

MARCO TULIO CARDOSO

**SECAGEM DE TORAS PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL
UTILIZANDO A QUEIMA DE GASES DE CARBONIZAÇÃO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C268s
2015
Cardoso, Marco Tulio, 1985-
Secagem de toras para produção de carvão vegetal
utilizando a queima de gases de carbonização / Marco Tulio
Cardoso. – Viçosa, MG, 2015.
ix, 65f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.57-60.

1. Carvão vegetal. 2. Carbonização. 3. Queima de gás.
4. Gases - combustão. 5. Madeira - secagem. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal.
Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDD 22. ed. 634.98675

MARCO TULIO CARDOSO

**SECAGEM DE TORAS PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL
UTILIZANDO A QUEIMA DE GASES DE CARBONIZAÇÃO**

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

APROVADA: 23 de fevereiro de 2015.

Benedito Rocha Vital
(Coorientador)

Marcos Oliveira de Paula

Daniel Câmara Barcellos

Márcio Arêdes Martins

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
(Orientadora)

Aos meus queridos pais Julio e Bete, pelo amor incondicional!

Aos meus irmãos Juliana e André, por estarem sempre comigo.

À minha amada filha Julia, um presente de Deus!

À minha esposa Marquione, por sempre me apoiar.

Aos meus sobrinhos Rafael e Gabriela.

A Larissa, filha de coração.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, que na sua infinita bondade e justiça me permitiu a vida e concedeu a oportunidade de estudar e realizar este curso.

À Universidade Federal de Viçosa, pela formação acadêmica.

Ao Departamento de Engenharia Florestal, pela infraestrutura disponibilizada para o trabalho.

Aos funcionários da Pós-graduação do DEF, Alexandre, Ritinha e Dilson.

Ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira.

Ao CNPq pela bolsa concedida.

À Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (SECTES) e à FAPEMIG por financiar o projeto.

À Professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, por ser muito mais que uma orientadora, por toda amizade, respeito e dedicação.

Ao Professor Benedito Rocha Vital pelo exemplo de retidão, profissional e moral e pela coorientação na pesquisa.

À Professora Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, pelos auxílios e coorientação na pesquisa desenvolvida.

Ao amigo Daniel Câmara Barcellos, pela orientação e apoio na execução do projeto.

Ao Prof. Márcio Arêdes Martins, por sempre colaborar com nossas pesquisas e por aceitar de prontidão participar da banca de defesa.

Ao Prof. Marcos Oliveira de Paula, pela boa vontade e ajuda.

Ao Renato Castro, pela ajuda fundamental nas análises estatísticas e ideias na apresentação dos resultados.

Ao amigo Sálvio (Moiado), por ter sido um executor e gerente de toda pesquisa desenvolvida.

Ao Éder, por todo auxílio, ideias e prontidão em ajudar.

Ao Chico Bizerra, por ter ajudado tanto a resolver todos os problemas durante o experimento.

Ao grande amigo Bráulio, pela disposição em ajudar sempre.

Aos colegas Artur e Danilo, por terem sido supervisores de todas as secagens realizadas.

Aos funcionários do viveiro, Sr. Ivo e Sr. João, por todas as vezes que auxiliaram no carregamento e descarregamento do forno e do secador.

Esta foi uma pesquisa muito longa, de muito trabalho, muito suor, de muitas pessoas, sem as quais seria impossível terminá-la, por isso agradeço imensamente a todos que ajudaram na execução das secagens, nos turnos diurnos e noturnos: Mateus, Miguel, Ramon, Reginaldo, Lawrence, Edna, Isabela, Fernanda, Ana Carolina, Lucas e Clarissa.

Ao Arthur Freitas Gomes, pela relevante ajuda.

Ao amigo Odilon, que me substituiu em todas as vezes que precisei ausentar do meu trabalho para realizar o experimento.

Ao Prof. Sergio Yoshimitsu Motoike, por ter apoiado desde o início minha pesquisa e ter me liberado do trabalho todas às vezes necessárias.

BIOGRAFIA

MARCO TÚLIO CARDOSO, filho de Júlio Alberto Cardoso e Elisabete Barbosa Cardoso, nasceu em 30 de abril de 1985, na cidade de Viçosa, Estado de Minas Gerais.

No ano de 2003, ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em janeiro de 2008.

Em março de 2008, ingressou no Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, em nível de Mestrado, na área de Tecnologia da Madeira, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em fevereiro de 2010.

Foi bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial, pela FAPEMIG, no projeto “Desenvolvimento Tecnológico da Produção de Carvão Vegetal de Florestas Plantadas em Minas Gerais”, coordenado pela Prof.^a Angélica de Cássia O. Carneiro, pelo período de março de 2010 a fevereiro de 2011.

Em março de 2011 ingressou no Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, em nível de doutorado.

Em fevereiro de 2013 tomou posse como servidor da Universidade Federal de Viçosa, onde é Secretário do Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1. Contexto energético da produção de carvão vegetal	4
3.2. Carbonização da madeira	5
3.3. Aproveitamento dos gases da carbonização	7
3.4. Secagem da madeira	9
3.4.1. Água na madeira	9
3.4.2. Tipos e localização de água na madeira	10
3.4.3. Movimentação da água na madeira.....	10
3.4.4. Secagem natural da madeira.....	12
3.4.5. Secagem artificial da madeira.....	14
3.4.6. Propriedades da madeira que afetam a secagem	16
3.5. Influência da umidade da madeira no rendimento gravimétrico e qualidade do carvão vegetal.....	18
4. MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1. Matéria prima	20
4.2. Sistema de forno-fornalha.....	20
4.3. Descrição do Secador metálico e do Sistema de transporte dos gases	21
4.3.1. Descrição do sistema de Transporte dos gases	22
4.4. Secagem artificial da madeira	25
4.4.1. Disposição da madeira dentro do secador	26
4.4.2. Perfil de temperatura dos gases combustos	26
4.4.3. Características térmicas do secador.....	31
4.4.4. Umidade da madeira.....	32
4.4.5. Redução de umidade e taxa de secagem	33
4.5. Produção e propriedades do carvão vegetal.....	34
4.5.1. Parâmetros técnicos das carbonizações.....	34
4.5.2. Amostragem e propriedades do carvão	35
4.6. Balanço de massa e energia.....	36
4.6.1. Consumo de energia elétrica pelo secador	36
4.6.2. Eficiência térmica do secador	36
4.6.3. Estimativa de aumento de rendimento gravimétrico em carvão vegetal ...	37
4.7. Delineamento Experimental	37
4.7.3. Delinemento experimental para avaliação do perfil térmico do secador e efeito da classe de diâmetro sobre a redução relativa de umidade	37
4.7.4. Delinemento experimental para avaliação do efeito da posição da tora ao longo da pilha e ao longo da tora no teor de umidade final da madeira.....	38
5. RESULTADOS	39
5.1. Temperaturas dos gases no sistema de transporte.....	39
5.2. Perfil térmico do secador	43
5.3. Efeito da posição da tora na pilha de madeira e posição ao longo da tora na umidade final.....	46
5.3. Efeito da classe de diâmetro na taxa de secagem e redução relativa de umidade	49

5.3.1. <i>Efeito da posição da tora na redução relativa de umidade</i>	50
5.4. Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal	52
5.5. Balanço energético da secagem e estimativa de ganho em rendimento de carvão vegetal	52
6. CONCLUSÕES.....	55
7. RECOMENDAÇÕES.....	56
REFERÊNCIAS	57
ANEXO	61

RESUMO

CARDOSO, Marco Tulio, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2015. **Secagem de toras para produção de carvão vegetal utilizando a queima de gases de carbonização** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientadores: Benedito Rocha Vital e Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.

O objetivo deste trabalho foi realizar a secagem artificial de toras utilizando gases combustos do sistema forno-fornalha. Foi avaliado o efeito da classe diamétrica na taxa de secagem e redução relativa de umidade. Determinou-se a influência da posição da tora na pilha de madeira na secagem, além da variação de teor de umidade ao longo da tora. Foi desenvolvido e construído um secador metálico, com capacidade volumétrica útil de 16,8 m³. Realizaram-se duas secagens para cada classe de diâmetro das toras, a saber: Classe 1 (8 a 14 cm); Classe 2 (14 a 22 cm) e Classe 3 (8 a 22 cm), totalizando seis secagens. Utilizou-se 45 amostras de toras, com 2 metros de comprimento, para se obter o perfil de umidade da pilha de madeira. Estas foram distribuídas em 3 estratos (linhas) e 3 seções (colunas) ao longo da pilha de madeira, sendo cada amostra pesada antes e depois da secagem. O tempo de secagem estabelecido foi de 68 horas e a temperatura média do gás de entrada no secador foi de 150 °C. Determinou-se, também, o rendimento gravimétrico e as propriedades do carvão vegetal. De acordo com os resultados, houve uma redução relativa do teor de água médio de 39,34% para Classe 1; 27,43% para Classe 2 e 42,58% para Classe 3. Obteve-se diferença entre os estratos, tendo maior perda de água ocorrida nas toras posicionadas nos estratos superiores e entre as seções, tendo a Seção II a maior redução. O teor de umidade final obtido nas toras amostrais indicaram menor variação, tanto nas posições ao longo da pilha como ao longo do comprimento das toras, quando se procede a separação por classes de diâmetro, tendo a Classe 3 gerado uma carga de madeira mais heterogênea, quanto ao teor de umidade, após as secagens. Obteve-se um rendimento gravimétrico médio em carvão vegetal de 30,89%, e as propriedades do carvão o adequam para utilização em siderurgia. O consumo de energia elétrica do secador foi de aproximadamente 49,4 kW por tonelada de madeira (massa seca). A maior eficiência térmica foi obtida nas secagens da Classe 1, com 0,61. O incremento em rendimento gravimétrico estimado com a utilização de madeira seca foi de 4,85%. Conclui-se que a secagem de toras de menor diâmetro é mais efetiva e o ganho estimado na produção de carvão vegetal com toras secas foi significativo.

ABSTRACT

CARDOSO, Marco Tulio, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, february of 2015. **Drying of logs using combustion gases of a kiln-furnace system.** Adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-Advisers: Benedito Rocha Vital and Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.

The main objective of this work was the artificial drying eucalyptus logs using combustion gases of a kiln-furnace system, and the specific objective of evaluating the effect of the diameter class in rate and drying homogeneity. It was developed and built a metal dryer with useful volumetric capacity of 16.8 m³. It was performed two dryings, repeats, for each diameter class of the logs, as follows: Class 1 (8 to 14 cm); Class 2 (14 to 22 cm) and Class 3 (8 to 22 cm), totaling six dryings. It was used 45 log samples to get the moisture profile of the wood pile inside the dryer. These were divided into 3 layers (rows) and 3 sections (columns) along the stack of wood, each sample was weighed before and after drying. The average of drying time set was 68 hours and the average temperature of the inlet gas in the dryer was 150 °C. Also, it was determined the gravimetric yield and properties of charcoal for each diameter class of the logs. According to the results, there was a relative reduction in the average water content of 39.34% for Class 1; 27.43% for Class 2 and 42.58% for Class 3. There was obtained difference between the strata, with greater loss of water in the logs positioned in stratum 1 and 2, and between sections, the Section II had the greater reduction. It was no significant difference in the gravimetric yield of charcoal between the diameter class, however, for Class 1, the yield was higher than the others, 33.95%. The Charcoal produced with Class 1 logs was rated "very little friable", and friability lower than the others. The bulk density and ash content did not differ between classes. The fixed carbon content was higher in classes 1 and 3. In the analysis, there was no difference in moisture content between the parties of the logs, for Class 1, indicating that they were dried homogeneously so that became homogeneous. It has been estimated an increase in gravimetric yield for the 3 classes: 36,38% for Class 1; 30,54% for Class 2 and 30,02% for Class 3. The dryer had been shown to be effective efficient and have appropriate structure; scores a relative reduction of 36.45% in the moisture content and the drying was more efficient for smaller diameter logs.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e consumidor do carvão vegetal do mundo, sendo Minas Gerais o estado que mais colabora com este cenário, consumindo cerca de 66% do carvão vegetal produzido no país. Em 2012, o setor que mais consumiu o carvão vegetal foram os produtores independentes de ferro-gusa, com pouco mais de 60% do consumo total, seguido pelas usinas integradas de aço, com 24,5%. O consumo doméstico corresponde a aproximadamente apenas 1% do consumo total (AMS, 2013).

O processo de produção de carvão vegetal envolve inúmeras etapas, ocorrendo muitas perdas até que se tenha o produto final. A água na madeira é um dos principais problemas, indubitavelmente, desde o transporte das toras até a unidade de produção de carvão vegetal, até no processo de carbonização, tendo influência inclusive na qualidade do carvão. As unidades de produção de carvão vegetal utilizam madeira com as mais variadas umidades. Em função da grande demanda, não é possível, muitas vezes, aguardar o tempo necessário para secagem natural, realizando a carbonização de madeiras com altas umidades iniciais.

Além do alto teor de umidade inicial, outro problema é a sua grande variação entre as toras e ao longo do comprimento de uma tora. Logo, para carbonização, a carga de madeira deve ter um teor de umidade médio de 30%, base seca, porém, a variação da umidade entre as toras deve ser a menor possível, afim de que se produza carvão em quantidade e qualidade altas.

Sabe-se que o diâmetro das toras tem influência no seu teor de umidade, principalmente quando da secagem natural, por meio da qual toras com diâmetros menores tem uma secagem mais efetiva, comparando-se com toras de diâmetros maiores. Logo, a separação de toras por classes de diâmetro para a carbonização torna-se uma alternativa para minimizar o impacto negativo que a água na madeira tem no processo, uma vez que tornaria a carga de madeira com menor variação de teor de umidade.

Contudo, a separação de toras por classes diamétricas nem sempre é viável, sendo necessário o desenvolvimento de tecnologias que possam secar a madeira mais rapidamente, além de gerar uma carga de madeira uniforme quanto ao teor de umidade.

O desenvolvimento de secadores de toras, visando a produção de carvão vegetal, ainda é incipiente, contudo, essa é uma alternativa de grande importância na cadeia

produtiva do carvão vegetal, promovendo diversos ganhos, sendo menor tempo de secagem, menor necessidade de estocagem de madeira, redução da poluição, redução do ciclo de carbonização com aumento da produtividade, elevação do rendimento gravimétrico e melhoria da qualidade do carvão vegetal.

Atualmente a queima dos gases da carbonização é uma tecnologia muito difundida entre as grandes empresas, por meio da qual obtem-se grande quantidade de energia térmica, logo, o aproveitamento dessa energia para a secagem das toras em secadores torna-se uma alternativa atraente.

Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de secadores para toras, capazes de, aproveitar a energia térmica resultante da queima dos gases da carbonização, reduzir o teor de umidade e gerar carga de madeira com baixa variação entre toras e ao longo do comprimento das toras.

2. OBJETIVOS

Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho foi secar madeira em toras com a utilização da energia térmica liberada na queima dos gases da carbonização.

Objetivos Específicos

- Projetar e construir um secador metálico para secagem de madeira roliça;
- Analisar as características térmicas do sistema de transporte de gases combustos e obter as perdas térmicas do mesmo;
- Determinar as características térmicas do secador metálico;
- Determinar a umidade da madeira, em função da posição da tora na pilha de madeira e ao longo da tora;
- Determinar a massa de água eliminada durante as secagens por tratamento;
- Determinar a taxa de secagem;
- Avaliar a influência da classe de diâmetro da madeira no desempenho da secagem;
- Determinar o rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal;
- Obter o consumo de energia elétrica do secador;
- Determinar a eficiência térmica do secador;
- Estimar o ganho em rendimento gravimétrico em carvão vegetal devido a redução da umidade da madeira.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Contexto energético da produção de carvão vegetal

A procura por fontes de energia sempre foi uma das maiores prioridades da humanidade, desde os seus primórdios. O que se busca nessas fontes é eficiência, facilidade de transporte e manuseio, e baixo custo. Porém, na atualidade, a crescente preocupação com os problemas ambientais oriundos do uso de combustíveis fósseis como fonte energética, direciona essa busca para fontes que preencham mais que esses requisitos, sejam também renováveis e menos nocivas ao meio ambiente.

O uso de madeira para produção de energia térmica é tido como um indicio de atraso evolutivo em países em desenvolvimento. No Brasil, segundo dados do Balanço Energético Nacional - BEN, na década de 1940, 83,3% da oferta interna brasileira de energia tinha como fonte a madeira e o carvão vegetal, enquanto a participação do petróleo e das hidrelétricas era de 6,4 e 1,5%, respectivamente, e a dos produtos da cana-de-açúcar de 2,4%. Porém, em 2013 o petróleo passou a ser a fonte de energia com maior participação (39,3%), seguido pelos produtos da cana-de-açúcar, com 16,1%, gás natural com 12,8% e hidrelétricas, com 12,5%. A lenha e o carvão vegetal, que eram as principais fontes, têm hoje uma participação de 8,3%, que comparativamente com o ano de 2012, a lenha e carvão vegetal tiveram uma queda de 4,6% no seu consumo, enquanto o gás natural apresentou um aumento de 15,9% (EPE, 2014). Esses números evidenciam a necessidade de se investir em novas tecnologias no setor de produção do carvão vegetal, otimizando o processo para tornar este combustível mais competitivo.

A utilização do carvão vegetal como fonte de energia termorreduzora converge com o cenário mundial de preocupação com as questões ambientais, pois sabe-se que além de ser fonte renovável de energia, é menos poluente que o carvão mineral.

Inicialmente, a produção de carvão vegetal no Brasil utilizava madeira oriunda de matas nativas. Segundo Matarelli *et al.* (2001), os plantios para produção de carvão com fins siderúrgicos iniciaram-se no Brasil de maneira pioneira e intensiva em 1937. Entretanto, só a partir de 1960, por meio do Programa de Incentivo Fiscal ao Florestamento e Reflorestamento, houve aumento das áreas de florestas plantadas em todo o País, proporcionando a utilização da madeira como fonte energética pelas indústrias.

O maior consumo de carvão ocorreu em 2005, quando foram produzidos e consumidos mais de 38 milhões de metros de carvão (MDC) (AMS, 2012). No entanto, a indústria siderúrgica foi afetada pela crise econômica ocorrida no cenário mundial a partir de setembro de 2008, provocando acentuada diminuição na exportação de ferro-gusa, aço e ferro-liga e, conseqüentemente, na produção e no consumo de carvão vegetal.

A crise econômica mundial afetou o preço do carvão vegetal ocasionando uma queda de mais de 50% no seu preço. Segundo dados do Centro de Inteligência em Florestas, no período de novembro de 2008 a maio de 2009 o preço médio era de R\$ 65,00/metro de carvão (MDC), enquanto no período anterior à crise chegou a ser comercializado por R\$ 210,00/MDC. Devido ao baixo preço praticado atualmente, os produtores estão com grande dificuldade para comercializar o carvão, e quando conseguiam vendê-lo o valor pago não está cobrindo os custos de produção, uma vez que o preço do carvão vem se mantendo em R\$ 113,00 (CIFLORESTAS, 2015).

3.2. Carbonização da madeira

No processo de carbonização a madeira é submetida a tratamento térmico sobre temperaturas acima de 300 °C, numa atmosfera redutora controlada (ALMEIDA e REZENDE, 1982). Para maximizar a produção e também ter carvão de qualidade a temperatura máxima de carbonização não deve ultrapassar 400 °C (Carneiro e Costa, 2013).

