

HAMILTON OLIVEIRA REIS

**RESFRIAMENTO DE FORNOS DE CARBONIZAÇÃO POR INJEÇÃO DE VAPOR
D'ÁGUA**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2009**

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

T

R375r
2009

Reis, Hamilton Oliveira, 1957-

Resfriamento de fornos de carbonização por
injeção de vapor d'água / Hamilton Oliveira Reis. – Viçosa,
MG, 2009.

xiv, 124f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Juarez de Sousa e Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 84-105.

1. Carbonização. 2. Resfriamento. 3. Vapor d'água.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 662.74

HAMILTON OLIVEIRA REIS

**RESFRIAMENTO DE FORNOS DE CARBONIZAÇÃO POR DE INJEÇÃO DE VAPOR
D'ÁGUA**

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

APROVADA: 27 de novembro de 2009.

Prof. José Helvécio Martins

Prof. José Marcio Costa

Prof. Roberto Precci Lopes

Sergio Maurício Lopes Donzeles Pesquisador

Prof. Juarez de Sousa e Silva
(Orientador)

Ao Vô Aarão e à Vó Loura (in memoriam) e à minha família Cisne Zélia, Maria Cecília,
Hamilton Henrique e Victória Esther, pela constância e pelo incentivo.
Aos meus irmãos Guilherme, Ernani e Aarão, pela família de origem.
Ao meu prezado Ir.🇳🇧 Efraim L. Reis, por aqui estar.

AGRADECIMENTOS

Ao Criador, pela oportunidade de Vida.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola.

Ao professor Juarez de Sousa e Silva pela orientação, estímulo e dedicação.

Aos professores da UFV, José Marcio Costa, José Helvécio Martins, Roberto Precci Lopes, Sergio Zolnier e Paulo Marcos de Barros Monteiro (UFOP) pelo apoio.

À professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, do Departamento de Engenharia Florestal, através de quem, agradeço a todos do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LPEM), DEF-UFV.

Ao professor Lauro Gontijo Couto, através de quem, agradeço a todos do Laboratório de Engenharia Civil, DEC-UFV.

Ao professor Braz Moura Freitas, do Departamento de Matemática, DMA-UFV, pela verdade matemática.

Ao professor Oscar Luíz Teixeira de Rezende, da Coordenadoria de Matemática, IFES – Vitória, E.S., pela estatística e regressões.

Ao Dr. Sergio Maurício Lopes Donzeles, pesquisador da EPAMIG, pela ajuda.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, Antonio Pedro Machado (Inhamim), Sebastião Rodrigues (Catitu), José Galinari, Maria José (Dona Zuca), Claudenilson Filomêno, Renato Alves e Geraldo Lopes pela amizade, mão-de-obra e apoio.

Aos meus amigos verdadeiros pelo convívio e pela amizade.

BIOGRAFIA

HAMILTON OLIVEIRA REIS, filho de Aarão Lemes Reis e Sebastiana de Oliveira Reis, nasceu em 20 de maio de 1957, em Cambuquira, Minas Gerais.

Em 1983, foi contratado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais, sendo lotado no Departamento de Química (DEQ-CCET), para trabalhar no Laboratório de Cromatografia Gasosa e Espectrometria de Massas.

Em 1994, foi transferido para o Núcleo de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária (BIOAGRO-UFV).

Em 2003, foi trabalhar no Departamento de Engenharia Agrícola (DEA-UFV).

Em 2004, graduou-se em Engenharia Florestal pela UFV.

Em março de 2007, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola e Ambiental – área de Energia na Agricultura – da UFV, submetendo-se à defesa da dissertação em novembro de 2009.

CONTEÚDO

AGRADECIMENTOS.....	III
BIOGRAFIA	IV
RESUMO	VII
ABSTRACT.....	IX
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Elementos constitutivos da lenha	10
2.1.1. A dessorção térmica dos compostos orgânicos da lenha	12
2.2. Análises do carvão	19
2.2.1. Impactos ambientais do processo de carbonização.....	19
2.2.2. Controle das emissões gasosas.....	20
2.2.3. Queima dos gases da carbonização	21
2.2.4. Fornalha para queima da fumaça.....	21
2.2.5. Condições térmicas da carbonização.....	22
2.3. Propagação térmica.....	23
2.4. O porquê do uso do vapor d'água para resfriamento.....	26
2.4.1. Modelo simplificado transiente macroscópico da carbonização e do resfriamento.....	36
2.4.2. A discretização da evolução térmica	47
2.4.3. O resfriamento do forno e da massa de carvão	53
2.4.5. Balanço termo-energético do forno	53
2.4.6. Transferência de calor do envelope construtivo forno à massa de lenha	60
2.4.7. O gerador de vapor.....	61
2.4.7. Sistema de distribuição de vapor.....	61
2.4.8. Eficiência térmica da caldeira	62
2.4.9. Balanço energético na geração de vapor	62
2.5. Implementação de controle eletrônico do processo de produção de carvão vegetal.....	63
3. MATERIAL E MÉTODOS	65
3.1. Norma para análises.....	66
3.2. Forno-piloto.....	66
3.2.1. Construção do forno-piloto	67
3.2.2. Revestimento de proteção do piso do forno-piloto	67
3.2.3. Paredes do forno-piloto	67
3.2.4. Fechamento e vedação da porta	68
3.3. Controle da velocidade de carbonização.....	68
3.4. Vedação do forno por barrelamento	69
3.6. Injeção direta do vapor para resfriamento.....	69

