Lucratividade (%)	42,58	37,08
VPL (R\$)	2.052.565	1.867.439
VAE (R\$)	232.529	211.557
MTIR (%)	24,41	30,19
ROI (%)	74	59
PRI descontado (anos)	1,1	0,5
B/C	1,74	1,59

Observou-se uma lucratividade maior para os fornos “Rampa” quando destinado ao mercado de cocção de alimentos, com uma diferença de 5,5%, ou seja, a cada R\$100 comercializados de carvão o lucro obtido pelo conjunto “Rampa” gera uma renda de R\$ R\$5,50 a mais do que o carvão produzido no conjunto de fornos circulares de superfície.

O VPL foi positivo para ambos os sistemas, nos dois mercados, indicando a viabilidade dos projetos. Tal fato significa que houve um rendimento corrigido para o ano presente superior à taxa mínima de atratividade. O VPL dos fornos “Rampa” foi R\$185 mil superior ao VPL do conjunto de fornos circulares, gerando um valor presente líquido 10% maior.

O VAE para os dois fornos em ambos os cenários foi positivo, indicando um retorno financeiro anual que viabiliza os empreendimentos nas duas situações. O VAE, por ser diretamente proporcional ao VPL, naturalmente acaba assumindo mesma tendência comparativa entre os fornos, isto é, no mercado de cocção a diferença relativa foi pequena, porém, para siderurgia, o VAE do conjunto rampa supera em mais de duas vezes o dos fornos de superfície.

A MTIR superou a TMA de ambos os projetos no mercado de cocção, logo, os investimentos podem ser classificados como economicamente atraentes. Esta taxa, entretanto, se contrapôs a tendência observada de melhores índices para o sistema de fornos “Rampa” no mercado de cocção, uma vez que o sistema superfície superou em 5,78% a MTIR

dos fornos “Rampa”. Este comportamento está associado ao menor custo de implantação dos fornos, localizado no denominador da equação matemática para cálculo da MTIR.

O Retorno sobre Investimento (ROI) foi positivo para ambos os investimentos, superando a taxa mínima de atratividade. O ROI foi superior em 15% no conjunto de fornos “Rampa”, indicando um maior retorno ou lucro com o investimento feito neste modelo de forno.

O Período de Recuperação do Investimento Descontado dos fornos de superfície foi de 1,1 ano para o conjunto “Rampa” e de 0,5 ano para o conjunto circular de superfície. Ou seja, a recuperação do capital investido nos fornos de superfície acontece em menos da metade do tempo da recuperação de capital investido para os fornos “Rampa”.

Os dois conjuntos de fornos apresentaram uma Razão de Benefício Custo maiores do que 1 em ambos mercados, indicando a viabilidade dos projetos. Ressalta-se que o maior valor foi observado para os fornos “Rampa”.

#### **4.3.2. Resultados Cenário 2**

Neste cenário foi simulada a venda do carvão vegetal a granel no mercado siderúrgico, com valor de remuneração adotado em R\$0,75 kg<sup>-1</sup>. Na Tabela 14 é apresentado o fluxo de caixa para cada conjunto de fornos.

**Tabela 14.** Fluxo de caixa no Cenário 2, carvão destinado ao mercado siderúrgico

Ano	Fornos Rampa				Fornos de Superfície			
	Custo	Receita	Saldo ano	Acumulado	Custo	Receita	Saldo ano	Acumulado
<b>0</b>	258	0	<b>-258</b>	<b>-258</b>	112	0	<b>-112</b>	<b>-112</b>
<b>1</b>	310	478	168	<b>-90</b>	356	487	131	19
<b>2</b>	310	478	168	78	356	487	131	149
<b>3</b>	310	478	168	246	356	487	131	280
<b>4</b>	310	478	168	414	356	487	131	411
<b>5</b>	310	478	168	583	356	487	131	542
<b>6</b>	327	478	152	734	386	487	100	642
<b>7</b>	310	478	168	902	356	487	131	773
<b>8</b>	310	478	168	1071	356	487	131	903
<b>9</b>	310	478	168	1239	356	487	131	1034
<b>10</b>	310	478	168	1407	356	487	131	1165
<b>11</b>	327	478	152	1558	386	487	100	1265
<b>12</b>	310	478	168	1727	356	487	131	1396
<b>13</b>	310	478	168	1895	356	487	131	1527
<b>14</b>	310	478	168	2063	356	487	131	1657
<b>15</b>	310	478	168	2231	356	487	131	1788

\*Os valores apresentados estão em  $10^{-3}$  R\$.