A carbonização, portanto, é um processo de pirólise lenta, cujo objetivo principal é eliminar a maior parte do oxigênio e do hidrogênio pela ação do calor e, com isso, possibilitar a concentração do carbono na estrutura residual, que é o carvão vegetal. A transformação da madeira em carvão vegetal é um processo de decomposição térmica físico-química irreversível, que se inicia com a secagem, com a perda de água livre ou capilar e água de adesão. Após a retirada da água, inicia-se a fase de pirólise, com a produção de gases condensáveis e não condensáveis (VALE e GENTIL, 2008).

Para se compreender bem o processo de carbonização da madeira é preciso conhecer a madeira e sua composição. A madeira é constituída por celulose, hemicelulose, lignina e extrativos. A celulose é o composto orgânico mais abundante no planeta, é um polímero composto por unidades de D-glicopirranose, interligadas por ligações glicosídicas

beta 1-4, formando longas cadeias; e sua proporção na madeira é de 40 a 45%. As hemiceluloses são polímeros de várias unidades de açúcares diferentes, originando cadeias ramificadas, correspondendo de 15 a 25% da madeira. As ligninas são moléculas amorfas, altamente complexas, cujo polímero é formado principalmente por unidades aromáticas de fenilpropano, considerado uma substância incrustante, tendo uma proporção de 18 a 35% nas folhosas e 25 a 35% nas coníferas. Os extrativos são componentes acidentais que não fazem parte da composição química da parede celular, geralmente formados a partir de graxas, ácidos graxos, alcoóis graxos, fenóis, terpenos, esteróides, resinas ácidas, resinas, ceras, e alguns outros tipos de compostos orgânicos (ROWELL et al., 2005).

Cada constituinte da madeira comporta-se diferentemente durante a carbonização, devido à natureza de sua composição química. A celulose é degradada no intervalo de temperatura de 315 a 400 °C (YANG et al., 2007). De acordo com Shen et al. (2010), as hemiceluloses são degradadas em temperaturas entre 190 e 360 °C. A lignina é o componente químico mais importante da madeira quando se objetiva a produção de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico está diretamente relacionado ao conteúdo de lignina na madeira. Este componente começa a degradar-se em temperaturas mais baixas, cerca de 150 °C, e ao contrário das celulosas e das hemiceluloses, a lignina continua perdendo peso em temperaturas superiores a 500 °C, tendo como resultado o carvão vegetal (OLIVEIRA et al., 1982).

Rezende (2006) descreve o processo de carbonização em quatro fases. Na primeira fase ocorre a secagem da madeira até a temperatura de 110°C, havendo somente liberação de água. Na segunda fase, que varia de 110 a 250°C, a 180°C tem início a liberação da água de constituição pela decomposição de hemiceluloses e pouca massa é perdida até 250°C. Forma-se a madeira parcialmente carbonizada ou atijo. A terceira fase ocorre entre 250°C e 350°C, com a intensificação da decomposição da celulose e hemiceluloses, havendo expressiva perda de massa. Ao atingir a temperatura de 350°C o carvão tem aproximadamente 75% de carbono fixo e se considera que a carbonização está praticamente pronta. Na quarta fase, de 350°C a 500°C, reduz-se gradualmente a liberação de voláteis, principalmente gases combustíveis, continuando a fixação de carbono.

No que se refere à combustão de gases da carbonização, o conhecimento das fases da carbonização é de grande importância, a exemplo da etapa inicial do processo, em que ocorre grande quantidade de liberação de vapor de água, que representa a fase endotérmica,

na qual a combustão dos gases na fornalha ocorre com dificuldades, sendo necessário adicionar combustíveis auxiliares para promover a combustão. Contudo, à medida que a temperatura de carbonização se eleva, principalmente acima de 300°C, reduz-se a liberação de vapor de água e aumenta a liberação de gases combustíveis de alto poder calorífico, como monóxido de carbono e metano, sendo esta fase exotérmica. Devido as características dos gases e temperatura, há maior facilidade de queima na fornalha, resultando em grande liberação de energia na forma de calor.

Neste contexto, a utilização de uma madeira com baixo teor de umidade, resultante da secagem artificial, reduziria a fase endotérmica, diminuindo o tempo total de carbonização e fazendo com que a fase exotérmica inicie mais rapidamente, o que é vantajoso para eficiência da fornalha de queima dos gases e fornecimento de calor para secagem artificial da madeira. Além disso, resultaria também em um maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal e uma melhor qualidade do mesmo.

Os produtos gerados na carbonização da madeira, além do carvão vegetal, são a água e produtos orgânicos, incluindo o ácido acético, metanol, compostos aromáticos, derivados fenólicos, aldeídos e breu ou piche; e em gases não condensáveis, dentre os quais se destacam o metano (CH₄), o dióxido de carbono (CO₂), o monóxido de carbono (CO), o hidrogênio (H₂) e os hidrocarbonetos (BRITO, 1990).

Os principais produtos gasosos da pirólise são CO e CO₂, ressaltando que a quantidade de CO produzido aumenta entre 400 e 900°C e que o rendimento de CO₂ tende a estabilizar ou a decrescer em altas temperaturas. As emissões de CH₄ e H₂ ocorrem em menor escala, com tendência de aumento com a elevação da temperatura (TACCINI, 2011).

3.3. Aproveitamento dos gases da carbonização

De acordo com Pimenta et al. (2004), os gases gerados durante a carbonização contêm vários compostos poluentes, sendo que os principais são os compostos orgânicos condensáveis e os gases não condensáveis. Os gases não condensáveis são compostos principalmente de CO, CO₂, H₂ e CH₄. O CO₂ representa 58% em volume dos gases não condensáveis, sendo o principal gás da carbonização por ser produzido em grandes volumes.

Devido às preocupações com os impactos negativos das atividades de produção de carvão vegetal ao meio ambiente, buscou-se a criação de tecnologias que mitigassem os mesmos, principalmente a emissão de gases de efeito estufa e material particulado. Essas tecnologias seguiram basicamente duas linhas de aplicação, uma levava a condensação dos gases da carbonização, a outra conduzia à sua combustão.

Por causa das questões de mercado e custo, rapidamente as tecnologias de recuperação de gases condensáveis da carbonização foram abandonadas, uma vez que os equipamentos eram caros e de difícil manutenção, além de não haver demanda no mercado para os produtos gerados, assim o maior foco tanto das grandes empresas quanto dos pequenos e médios produtores é a combustão dos gases da carbonização.

A implementação de fornalhas para redução das emissões na carbonização eleva o custo de produção do carvão vegetal. Logo, é importante a realização de estudos que criem alternativas para utilização da energia na forma de calor que é liberada após a combustão dos gases, que pode ser utilizada para aquecimento de granjas, secagem de grãos, geração de energia elétrica, ou até mesmo no próprio processo de carbonização.

Nas principais empresas produtoras de carvão vegetal, as pesquisas com a tecnologia de combustão dos gases, por meio de fornalhas, se iniciaram em 2006. A partir disso, vários estudos estão sendo desenvolvidos, com objetivo de melhorar a eficiência das fornalhas, incluindo arquitetura, materiais, diferentes potenciais térmicos e sistemas de exaustão natural ou forçada (BARCELLOS, 2010).

A Arcelor Mittal BioFlorestas iniciou em 2010 um projeto em parceria com a Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig, para aproveitamento dos gases da carbonização para geração de energia elétrica, por meio de turbina de queima externa (ARCELORMITTAL, 2013).

No âmbito acadêmico existem alguns trabalhos específicos sobre sistemas de forno-fornalha para produção de carvão vegetal com combustão dos gases. Cardoso (2010) desenvolveu um sistema capaz de produzir carvão vegetal de qualidade, reduzindo em 97% a emissão de metano, 93% a emissão de monóxido de carbono e 95% de material particulado. Além disso, o mesmo autor observou que em uma carbonização nesse sistema, a energia na forma de calor liberada após a combustão dos gases da carbonização pela fornalha se equivale a mesma energia liberada da combustão direta de 1,4 toneladas de madeira de eucalipto, a 30 % de umidade.

Oliveira (2012) desenvolveu outro sistema de forno/fornalha, no qual a queima dos gases na fornalha ocorreu durante 36 horas, tendo sido necessário abastecer a fornalha durante as primeiras horas até que o volume de gases com alto poder calorífico fosse suficiente para manutenção da chama.

Coelho (2013) desenvolveu uma fornalha metálica para queima dos gases da carbonização da madeira e obteve uma redução de metano de 99,8%.

Percebe-se que a tecnologia de combustão dos gases vem sendo pesquisada e implementada, permitindo algumas possibilidades de aproveitamento da energia térmica liberada no processo. A possibilidade de geração de energia elétrica, por meio de turbinas e geradores movidos a gás, ou acoplando-se a uma caldeira a vapor, ligada a uma turbina conectada a um gerador de eletricidade, possui um elevado custo para implantação, tornando atrativa a alternativa de direcionamento dessa energia térmica para secagem prévia da madeira, que requer um custo de implantação inferior, diminuindo os riscos de investimento e tornando a produção de carvão vegetal mais sustentável (CARNEIRO *et al.*, 2012).

3.4. Secagem da madeira

3.4.1. Água na madeira

O crescimento e desenvolvimento de uma árvore estão condicionados a presença de água, pois é através dela que os nutrientes do solo são movidos para as folhas, onde são convertidos em energia pela fotossíntese. A água é o meio de transporte e sua presença em grandes quantidades dentro da árvore é uma condição, essencial para sua vida (KLITZKE, 2003).

Porém, para muitos usos da madeira, a água presente em seu tecido lenhoso é prejudicial, por isso a secagem da madeira torna-se um dos primeiros tratamentos dessa matéria-prima, além deste procedimento reduzir consideravelmente sua massa para o transporte.

3.4.2. Tipos e localização de água na madeira

Existem essencialmente três tipos de água na madeira, ou melhor, a água presente na madeira se associa a mesma de três formas. A primeira delas é a chamada água de livre, ou de capilaridade; a outra é a água de adesão; por fim, existe a água de constituição (KLITZKE, 2003).

A água livre é aquela que ocupa os espaços entre as células e as suas cavidades, também presente nos elementos de vasos (SKAAR, 1972).

A água de adesão é aquela ligada à parede celular, e está retida na madeira por ligações de hidrogênio e forças de Van der Waals (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

A Umidade de Saturação das Fibras (USF) ocorre quando a água livre da madeira foi totalmente retirada, havendo apenas água presente na parede celular e a água de constituição. O teor de umidade na USF médio é de 28% (SKAAR, 1972).

Como a água de adesão é mais fortemente ligada à madeira, certamente será mais difícil de ser retirada, por isso a USF é importante, pois abaixo deste ponto, o gasto energético necessário para retirada da água da madeira é muito maior, além disso, segundo Ponce e Waitai (1985), a secagem da madeira abaixo da USF ocasiona mudanças significativas nas suas propriedades físicas e mecânicas.

Por fim, a água de constituição é aquela que pode ser observada somente quando a madeira sofre algum tipo de degradação, por exemplo a degradação térmica, por meio da qual há formação de moléculas de água.

3.4.3. Movimentação da água na madeira

Segundo Andrade (2000), a energia na forma de calor é transferida do ambiente para a superfície da madeira, através de convecção, e daí para seu interior por condução. No início da secagem, quando a madeira está úmida, o fator mais importante é a transferência de energia na forma de calor do ambiente para a superfície. Com a perda de umidade da superfície da madeira, a transferência de calor da superfície para o interior torna-se o fator limitante, uma vez que a temperatura do interior da madeira precisa ser elevada para promover o aumento da energia cinética das moléculas de água, favorecendo sua movimentação para a superfície.

A transferência de calor e a evaporação superficial são controladas pelas condições externas, como temperatura ambiente, velocidade do ar e umidade relativa, enquanto que a movimentação de umidade do interior até a superfície da madeira, que ocorre por meio de um gradiente de umidade, é controlado principalmente por propriedades da madeira como a permeabilidade e a massa específica (GALVÃO E JANKOWSKY, 1985).

A água na madeira se movimenta de regiões de alta umidade para aquelas de baixa umidade, implicando que a parte externa da madeira deve estar mais seca do que seu interior para que ocorra a secagem. Os elementos situados na superfície cedem água para o ar que a envolve, sendo que, quanto mais alta for a temperatura, menor a umidade relativa e maior a velocidade de deslocamento do ar, mais rápida será a secagem.

De acordo com Skaar (1988), quando a madeira está perdendo umidade, duas principais forças atuam simultaneamente, a capilaridade e a difusão. A capilaridade atua na movimentação da água no estado líquido, através de capilares representados na madeira principalmente pelos lumes e pontuações, além de fibras, traqueídes e outros elementos anatômicos. Segundo os mesmos autores, a tensão capilar é decorrente da tensão superficial na interface gás/líquido e inversamente proporcional ao raio do capilar.

O movimento da água higroscópica pode ser considerado como um fenômeno de difusão (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985), onde a água está adsorvida na superfície e no interior da parede celular, ligada aos componentes básicos da madeira, sobretudo por ligações de hidrogênio e forças de Van der Waals. As moléculas de água movimentam-se de regiões com elevadas concentrações para regiões com baixas concentrações. Assim como a velocidade de difusão da água higroscópica depende do gradiente de umidade, a difusão do vapor d'água é função do gradiente de pressão. No interior da madeira, a pressão de vapor aumenta de acordo com a elevação da umidade até a umidade de saturação das fibras (USF) (OLIVEIRA, 1981).

Durante a secagem os mecanismos de movimentação por difusão de vapor d'água e de água higroscópica e capilar são realizados simultaneamente (OLIVEIRA, 1981).

A diferença entre o movimento capilar e o de difusão é que a difusão é um processo lento e considerado complexo, porque ocorre simultaneamente, difusão de vapor através das cavidades celulares e difusão de água higroscópica nas paredes celulares da madeira, ou seja, durante a secagem da madeira, tanto a difusão de água higroscópica

como a difusão de vapor de água, ocorrem simultaneamente. Sendo que ao ser deslocada do centro da madeira até a superfície, grande parte da umidade passa através das paredes celulares pelo processo de difusão da água higroscópica, que evapora dentro das cavidades celulares e passa por sua vez através do lume, pelo mecanismo de difusão de vapor. Na continuidade da sua migração para a sua superfície, a água no estado de vapor nos lumes é adsorvida por outra parede celular, passando através dela por difusão de água higroscópica, e assim sucessivamente, até atingir a superfície da madeira (MELLADO, 2007).

No processo de produção de carvão vegetal, na fase inicial ocorre a secagem. Porém, a secagem dentro de um forno não é eficiente nem homogênea. Essa ineficiência causa danos na madeira que prejudicam a qualidade final e o rendimento do carvão vegetal. Esses danos são causados devido ao aumento abrupto de temperatura dentro do forno, gerando assim pressões de vapor altas dentro das células da madeira, causando muitas vezes o rompimento da parede celular, isso, por sua vez, ocasiona o menor rendimento em carvão vegetal e maior geração de finos.

3.4.4. Secagem natural da madeira

A secagem ao ar livre, ou natural, é o método mais antigo, e depende basicamente das condições do clima, como temperatura e umidade do ar, velocidade do vento. Neste caso, o controle pode ser feito na escolha do local do pátio de secagem, distância entre as pilhas de madeira, posicionamento em relação a corrente predominante do ar, altura da pilha, etc.

A madeira exposta ao ar perde ou ganha umidade até atingir um equilíbrio dinâmico, conhecido como umidade de equilíbrio. Normalmente, a umidade de equilíbrio da madeira é obtida em função da temperatura e da umidade relativa do ambiente a que a madeira está exposta. (ELEOTÉRIO *et al*, 1998).

A umidade de equilíbrio pode ser determinada para o local onde a madeira será empregada, o que pode ser conseguido expondo-se amostras de madeira às temperaturas e umidades relativas, podendo-se utilizar ensaios de campo, secador artificial, câmara de climatização ou estimativas por meio de equações (BARAÚNA e SOUZA DE OLIVEIRA, 2009).

Rezende (2009) estudando a secagem natural da madeira do clone *E. urophylla* x *E. camaldulensis* (VM 01), com casca e sem casca, durante 200 dias, em Lavras –MG,

obteve a curva de secagem, na qual se observou que a casca influenciou na secagem. As toras com casca apresentaram maior umidade do que as toras sem casca e na primeira semana as toras com casca praticamente não perderam umidade, enquanto que as toras sem casca tiveram a sua umidade reduzida de 120% para 107%.

Barros (2006) realizou a secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis* aos 11 anos de idade, no Rio Grande do Sul e observou que a umidade média das toras atingiu 70%, após 30 dias de exposição às condições ambientais, partindo de uma umidade inicial de 106%. Aos 60 dias de secagem, a umidade média aproximou-se de 40%, após 180 dias, a umidade média estava em 27%.

Vital *et al.* (1985), estudando a secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis*, aos 5 anos de idade, em Viçosa, MG, observaram que a redução de umidade em função do tempo é afetada pelo diâmetro das toras e presença de casca. As toras sem casca atingiram 23% de umidade média após 175 dias de secagem e as toras com casca atingiram 32%, assumindo-se uma umidade inicial de 129%. A presença de casca teve maior influência na perda de umidade em relação à madeira sem casca, nas quatro primeiras semanas de secagem. As toras com diâmetro superior a 12,0 cm apresentaram umidade superior a 50% após os 175 dias de secagem, enquanto as toras de menores diâmetros apresentaram umidade entre 16 e 27%. Observaram também que a perda de umidade é afetada pela posição das toras nas pilhas. A umidade das toras na região inferior das pilhas variou de 20 a 56%; na região central da pilha, variou de 19 a 44% e, na região superior, de 16 a 43%.

Pinheiro (2013) observou uma maior velocidade de secagem natural em toretes de madeira sem casca. Verificou também a velocidade de secagem em função do comprimento das toras, sendo 0,20, 0,40 e 0,60m de comprimento, obtendo uma diferença não significativa entre os comprimentos maiores, porém uma velocidade de secagem maior nas peças de 20cm. Para diâmetro menor que 10 cm, está atingiu 30% de umidade aos 28 dias, contra 49 dias das demais.

O comprimento de toras influencia a secagem até certo valor, uma vez que a velocidade de movimentação da água na madeira que é cerca de 10 a 15 vezes maior na direção longitudinal que na transversal (MELLADO, 2007), porém, para produção de carvão vegetal em escala industrial, na qual se utilizam toras de comprimento acima de 2

metros, esse efeito é minimizado, tornando mais importante a observação do diâmetro das toras.

Rezende (2009) estudando a secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus*, aos 8 anos de idade, em Lavras, MG, em duas classes diamétricas, verificou que após 200 dias de secagem, as toras com casca da maior classe diamétrica apresentaram umidade média de 72%, enquanto as toras da menor classe estavam na faixa de 39% de umidade, com redução total de umidade em relação a inicial de 43 e 65%, respectivamente. Para as toras sem casca, a umidade média da classe de maior diâmetro foi de 55% (redução total de umidade em relação à inicial de 75%) enquanto para a classe de menor diâmetro foi de 30% (redução de 79%).

Segundo Valente (1986) a madeira utilizada nas carbonizações deve apresentar teor de umidade abaixo de 30%, para alcançar um melhor desempenho do processo e qualidade do produto, o que para madeiras de diâmetros maiores é extremamente difícil de ocorrer na secagem natural.

Na produção de carvão vegetal, o maior problema da secagem natural é o tempo necessário até atingir níveis mais baixos de umidade, ocasionando perdas na produtividade, daí a importância de se criar mecanismos de secagem artificial eficientes e de baixo custo, otimizando não só a produtividade, mas também o rendimento e qualidade do carvão.