3.8. Posicionamento dos dispositivos utilizados na monitoração térmica.....	73
4. RESULTADOS	75
4.1. Curvas de carbonização	75
4.2. Rendimento da produção	82
4.3. Análise química imediata.....	85
4.4. Ganho anual de fornadas	86
5. CONCLUSÕES.....	88
REFERÊNCIAS	90
APÊNDICES	101
APÊNDICE A.....	102
APÊNDICE B	108
APÊNDICE C.....	113
APÊNDICE D.....	114

RESUMO

REIS, Hamilton Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2009. **Resfriamento de fornos de carbonização por injeção de vapor d'água.** Orientador: Juarez de Sousa e Silva. Co-orientadores: Delly Oliveira Filho e Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

O carvão vegetal, mesmo sendo produzido e utilizado desde os primórdios da civilização, ainda mantém insuficiente o conhecimento dos diversos mecanismos da cinética química e da transferência de calor e massa que acontecem durante a carbonização. O que torna importante a identificação da maioria, senão de todos, os parâmetros do processo de carbonização de madeira nas dimensões utilizadas na produção industrial de carvão vegetal é a forma como esses parâmetros podem interagir no transcorrer do processo e na qualidade do carvão produzido. O carvão vegetal, mesmo sob carbonização controlada, não é um composto químico definido, alguns carvões são quase carbono puro, outros devido a processos parciais de carbonização, contem quantidades significativas de oxigênio, hidrogênio e compostos orgânicos. Um sistema ideal de carbonização vegetal deve proporcionar uma adequada condição de trabalho, estabelecendo estratégias para minimizar a duração do ciclo da carbonização, sem alterar o rendimento e a qualidade do carvão produzido. Neste sentido, poucas tecnologias foram desenvolvidas visando melhorar o processo. Variáveis operacionais e mesmo construtivas de um forno, influenciam a qualidade final do produto gerado, sendo a temperatura uma das mais importantes, pois tem influência no aspecto, volume e perdas durante a carbonização, razão por que deve ser precisamente controlada. Através de ensaios termogravimétricos sabe-se que quanto maior a velocidade do aquecimento imposta à biomassa, menor o rendimento em carvão vegetal. Constata-se, também, que sob altas taxas de aquecimento a massa de carvão não estabiliza o seu auto-consumo, mesmo que se tenha atingido a temperatura de encerramento da carbonização. Isto ocorre por que há uma diferença de temperaturas entre o forno e o interior da massa de carvão, diferença esta que é função da taxa de aquecimento e dos mecanismos de transferência de calor e massa no interior da massa de carvão. Assim, a utilização do vapor favorece o processo de resfriamento e agrega rendimento, pois encerra o auto-consumo, além de favorecer a eliminação de gases de materiais voláteis presentes. Assim sendo, a água por ser uma substância facilmente disponível e pouco agressiva quimicamente, torna-se um veículo que modifica a atmosfera interna do forno, amortece as variações de temperatura e atua como um vetor de transporte da energia térmica, fato que explica a sua disseminação como elemento extintor de incêndios. Assim, no processo de carbonização, para que o resfriamento, utilizando vapor

d'água, seja bem sucedido, depende das características do vapor e de como e onde ele é aplicado, além da combinação do binômio tempo x temperatura, e sua velocidade de circulação no interior da massa do corpo quente ou em incandescência. A velocidade do vapor que flui através dos orifícios de injeção deve ser conhecida para se maximizar os efeitos resfriamento e abafamento. O tempo é importante, pois quanto mais rápido for carregado o vapor sobre o carvão, menor é o tempo disponível para que um dado volume desse vapor condense-se sobre o carvão. Assim, a transferência de calor do carvão para o vapor aumenta, pois o filme de vapor formado sobre o carvão tem pouca espessura, o que favorece o aumento de sua temperatura interna, dificultando a sua condensação. Considerando que o carvão vegetal representa de 60% a 70% do custo da produção do ferro-gusa, torna-se imprescindível a aplicação de investimentos em pesquisas e em tecnologias na forma de carbonização (HOMMA et alli, 2006). A adoção de soluções de maior produtividade nas formas de carbonização implica em alterações significativas na sistemática vigente no "modus operandi" adotado no Brasil, pois torna-se necessário a adoção de conceitos e tecnologias agroindustriais modernas e mais eficientes de altos investimentos iniciais mas com ganhos ambientais significativos.

Os objetivos gerais foram:

- a otimização do processo de fabricação de carvão, com o resfriamento da massa de carvão e do forno de carbonização utilizando-se vapor d'água como agente refrigerante;
- análise de redução do tempo de ocupação do forno;
- análise de rendimento em número de fornadas/ano.