No primeiro ano observou-se acumulado negativo para o conjunto de fornos “Rampa”, devido ao maior custo de implementação. No primeiro ano também se observou um acumulado positivo de apenas R\$19 mil para o conjunto de fornos circulares de superfície. Além disso, verificou-se também saldos menores no 6º e 11º anos, em função de maiores custos para reforma dos sistemas.

Vale ressaltar que esses valores negativos ou muito baixos, frequentemente, não são percebidos pelos produtores. Segundo Colombo et al. (2006), muitas vezes em pequenas produções são ignoradas as despesas com mão de obra para a construção dos fornos, utilização de veículo próprio nas operações de transporte da lenha ou carvão, ou o emprego de familiares na produção.

Observou-se que o acumulado do conjunto “Rampa” se torna superior aos fornos de superfície no quarto ano, um ano antes do que observado no 1º cenário. Tal fato demonstra maior competitividade do sistema a médio prazo diante de menores remunerações, devido, principalmente, ao menor consumo de lenha e menor quantidade de mão de obra demandada.

O acumulado final no 15º ano para o conjunto “Rampa” foi R\$443 mil superior ao acumulado apresentado pelo conjunto de fornos circulares e superfície. Em comparação ao

primeiro cenário houve uma queda no acumulado final no 15º ano da ordem de R\$ 1,44 mi e 1,46 mi para os fornos “Rampa” e circular de superfície, respectivamente. Esta queda foi acarretada pela menor remuneração do carvão vegetal assumida no mercado siderúrgico.

É importante salientar que ainda existem possíveis receitas da comercialização dos subprodutos da carbonização, como moinha (carvão de baixa granulometria). Também existe mercado para os atijos (madeira semicarbonizada), que podem retornar ao forno, mas também são muito desejados para aquecimento residencial, cocção de alimentos em fogões e para churrascos de chão. Também existe o potencial de comercialização do líquido pirolenhoso que pode ser incorporado aos sistemas, porém, ainda não existe um mercado expressivo ou uma cadeia comercial bem definida, tornando sua venda e utilização muito incipientes.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados obtidos para os índices econômicos analisados no 2º Cenário.

**Tabela 15.** Índices econômicos do Cenário 1, para o carvão destinado a siderurgia

Índice	Modelo de Forno	
	Rampa	Superfície
<b>Lucratividade (%)</b>	31,09	24,50
<b>VPL (R\$)</b>	1.207.981	1.008.480
<b>VAE (R\$)</b>	136.849	114.248
<b>MTIR (%)</b>	20,69	25,34
<b>ROI (%)</b>	45	32
<b>PRI descontado (anos)</b>	1,7	0,9
<b>B/C</b>	1,45	1,32

Observou-se novamente no segundo cenário uma maior lucratividade para o conjunto de fornos “Rampa”, superando em 6,59% a lucratividade dos fornos de superfície. Isto quer dizer que a cada R\$100,00 de carvão vendidos é proporcionado um lucro superior de R\$6,59 quando produzido no sistema de fornos “Rampa”. Esta diferença de lucratividade foi maior do que a apresentada no primeiro cenário, demonstrando maior competitividade dos fornos rampa diante de oscilações de mercado.

O Valor Presente Líquido foi positivo para ambos os conjuntos de fornos, sendo superior em cerca de R\$200 mil para o conjunto de fornos “Rampa”, demonstrando uma

maior rentabilidade do processo apesar do maior investimento demandando. O VPL foi cerca de R\$845 mil e R\$859 mil inferiores em relação ao primeiro cenário para os fornos “Rampa” e de superfície, acarretados pela menor remuneração do carvão vegetal.

O VAE no segundo cenário também foi positivo para ambos os conjuntos de fornos, indicando um retorno financeiro anual que viabiliza os empreendimentos nas duas situações. Neste segundo cenário o VAE foi cerca de R\$22,6 mil superior para os fornos “Rampa” em relação aos fornos de superfície. Esta diferença se acentuou em relação ao primeiro cenário, indicando uma maior resiliência do forno “Rampa” diante de menores remunerações.