3.4.5. Secagem artificial da madeira

O processo de secagem artificial tem como objetivo promover o equilíbrio entre a evaporação da água na superfície da madeira com a movimentação da mesma em seu interior e as reações consequentes dessa movimentação, que podem ocasionar contrações na madeira. Para isso é preciso além de conhecimento em termodinâmica da secagem, conhecer sobre a madeira a ser seca e o funcionamento do secador (JANKOWSKY, 1995).

A secagem artificial convencional é conduzida em estufas ou secadores, com controle das condições internas da mesma e segundo STCP (1990), este é o processo de maior aplicação na indústria madeireira. As estufas de secagem convencional são câmaras de secagem que operam com temperaturas entre 35°C e 90°C, dotadas de um sistema de aquecimento, um sistema de umidificação do ar, um conjunto de “dampers” ou janelas, que permitem a troca de ar entre o interior da estufa e o meio externo, e um sistema de ventilação, que promove a circulação do ar através das pilhas de madeira (PRATT, 1974).

Os sistemas de aquecimento mais utilizados são trocadores de calor, podendo utilizar como fluido térmico ar quente, água quente, vapor d'água ou óleo térmico. A umidificação do ar é realizada pela liberação de vapor de baixa pressão ou pela aspersão de água fria dentro do secador. A circulação do ar é promovida por um conjunto de ventiladores, posicionados lateralmente em relação às pilhas de madeira ou sobre o falso teto acima das pilhas. Os “dampers” ou janelas são colocados de tal forma que a ação dos ventiladores faz com que o ar quente e úmido do interior do secador seja expelido, com entrada de ar do meio externo (JANKOWSKY, 1995).

Os secadores devem possuir uma entrada de ar quente, ventiladores para forçar turbulência dentro do secador, janelas de saída do ar úmido. O posicionamento das entradas e saídas de ar quente e úmido deve permitir uma circulação eficiente, fazendo com que o ar quente percole o máximo possível as peças de madeiras, e por um tempo suficiente para transferir a energia na forma de calor para as mesmas, iniciando a secagem.

Conforme Tuset e Duran (1986) a secagem artificial convencional apresenta como principais vantagens a independência das condições climáticas, a menor duração em relação à secagem ao ar livre, o maior controle sobre os defeitos e a umidade final, a adequação a todo tipo de madeira e a ampla experimentação disponível.

Segundo Susin (2012) o processo de secagem em estufa é influenciado por algumas características da madeira, tais como a massa específica, estrutura anatômica, teor de umidade e espessura e aos inerentes do ambiente em que a madeira está condicionada, como a temperatura da câmara de secagem, umidade relativa do ar, velocidade do ar e potencial de secagem do programa empregado.

A construção de secadores para madeira em toras deve seguir o mesmo princípio da secagem de madeira serrada convencional, buscando manter as toras em um local com corrente de ar quente e de baixa umidade. Assim percebe-se que a secagem artificial é uma otimização da secagem natural, na qual se pode ter o controle da temperatura e umidade do ar, além de forçar sua circulação.

Na secagem artificial de madeira em toras, deve-se atentar para algumas características da madeira, como seu teor de umidade ao ser colocada no secador, presença de casca, variação diamétrica, dentre outras.

Segundo Chagas (2010), a velocidade de secagem da madeira está diretamente correlacionada com o diâmetro das peças. Assim, peças de maiores diâmetros tendem a

demorar mais tempo para atingir determinado teor de umidade, comparando-se com peças de menores diâmetros. Este é um fator importante a ser considerado na utilização de um secador, buscando secar peças com diâmetros mais próximos possíveis, mantendo com isso a homogeneidade do teor de água.

Observa-se um grande número de trabalhos de secagem no setor de madeira serrada, sendo este o grande consumidor e gerador de tecnologias relativas à secagem de madeira. Entretanto, não há no meio acadêmico muitos trabalhos realizados com madeira em toras, que forneceriam diretrizes para elaboração de secadores industriais, assim, também não se encontra no mercado produtos que atendam o setor de secagem de madeira para produção de carvão vegetal.

Para viabilizar um secador eficiente de madeira em toras, faz-se necessário conhecer os desafios que serão enfrentados, entre eles destacam-se: uso de madeira roliça com diâmetros que variam de 50 mm a 250 mm; presença de casca que consiste de uma agente de grande interferência no processo de perda de água na madeira; busca de soluções técnicas, que são exigidas em situações industriais como as verificadas na cadeia produtiva de produção de carvão vegetal; busca de máxima eficiência térmica para viabilizar economicamente os projetos. Nesse ínterim, o secador deve ser capaz de reduzir o teor de umidade das toras em um curto período de tempo, além de produzir uma carga de madeira com teor de umidade homogêneo, entre toras e mesmo dentro de uma mesma tora.

3.4.6. Propriedades da madeira que afetam a secagem

Segundo Susin (2012), a secagem em estufa é influenciada por fatores da própria madeira, como a massa específica, estrutura anatômica, teor de umidade e espessura, ou diâmetro no caso de madeira roliça.

Para Stein (2003), a velocidade de secagem é influenciada pelas estruturas anatômicas da madeira. As madeiras apresentam uma grande variedade de arranjos estruturais anatômicos que podem facilitar ou dificultar este processo.

A madeira de folhosas é constituída por fibras libriformes, fibrotraqueóides, elementos de vasos e células parenquimáticas (BURGER e RICHTER, 1991).

Os elementos de vaso se comunicam com as células adjacentes (parênquimas radial e axial), através das pontuações, permitindo um maior fluxo de água na madeira facilitando também a secagem. A sua obstrução por tiloses reduz a velocidade de secagem.

A utilização da madeira para fins energéticos exige que ela tenha alguns parâmetros, dentre os quais se destaca a densidade básica. Esta, por sua vez, está relacionada a anatomia da madeira. Variações na densidade da madeira dependem das mudanças na proporção de vasos, da espessura da parede celular das fibras e de outras estruturas anatômicas que compõem o lenho (OLIVEIRA e SILVA, 2003). Em geral, quanto maior a densidade, mais lenta é a secagem. Madeiras de maiores densidades requerem maior período de secagem do que madeiras menos densas, para um mesmo teor de umidade, quanto maior for a densidade maior será a massa de água que deverá ser removida para igual redução da umidade (GALVÃO e JANKOWSKY, 1988).

Marques (2008), avaliando a secagem de madeiras de espécies amazônicas baseado em características anatômicas e físicas, observou-se que acima da USF, a relação entre densidade e a velocidade de secagem torna-se inversa, ou seja, quanto menor a densidade básica, maior o tempo de secagem do estado saturado até 30% de umidade (USF). As madeiras menos densas possuem uma maior quantidade de água livre nos lumes e espaços intercelulares, que durante a secagem necessitam de mais tempo para ser eliminada. Abaixo da USF, essa relação é direta indicando que quanto maior a densidade, maior o tempo de secagem, uma vez que madeiras mais densas possuem mais massa por unidade de volume, conseqüentemente maior quantidade de água retida, cuja remoção se dá de forma mais lenta através do processo de difusão.

Baseado nessa informação percebe-se que quanto maior o diâmetro de uma tora, menor a velocidade de secagem, devido a uma maior distância a ser percorrida pelas moléculas de água no processo de difusão.

Segundo Rezende (2009), geralmente madeiras mais permeáveis secam mais facilmente. Uma maior permeabilidade está relacionada a existência de estruturas anatômicas que contribuam para isso, por exemplo, em folhosas o tamanho, abundância, distribuição dos poros e a presença de gomas, tilos e outras substâncias obstrutoras que reduzem a permeabilidade (GARBE, 2008).

3.5. Influência da umidade da madeira no rendimento gravimétrico e qualidade do carvão vegetal

A primeira fase da carbonização é a secagem das toras. Assim, é necessário fornecer energia proveniente da combustão das próprias toras dentro do forno, o que resulta em uma perda de rendimento. Além disso, a presença de água na madeira durante a carbonização eleva a formação de finos. Com a elevação de temperatura dentro do forno, a energia na forma de calor é transferida para madeira, elevando sua temperatura e energia cinética das moléculas de água presente na madeira, aumentando sua movimentação. Isso ocasiona a formação de vapor de água, nessa condição, devido a uma grande "agitação" das moléculas, enclausuradas dentro das células, gera uma força sobre a parede celular das fibras, que nada mais é que a pressão de vapor. Quando a pressão for maior que a resistência da célula há o rompimento das ligações entre as moléculas e o rompimento da parede celular das fibras, do parênquima e vasos. Salienta-se que os vasos são muitas vezes obstruídos por tilos, aumentando ainda mais o efeito da pressão de vapor. Na prática, esse fenômeno ocasiona na carbonização um menor rendimento em carvão vegetal devido as perdas por finos, além de pior qualidade, uma vez que o carvão se torna mais quebradiço.

Chagas (2010), realizando estudo sobre a influência do teor de umidade na madeira no rendimento gravimétrico em carvão vegetal obteve uma correlação positiva, quanto maior o teor de água na madeira menor o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Verificou-se para as madeiras com mais de 100% de umidade um rendimento de 34,3%, e com madeira abaixo de 5% de umidade, base seca, o rendimento aumentou para 38,7%. Além disso, a geração de finos também aumentou com o aumento do teor de água na madeira, de 59% para 70% no carvão produzido com a madeira mais úmida. O tempo de carbonização também se elevou na madeira mais úmida.

Além dos problemas causados pela água na madeira no carvão produzido, há também outras conseqüências, tais como aumento do volume de gases de baixo poder calorífico emitidos na carbonização, degradação física dos fornos e equipamentos utilizados, maior tempo de carbonização com aumento da fase endotérmica, dentre outras.

Segundo Oliveira (2012), o teor de umidade da madeira acima de 30% eleva o tempo de carbonização, devido à necessidade de secagem da madeira no interior do forno para depois se iniciar a carbonização propriamente dita, além de ocasionar o consumo de

parte da madeira enfiada para fornecimento da energia necessária para a evaporao da água, reduzindo o rendimento gravimétrico.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa, no período de 01 de março de 2014 a 07 de agosto de 2014, no qual foi registrada a temperatura mínima de 6°C e a máxima de 32°C (INMET, 2014).

4.1. Matéria prima

Utilizou-se madeiras de *Eucalyptus* sp., adquiridas de fornecedor local, da cidade de Viçosa-MG, provenientes de plantios com idade entre 7 e 8 anos. As toras com comprimento médio de 2,0 metros foram levadas para o Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM da Universidade Federal de Viçosa, onde foram separadas em três classes de diâmetro: classe 1 (8 a 14 cm); classe 2 (14 a 22 cm); classe 3: (8 a 22 cm). A última classe continha uma mistura de diâmetros pertencente às classes 1 e 2.

4.2. Sistema de forno-fornalha

O forno utilizado para carbonização da madeira foi o MF/UFV, que é um forno retangular em escala piloto, com capacidade volumétrica de aproximadamente 9 st de madeira, possuindo 4 aberturas (controladores de ar) em cada parede lateral. As dimensões internas do forno eram de 2,30 m de comprimento; 1,60 m de largura; paredes com 2,00 metros de altura e flecha de copa de 0,60 m.

Utilizou-se uma fornalha metálica para queima dos gases da carbonização, desenvolvida por Lana (2014). A câmara de combustão da fornalha, construída em alvenaria, possui dimensões externas de 1,0 x 1,0 x 1,0 m, e uma abertura lateral junto à base (0,12 x 0,12 m) para admissão de ar e outra frontal de 0,30 x 0,30 m para alimentação do combustível auxiliar. Internamente a câmara de combustão era cilíndrica, com diâmetro de aproximadamente 0,60 m. A parte metálica da fornalha foi construída em chapa galvanizada e zincada de 1/8” de espessura, revestida internamente por uma manta cerâmica, com espessura média de 2” (5,08 cm) e densidade de 128 kg/m³. A chaminé da fornalha, também constituída de chapa galvanizada e zincada de 1/8”, foi construída sobre

a câmara de combustão, com altura total de 240 cm e diâmetro interno de 50 cm. A altura total do sistema, câmara de combustão e chaminé, foi de 4,68 m.

A conexão entre o forno e a fornalha foi feita por um duto metálico com 0,30 m de diâmetro interno e 0,60 m de comprimento. O controle da vazão dos gases da carbonização se deu por válvulas do tipo “borboleta” e “guilhotina”, que foram feitas com chapas metálicas instaladas no interior do duto, com movimento horizontal de 360° e vertical, respectivamente.

4.3. Descrição do Secador metálico e do Sistema de transporte dos gases

O secador foi projetado tendo como base a temperatura média dos gases de saída do queimador, 514°C, obtida a 2,0 m da altura total da chaminé. Para o posicionamento dos ventiladores centrífugos e axiais, e das entradas e saídas de ar, levou-se em consideração os mesmos posicionamentos utilizados em secagem de madeira serrada.

O secador foi construído com chapa galvanizada de 2,00 mm, estruturado em perfil quadrado, paredes de 40 mm de espessura com isolamento térmico feito com manta de fibra cerâmica aluminada, com densidade de 160 kg/m³ e espessura de 38,10 mm. As dimensões internas do secador metálico foram de 2,50 m de altura; 0,70 m de flecha de copa; 4,20 m de comprimento; 3,10 m de largura; abertura de porta de 3,0 m. O teto do secador foi feito no formato de uma seção cilíndrica, semelhante àquela feita no forno para carbonização, com objetivo de facilitar o fluxo dos gases combustos dentro do secador. O volume total do secador foi de 35 m³ e o volume utilizado para a secagem da madeira foi de 16,8 m³.

As portas do secador foram feitas em forma de abas, também isoladas termicamente com a manta cerâmica. Na parede oposta à porta, na parte superior, foi instalado um distribuidor principal dos gases combustos, em uma altura de 2,00 m acima do piso, contendo 4 aberturas secundárias para melhor distribuição do fluxo de gás dentro do secador. A tubulação do distribuidor, bem como as aberturas secundárias, possuía diâmetro interno de 150 mm, posicionadas de modo a formar um ângulo de 90° com o piso do secador, sendo direcionadas para o teto.

Foram instalados, também, na parede oposta a porta, intercalados as 4 aberturas do distribuidor dos gases combustos, três ventiladores axiais, acionados individualmente

por motores de 0,5 cv de potência, com 1800 rpm, cuja função foi promover uma melhor distribuição dos gases combustos dentro do secador. Nesta mesma parede, na parte inferior, foram feitas 4 aberturas, com diâmetro de 150 mm para exaustão dos gases úmidos de dentro do secador. As aberturas foram conectadas a um único ventilador centrífugo de 5 cv e 1725 rpm para proceder a exaustão. Todos os ventiladores utilizados no sistema foram conectados a um único painel elétrico com comando independente.

Na Figura 1 estão apresentados os detalhes construtivos do secador.

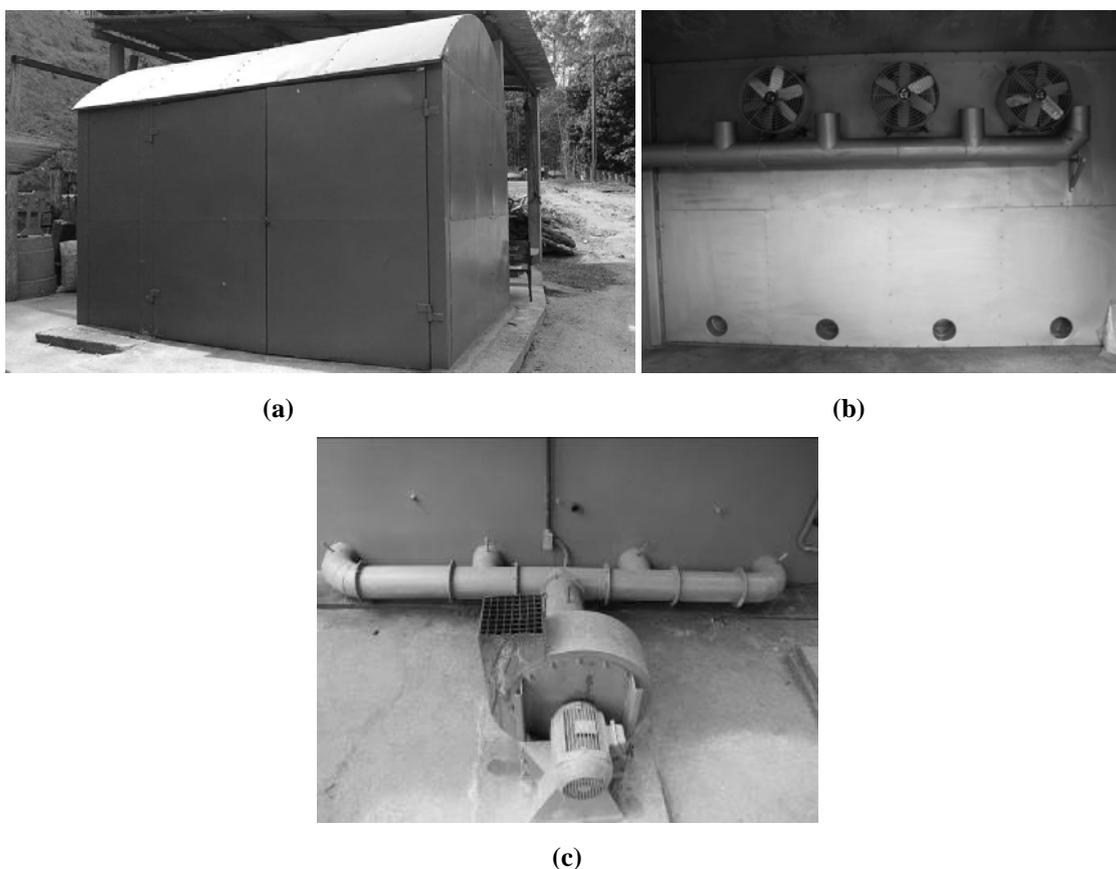


Figura 1 - Vista geral do secador (a); detalhes do posicionamento do distribuidor dos gases combustos, ventiladores axiais e saídas de ar úmido (b) e Detalhe da tubulação e ventilador centrífugo de exaustão do ar úmido.

4.3.1. Descrição do sistema de Transporte dos gases

A temperatura dos gases na saída da chaminé é de aproximadamente 500°C, superior a temperatura utilizada para secagem artificial da madeira, logo foi necessário a construção de um misturador de ar para reduzir sua temperatura, para que eles entrassem no secador com temperatura de aproximadamente 150°C.

A tiragem dos gases combustos foi feita na chaminé, a 2,20 metros acima da base da fornalha, por meio de tubulação de aço inoxidável, de 2 mm de espessura, sendo esta conectada ao misturador, que foi construído com tijolos maciços, nas dimensões internas de 0,80 m de largura, 0,80 m de comprimento e 0,80 m de altura, posicionado ao lado da base da fornalha. Na parte superior do misturador, paralelo à tubulação de tiragem, instalou-se uma tubulação, fabricada com chapas galvanizadas, de 2 mm de espessura, com 150 mm de diâmetro interno, para efetuar o transporte dos gases até o secador. Esta tubulação foi conectada a um ventilador centrífugo (soprador) de 3 cv de potência e 1725 rpm, responsável por promover a sucção dos gases combustos do misturador para conduzi-los até o secador. Nessa mesma tubulação, posicionada a 1,5 m do piso, utilizou-se uma abertura, de 12 x 15 cm, com acionamento manual de fechamento, para controle da temperatura dos gases na entrada do secador. Na saída do soprador foi conectada uma tubulação, com as mesmas características já descritas, conectando-o ao secador em uma altura de 2,00 m do piso. Neste ponto conectou-se o distribuidor dos gases combustos conforme mostra a figura 2(a).