Pelos rendimentos apresentados, além da redução do tempo de produção e no aumento no número de fornadas utilizando-se resfriamento do forno (envelope construtivo e massa de carvão vegetal) com a aplicação do vapor d'água na base da massa de carvão, o processo se mostrou viável e com resultados significativos.

ABSTRACT

REIS, Hamilton Oliveira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, November of 2009.
Cooling of carbonization ovens by water vapor injection. Adviser: Juarez de Sousa e Silva. Co-Advisers: Delly Oliveira Filho and Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Charcoal, even being produced and used since the dawn of civilization, still have insufficient knowledge of the different mechanisms of chemical kinetics and heat transfer and mass that occur during the carbonization. What is important to identify the most if not all, the parameters of the carbonization process in the dimensions of wood used in industrial production of charcoal is the way these parameters can interact along the process and quality of coal produced. Charcoal, even under controlled carbonization, there is a chemical compound set, some coals are almost pure carbon, others due to partial processes of carbonization, contains significant amounts of oxygen, hydrogen and organic compounds. An ideal system of coking plant should provide a suitable working condition, establishing strategies to minimize the cycle time of carbonization, without changing the yield and quality of coal produced. In this sense, few technologies have been developed to improve the process. Operating variables and even an oven constructive influence the final quality of the product generated, the temperature of the more important as an influence on the appearance, volume and losses during carbonization, reason why it should be precisely controlled. Through testing thermogravimetric known that the higher the speed of heating required to biomass, the lower the yield of charcoal. There is also that at high heating rates the mass of coal does not stabilize its self-consumption, even if it has reached the temperature of completion of the carbonization. This is because there is a temperature difference between the oven and the inner mass of coal, and such difference is a function of heating rate and the mechanisms of heat transfer and mass within the mass of coal. Thus, the use of steam helps the cooling process and aggregate income, for terminating the self-consumption, in addition to promote the elimination of gas volatiles present. Thus, the water is a substance readily available and inexpensive chemically aggressive, it is a vehicle that modifies the internal atmosphere of the oven, shock, temperature variations and acts as a vector for transport of thermal energy, which explains its spread as a fire extinguisher. Thus, in the carbonization process, for cooling, using water vapor, to be successful, depends on the characteristics of steam and how and where it is applied, and the combination of binomial time x temperature, and speed of movement within the mass of the body. The velocity of steam flowing through the holes injection must be known to maximize cooling and smothering. Timing is important, because the faster the steam is loaded on coal, the less

time available for a given volume of vapor to condense on the coal. Thus, the heat transfer from coal to steam increases because the vapor film formed on coal is the thickness, which favors the increase of internal temperature, making it difficult to condensation. Considering that charcoal represents 60% to 70% of the cost of production of pig iron, it is essential that investment in research and technology in the form of carbonization (Homma et alli, 2006). The adoption of solutions for increased productivity in the forms of carbonization implies significant changes in the system in place in the modus operandi adopted in Brazil, it becomes necessary to adopt concepts and modern agro-technologies and more efficient high initial investment but with gains environmental impacts.

The overall objectives was:

- the optimization of the manufacturing process of coal, with the cooling of the mass of coal and coking furnace using water vapor as coolant;
- analysis of short-time occupation of the oven;
- analysis of performance in number of batches per year.

The income produced, besides the reduction of production time and increasing the number of heats using the oven cooling (building envelope and mass of charcoal) with the use of water vapor on the dry mass of coal, the process to be viable and meaningful results.

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Mineira de Silvicultura (AMS 2005), as empresas do setor siderúrgico estruturaram suas estratégias de produção e competitividade, sustentadas no crescimento interno e nas cotações internacionais. A busca de economias de escala levou os diversos segmentos a aquisições e fusões e, também, à realização de investimentos que aumentassem a produção. Como resultado, o país cresceu em importância na exportação de produtos como ferro-gusa, aço e ferroligas. Recentemente, houve acentuado incremento na produção do setor decorrente do aumento das demandas interna e, especialmente, da externa. Mercados tradicionais foram ampliados e consolidados além de novos parceiros que estão sendo atendidos. O volume de produção, em alguns segmentos, aproximou-se drasticamente do limite de sua capacidade.

Em resposta às crescentes demandas por produtos, em especial do setor siderúrgico e de celulose, as empresas iniciaram um novo ciclo de investimentos, ampliando e modernizando o parque fabril. Existia previsão inicial de ampliação do parque fabril de aço e celulose, com investimento da ordem de US\$ 15 bilhões para os próximos sete anos, que está sendo adiado. Em razão da falta iminente de carvão vegetal, um dos principais insumos da siderurgia, outras empresas estão revendo os planos de substituição do coque siderúrgico (insumo poluidor e totalmente importado) pelo carvão vegetal, cujo processo de produção é, ao contrário do carvão mineral, ambientalmente correto, se bem conduzido (AMS 2005).

Na siderurgia são esperados investimentos da ordem de US\$ 10 bilhões, ampliando a capacidade de produção de aço de 34 para 44 milhões de toneladas até 2012 e cerca de 74 milhões em 2020, ampliando, assim, a industrialização do ferro-gusa (AMS 2005).