A MTIR superou a TMA de ambos os projetos no cenário siderúrgico, logo, este índice classifica os investimentos como economicamente atraentes. A MTIR dos fornos de superfície superou em 4,65% a MTIR dos fornos “Rampa”, sendo este percentual menor do que o apresentado no primeiro cenário. A maior MTIR dos fornos de superfície foi devido, principalmente, ao menor custo de implantação dos fornos.

O ROI foi superior a TMA para ambos os fornos analisados no mercado siderúrgico. O ROI foi 13% maior para os fornos “Rampa” comparado ao ROI dos fornos de superfície.

O Período de Recuperação do Investimento Descontado foi superior para o conjunto “Rampa”, quase o dobro do PRI obtidos para os fornos circulares de superfície, mantendo a diferença relativa observada anteriormente no primeiro cenário. O maior custo construtivo dos fornos “Rampa” levou a delonga para recuperação do capital investido.

A Razão Benefício Custo foi maior que 1 para ambos fornos no segundo cenário, indicando a viabilidade dos investimentos. O conjunto de fornos “Rampa” apresentou B/C maior do que os fornos circulares de superfície.

#### **4.4. Conclusões**

Nos dois cenários avaliados (mercado de cocção e mercado siderúrgico), ambos os conjuntos de fornos se apresentaram viáveis economicamente por todos os índices econômicos calculados.

O sistema de fornos “Rampa” apresentou melhor desempenho econômico que os fornos de superfície em ambos os cenários, ou seja, apresentou maior lucro. Os fornos “Rampa” apresentaram melhores índices nos dois cenários, exceto para o Período de Retorno

do Investimento e Taxa Interna de Retorno Modificada, os quais foram influenciados pelo menor dispêndio financeiro para implantação do sistema de fornos circulares de superfície.

## Referências

ATKINSON, A. A.; BANKER, R. D.; KAPLAN, R. S.; YOUNG, S. M. **Management Accounting**. 3<sup>rd</sup> edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.

BARBIERI, J.C.; ÁLVARES, A.C.T.; MACHINE, C. Taxa interna de retorno: constrovérsias e interpretações. **GEPROS**. v.5. pp 131-142, 2007.

CARNEIRO, A.C.O.; LANA, A.Q.; OLIVEIRA, A.C.; PEREIRA, B.L.C.; SALLES, T.T. **Estudo da viabilidade técnica e econômica da produção de carvão vegetal em fornos circulares com baixa emissão de poluentes**. 2012. 41p. CNA – Confederação Nacional da Agricultura e Pecuária. CEPEA/ESALQ. Viçosa – MG. 2012.

COLOMBO, S. de F. de O.; HATAKEYAMA, H.; PILATTI, L. A. O custo de produção como fator determinante do futuro da produção artesanal de carvão vegetal no Brasil. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13., 2006, Bauru. **Anais...** Bauru: UNESP, 2006.

DIAS JÚNIOR, A. F. **Carvão vegetal para cocção de alimentos: aspectos mercadológicos e de qualidade para o consumo**. 2018. 105p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2018.

KASSAI, J.R.; KASSAI, S.; SANTOS, A.; ASSAF NETO, A. **Retorno de investimento: abordagem matemática e contábil do lucro empresarial**. São Paulo: Atlas, 1999. 280p.

KEELLING, R. **Gestão de Projetos: uma abordagem global**. 3<sup>a</sup> Ed. São Paulo: Saraiva, 2014, 286 p.

NOTÍCIAS AGRÍCOLAS. Cotações de silvicultura. Disponível em: <https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/silvicultura>. Acessado em 25 de jun. de 2018.

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

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. 3<sup>a</sup> ed. Viçosa: UFV, 2013, 385 p.

SANTOS, E. Queima de Gases da Carbonização e Recuperação de Licor Piro lenhoso - Aperam BioEnergia, 31p. 2014. In: III Fórum Nacional Sobre Carvão Vegetal. Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte - MG. Disponível em: <http://www.sif.org.br/evento/forum-nacional-sobre-carvao-vegetal>. Acessado em: 19 set. 2017.

SANTOS, I.S.S. **Resfriamento artificial de carvão vegetal em fornos de alvenaria**. 2013. 98p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2013.

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. **Economia Florestal**. 2<sup>a</sup> ed. Viçosa, MG: UFV, 2005. 178 p.