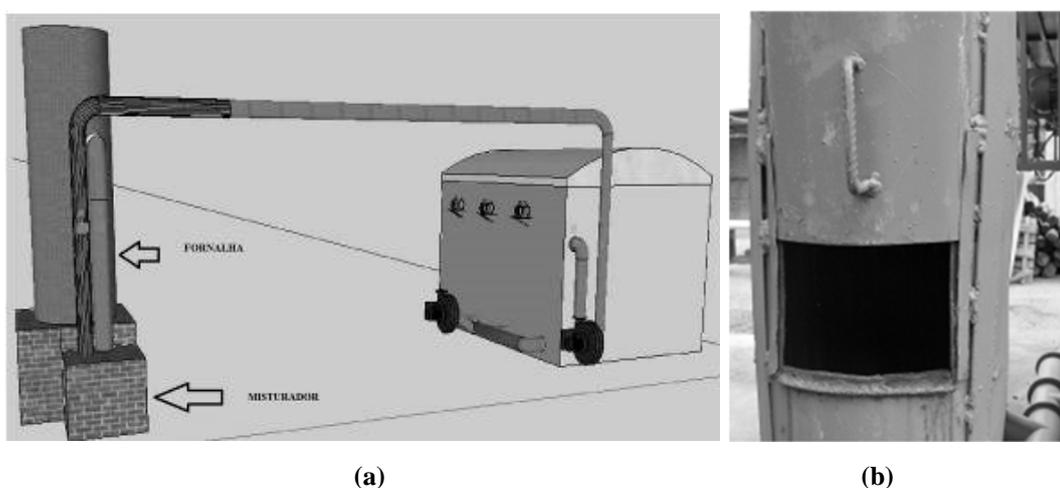


Figura 2 - Vista geral do sistema de transporte de gases combustos (a); detalhe da abertura para admissão de ar para controle da temperatura dos gases de entrada no secador (b).

Na Figura 3 é apresentada a vista geral do sistema forno-fornalha e do sistema de secagem de toras.



Figura 3 - Vista geral do sistema forno-fornalha e do sistema de secagem, sendo: 1) Secador; 2) forno; 3) fornalha; 4) rede de transporte de gases; 5) misturador.

Na Figura 4 é apresentado um esquema do conjunto forno/fornalha, secador e tubulações de transporte de gases. Maiores detalhes podem ser observados nos anexos 2 e 3.

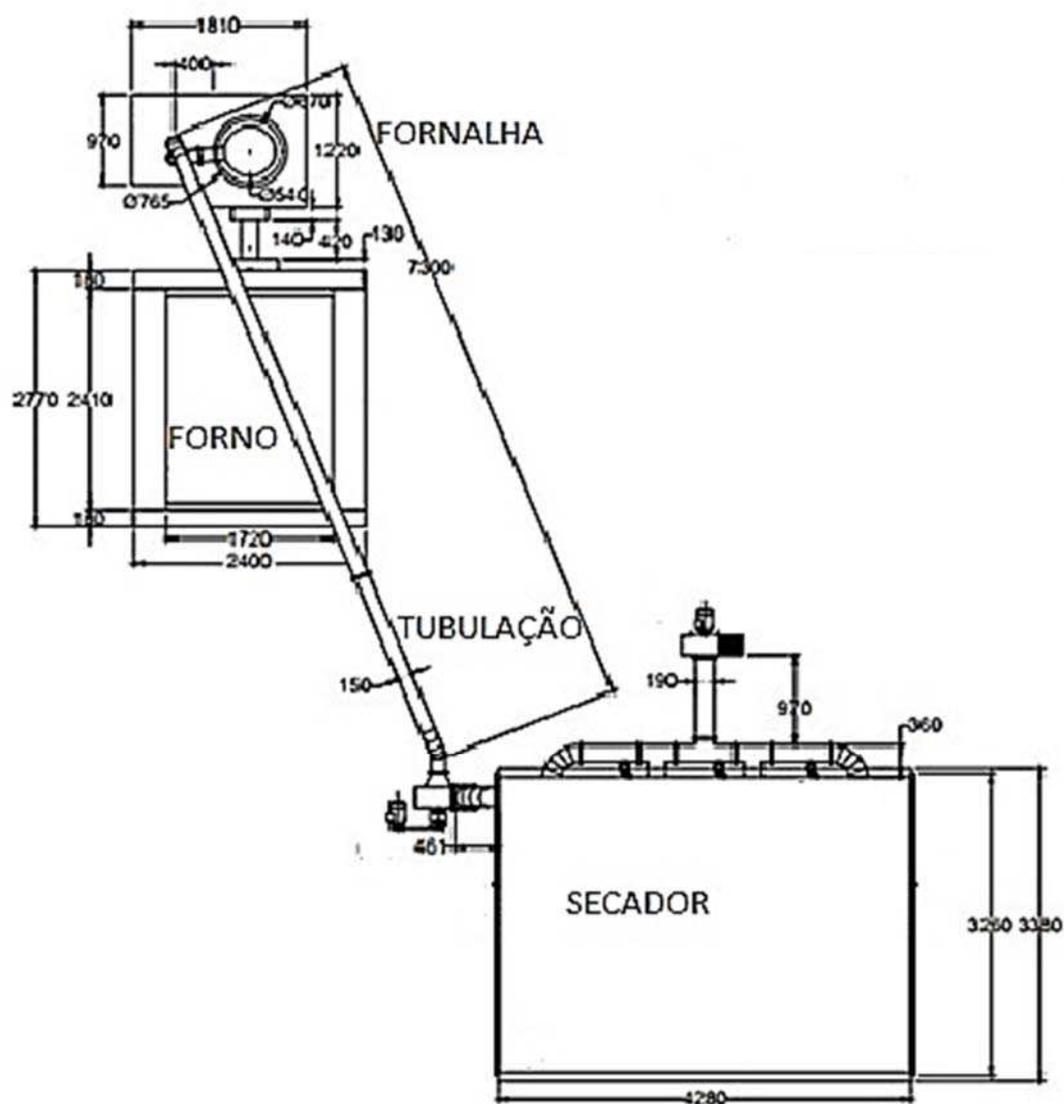


Figura 4. – Esquema do conjunto forno/fornalha, tubulações e secador (dimensões em mm).

4.4. Secagem artificial da madeira

A secagem da madeira foi realizada durante aproximadamente 68 horas, independente do tratamento. Esse tempo foi estabelecido em função do tempo médio total de carbonização da madeira no forno MF/UFV. A temperatura média de admissão dos gases para dentro do secador foi de 150°C. Foram realizadas duas secagens por classe de diâmetro, totalizando 6 unidades amostrais.

4.4.1. Disposição da madeira dentro do secador

A pilha de madeira foi disposta horizontalmente dentro do secador, no sentido porta/fundo, tendo altura máxima de aproximadamente 2,0 m, largura de 2,0 m (correspondente ao comprimento das toras) e comprimento de 4,20 metros, sendo mantida uma distância aproximada de 25 cm entre o final da pilha e o fundo do secador. Para que o fluxo dos gases combustos não fosse preferencialmente conduzido por este vão entre a pilha de madeira e a parede, adaptou-se na tubulação do distribuidor dos gases dentro do secador uma chapa metálica para forçar o fluxo dos gases a percolar a pilha de madeira.

Na Figura 5 são apresentados os detalhes do posicionamento da pilha de madeira e chapa metálica.

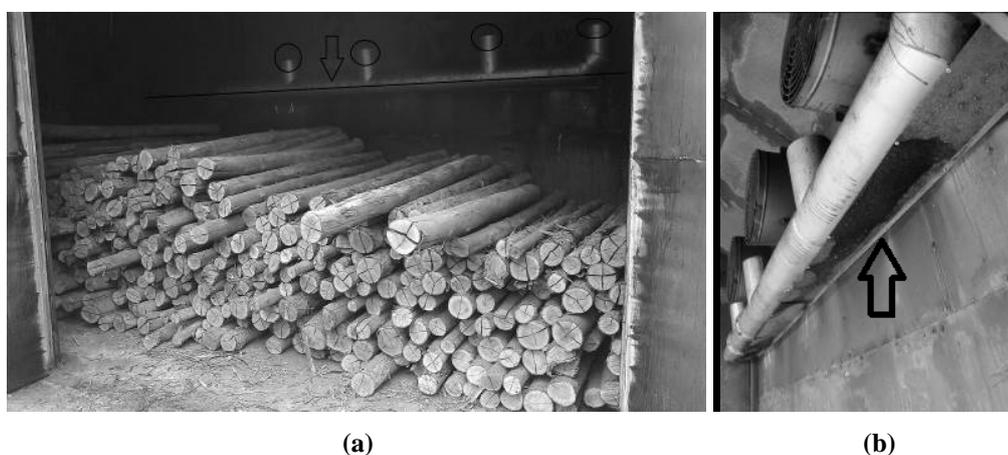


Figura 5 - Detalhe do posicionamento da pilha de madeira dentro do secador (a) e chapa metálica abaixo do distribuidor dos gases combusto dentro do secador (b).

4.4.2. Perfil de temperatura dos gases combustos

Avaliou-se as características térmicas do sistema de secagem das toras, coletando-se a temperatura dos gases da carbonização, da câmara de combustão da fornalha, dos gases combustos, em pontos determinados ao longo da tubulação de transporte e do gás úmido de saída do secador.

A temperatura do sistema de transporte de gases foi monitorada a cada 2 horas, por meio de orifícios feitos na tubulação, que permitiram a introdução de termopar tipo K, que foi conectado em um datalogger ICEL, modelo TD - 880. Os pontos de monitoramento foram estabelecidos de modo que permitisse a avaliação das perdas térmicas e eficiência do sistema, e foram assim dispostos:

a) Duto condutor dos gases da carbonização, localizado entre o forno e a base da fornalha;

- b) Câmara de combustão da fornalha, na altura de 1,5 m a partir do piso;
- c) Tubulação de aço inoxidável condutora dos gases combustos para o misturador, na altura de 1,8m;
- d) Tubulação de saída dos gases combustos do misturado, na altura de 1,8 m a partir do piso;
- e) Tubulação de conexão entre o misturador e o ventilador centrífugo, 20 cm acima da abertura de controle manual (Figura 2(b));
- f) Tubulação conectada ao distribuidor dos gases combustos para dentro do secador, a 2,00 m de altura do piso;
- g) Tubulações de saída do ar úmido de dentro do secador;
- h) Tubulação de junção das 4 saídas de ar úmido;
- i) Duto de saída do ventilador centrífugo de tiragem.

Na figura 6 estão representados os pontos de medição de temperatura ao longo do sistema de transporte de gases.

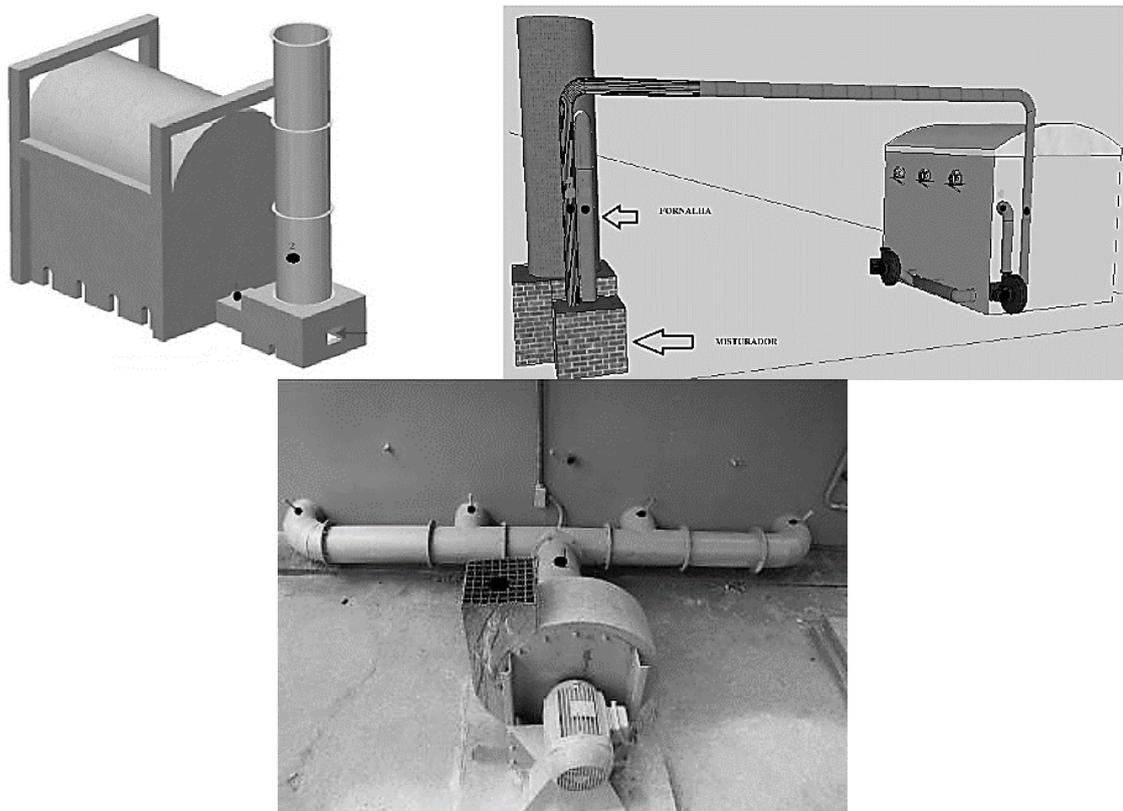


Figura 6 - Detalhe dos pontos (círculo preto) de coleta de temperatura.

A distribuição de temperaturas na tubulação que conecta o misturador ao secador foi feito por meio de imagens termográficas no infravermelho, utilizando uma câmera infravermelha (FLIR 40) fator de emissividade de 0,95. As imagens foram obtidas a 10 metros de distâncias do sistema.

As perdas térmicas ocorridas na tubulação de transporte dos gases foram calculadas considerando o sistema em regime estacionário, propriedades constantes, gás ideal, dissipação viscosa e variações de pressão estática desprezíveis e resistência térmica da tubulação desprezível. Além disso, os cálculos foram realizados considerando a tubulação como retilínea, sendo da saída do misturado até a abertura de admissão de ar atmosférico para controle da temperatura do gás de entrada do secador.

Considerou-se os parâmetros obtidos de temperatura média dos gases combustos na entrada da tubulação descrita, temperatura ambiente de 25°C e temperatura de saída calculada.

Na Figura 7 é apresentado o esquema da tubulação de transporte de gases, com os parâmetros considerados no cálculo de perda térmica.

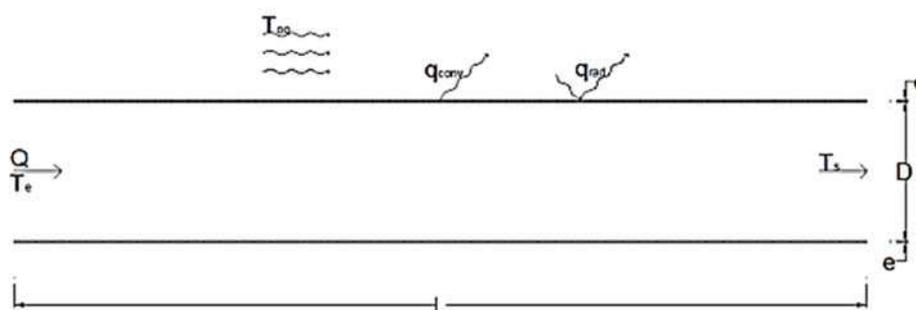


Figura 7 - Esquema da tubulação com os parâmetros considerados no cálculo de perda térmica.

Para o cálculo a diferença de temperatura entre os gases combustos na entrada e saída da tubulação, considerou-se primeiro o calor sensível, devido à variação de temperatura:

$$q = \dot{m}c_p(Ts - Te)$$

Colocando em função da vazão volumétrica, tem-se:

$$q = \rho Qc_p(Ts - Te) \quad (1)$$

Em que:

q = taxa de transferência de calor (W)

ρ = massa específica do gás (kg/m³)

Q = vazão volumétrica (m³/s)

c_p = calor específico do gás (J/(kg.K))

T_s = temperatura de saída dos gases combustos (K)

T_e = temperatura de entrada dos gases combustos (K)

Considerando ainda que a transferência de calor é função do gradiente de temperatura e da resistência do sistema a este fluxo, ou seja:

$$q = \frac{\Delta T_{m,l}}{Rt} \quad (2)$$

Em que:

$$\Delta T_{m,l} = \frac{T_s - T_e}{\ln(T_{viz} - T_s / T_{viz} - T_e)}$$

Em que:

$\Delta T_{m,l}$ = média logarítmica das diferenças de temperatura (K)

Rt = resistência térmica total do sistema (K/W)

T_{viz} = temperatura do fluido externo (K)

A abordagem definida para a resistência térmica total do sistema foi de um circuito primeiramente em série, onde há resistência ao fluxo de calor pelos gases combustos à parede da tubulação, e posteriormente um circuito paralelo, no qual há perda de calor da parede da tubulação para o ambiente por convecção e radiação, de modo simultâneo, conforme esquema apresentado na Figura 8.

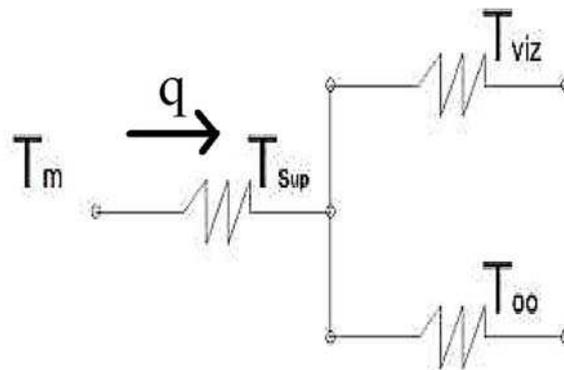


Figura 8 - Esquema da abordagem do sistema de perda térmica da tubulação dos gases combustos.

Sendo assim,

$$R_t = R_{conv,int} + (1/R_{rad} + 1/R_{(conv, ext)})^{-1}$$

Em que:

$$R_{conv,int} = \frac{1}{h_x A_{int}}$$

$$R_{rad} = \frac{1}{h_r A_{ext}}$$

$$R_{conv,int} = \frac{1}{h A_{ext}}$$

Em que:

h_x = coeficiente de convecção interna (W/(m²K))

h_r = coeficiente de radiação (W/(m²K))

h = coeficiente de convecção externa (W/(m²K))

A_{int} = área interna no cilindro (m²)

A_{ext} = área externa do cilindro (m²)

Considerou-se o coeficiente de convecção externa de 20 W/(m²K), o coeficiente de radiação foi estimado da seguinte forma:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_{sup} + T_{viz})(T_{sup}^2 + T_{viz}^2)$$

Em que:

ε = emissividade do material

σ = constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/(m²K))

T_{sup} = temperatura da superfície

Como a temperatura da superfície não é conhecida, ela foi estipulada por meio de interações. Já o coeficiente de convecção interna foi estimado como segue:

$$Nu_d = \frac{h_x D}{k} = 0.023 Re_d^{4/5} Pr^n$$

Onde

$$Re_d = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Em que:

Nud = número de Nusselt

D = diâmetro (m)

k = condutividade térmica do gás (W/(mK))

Re_d = número de Reynolds

μ = viscosidade do gás (Ns/m²)

Pr = número de Prandtl

n = 0.3, por se tratar de resfriamento.