Os novos investimentos irão, também, contemplar a utilização parcial de carvão vegetal, esperando-se, assim, aumento da participação desse insumo na produção de ferro-gusa, aço e ferroligas, atualmente, presente em 30% da produção, para 35% no ano de 2010 e 50% em 2020.

Segundo Brasil (2007), a produção brasileira de carvão vegetal, em 2006, foi de 9,6 milhões de toneladas, 3% menor em relação à de 2005. Ressalta-se que nesse mesmo ano foram importadas 158 mil toneladas de carvão vegetal (75% a mais que em 2005). O consumo total no mesmo período foi de 9,4 milhões de toneladas, sendo 49% do carvão de

origem de florestas nativas e 51% de florestas plantadas (AMS, 2007). Do total, foram consumidos: (i) 90,5% pelo segmento industrial; (ii) 8,3% pelo setor residencial; (iii) 1,1% pelo setor comercial; e (iv) 0,1% no segmento agropecuário.

Segundo Hess (2007), no Brasil em 2006, 33,2% do total de ferro-gusa foi produzido utilizando o carvão vegetal como agente redutor.

Para Monteiro (2006), considerando a cadeia produtiva brasileira, para cada metro cúbico (m^3) de carvão vegetal produzido são necessários, em média, $1,29 m^3$ de lenha, ou seja, cada tonelada de ferro-gusa produzido consome, pelo menos, o equivalente a $3,74 m^3$ de lenha. De acordo com Ferreira (2000), a rota a coque mineral libera 1,68 t de dióxido de carbono (CO_2) e fixa 1,54 t de oxigênio (O_2) por tonelada de aço produzido, já a rota a carvão vegetal seqüestra 16,34 t de CO_2 e regenera 1,54 t de O_2 por tonelada de aço produzido no ciclo completo, desde a plantação do eucalipto até a produção do aço. A rota a coque mineral libera 7kg de dióxido de enxofre (SO_2) e essa emissão é praticamente nula na rota a carvão vegetal.

Na literatura consultada não foram encontrados artigos sobre a utilização do vapor e sua aplicação direta em processos industriais de carbonização da lenha, com o objetivo de favorecer a remoção da carga térmica da massa de carvão e da estrutura do forno. O sistema de resfriamento de fornos de carbonização, muitas vezes, tem sido relegado nos estudos e por isto recebe incentivos nas pesquisas, com vistas à aceleração da produção e melhoria na qualidade do produto, na indústria carvoeira. Porém, em face da importância das interações envolvidas, a geração e o circuito de distribuição do vapor, merecem atenção especial na análise desse tipo de processo industrial.

Para Tomaz Fendel citado por Brito (2008): “Se o carvão vegetal ainda não é produzido de forma sustentável e correta, o erro não é do carvão vegetal, mas de quem o produz. Então, tem que se mudar a política de comercialização e de produção...só isso...”.

Assim, a geração e aplicação de tecnologias visando à maximização do uso da lenha são importantes quando se objetiva o uso racional de recursos florestais renováveis como alternativa viável e de grandes benefícios na área econômica, social e de meio ambiente (reduzindo as emissões de gases de efeito estufa).

Diante do aumento no consumo do coque, base carvão vegetal, em substituição ao carvão mineral que produz muitos poluentes, é que foi desenvolvido este trabalho. Assim sendo, o foco principal foi a aceleração da produção aplicando vapor d'água, para abafamento de focos de incandescência e resfriamento da massa de carvão e da alvenaria do forno, pois um dos principais estrangulamentos da produção está no tempo gasto no processo de resfriamento. Para tanto foi construído um forno piloto e testadas duas formas de circulação do vapor:

- (1) vapor fornecido na base da massa de carvão e retirado pelas aberturas pré-existentes na base das paredes do forno;
- (2) vapor fornecido na base da massa e retirado por uma única abertura na parte superior da porta do forno.

Como contribuição ao setor de carbonização foram realizadas:

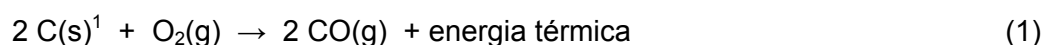
- (1) análise da aplicação de vapor d'água na base da massa de carvão, em fase de resfriamento, e a retirada desse vapor por "tatus", "baianas" e abertura na parte superior da porta do forno,
- (2) análise do rendimento, em fornadas, por ano com a aplicação do vapor,
- (3) modelagem matemática simplificada do comportamento térmico da carbonização e do resfriamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

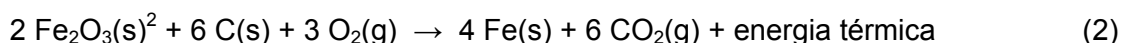
O carvão vegetal brasileiro, segundo Nogueira et al. (2000), é produzido, em sua maior proporção, da mesma forma como o era um século atrás. A tecnologia é primitiva, o controle operacional é pequeno, e não há prática de controles qualitativos e quantitativos durante e depois da produção.

Segundo Canto (1996), o elemento ferro não se encontra livre na natureza, sendo necessário o uso de agente redutor (carvão mineral) ou de biorredutor sólido renovável (carvão vegetal) para obtê-lo a partir dos seus minérios. O monóxido de carbono (CO) oriundo do carvão (C) é, normalmente, o agente redutor empregado. As principais reações químicas que ocorrem no interior do alto-forno são representadas pelas equações 1 e 2:

- Produção de energia e formação de monóxido de carbono (CO):



- A redução do ferro, presente nos minérios, a ferro metálico utiliza o CO (monóxido de carbono) como agente redutor. A reação global é dada pela equação (2).



¹ A combustão do carvão sólido ou coque, nos processos siderúrgicos, tem dupla finalidade: fornecer o calor necessário e, ao mesmo tempo, produzir CO (monóxido de carbono) que favorece a redução do minério (CANTO 1996).

² Os minérios de ferro são rochas a partir das quais pode ser obtido ferro metálico de maneira economicamente viável. O ferro encontra-se geralmente sob a forma de óxidos (magnetita, hematita) ou como carbonato (siderita). Os minérios de ferro têm um teor de ferro variável consoante o mineral ferrífero:

Mineral	Fórmula química	Conteúdo teórico em ferro %
Hematita	Fe ₂ O ₃	69,96
Magnetita	Fe ₃ O ₄	72,4
Magnesioferrita	MgO·Fe ₂ O ₃	56-65
Goetita	Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	62,9
Hidrogoetita	3Fe ₂ O ₃ ·4H ₂ O	60,9
Limonita	2Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O	60
Siderita	FeCO ₃	48,3
Pirita	FeS ₂	46,6
Pirrotita	Fe _{1-x} S	61,5
Ilmenita	FeTiO ₃	36,8

Os principais, sob o ponto de vista de interesse econômico são: magnetita e hematita.

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Min%C3%A9rio_de_ferro

O ferro, que sai do alto-forno, chama-se ferro-gusa ou ferro fundido, e mesmo depois de solidificado mantém esse nome. Contém cerca de até 5% de carbono, sendo, por esse motivo, muito quebradiço. O ferro-gusa passa, então, por um processo de purificação, em que pode conter, em sua composição, até cerca de 0,2 % de carbono, recebendo o nome de ferro-doce. O ferro com até cerca de 1,5% de carbono é chamado de aço e trata-se de uma das ligas metálicas mais usadas (CANTO, 1996).

Segundo Ronaldo et al. (2006), para melhor desenvolvimento do processo de carbonização visando a obtenção de um carvão vegetal ideal como redutor em alto-fornos, este deve possuir características semelhantes ao coque quanto ao teor de carbono fixo, grande resistência à compressão e baixo teor de cinzas. Ainda segundo o mesmo autor, as características desejadas do carvão redutor, devem ser agrupadas em propriedades desejáveis, tais como:

- Alta concentração de energia (grande capacidade de redução do minério),
- Permeabilidade (volume e distribuição de vazios),
- Estrutural (resistência mecânica) e
- Reatividade (cinética de oxidação), orientando assim a produção de carvão.

DOE (1992), concluiu que diante da atual conjuntura energética mundial a biomassa é uma das poucas fontes capazes de suprir a crescente demanda diante da polêmica da diminuição na oferta dos combustíveis fósseis, além das explícitas vantagens ambientais perante as mudanças climáticas em curso no planeta. Contudo, essa fonte renovável possui características que, em geral, prejudicam seu uso direto como combustível.

Em estudos realizados por Knight (1979), estabeleceu que a energia "recuperada" na forma de subprodutos da carbonização (carvão, alcatrão e gases) é, aproximadamente, 95% da energia interna da biomassa seca. As quantidades combinadas de carvão e alcatrão, em base seca, contêm 68% da energia. Cerca de 20% da energia, em base úmida, é usada para a secagem da biomassa, energia suficiente para diminuir a umidade de 50 até 7%. A energia nos gases corresponde a 7% da energia interna da biomassa seca.

De acordo com Briane e Doat (1985a), a biomassa, na sua forma natural, é um combustível sólido, polidisperso, de baixa densidade, com alto teor de umidade³, baixo poder calorífico, granulometria irregular⁴, baixo teor de carbono fixo e alto teor de material

³ Segundo Earl (1975), citado por Cunha et al. (1989), é importante que o teor de umidade da lenha a ser usada como combustível seja reduzido, diminuindo assim o manejo e o custo de transporte, agregando valor ao combustível. O conteúdo de umidade máximo que uma lenha pode ser queimada no forno está em torno de 65% a 70% em base úmida. Por existir essa umidade, é inevitável que ocorra uma perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água, já que a umidade da lenha evapora e absorve energia em combustão. A quantidade máxima de água que a lenha pode conter para entrar em combustão tem sido calculada em aproximadamente 65% na base úmida (o resto corresponde ao material sólido). Desta forma, lenha muito úmida, com teor de umidade acima deste limite, necessita calorias de origem externa para secar e entrar em combustão (Ince, 1980, citado por CUNHA et al., 1989; JARA, 1989).

⁴ Em função da disposição e função dos tecidos que a compõem.

volátil. Todas essas propriedades juntas tornam a biomassa um combustível heterogêneo e de baixa qualidade, quando comparada ao petróleo.