Igualando as equações 1 e 2,

$$q = \rho Q c_p (T_s - T_e) = \frac{T_s - T_e}{R t \ln((T_{viz} - T_s)/(T_{viz} - T_e))}$$

Sendo essa uma equação implícita, o valor da temperatura dos gases combustos na saída da tubulação da rede de transporte de gases foi obtido por processo iterativo.

Assim, conhecendo a temperatura de saída, calculou-se a quantidade de energia transferida para a vizinhança pela equação 1.

4.4.3. Características térmicas do secador

Para obter o perfil de temperaturas do secador, estabeleceu-se 16 pontos de monitoramento distribuídos ao longo do secador, sendo dois pontos na copa, três pontos em cada parede lateral, dois pontos na porta e seis pontos na parte de trás do secador, oposta a porta (Figura 9).

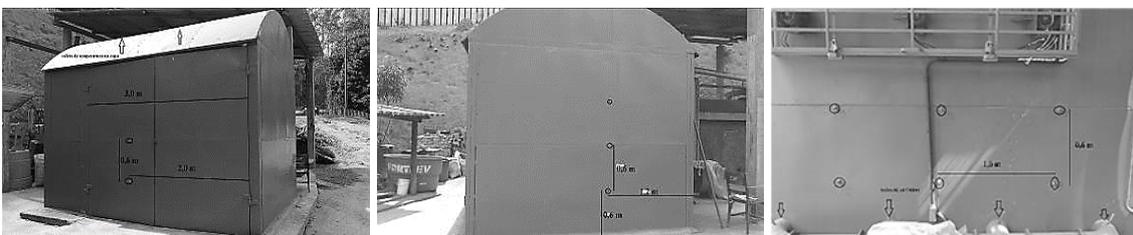


Figura 9 - Pontos de monitoramento de temperatura no secador de madeira.

As temperaturas foram obtidas usando termopares tipo K. Foram feitos orifícios de 11 mm de diâmetro nos pontos estabelecidos para o monitoramento de temperatura, no

quais foram introduzidos tubos de alumínio, de diâmetro interno de 10 mm, com comprimento aproximado de 10 cm, de modo que não houvesse frestas que permitissem a comunicação com a parte interna das paredes revestidas com manta cerâmica, a fim de evitar perdas térmicas e interferências nas leituras da temperatura. A temperatura da copa foi obtida com termopares tipo K, conectados a um datalogger Gulterm 700 .

A distribuição das temperaturas do secador foi realizada por meio de imagens termográficas, utilizando uma câmera infravermelha (FLIR 40) fator de emissividade de 0,95. As imagens foram obtidas a 10 metros de distâncias do sistema.

4.4.4. Umidade da madeira

Para obter o perfil de umidade da pilha de madeira, a mesma foi dividida em 3 estratos (linhas) e 3 seções (colunas), sendo os estratos designados 1, 2 e 3 e seção I, II, III. Os estratos representam a parte superior, meio e parte inferior da pilha, ao longo da altura, enquanto as seções representam o lado esquerdo, meio e direito da pilha, sendo estas posições horizontais.

Para cada interseção entre os estratos e seções foram utilizadas 5 amostras (toras de madeira) controle, resultando em 45 toras de madeira, provenientes de nove pontos amostrados. Essas foram utilizadas para estimar a umidade da madeira nas diferentes posições do secador para verificar a homogeneidade de secagem, conforme Figura 10.

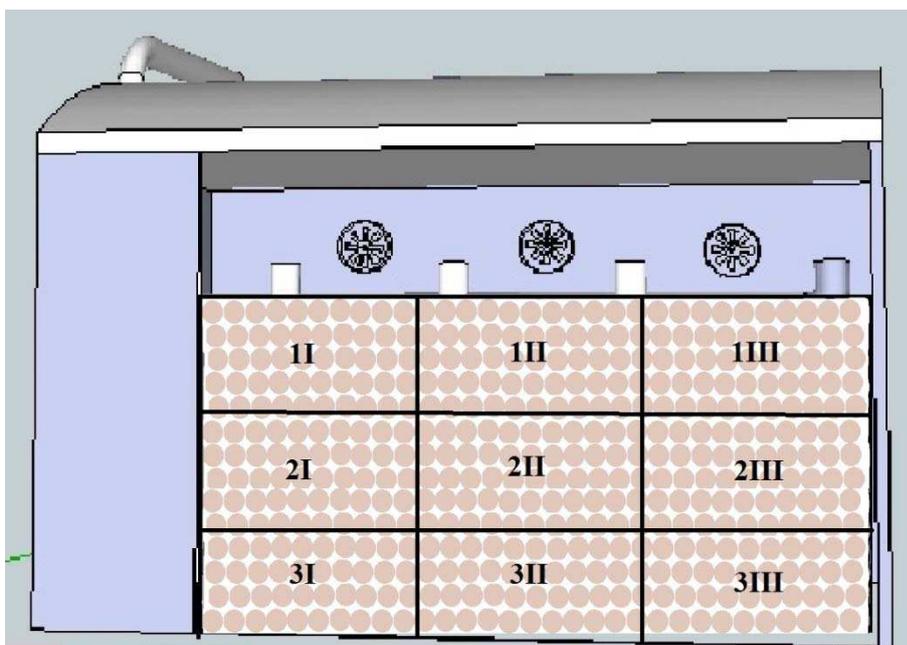


Figura 10 - Esquema da distribuição das toras nos estratos (1, 2 e 3) e seções (I, II e III) na pilha de madeira.

Para determinação da umidade em base seca, as amostras de controle de madeira foram pesadas, individualmente, antes e depois da secagem, retirando-se de cada amostra (tora) três discos ao longo do seu comprimento, sendo um disco no centro e os outros dois equidistantes 50% do centro para a extremidade. O teor de umidade foi determinado pelo método da estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até massa constante.

Para estimar a umidade inicial de cada tora de controle utilizou-se as seguintes expressões.

$$M_s = M_d / (1 + (U_f / 100))$$

Em que:

M_s = massa seca estimada da tora (amostra controle) (kg);

M_d = massa da tora (amostra controle) depois da secagem (kg);

U_f = Umidade média dos discos (%).

Uma vez obtido o valor da massa seca, estimou-se a umidade inicial de cada tora de madeira (amostra controle):

$$U_i = ((M_i - M_s) / M_s) * 100$$

Em que:

U_i = umidade inicial estimada (%);

M_i = massa da tora de madeira antes da secagem (kg);

M_s = massa seca estimada da tora de madeira (kg)

4.4.5. Redução de umidade e taxa de secagem

Para obter a massa total de água eliminada durante a secagem da madeira, pesou-se toda a massa de madeira antes e depois da secagem, utilizando-se uma balança Digi-Tron UDL 3000, com capacidade máxima de 3 toneladas. Determinou-se a massa seca de madeira em função do teor de umidade inicial.

A taxa de secagem, kg de água/kg de madeira por hora, foi determinada dividindo a massa média total de água eliminada pela massa seca de madeira que foi empilhada no secador. Esse procedimento foi realizado para cada classe de diâmetro.

A umidade inicial da pilha de madeira foi obtida por meio da média aritmética das umidades iniciais estimadas das 45 amostras controle. O valor de umidade final, depois da secagem, calculado por meio da média aritmética dos valores de umidade obtidos dos discos de madeira retirados das amostras de controle.

A redução relativa (%) de teor de umidade foi calculada por meio da seguinte equação:

$$RU = \left(\frac{U_i - U_f}{U_i} \right) * 100$$

Em que:

RU = redução relativa de umidade (%)

U_i = umidade inicial

U_f = umidade final após a secagem

4.5. Produção e propriedades do carvão vegetal

4.5.1. Parâmetros técnicos das carbonizações

As carbonizações foram conduzidas da seguinte forma: 14 horas com temperatura até 150°C; 14 horas entre 150 e 275°C; 24 horas entre 275 e 400°C e 20 horas entre 400 e 420°C, totalizando 72 horas de carbonização. Para o controle da carbonização, a temperatura considerada foi a obtida na copa do forno.

A temperatura do forno foi monitorada durante todo o processo, coletando-as a cada 2 horas. Utilizou-se onze pontos de amostragem e coleta das temperaturas, sendo 2 na copa, 4 em cada uma das paredes laterais e um ponto acima da porta. Utilizou-se um pirômetro Spectrum MT - 350, conforme metodologia utilizada por Oliveira (2012), exceto para as coletas das temperaturas de copa que utilizou termopares do tipo K, fixados, tendo a leitura realizada no datalogger ICEL TD 880.

Realizou-se seis carbonizações da madeira, as quais forneceram os gases para a fornalha para combustão dos mesmos, e a energia térmica da combustão dos gases foi aproveitada para a realização das secagens.

O funcionamento da fornalha foi monitorado a fim de que a combustão dos gases da carbonização ocorresse de modo ininterrupto, fornecendo os gases combustos para a secagem. Para tal, a fornalha foi abastecida com resíduos de madeira sempre que necessário para que a chama na câmara de combustão se mantivesse.

As carbonizações foram realizadas com madeira separada por classes de diâmetro, conforme a classificação realizada para as secagens, no entanto ressalva que foram amostras independentes, ou seja, que não passaram pelo processo de secagem.

Determinou-se o rendimento gravimétrico em carvão vegetal pela expressão abaixo:

$$RGC = 100 \times \frac{Mc}{Mms}$$

Em que:

RGC = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%);

Mc = massa de carvão vegetal (kg); e

Mms = massa de madeira seca enfiada (kg).

Também, fez-se a estimativa de ganhos em rendimento gravimétrico em carvão em função da secagem da madeira. Considerou-se a massa de madeira que deixaria de ser gasta na carbonização para fornecer energia para a secagem da madeira dentro do forno, estimando-se o ganho em rendimento gravimétrico em carvão vegetal para cada classe de diâmetro, convertendo a massa de madeira em carvão pelo mesmo rendimento obtido nas carbonizações. Esse cálculo foi realizado, baseado no valor de energia consumida nas secagens em função da massa de água eliminada.

4.5.2. Amostragem e propriedades do carvão

Após cada carbonização, 50 kg de carvão foram coletados e dispostos numa lona plástica, sendo homogeneizado. Posteriormente, o carvão foi quarteado (dividido em 4 partes), sendo duas partes descartadas e das outras duas restantes retirou-se amostras suficientes para realização das análises.

A densidade a granel foi determinada conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981).

A determinação dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) foi realizada segundo os procedimentos preconizados na norma NBR 8112 (ABNT, 1983).

Para determinação da friabilidade e a classificação do carvão vegetal quanto a geração de finos utilizou-se os procedimentos descritos por Oliveira et al. (1982).

4.6. Balanço de massa e energia

4.6.1. Consumo de energia elétrica pelo secador

Para medir o consumo de energia elétrica do secador foi instalado no painel elétrico central um Medidor de Consumo trifásico, analógico, FAE MFT – 04G Classe 2, obtendo-se a energia gasta pelo sistema durante as 68 horas de funcionamento do secador. As medições foram realizadas em quatro secagens aleatórias, ou seja, quatro repetições. Foi determinado o consumo total e por meio de média aritmética definiu-se o consumo médio de cada secagem.

A energia elétrica intensiva foi obtida dividindo-se o consumo médio de energia elétrica do secador pela massa seca de madeira (0% de umidade), obtendo o valor em kW por tonelada de madeira.

4.6.2. Eficiência térmica do secador

Para determinação da eficiência térmica do secador, primeiramente calculou-se a quantidade de energia na forma de calor sensível fornecida para as secagens, por meio da seguinte equação:

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t$$

Em que:

Q = Calor sensível fornecido para secagem (J/s)

V = vazão dos gases na entrada do secador (0,2 m/s)

ρ = densidade da mistura de gases (g/m³)

c_p = calor específico do ar (kJ/(kg*K))

Δt = diferença de temperatura dos gases entre a entrada e saída do secador (K)

A vazão dos gases, na entrada do secador, foi medida com tubo de Pitot.

O calor específico dos gases foi obtido por meio de consulta em literatura (INCROPERA, 2011), para cada faixa de temperatura utilizada.

Para estimar a quantidade de energia necessária para retirada de água da madeira para cada classe de diâmetro avaliada, utilizou-se o valor de massa de água eliminada nas secagens, separando a porcentagem de água livre e a porcentagem de água de adesão. Para este procedimento observou-se o valor de umidade final obtido após as secagens. Logo, quando a umidade final foi abaixo de 30%, verificou-se a proporção de água de adesão, já

quando a umidade final manteve-se acima de 30%, considerou-se que toda água eliminada foi água livre.

Essa distinção foi necessária, pois para a retirada da massa de água livre gasta-se aproximadamente 569 kcal/kg e para remover a água de adesão 829 kcal/k, segundo Skaar (1972).

Determinou-se a energia térmica intensiva (J/s por toneladada de madeira seca) dividindo-se a energia fornecida para secagem, que corresponde ao calor sensível, pela massa seca de madeira.

A eficiência térmica foi determinada dividindo-se a energia fornecida para secagem pela energia que foi efetivamente utilizada na eliminação da massa de água.

Os cálculos foram realizados no software MATLAB 14, e são apresentados no anexo 4.

4.6.3. Estimativa de aumento de rendimento gravimétrico em carvão vegetal

Estimou-se o incremento em rendimento gravimétrico em carvão vegetal a partir da quantidade de energia necessária para remoção de água na madeira, dividindo-se o valor obtido, para cada classe de diâmetro, por 3600 kcal/kg, correspondente ao poder calorífico útil médio da madeira com umidade, base seca, de 30%. Determinando-se, assim, a massa de madeira que seria necessária para combustão. Essa massa foi convertida em carvão, utilizando-se o valor obtido de rendimento gravimétrico para cada classe de diâmetro, sendo o valor obtido somado a massa de carvão já obtida nas carbonizações.

4.7. Delineamento Experimental

4.7.3. Delinamento experimental para avaliação do perfil térmico do secador e efeito da classe de diâmetro sobre a redução relativa de umidade

Para avaliar o perfil térmico do secador e efeito da classe de diâmetro sobre a redução relativa de umidade, o experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos (classes de diâmetro), sendo duas repetições por tratamento, totalizando 6 unidades amostrais.

4.7.4. Delinamento experimental para avaliação do efeito da posição da tora ao longo da pilha e ao longo da tora no teor de umidade final da madeira

Para avaliar o efeito da classe de diâmetro, posição da tora na pilha de madeira e posição ao longo da tora na umidade final da madeira, instalou-se um fatorial no delineamento inteiramente casualizado, comparando-se as três classes, nove posições na pilha de madeira, três posições ao longo da tora, com cinco repetições, totalizando 405 unidades amostrais por secagem.

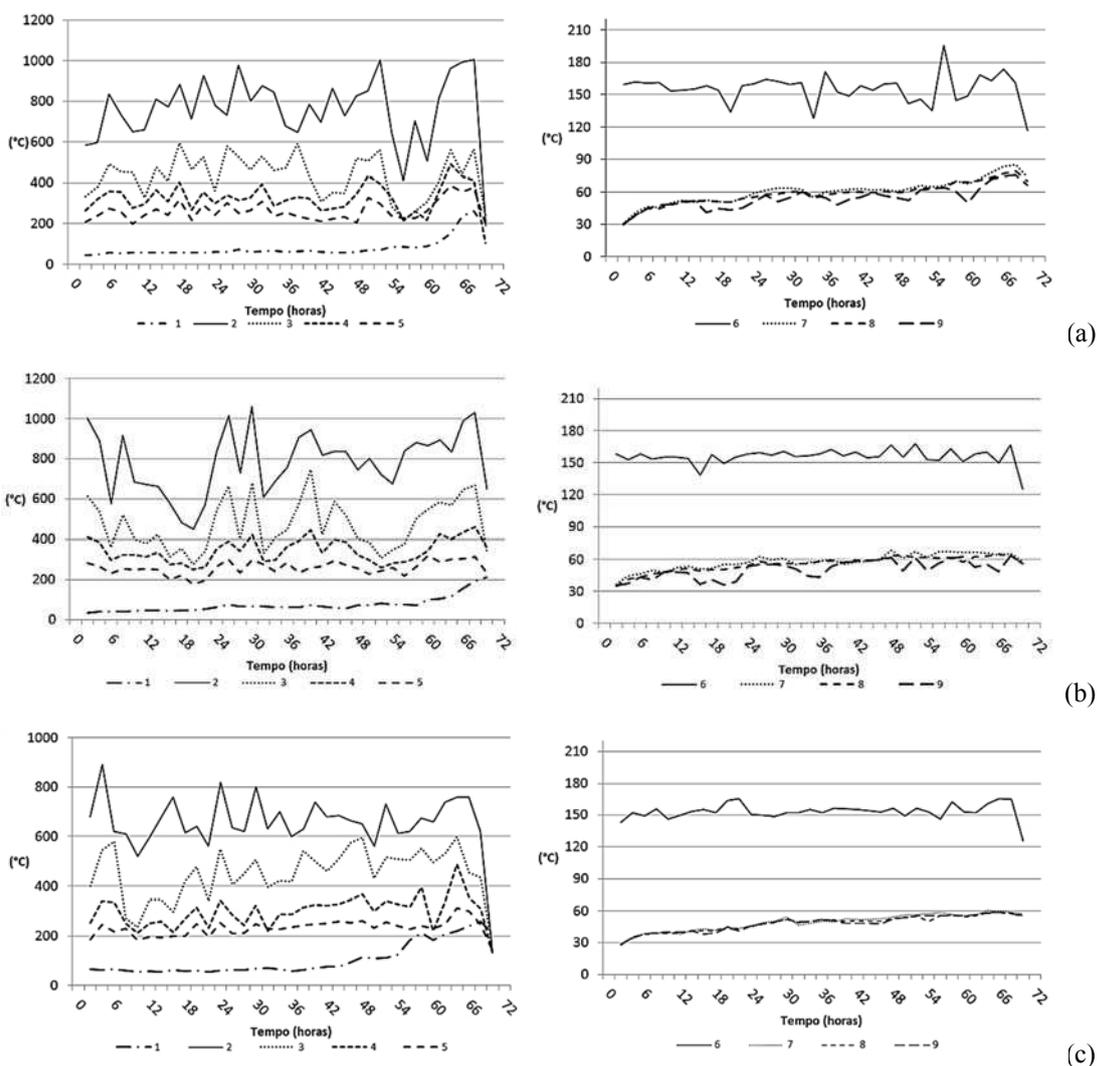
Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors para testar a normalidade, e Cochran para testar a homogeneidade das variâncias.

Em seguida, procedeu-se à análise de variância pelo teste F , sendo as médias comparadas pelo teste Tukey. Considerou-se o nível de significância de 5%. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa R versão 2.13.1.

5. RESULTADOS

5.1. Temperaturas dos gases no sistema de transporte

Na Figura 11 são apresentadas, por classe de diâmetro, as temperaturas médias do sistema de transporte de gases combustos desde a saída do forno até a saída dos gases úmidos do secador, em função do tempo de secagem.