Segundo Nogueira et al. (2000), a carbonização pode ser definida como uma decomposição química por calor, sob baixa concentração de oxigênio (O_2), com balanço energético positivo, produzindo mais energia do que consumindo. Passando por três etapas:

- Secagem (nesta fase a lenha passa por duas etapas: (a) pré-secagem e (b) secagem propriamente dita. As temperaturas estão na faixa de 100 a 150 °C, removendo, assim, a umidade que interage negativamente com os resultados do processo);
- Pirólise (temperaturas variam de 280 a 500 °C, liberando: alcoóis, óleo combustível e alcatrão, dentre outros); e
- Resfriamento (fase final).

Estas etapas podem ocorrer única e/ou simultaneamente durante a carbonização. Cada faixa de temperatura é responsável por um produto com características próprias. A temperatura final de carbonização é, portanto, uma das variáveis responsáveis, juntamente com a espécie da lenha utilizada, pela qualidade final do carvão vegetal.

Segundo Bridgwater (1991), a pirólise, ou termólise, é o processo de degradação térmica incompleta de materiais sólidos com teor significativo de carbono, e que pode ser realizado em ausência completa de um agente oxidante (ou, em uma quantidade tal que não haja gaseificação do material combustível), a baixas taxas de aquecimento e elevados tempos de permanência no interior do forno, minimizando as quantidades dos subprodutos gerados (dentre eles: gases combustíveis, alcatrões e carvão vegetal).

Para Numazawa (2000), a carbonização está sujeita à influência de fatores diversos:

- A matéria prima;
- O teor de água da madeira;
- A temperatura final da reação;
- A taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final;
- A forma e dimensão da matéria prima;
- A adição de catalisadores;
- Atmosfera de reação (inerte ou parcialmente inerte);
- Técnica utilizada (fonte de energia);
- Qualificação do operador (processos artesanais); e
- Pressão (rendimento e cinética das reações).

Em processos de carbonização convencionais, para o mesmo autor, os fatores mais importantes são:

- Taxa de aquecimento;
- Temperatura final do processo de carbonização;

- Tempo de permanência na temperatura final de carbonização; e
- Teor de água da madeira, responsáveis pela cinética das reações, pelas propriedades físico-químicas e do rendimento gravimétrico.

O processo de carbonização, segundo Emrich (1985), é definido como uma decomposição química na ausência de oxigênio. Ela permite a recuperação de energia intrínseca por meio da decomposição térmica dos combustíveis fósseis ou biomassa em ambiente com atmosfera controlada. O carvão vegetal é o produto principal da pirólise da lenha por combustão incompleta. Na maioria dos processos de carbonização, a perda de energia é cerca de $10,816 \times 10^6$ kJ/t de lenha⁵ seca, para um rendimento médio de 30% em carvão.

A carbonização quando bem conduzida apresenta poucos problemas de poluição e um aspecto ambientalmente favorável, pois a emissão de CO₂ ao ser lançada na atmosfera é compensada pela sua absorção por ocasião do plantio de uma nova geração de biomassa (INGHAM, 1999).

De acordo com Briane e Doat (1985b), o rendimento energético do processo de carbonização depende da constituição química da lenha, pois, os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e substâncias minerais variam com a espécie e é importante na escolha da lenha a ser utilizada. A determinação numérica da propagação térmica durante a carbonização é de difícil predição, em virtude da complexidade e variabilidade dos fatores envolvidos, tais como a fisiologia e as propriedades inerentes que podem variar com a idade, a temperatura e as condições ambientais.

Para Carzino (2006), um forno para trabalhar em sua máxima eficiência deve ser projetado, considerando-se as formas de transferência de calor: convecção, radiação e condução. O processo de condução é responsável por grande parte da transferência de calor, não podendo ser ignorado (a forma da câmara de carbonização, a disposição das toras e a espécie de lenha utilizada devem ser analisadas quando se pondera a condução). A convecção é uma forma de transferência de calor cuja eficiência e a implementação de estudos, foram as que mais evoluíram nos últimos anos devido à capacidade cada vez maior em se calcular e avaliar, nos diversos tipos de fornos. Assim, as variáveis que devem ser consideradas nos cálculos de transferência de calor por convecção são: a densidade do fluido⁶, a sua viscosidade e a velocidade com que circula no interior das massas de lenha e carvão (o tamanho, o formato, a temperatura e a rugosidade superficial da lenha ao redor da qual o fluido circula são importantes). A convecção tende a melhorar a eficiência de fornos,

⁵ Lenha é material lignocelulósico utilizado para cocção, produção de carvão e calor. Madeira é material lignocelulósico nobre utilizado na confecção de móveis e utensílios, eventualmente, pode ser utilizada para carvão.

⁶ Material orgânico dessorvido + vapor d'água.

pois o calor é extraído de toras aquecidas mais eficazmente e transferido às toras vizinhas, mais frias, com melhor resultado (uma velocidade maior de circulação do ar, durante a carbonização e na fase de aplicação do vapor para o resfriamento, melhora sensível e significativamente a transferência de calor para as massas de lenha e carvão).