Legenda: 1 - duto condutor dos gases da carbonização, localizado entre o forno e a base da fornalha; 2 - na chaminé, na altura de 1,5 m a partir do piso; 3 - na altura de 1,80 m da tubulação condutora dos gases combustos para o misturador; 4 - na altura de 1,80 m da tubulação de saída do misturador; 5 - 20 cm acima da abertura de controle; 6 - tubulação conectada ao distribuidor de gases do secador (temperatura de entrada do secador); 7 - média das 4 saídas de gás úmido; 8 - tubulação que une as 4 saídas de ar úmido; 9 - abertura de saída do ar úmido do ventilador.

Figura 11 – Temperatura dos gases combustos, em função do tempo de secagem, ao longo das tubulações de transporte, sendo Classe 1 (a); Classe 2 (b) e Classe 3 (c).

Avaliando a temperatura dos gases ao longo do tempo de carbonização e da secagem da madeira, de modo geral, observa-se que houve variação na temperatura dos gases na saída da fornalha, contudo essa variação não teve efeito na temperatura dos gases na entrada secador, mantendo-se os valores pré-estabelecidos.

De modo geral, tem-se observado que acima de 110°C ocorre a combustão dos gases sem a necessidade de combustível auxiliar para manter a combustão, pois nesta temperatura os gases da carbonização têm na sua composição menor quantidade de água e maior percentual de gases combustíveis.

A temperatura da câmara de combustão variou ao longo do tempo, porque a combustão dos gases não foi constante, principalmente no início da carbonização, quando foi necessária adição de combustível auxiliar (resíduos de biomassa) para manter a chama, devido ao baixo poder calorífico dos gases. Observa-se que a temperatura dos gases combustos na tubulação de saída da fornalha até a abertura de controle de temperatura do secador, também seguiu a mesma tendência de variação verificada na câmara de combustão, no entanto, essa variação não afetou a temperatura de entrada do secador, uma vez que essa é controlada pela admissão de ar atmosférico.

Verifica-se que a temperatura dos gases na entrada do secador variou de 140 a 160°C, independente da classe de diâmetro da madeira. Isso evidenciou a funcionalidade da abertura de controle manual da temperatura do gás de entrada.

Verificou-se, também, uma tendência de aumento de temperatura dos gases úmidos de saída do secador ao longo do tempo. No início da secagem, os gases foram admitidos no secador com temperatura média de 150°C e os gases úmidos saindo do secador, de modo geral, com aproximadamente 30 °C. Ao final do processo de secagem, observa-se que a temperatura dos gases úmidos na saída no secador está em torno de 60°C. Logo, percebe-se que a transferência de energia na forma de calor, dos gases combustos para a madeira, no início da secagem foi maior que ao final. Esse fato, termodinamicamente, representa um dos princípios fundamentais da secagem, que é a transferência de energia da corrente de ar para a água presente na madeira, o que eleva sua energia cinética, aumentando o “grau de agitação” das suas moléculas, sejam elas do estado líquido ou gasoso, no caso de líquido, fazendo com que a água evapore, facilitando sua saída da madeira. Associado a evaporação da água, a circulação forçada de ar faz com que a secagem seja mais eficiente.

É importante ressaltar que parte da energia na forma de calor foi utilizada para promover a evaporação da água superficial da madeira, e também para o aquecimento das toras.

Na Tabela 1 são apresentadas as temperaturas médias do sistema de transporte de gases desde a saída do forno até a saída dos gases úmidos do secador.

Tabela 1. Temperaturas médias dos gases.

Pontos de monitoramento	Temperatura média °C		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Temperatura dos gases de saída do forno	80,1±50,2	73,8±40,2	104,2± 64,6
Temperatura da câmara de combustão da fornalha	756,3±171,5	783,5±157,2	654,1±120,4
Temperatura dos gases combustos na entrada do misturador de ar	433,9±105,6	471,8±126,6	450,1±105,6
Temperatura dos gases na saída do misturador de ar	323,1±72,4	344,2±58,1	298,3±63,9
Temperatura dos gases anterior à abertura de admissão de ar (controle)	261,9±49,7	258,1±34,0	231,3±32,5
Temperatura dos gases combustos na entrada do secador	159,9±14,8	155,8±7,5	153,4±7,3
Temperatura média do gás de saída do secador (gás úmido)	60,4±11,2	57,8±7,4	49,4±8,0
Temperatura dos gases anterior ao ventilador de tiragem	58,3±10,3	55,6±7,0	48,5±7,5
Temperatura dos gases posterior ao ventilador de tiragem	54,4±9,9	50,7±8,4	48,3±7,6

*Os valores após o sinal ± representam o desvio padrão da média.

A temperatura na câmara de combustão é um parâmetro importante a ser considerado e deve ser mantida acima de 650 °C para que ocorra a combustão completa de alcatrão, do licor pirolenhoso, dos fenóis e dos gases CO e CH₄, transformando-os em CO₂ e H₂O, além de reduzir o material particulado, conforme observado por Oliveira (2012). Observa-se que a temperatura média na câmara de combustão da fornalha, independente da classe de diâmetro da madeira, foi superior a 650 °C, mantendo assim a eficiência da combustão dos gases pelo sistema utilizado.

O misturador de ar tem a função de reduzir a temperatura dos gases combustos da fornalha até valores adequados para proceder a secagem. Observa-se que houve uma redução de cerca de 100 °C na temperatura do gás após a passagem pelo misturador, evidenciando a sua efetividade para controle da temperatura dos gases combustos.

Observa-se que houve uma redução média de apenas 70 °C na temperatura do gás transportado desde a saída do misturador de ar até a abertura de controle de temperatura na entrada no secador, sendo a perda térmica calculada de 1461 W.

A temperatura média de saída dos gases úmidos do secador foi de 56 °C, indicando uma redução de temperatura de aproximadamente 100 °C. Vale salientar que todas as paredes do secador receberam isolamento térmico, logo espera-se que a maior parte da energia na forma de calor, tenha sido transferida para as toras, favorecendo a secagem.

Na Figura 12 é apresentada uma imagem termográfica no infravermelho do forno e da tubulação de transporte de gases até o secador.

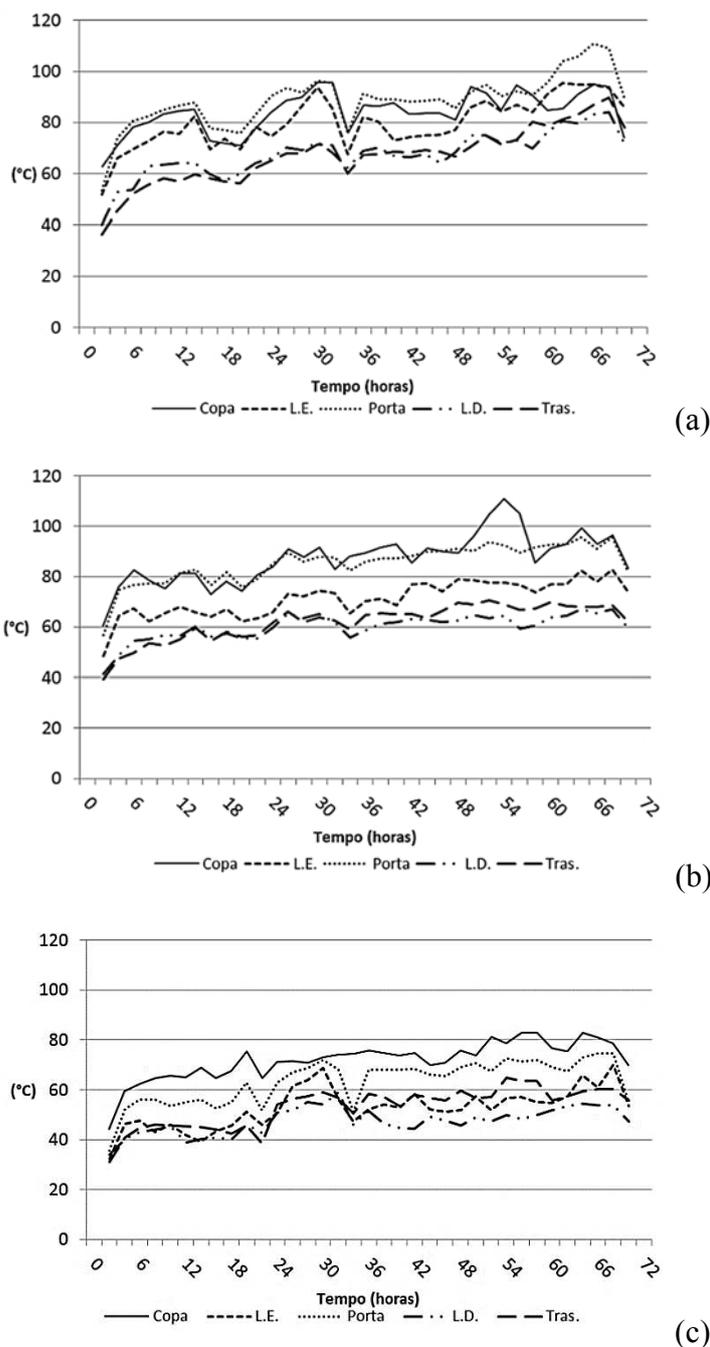


Figura 12 – Imagem termográfica no infravermelho do forno e tubulação de transporte de gases.

Observa-se na Figura 12 uma redução de temperatura ao longo da tubulação que transporta os gases combustos até a entrada do secador. Além disso, a imagem permite visualizar a condução da carbonização, evidenciando maior temperatura na copa do forno em comparação a parte inferior, mostrando que a frente de carbonização avança de cima para baixo.

5.2. Perfil térmico do secador

Na Figura 13 são apresentados os perfis de temperaturas do secador, para cada classe de diâmetro das toras em função do tempo de secagem.



Legenda: L.E. – lado esquerdo (entrada do distribuidor dos gases combustos); L.D. – lado direito; Tras. – parede oposta à porta.

Figura 13 – Perfil térmico do secador para secagens de toras de madeira ao longo do tempo, sendo (a) Classe 1, (b) Classe 2 e (c) Classe 3.

De modo geral, observa-se que a temperatura dentro do secador ao final da secagem foi maior que a inicial, indicando o aquecimento de todo o sistema, incluído parede, piso, dutos e principalmente a madeira. Se a secagem ocorresse em um período de tempo maior, a tendência seria que em um dado momento, mantendo-se a secagem, ou seja, eliminação de água da madeira, as temperaturas se mantiveriam constantes, quando ocorresse um equilíbrio térmico entre o gás quente admitido no secador e toda estrutura metálica, piso e a pilha de madeira.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios de temperatura do secador, em função da posição do termopar de observação.

Tabela 2 – Temperaturas médias do secador em função da posição do termopar.

Posição no secador	Temperatura média °C			Média
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	
Copa	84,0±8,2	87,3±9,9	71,9±7,7	81,09 A
Lateral esquerda	79,9±9,8	71,3±7,1	52,7±8,2	67,95 BC
Porta	88,6±10,7	85,3±7,8	63,4±8,9	79,11 AB
Lateral direita	67,5±8,8	60,0±5,3	47,5±5,5	58,33 C
Parte oposta a porta	67,0±11,3	61,9±7,3	53,1±7,9	60,64 C
Média	74,35 a	69,39 a	55,59 b	

*Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas entre Posição (linhas) e minúsculas entre temperaturas (colunas) não diferem entre si ao nível de 95% de probabilidade pelo teste Tukey. Os Valores após o sinal ± representam o desvio padrão da média.

Observa-se que a temperatura média na copa do secador foi de 81,09°C, consideravelmente inferior àquela observada na entrada do secador, que foi de 156°C, essa redução é explicada pela turbulência gerada nos gases dentro do secador pela ação dos ventiladores axiais, o que influencia na medição da temperatura pelos termopares.

As temperaturas observadas para a Classe 3 foram inferiores as demais, sendo este fato explicado basicamente por dois motivos: a temperatura ambiente nas secagens realizadas foi mínima de 6 °C durante a noite. Acredita-se que mesmo o secador sendo isolado termicamente, esse isolamento não o torna hermético, logo há troca de energia na forma de calor com o ambiente, fazendo com que parte da energia térmica dos gases no interior do secador seja perdida para o ambiente, reduzindo sua temperatura; outra possível explicação é devido à quantidade e tipo de água que foi eliminada da madeira. O teor de umidade inicial da madeira utilizada nas secagens da Classe 3 foi de 39,99%, valor muito

inferior ao observado nas demais classes (Tabela 4), logo, espera-se que, proporcionalmente, tenha sido retirada da madeira maior quantidade de água de adesão, a qual necessita maior quantidade de energia para ser removida em comparação a água livre. Esse fato pode ser comprovado pela umidade final observada, que foi de 22,96%, umidade que se encontra abaixo do ponto de saturação das fibras. Assim, para retirada da água da madeira da Classe 3, foi necessária maior quantidade de energia na forma de calor, que foi transferida do gás para a madeira, reduzindo sua temperatura, em maior proporção que a observada na demais classes.

Para as secagens realizadas com as madeiras pertencentes as Classes 1 e 2 de diâmetro, observa-se que não houve diferença significativa da temperatura média dentro do secador.

Comparando-se as temperaturas para uma mesma classe de diâmetro, verifica-se que as temperaturas da copa e próximas da porta do secador tiveram valores médios próximos e maiores que as obtidas nas laterais do secador. A maior temperatura observada na copa se deve a menor densidade do gás quente, e ao fato de ele ter sido injetado na parte superior do secador, fazendo com que o mesmo permaneça nessa região e o gás frio desça, contribuindo para essa diferença de temperatura. Na região da porta, a maior temperatura, se deve a ação dos ventiladores axiais e pela ausência de barreira física ao fluxo de gás, assim a massa de gás quente deslocou-se para esta região com maior facilidade.

Verifica-se que a temperatura na lateral esquerda do secador foi maior que àquelas observadas na lateral direita, devido a proximidade com a tubulação de distribuição dos gases quentes para dentro do secador, que se divide em 4 aberturas, tendo a primeira próxima a lateral esquerda.

De modo geral observa-se que a temperatura dos gases na copa do secador foi de 81,09 °C em média, valor inferior à temperatura dos gases na entrada do secador (Tabela 1), que foi 156 °C em média. Essa diferença pode ser explicada pelo fluxo dos gases dentro do secador, que foi forçado pela ação dos exaustores e ventiladores axiais, o que não permite que os gases permaneçam por um tempo maior em contato com os termopares, não transferindo a quantidade de energia na forma de calor necessária para maior elevação da temperatura.

Na Figura 14 são apresentadas as imagens obtidas com a câmera infravermelha.

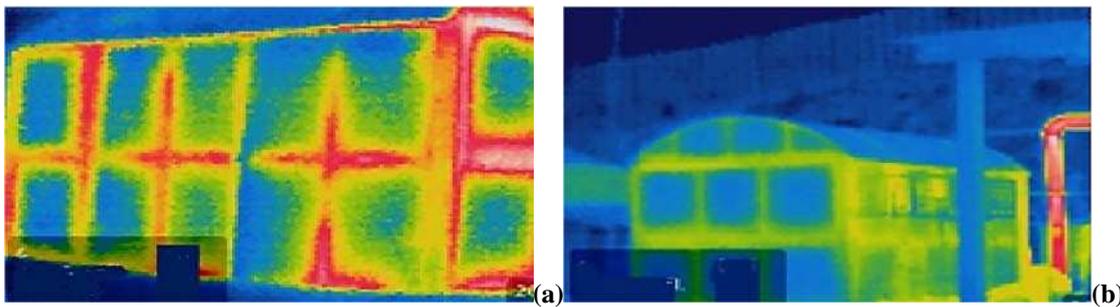


Figura 14 – Imagem do secador (a) e das tubulações de transporte de gases (b) durante o processo de secagem obtidas com termografia infravermelha.

Na Figura 14(a) observa-se as partes do secador onde ocorreram as maiores perdas térmicas. Conforme mencionado, as paredes do secador são compostas de chapas metálicas paralelas, isoladas internamente por manta cerâmica, contudo, percebe-se que nas junções entre as chapas foi a região de maior temperatura, evidenciada pela cor vermelha na imagem, e onde ocorreu maior perda térmica. Uma provável explicação para esse fato é que a manta cerâmica que isola termicamente as paredes não são inteiriças, deixando frestas no isolamento, por onde o calor foi transferido das chapas metálicas internas para as externas; essas, por sua vez, foram unidas por pontos de solda, o que gerou uma interrupção entre elas. Assim, a condução do calor foi interrompida nestas junções, não sendo transferido de uma chapa para outra, causando seu acúmulo e consequente perda para o ar ambiente nessa região.

Na Figura 14b observa-se, visualmente, a maior temperatura da tubulação de transporte dos gases combustos em comparação com as junções das paredes do secador.

Apesar de existir essa perda de calor pelas junções do secador, de modo geral, constatou-se pelas temperaturas internas do secador (Tabela 2), que a energia na forma de calor que entra no secador, é na sua maior parte, transferida para a madeira e utilizada na evaporação superficial das toras, e outra parte, perdida pelas paredes.

5.3. Efeito da posição da tora na pilha de madeira e posição ao longo da tora na umidade final

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de umidade final, após a secagem, nas diferentes posições das toras na pilha de madeira e ao longo da tora (partes), para cada classe de diâmetro.

Tabela 3 – Valores médios de umidade da madeira nas diferentes posições da pilha e ao longo da tora.

Classe	Parte	Estrato / Seção									Média
		II	III	1III	2I	2II	2III	3I	3II	3III	
1	1	37,87±14,79	42,75±28,28	49,85±16,77	32,68±16,53	34,82±12,88	37,47±17,00	33,49±11,86	38,98±17,91	39,77±12,49	38,63±17,10 A
	2	47,60±16,68	45,42±22,60	55,41±16,22	35,37±17,66	37,50±12,12	40,72±14,04	34,27±14,48	44,23±17,68	40,03±18,72	42,28±17,35A
	3	48,42±15,93	39,97±22,92	53,39±12,77	39,37±12,78	42,81±16,90	42,38±13,68	37,00±20,29	47,19±18,12	49,41±15,97	44,44±16,59A
Média		44,63±16,02 a	42,71±23,97 a	52,88±15,00 a	35,80±15,65 a	38,38±14,04 a	40,19±14,61 a	34,92±15,45 a	43,47±17,62 a	43,07±16,03 a	
2	1	60,86±19,74	63,47±12,38	58,95±12,68	49,93±12,01	62,12±11,09	54,49±12,06	50,91±12,25	52,98±10,58	60,98±18,89	57,19±14,12 B
	2	67,14±19,85	69,10±17,72	63,83±17,44	58,45±14,38	67,90±13,87	55,02±12,44	55,99±10,00	61,42±12,14	68,63±21,73	63,05±16,09 A
	3	67,37±16,52	60,25±10,88	62,26±13,77	61,77±12,39	68,26±15,86	63,57±13,77	56,73±11,78	62,56±15,51	69,84±20,33	63,62±14,65 A
Média		65,12±18,7 a	64,27±18,37 a	61,68±13,99 a	56,72±14,40 a	66,09±13,50 a	57,69±13,57 a	54,54±13,03 a	58,99±11,30 a	66,49±13,19 a	
3	1	16,47±6,16	16,21±10,95	20,52±10,67	25,26±13,65	19,03±8,71	20,02±4,78	23,74±5,34	22,15±11,81	24,02±12,42	20,82±9,92 B
	2	19,86±8,14	20,83±13,5	27,23±15,78	28,01±16,64	23,14±12,18	26,22±8,35	30,88±8,22	30,88±16,88	28,65±17,20	26,19±13,45 A
	3	15,23±3,85	15,74±8,58	19,66±11,38	24,09±12,20	18,97±7,31	20,88±8,05	28,64±8,57	28,46±16,57	25,16±15,21	21,87±11,41 B
Média		17,19±6,05 b	17,59±6,40 b	22,47±11,05ab	25,79±12,83 ab	20,38±13,88 ab	22,38±9,49 ab	27,75±7,53 a	27,16±7,86 a	25,94±15,20 ab	

*Médias seguidas de mesmas letras minúsculas entre médias de Estrato / Seção (colunas) e maiúsculas entre médias de Parte (linhas), para uma mesma classe, não diferem entre si ao nível de 95% de probabilidade pelo teste Tukey. Os valores após o sinal ± representam o desvio padrão da média.

Legenda: (Parte da tora: 1 - extremidade da tora posicionada em direção à porta do secador; 2 – meio da tora; 3 – extremidade direcionada para parede oposta à porta)

Observa-se que a umidade final das toras da Classe 1 não diferiram significativamente entre si, independentemente da posição na pilha. Verifica-se também que não houve diferença entre as partes da tora em função da posição na pilha, logo a umidade final da carga de madeira, após a secagem, pode ser considerada homogênea.

Para a Classe 2, observa-se que também não houve diferença significativa para a umidade final das toras em função da posição na pilha, ou seja, independentemente da sua posição nos estratos e seções, não houve variação na umidade média. Porém, houve diferença entre as partes da tora, tendo que a umidade na parte 1 foi significativamente inferior às partes 2 e 3. Esse fato pode ser explicado pelo maior contato desta parte da tora com o fluido quente do secador, pois essa parte é voltada para a porta do secador, que juntamente com a copa, foram as regiões de maior temperatura, logo era de se esperar uma secagem mais pronunciada nesta parte da tora.

Nas secagens realizadas com as toras da Classe 3, observou-se diferença significativa da umidade final em função da posição na pilha e ao longo da tora. As toras localizadas no Estrato 1, nas seções I e II, obtiveram os menores valores de umidade, por outro lado, as toras localizadas no Estrato 3, nas seções I e II, obtiveram os maiores valores de umidade final. Nas demais posições as umidades não diferiram entre si, sendo os valores obtidos considerados médios, comparativamente àqueles obtidos nas seções I e II dos estratos 1 e 3, respectivamente. De modo geral, houve uma tendência de maior umidade final das toras localizadas nos estratos inferiores.

Verifica-se também para Classe 3 que houve efeito da posição ao longo da tora na umidade final, sendo a umidade obtida no meio da tora maior que aquelas observadas nas extremidades.

Como a umidade inicial de cada classe de diâmetro das toras foi diferente, não se pode compará-las após a secagem, contudo, os resultados obtidos permitiram verificar algumas tendências, a saber:. Verificou-se que a secagem de toras com separação de classe de diâmetro apresentou-se mais homogênea, resultando em uma carga de madeira com menor variação da umidade, como observado nas classes 1 e 2. Já para a Classe 3, os resultados obtidos demonstraram uma variação de umidade maior, havendo diferenças tanto nas posições ao longo da pilha como ao longo das toras. Essa diferença entre as classes pode ser explicada pela melhor acomodação das toras na pilha quando essas possuem diâmetros com menor variação, pois desta forma há a formação de espaços vazios

ao longo da pilha, porém esses tendem a ser menores e distribuídos de forma regular. Em contrapartida, quando há mistura de toras com diâmetros variados, ocorre que no empilhamento pode-se ter uma distribuição irregular dos espaços vazios, ocasionando fluxo preferencial do ar em alguns pontos ao longo da pilha, tornando a secagem desigual.

Portanto, a secagem artificial de toras com separação de classe de diâmetro se mostra mais eficiente, por apresentar uma umidade final homogênea, contudo, a separação das toras em classes de diâmetros ocasiona um aumento nos custos de produção, sendo necessário um estudo de viabilidade econômica. É importante ressaltar que este estudo deve ser relacionado também com a produção de carvão vegetal, pois espera-se também um ganho em produtividade e qualidade do mesmo, ao se carbonizar toras com separação diamétrica.

5.3. Efeito da classe de diâmetro na taxa de secagem e redução relativa de umidade

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios dos principais parâmetros da madeira, por classe de diâmetro, obtidos após as secagens. De modo geral, após a secagem as toras de madeira reduziram em média 36,45% da sua umidade inicial.

Tabela 4 – Parâmetros médios da madeira, por classe de diâmetro, obtidos após a secagem.

Classe de diâmetro	Massa seca de madeira (kg)	Massa de água eliminada (kg)	Taxa de secagem (kg água/kg madeira.h)	Umidade inicial (%)	Umidade final (%)	Redução relativa (%)
1	4314,4	1281,35	0,00436	70,81	42,96	39,34
2	4460,5	554	0,00183	84,46	61,29	27,43
3	4132,5	707,1	0,00252	39,99	22,96	42,58

Observa-se que a massa média de água eliminada da madeira foi maior para aquelas pertencentes à Classe 1, com uma taxa de secagem de 0,00436 kg água/kg madeira.h. A Classe 3, que abrange toras com diâmetros das classes 1 e 2 misturados, teve uma taxa de secagem de 0,00252 kg água/kg madeira.h, resultando em uma massa média de 707,10 Kg de água eliminada. Observa-se uma taxa de secagem de apenas 0,00183 kg

água/kg madeira.h para a madeira da Classe 2, mesmo o teor de umidade final tendo sido alto, o que indica que foi eliminada maior quantidade de água livre, evidenciando a maior dificuldade de secagem de toras com diâmetros maiores.

Verifica-se, ainda na Tabela 4, que houve efeito da classe de diâmetro na redução relativa média da umidade da madeira após a secagem. De acordo com os resultados, as toras de madeira pertencentes as classes 1 e 3 obtiveram maior redução de umidade em relação as toras com maior diâmetro (classe 2), seguindo a mesma tendência da secagem ao ar livre, conforme relatado por Pinheiro (2013) e Rezende (2009), em experimento de secagem natural com diferentes classes de diâmetro.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram a maior dificuldade de secagem para toras com diâmetros maiores, sendo este fato explicado pela maior distância a qual as moléculas de água do interior da tora têm que percorrer para atingirem a superfície e por diferença de pressão serem removidas.

5.3.1. Efeito da posição da tora na redução relativa de umidade

Na Tabela 5 são apresentados os percentuais médios de redução relativa de umidade, em função da posição da madeira na pilha.

Tabela 5 – Percentuais médios de redução relativa de umidade em função da posição da madeira na pilha.

Classe de diâmetro	Estrato	Seções			Média
		I	II	III	
1	1	46,18	49,77	34,61	43,52
	2	39,79	40,90	36,93	39,21
	3	39,62	36,23	29,54	35,13
Média		41,86	42,30	33,69	39,29
2	1	33,49	31,01	27,20	30,57
	2	31,31	26,16	25,29	27,59
	3	28,77	24,78	18,15	23,90
Média		31,19	27,32	23,55	27,35
3	1	50,41	54,67	49,36	51,48
	2	42,72	45,08	45,02	44,28
	3	29,32	34,41	33,98	32,57
Média		40,82	44,72	42,79	42,78

Não houve efeito significativo dos fatores classe de diâmetro e as posições na pilha (estratos e seções), para os valores de redução relativa de umidade. Logo, são apresentados na Tabela 6 os valores médios dos estratos e seções independentemente das classes, verificando seu efeito, isoladamente, na redução relativa do teor de umidade.

Tabela 6 – Efeitos isolados das posições das toras na pilha na redução relativa de umidade.

Estrato	Redução do teor de umidade (%)
1	41,86 ± 10,28 a
2	37,02 ± 8,23 a
3	30,54 ± 9,64 b

Seção	Redução do teor de umidade (%)
I	37,96 ± 8,06 ab
II	38,11 ± 11,89 a
III	33,34 ± 10,62 b

*Médias seguidas de mesmas letras entre linhas, para um mesmo fator não diferem entre si ao nível de 95% de probabilidade pelo teste Tukey. Os valores após o sinal ± representam o desvio padrão da média.

Observa-se na Tabela 6 que, avaliando-se o efeito das posições da tora na pilha de madeira, houve diferença significativa da redução relativa de umidade. As reduções observadas nos estratos 1 e 2 foram maiores que a observada no Estrato 3, o que era esperado, uma vez que há uma tendência do gás de maior temperatura permanecer na parte superior do secador, enquanto que na parte inferior encontra-se um gás mais denso e frio, com menor potencial de secagem.

Nas seções, houve uma maior redução na Seção II, na parte central da pilha de madeira, enquanto na Seção III, a redução foi significativamente inferior. Já na Seção I, a média obtida não diferiu das demais. Esse comportamento observado ao longo das seções, principalmente a menor redução verificada na Seção III, pode ser explicado por uma possível diferença de vazão dos gases combustos dentro do secador, em função das aberturas do distribuidor principal, como as aberturas foram colocadas em série, provavelmente devido a maior vazão da primeira em relação as demais, resultando em uma maior liberação dos gases combustos no lado esquerdo do secador.

A variação da redução relativa de umidade da madeira em função da posição das toras na pilha, pode ter sido gerada também por questões intrínsecas da madeira, pois a madeira é um material heterogêneo, havendo grande variação entre toras, e dentro de cada

tora. Porém, é importante que um secador artificial seja capaz de suprimir essa heterogeneidade, e independentemente de outros fatores, deve gerar uma carga de madeira com teor de umidade final baixo e principalmente, o mais homogêneo possível, o que colabora com otimização da matéria-prima para produção de carvão vegetal.

Assim, com objetivo de otimizar a secagem, algumas alternativas podem ser testadas, como por exemplo, mudanças nas posições dos ventiladores axiais, ou variações do tempo e temperatura de secagem.

5.4. Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios de rendimento gravimétrico e das propriedades do carvão vegetal.

Tabela 7 – Valores médios de rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal.

Propriedade do carvão vegetal	Valores com desvio padrão
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%)	30,9±2,7
Finos (%)	4,13± 0,35
Atiço (%)	5,08± 0,29
Densidade a granel (kg/m ³)	156,15±9,56
Friabilidade	10,8±1,7
Carbono fixo (%)	77,7±2,4
Materiais voláteis (%)	21,1±1,9
Cinzas (%)	0,99±0,17

Observou-se que os valores obtidos nas carbonizações, tanto para rendimento gravimétrico quanto propriedades do carvão vegetal, são adequados para sua utilização em siderurgia, indicando que a integração do sistema forno/fornalha com o secador não foi prejudicial para o processo de carbonização.

5.5. Balanço energético da secagem e estimativa de ganho em rendimento de carvão vegetal

O consumo total de energia elétrica foi de 850 Kw, tendo um consumo médio de 212,5 Kw para cada secagem, ou 49,4 Kw por tonelada de massa seca de madeira. Essa energia foi consumida em 68 horas ininterruptas de funcionamento do sistema de secagem, contemplando 2 ventiladores centrífugos e 3 axiais.

Na Tabela 8 são apresentados os valores obtidos de energia térmica intensiva, energia elétrica intensiva e eficiência térmica do secador.

Tabela 8 – Eficiência térmica do secador em função das secagens das toras de diferentes classes de diâmetro.

Classe diâmetro	Energia Fornecida (J/s)	Energia Utilizada (J/s)	Energia Térmica Intensiva (J/s.Ton. madeira seca)	Energia Elétrica Intensiva (kW/Ton. madeira seca)	Eficiência Térmica
1	20305	12470	4707	49,3	0,61
2	20330	5388	4558	47,6	0,27
3	22480	7979	5440	51,4	0,36
Média	21038	8612	4902	49,4	0,41

Observa-se maior eficiência térmica para as secagens realizadas com as toras de menor diâmetro, ou seja, a energia na forma de calor fornecida para a secagem foi melhor aproveitada para esta classe. A menor eficiência foi obtida para a Classe 2, toras com diâmetros maiores, evidenciando maiores perdas térmicas neste processo, o que representa também a maior dificuldade de secagem dessas toras.

Os parâmetros obtidos de energia térmica intensiva e energia elétrica intensiva são importantes, pois servirão de suporte para dimensionamento de secadores industriais, pois com os valores obtidos e conhecendo-se a massa seca de madeira que será empilhada no secador, será possível estimar a quantidade de energia térmica necessária, e também estimar o consumo de energia elétrica do sistema, para se proceder a secagem.

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios estimados de demanda de energia necessária para retirada de água na madeira considerando água livre e água de adesão e o ganho em rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Tabela 9 – Demanda de energia estimada para a retirada de água da madeira e ganho em rendimento gravimétrico em carvão (RGCV).

Carbonização	Massa de água eliminada durante a secagem (Kg)	Demanda de energia para secar (kcal)	RGCV estimado (%)
1	1181,7	672387,3	36,9
2	1381,0	785789,0	35,9
3	413,2	235110,8	31,3
4	694,2	394999,8	29,8
5	580,2	382841,5	31,9
6	834,0	550309,9	28,3
Média	847,4	503573,0	32,4

A demanda de energia para retirada da água da madeira foi diretamente proporcional à quantidade de água eliminada na secagem, logo teve influência não só da classe de diâmetro das toras mais também da umidade inicial e final, a qual determinou a proporção de água de adesão eliminada, uma vez que é necessária maior quantidade de energia para retirada desse tipo de água da madeira.

Comparando-se as estimativas de rendimentos gravimétricos das carbonizações, obteve rendimento variando de 28,3% a 36,9%, sendo o valor médio de 32,4%, ou seja, haveria um ganho de 1,5 pontos percentuais, ou 4,85% a mais de carvão ao se utilizar a madeira previamente seca. Este resultado é interessante quando se extrapola a produção para escala industrial, representando um ganho significativo.

Além do ganho em rendimento gravimétrico em carvão vegetal, a utilização de madeira com baixa umidade reduz o ciclo de carbonização em função de haver menor quantidade de água nas toras para ser eliminada na fase inicial. Além disso, menor quantidade de água na madeira gera menor quantidade de gases poluentes no processo (Canal, 2014).

6. CONCLUSÕES

As perdas térmicas ocorridas nas tubulações do transporte de gases não afetaram a temperatura de entrada dos gases no secador.

As toras separadas por classe de diâmetro apresentaram uma tendência de menor variação do teor de umidade após a secagem, gerando uma carga de madeira mais homogênea quando comparado com a carga de madeira de diâmetros misturados.

A redução relativa, independente da classe de diâmetro, foi maior nas toras posicionadas nas partes mais altas da pilha.

De modo geral, a redução relativa do teor de umidade, nas condições e parâmetros em que foram realizadas as secagens, foi de 36,45%.

O consumo de energia elétrica, por cada tonelada de madeira (massa seca), foi de 49,4 kW.

A maior eficiência térmica, sendo 0,61, foi obtida para as secagens da Classe 1.

Estimou-se um ganho médio de 4,85% no rendimento gravimétrico em carvão vegetal ao se utilizar madeira com baixa umidade na carbonização.

7. RECOMENDAÇÕES

- Recomenda-se a realização de um estudo de tempo de secagem, principalmente com toras de diâmetros maiores, verificando o tempo necessário para maior redução da umidade;
- Recomenda-se a avaliação de diferentes temperaturas de secagem, acima de 150°C;
- Realização de estudos de uso dos ventiladores, avaliando a necessidade de ajustes, tanto em quantidade como de rotação.
- Recomenda-se um estudo de viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A. **O Processo de carbonização contínua da madeira**. In: Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 1982. 393 p.
- ANDRADE, A., 2000. **Indicação de programas para a secagem convencional de madeiras**. Piracicaba, 72f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz" /Universidade de São Paulo.
- Anuário Estatístico da ABRAF: ano base 2011. **Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas**. Brasília, 2012.
- Anuário Estatístico da AMS: ano base 2012. **Associação Mineira de Silvicultura**. Junho de 2013. Disponível em: < <http://silviminas.com.br/wp-content/uploads/2013/06/Anu%C3%A1rio-Estat%C3%ADstico-AMS.pdf>>. Acesso em: 28 de outubro de 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6922**: Carvão vegetal: determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro, 1981. 2 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.
- ARCELORMITTAL BIOFLORESTAS. **Energia para gerar sustentabilidade**. Disponível em: <<http://www.arcelormittalbioflorestas.com.br/index.asp?Grupo=30&SubGrupo=76&ID=87>>. Acesso em: 04 dezembro de 2014.
- BARCELLOS, D.C. Avanços tecnológicos da produção de carvão. **II Fórum Nacional sobre produção de carvão vegetal**. Sete Lagoas, MG, out 27-29, 2010.
- BARAÚNA, E. E. P., SOUZA DE OLIVEIRA, V. Umidade de equilíbrio da madeira de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz & Pav.) e tauari vermelho (*Cariniana micrantha* Ducke) em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. **Acta Amaz.** vol.39, n 1, Manaus mar. 2009.
- BARROS, M. V. **Fator de cubicação para madeira empilhada de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, com toretes de dois comprimentos, e sua variação com o tempo de exposição ao ambiente**. 2006. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. Ed. São Paulo, 1991. 154 p.
- BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 9, p1-19, 1990.

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

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

Centro de Inteligência em Florestas – CIFLORESTAS. **Preços de produtos, 2014.**

Disponível em:

<<http://www.ciflorestas.com.br/dado.php?id=12>>. Acesso em: 18 março de 2015.

CHAGAS, L. Secagem natural da madeira no campo para produção de carvão vegetal. In: **FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 2.**, 2010, Sete Lagoas: SIF, 2010. Disponível em:
http://www.sif.org.br/arquivos_internos/downloads/Leonardo+Chagas.pdf. Acesso em: 13 dezembro de 2012.

COELHO, M. P. **Desenvolvimento de metodologia para o dimensionamento de câmaras de combustão para gases oriundos do processo de carbonização de madeira.** 2013. 78p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. 2014. **Balço Energético Nacional 2014: Ano Base 2013.** Rio de Janeiro, 2014. 288p. Disponível em:
<<http://www.ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 18 março de 2015.

ELEOTÉRIO, J. R., HASELEIN, C. R., GIACOMINI, N. P. Programa para estimativa da umidade de equilíbrio da madeira. **Revista Ciência Florestal**, v.8, n.1, 1998.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira.** São Paulo: Nobel, 1985.

GARBE, E. A. **Gradiente de umidade e tensões na madeira:** relação água- madeira. Curitiba: UFPR, 2008. 15 p.

INCROPERA, F.; DEWITT, D.P.; BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, LTC, 6a Edição, 2011.

JANKOWSKY, I. P. Equipamentos e processos para secagem de madeiras. In: Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. 109-118p.