As técnicas e equipamentos empregados na carbonização industrial da lenha, e utilizados nos últimos anos, possibilitaram a introdução de sistemas mais precisos que permitem a produção de grande quantidade de carvão, com boa qualidade e menores perdas. Infelizmente, ainda existem empresas que trabalham com técnicas, processos rudimentares e com grande dificuldade para se adaptar a essa nova realidade. Variáveis operacionais e, mesmo, construtivas de um forno de carbonização influenciam a qualidade final do produto gerado, e uma das mais importantes é a temperatura, pois tem influência no aspecto, volume e perdas durante a carbonização, razão por que deve ser precisamente controlada. Tem-se que: (i) um forno com temperatura excessivamente alta dará carvão com menor índice de impurezas, mas com baixo rendimento gravimétrico; e (ii) um forno com temperatura branda acarretará muito material volátil impregnado no carvão e a presença de muito tiço, além de carvão de baixa qualidade (JARA, 1989).

É possível, por meio do controle da temperatura de carbonização, “corrigir” a “qualidade” da lenha utilizada, observando que em lenhas com menor densidade a temperatura deve ser menor que a temperatura utilizada em lenhas de maior densidade. O mesmo raciocínio é extrapolado para o diâmetro da tora. O peso⁷, a espécie e o formato da lenha determinam o tempo de carbonização (JARA, 1989).

Na Figura 1, segundo Mezerette e Vergnet (1994), observa-se o efeito da temperatura sobre a pirólise (incluindo a carbonização), onde o teor de água da lenha tem forte influência sobre o rendimento em massa da carbonização e no balanço energético final, pois, um alto teor precisará de mais energia para a fase de secagem e início da carbonização, sendo mais visível em processo de carbonização com queima parcial da carga de madeira.

⁷ Não se pode, aqui, afirmar peso específico ou massa específica de lenha, sem se considerar o teor de água ainda presente nos tecidos. Quantidade real de água é desconhecida, quando em campo, pois quando do processo de carbonização trabalha-se com quantidades médias de água na lenha e, isso, depende da região produtora do carvão e de origem da lenha.

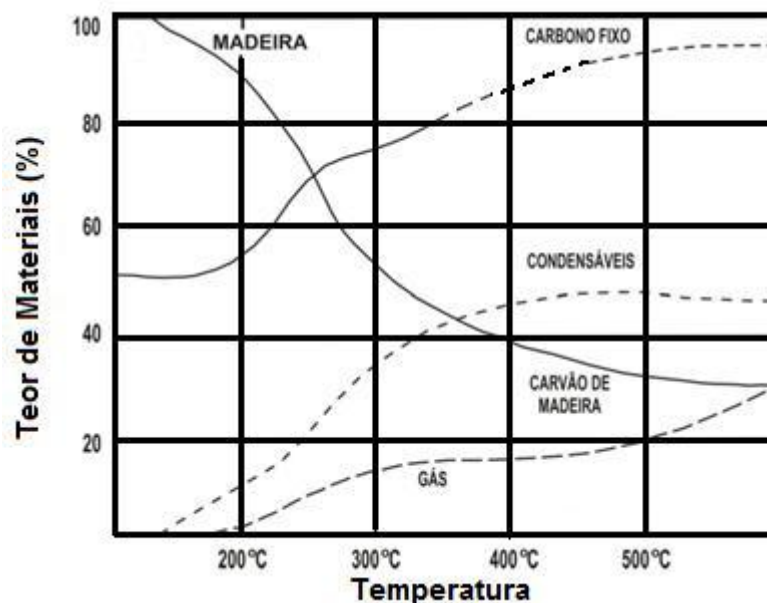


Figura 1 - Evolução dos teores de materiais resultantes da pirólise (carvão, condensáveis, carbono fixo e gás) em função da temperatura.

Segundo Valente (1986), para a parametrização térmica da carbonização e a avaliação da qualidade do carvão produzido é necessário que a lenha tenha as seguintes características conhecidas: forma, dimensões, teor de água, densidade, homogeneidade, constituição química, densidade básica e composição elementar. A qualidade da lenha é fator de extrema importância quando o objetivo é a produção de carvão com alto rendimento, baixo custo e elevada qualidade.

A partir da ignição da massa de lenha, inicia-se o processo de carbonização que é controlado, empiricamente, por meio da tonalidade da fumaça que sai pelas aberturas de ventilação (neste estudo, “baianas”⁸, “tatus” e chaminé). A carbonização começa sempre no sentido da abóbada para a base do forno. A tonalidade da fumaça inicialmente é esbranquiçada com a presença predominante de vapor d’água, CO e CO₂, indicando que a lenha está perdendo água. A partir daí, a coloração da fumaça torna-se amarelo-encardida, indicando a presença de vapores condensáveis (alcatrão e ácidos pirolenhosos), e ao final da carbonização a fumaça apresenta cor azulada, predominando CO e CO₂ (JUVILLAR, 1980).