KLITZKE, R. J. **Secagem da Madeira.** Curitiba: UFPR, 2003. 98p

- MARQUES, M. H. B. **Agrupamento de 41 espécies de madeiras da Amazônia para secagem baseado em características anatômicas e físicas.** 2008. 122p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.
- MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de *Pinus*.** 2007. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.
- MATARELLI, F. A.; LOPES, L. E. F.; CASTRO, L. F. A. Siderurgia a carvão vegetal. In: _____ . **Biomassa: energia nos trópicos em Minas Gerais.** Belo Horizonte: FAFICH, 2001. p. 145-161.
- OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno – fornalha para produção de carvão vegetal.** 2012. 73 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2012.
- OLIVEIRA, L. C. S. **Perguntas e respostas em secagem de madeiras.** São Paulo: IPT, 1981. 36p.
- OLIVEIRA, J. T. S. SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa, v 27, n. 3, p. 381-385, 2003.
- OLIVEIRA, J.B.de.; VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P.A. Produção de Carvão Vegetal - aspectos técnicos. In: PENEDO, W.R. et al. Eds. **Produção e utilização de carvão vegetal.** Belo Horizonte: CETEC, 1982. p.60-73.
- PINHEIRO, M. A. **Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal.** 2013. 77 fls. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- PIMENTA, A.S.; BARCELLOS, D.C. Atualização em carvão vegetal- Apostila. Viçosa: UFV, 2004. 95p.
- PONCE, RM.; WATAI, L. T. **Manual de secagem de Madeira.** Brasília: MIC/STI/IPT, 1985. 70p.
- PRATT, G. H. **Timber drying manual.** London: Department of the Environment, Building Research Establishment, 1974. 152p.
- REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental.** 2006. Belo Horizonte - MG. 2006.
- REZENDE, R. N. **Secagem de toras de clones de *Eucalyptus* empregados na produção de carvão.** 2009. 178 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal da Lavras, Lavras.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J.S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Editora Taylor & Francis Group. New York. 487 p. 2005.

SKAAR, C. J. **Water in Wood**. Syracuse: Syracuse University, 1972. 218p.

SKAAR, C. **Wood water relations**. NewYork: Springer-Verlag, 1988. 283 p.

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

STCP - ENGENHARIA DE PROJETOS Ltda. **Secagem de madeiras serradas**. Curitiba: 1990. 68p.

STEIN, F. R. **Avaliação técnica do tempo de estocagem da madeira**. 2003. 36p. Monografia (Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

SUSIN, FELIPE. **Avaliação de programas de secagem para madeiras de eucalipto elaborados com base em testes prévios a alta temperatura**. 2012. Dissertação (Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

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

TUSET, R.; F. DURAN. 1986. **Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización**. Editorial Agropecuaria, Hemisferio Sur. Montevideo. 688 p.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Rio Branco: Suprema, 2008. p.195-241.

VALENTE, A. F. LELLES, J. G. Carbonização da madeira de Eucalyptus. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 141, p. 74-79, set. 1986.

VITAL, B. R. DELLA LUCIA, R. M. VALENTE, O. F. Estimativa do teor de umidade de lenha para carvão em função do tempo de secagem. **Revista Árvore**, v.9, s/n, p.10-27, 1985.

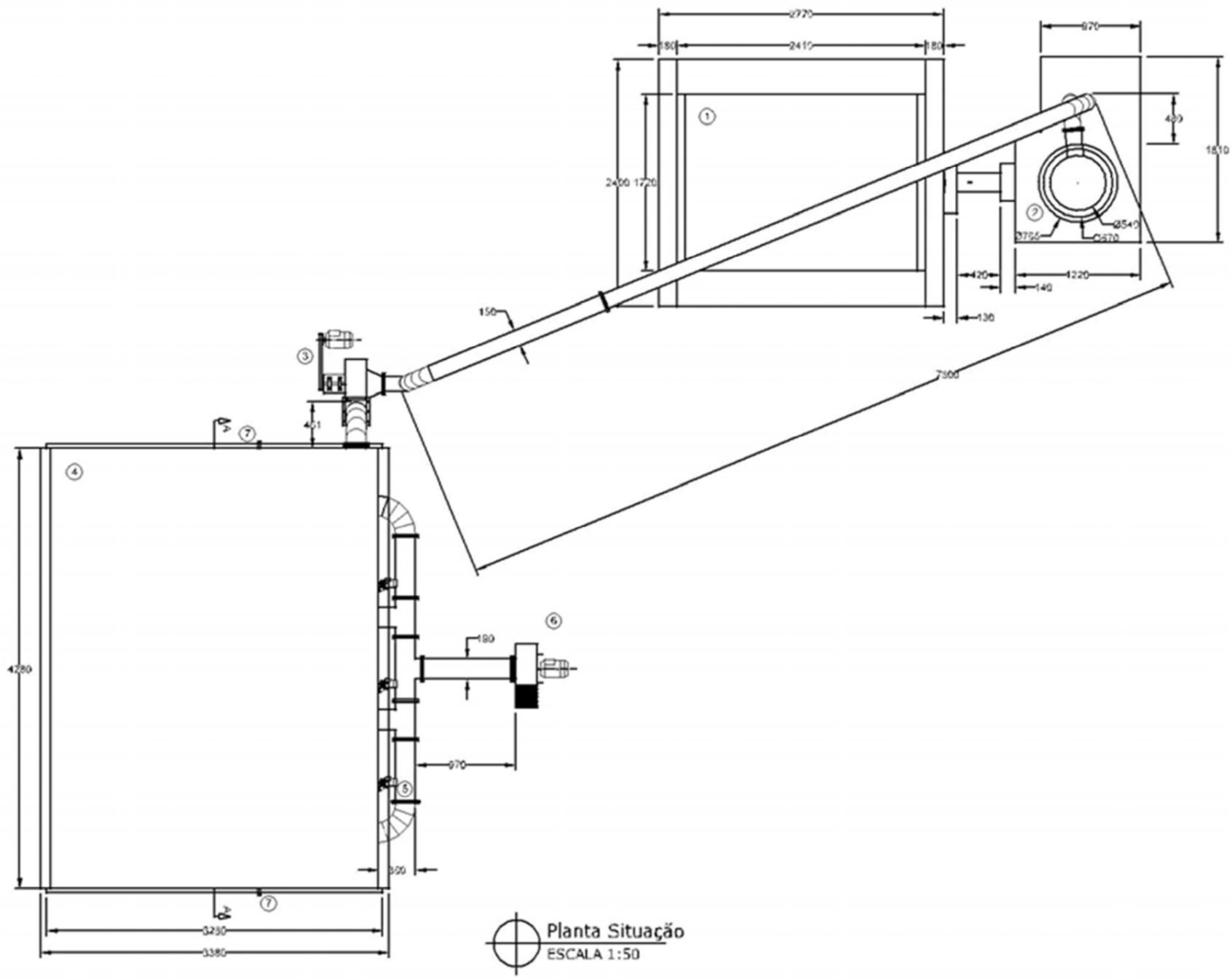
ANEXO

ANEXO 1 - Teores de umidade inicial e final em função do posicionamento das toras na pilha.

Classe 1		Teor de umidade (%)					
		Seção I		Seção II		Seção III	
		Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2
Estrato 1	Inicial	92,12	73,60	91,83	77,62	83,95	75,32
	Final	49,95	39,31	48,17	37,26	59,90	44,76
	Redução de umidade (%)	42,17	34,29	43,66	40,36	24,05	30,55
Estrato 2	Inicial	59,45	61,39	59,35	71,75	55,07	71,79
	Final	35,08	37,70	34,05	43,64	33,54	46,84
	Redução de umidade (%)	24,38	23,68	25,30	28,11	21,53	24,95
Estrato 3	Inicial	51,50	69,01	56,88	76,88	54,58	67,53
	Final	32,87	39,29	32,47	54,16	38,02	48,12
	Redução de umidade (%)	18,63	29,72	24,41	22,72	16,56	19,41

Classe 2		Teor de umidade (%)					
		Seção I		Seção II		Seção III	
		Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2
Estrato 1	Inicial	106,07	88,89	89,81	96,77	84,28	85,18
	Final	74,14	56,10	64,19	64,35	60,74	62,63
	Redução de umidade (%)	31,93	32,79	25,61	32,42	23,54	22,55
Estrato 2	Inicial	89,47	74,69	93,25	85,82	77,37	77,08
	Final	65,52	47,91	68,41	63,78	55,57	59,82
	Redução de umidade (%)	23,96	26,78	24,83	22,05	21,81	17,26
Estrato 3	Inicial	80,20	72,48	74,78	82,15	89,46	72,44
	Final	60,66	48,43	56,98	60,99	75,64	57,33
	Redução de umidade (%)	19,54	24,05	17,80	21,16	13,82	15,10

Classe 3		Teor de umidade (%)					
		Seção I		Seção II		Seção III	
		Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2
Estrato 1	Inicial	35,84	33,56	37,38	40,11	43,89	44,84
	Final	17,09	17,28	16,04	19,15	21,71	23,23
	Redução de umidade (%)	18,75	16,28	21,34	20,96	22,18	21,60
Estrato 2	Inicial	36,76	54,15	36,80	37,41	46,59	36,19
	Final	22,11	29,46	19,59	21,17	22,21	22,54
	Redução de umidade (%)	14,64	24,69	17,21	16,24	24,38	13,65
Estrato 3	Inicial	40,19	38,37	43,24	38,34	46,84	29,22
	Final	28,08	27,43	35,59	18,74	35,38	16,51
	Redução de umidade (%)	12,11	10,94	7,66	19,60	11,46	12,71



Planta Situação
ESCALA 1:50

Especificações	
Letras	Descrições
1	Forno
2	Urneta Turbina
3	Sopista
4	Sensor
5	Verificador Arroz
6	Chave de Trilhos
7	Portas de Amostragem

Anexo 2

Conjunto Forno/Secador

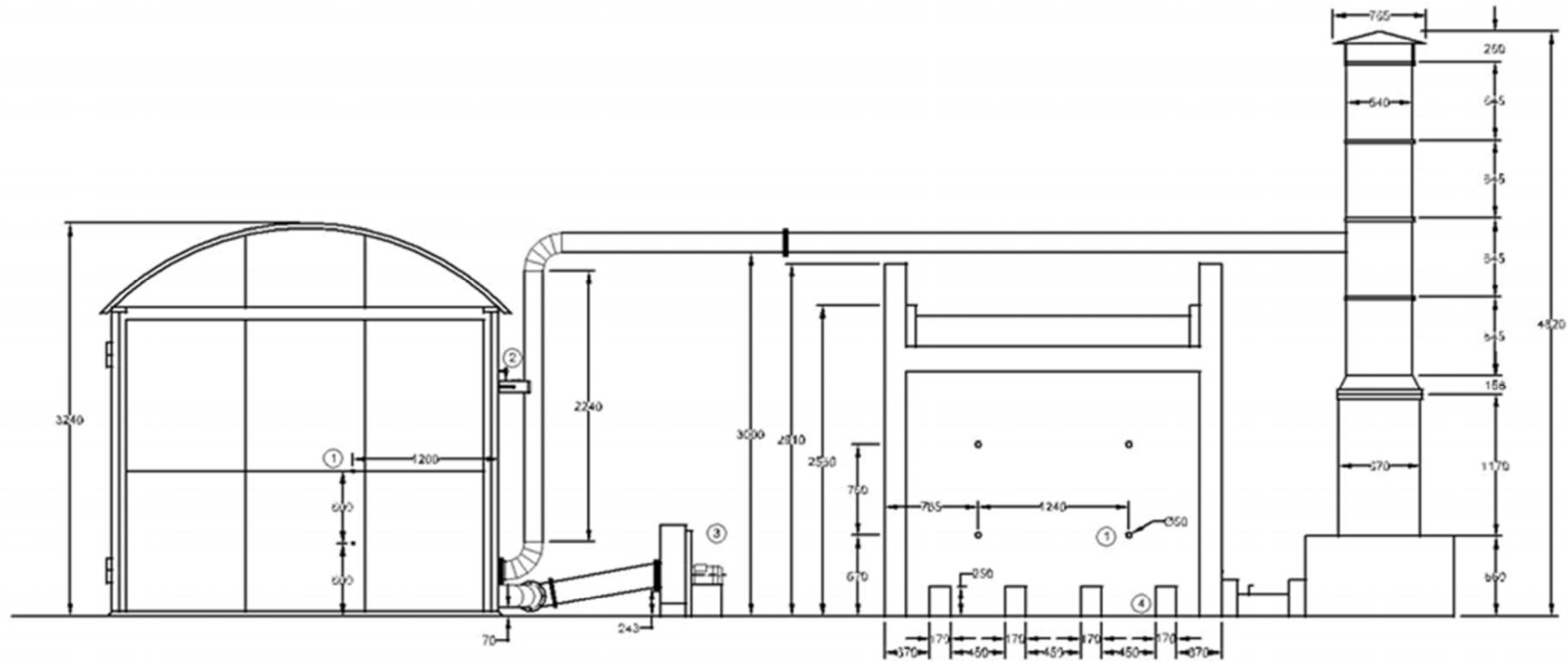
DATA: 11/07/15 MFDIAS FM: em FOLIA: 1/30

Descrição: Planta Situação do conjunto Forno/Secador do Laboratório de Física e Energia da Matéria (LAFEM)

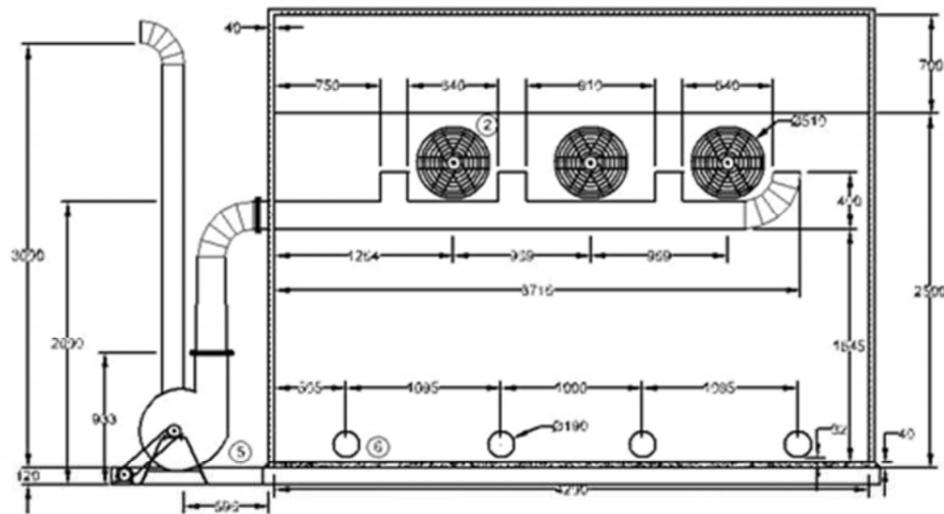
PROJETISTA Daniel Carlos Barreira Crea - N.º 74454	DESENHISTA: Alfonso Farias	ARQUIVO MAJNETIC: 1_ano20_Decador_01_02007.dwg	FOLIA: 1/30
--	-------------------------------	---	-------------

REV.	DATA	RESPONSÁVEL	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES

Vista Lateral
ESCALA 1:50



Corte A-A
ESCALA 1:50



Especificações	
Elementos	Denominações
1	Forno de Anodagem
2	Ventiladores Axiais
3	Exaustor de Tração
4	Frenos de Ar do Forno
5	Suportar
6	Tubulação do Tragam

Anexo 3

DISCRIÇÃO: Conjunto Fornoha/Secador			
DATA: 11/07/15	MODIFICAÇÕES	FOLHA Nº: 1/30	
PROJETISTA: Daniel Carlos Barreira CREA - Nº: 74484/E			
DESENHISTA: Alfonso Freitas		ARQUIVO MAJNÉTICO: 1-anexo3_Decador_01_02007.dwg	FOLHA Nº: 2/2

PCV	DA" A	RESPONSÁVEL	DCS: RUIJO DAS REVISÕES
-----	-------	-------------	-------------------------

ANEXO 4 – Cálculos de eficiência térmica do secador

I. Dados

1.0. Concentrações

$$c_{CO} = 1.38$$

$$c_{CO2} = 18.13$$

$$c_{CH4} = 0.27$$

$$c_{O2} = 5.8$$

$$c_{H2} = 1.69$$

$$c_{N2} = 100 - c_{CO} - c_{CO2} - c_{CH4} - c_{O2} - c_{H2} = 72.73$$

1.1. Temperaturas

$$T_{classe1} = (74.35 + 273.15)K = 347.5K$$

$$T_{classe2} = (69.39 + 273.15)K = 342.54K$$

$$T_{classe3} = (55.59 + 273.15)K = 328.74K$$

1.2. Vazão

$$Q_{Vazao} = 0.2 \frac{m^3}{s} = 720 \frac{m^3}{hr}$$

1.3. Taxa Secagem

$$m_{classe1} = 0.00436 \frac{g}{g \cdot hr}$$

$$m_{classe2} = 0.00183 \frac{g}{g \cdot hr}$$

$$m_{classe3} = 0.00252 \frac{g}{g \cdot hr}$$

1.4. Massa Seca

$$ms_{classe1} = 4314.4 \times 10^3 \cdot g$$

$$ms_{classe2} = 4460.5 \times 10^3 \cdot g$$

$$ms_{classe3} = 4132.5 \times 10^3 \cdot g$$

1.4. Massa Molares

$$MM_{CO2} = 44.0095 \frac{g}{mol}$$

$$MM_{CO} = 28.0101 \frac{g}{mol}$$

$$MM_{CH4} = 16.0425 \frac{g}{mol}$$

$$MM_{H2} = 2.0158 \frac{g}{mol}$$

$$MM_{O2} = 31.9988 \frac{g}{mol}$$

$$MM_{N2} = 28.0134 \frac{g}{mol}$$

1.5.Outros

$$Patm := 93390Pa$$

$$R_{gases} := 8.134 \frac{J}{K \cdot mol}$$

$$cp_{classe1} := 1.009 \frac{J}{g \cdot K}$$

$$cp_{classe2} := 1.009 \frac{J}{g \cdot K}$$

$$cp_{classe3} := 1.009 \frac{J}{g \cdot K}$$

$$Ti_{classe1} := (159.9 + 273.15)K$$

$$Tf_{classe1} := (60.4 + 273.15)K$$

$$Ti_{classe2} := (155.8 + 273.15)K$$

$$Tf_{classe2} := (57.8 + 273.15)K$$

$$Ti_{classe3} := (153.4 + 273.15)K$$

$$Tf_{classe3} := (49.4 + 273.15)K$$

2.Cálculos

$$MM_{ar} := \frac{[(MM_{CO} \cdot cCO) + (MM_{CO2} \cdot cCO2) + (MM_{CH4} \cdot cCH4) + (MM_{H2} \cdot cH2) + (MM_{O2} \cdot cO2) + (MM_{N2} \cdot cN2)]}{cCO + cCO2 + cCH4 + cH2 + cO2 + cN2}$$

$$MM_{ar} = 30.673 \frac{g}{mol}$$

$$\rho_{par_classe1} := \frac{Patm}{T_{classe1} \cdot \frac{R_{gases}}{MM_{ar}}} = 1.013 \times 10^3 \frac{g}{m^3}$$

$$\rho_{par_classe2} := \frac{Patm}{T_{classe2} \cdot \frac{R_{gases}}{MM_{ar}}} = 1.028 \times 10^3 \frac{g}{m^3}$$

$$\rho_{par_classe3} := \frac{Patm}{T_{classe3} \cdot \frac{R_{gases}}{MM_{ar}}} = 1.071 \times 10^3 \frac{g}{m^3}$$

$$Q_{sensivel_classe1} := Q_{Vazao} \rho_{par_classe1} \cdot cp_{classe1} \cdot (Tf_{classe1} - Ti_{classe1}) = -2.035 \times 10^4 \frac{J}{s}$$

$$Q_{sensivel_classe2} := Q_{Vazao} \rho_{par_classe2} \cdot cp_{classe2} \cdot (Tf_{classe2} - Ti_{classe2}) = -2.033 \times 10^4 \frac{J}{s}$$

$$Q_{sensivel_classe3} := Q_{Vazao} \rho_{par_classe3} \cdot cp_{classe3} \cdot (Tf_{classe3} - Ti_{classe3}) = -2.248 \times 10^4 \frac{J}{s}$$