Segundo Zuchi (2000), não existem normas rígidas sobre o fechamento dos pontos de ventilação de um forno. Somente a habilidade do carbonizador, adquirida com a prática, é que irá determinar qual a seqüência a ser adotada. O desenvolvimento da carbonização é

⁸ Os termos baianas e tatus são regionalismos, aceitos no ambiente de carbonização. São aberturas, feitas na estrutura do forno e em locais apropriados ao empirismo aplicado, com a função de facilitar a circulação de ar comburente, favorecendo o controle da carbonização (ZUCHI, 2000).

controlado por dois parâmetros empíricos: cor da fumaça e o pingamento⁹. Depois do fechamento das “baianas” e “tatus” usando tijolo e barro, inicia-se a fase de encerramento da carbonização. A fumaça, já com a cor azulada, começa a sair em maior intensidade pela chaminé, que é, então, fechada por um obturador de chapa metálica, o qual é vedado com barro, dando início à fase do resfriamento do forno e da massa de carvão.

2.1. Elementos constitutivos da lenha

Segundo Acioli (1994), a biomassa é produto da conversão da energia solar luminosa em energia química por meio da fotossíntese, e o seu aproveitamento energético irá depender dos sacarídeos ($C_{11}H_{22}O_{11}$), amiláceos ($C_6H_{10}O_5$), óleos e lignocelulósicos, acumulados nos tecidos.

Segundo Wenzl (1970), a lenha é considerada como um sistema diatérmico¹⁰, permeável¹¹ ou semipermeável.

Segundo Gomes e Oliveira (1982), a lenha é um combustível sólido e não volátil, que utiliza ar, com teor mínimo de O_2 (oxigênio) de 21%, como comburente. Se o percentual¹² de O_2 for inferior a 16%, não haverá combustão. Assim, para que a carbonização aconteça, e se mantenha durante o estágio inicial da carbonização é necessário a presença de um mínimo de O_2 no ar comburente.

Segundo Carvalho Jr. e McGuay (2007), combustível são substâncias químicas que, quando em contato com um oxidante, pode produzir reação exotérmica, liberando energia na forma de calor. Para que dada substância seja considerada como combustível industrial é preciso: (i) existir em grande quantidade e de fácil disponibilidade; (ii) ter baixo custo; e (iii) ser aplicável no processo industrial em consideração. Um combustível pode conter uma parte incombustível (que não fornece calor durante a combustão), composta por água e cinzas.

Segundo Doat (1977), a qualidade de lenha utilizada na produção de energia térmica e, ou, carvão depende da sua densidade e do seu teor de componentes orgânicos. A lenha, segundo Zanzi (2001) e Wenzl (1970), possui composição química heterogênea, constituída de três polímeros básicos: celulose, hemicelulose e lignina (na proporção 5:2:3), água e

⁹ Regionalismo que indica a presença de brasas próximas aos orifícios de aeração do forno. O primeiro é verificado visualmente e o segundo, com a introdução de barra de ferro no orifício de ventilação (baianas e tatus), se houver resistência mecânica indica a presença de lenha não carbonizada naquele ponto, sendo necessário limitar a entrada de ar para que o processo ocorra satisfatoriamente (ZUCHI, 2000).

¹⁰ Permite a passagem de calor (WENZL, 1970).

¹¹ Através das paredes celulares, da lenha, circulam substâncias orgânicas com características, funções e densidades próprias (WENZL, 1970).

¹² Este método é denominado abafamento.

extrativos¹³. De modo geral, a lenha é, essencialmente, composta por 50% de carbono, 44% de oxigênio e 6% de hidrogênio, além de traços de diversos elementos inorgânicos. Um dos componentes da lenha viva é a água, contudo, quando se analisa esse biopolímero desidratado (0% de teor de água), verifica-se a presença de 65 a 75% de carboidratos combinados com 35 a 25% de lignina (BRIANE e DOAT, 1985a e 1985b).

Estudos sobre o uso da lenha como combustível mostram que a combustão direta da lenha é, sem dúvida, o processo mais simples e econômico de se obter energia (EARL, 1975, citado por CUNHA et al., 1989). O rendimento energético de um processo de carbonização depende da constituição química da lenha, na qual os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e substâncias minerais, variam com a espécie utilizada e é de grande importância na escolha adequada da lenha.

Segundo pesquisas desenvolvidas por Salazar e Connor (1983), indicam que o comportamento térmico da lenha, durante a carbonização, reflete a soma das respostas térmicas dos seus três maiores componentes: (i) hemicelulose (menos estável) entre 200 e 300 °C; (ii) celulose entre 240 e 350 °C e (iii) lignina (mais estável) entre 350 e 500 °C.

Durante a fase de aquecimento pré-carbonização, acontece a degradação de hemiceluloses (polissacarídeos mais hidrofílicos), reduzindo a concentração de radicais hidroxila, nos quais normalmente se fixariam moléculas de água (MBURU et al., 2007).

Segundo Bodig e Yayne (1982), um incremento relativo na proporção de lignina aumenta o caráter hidrofóbico do material. Assim, o principal volátil formado é o vapor d'água, além de produtos orgânicos (ácido acético, ácido fórmico, metanol) e gasosos (CO₂ - 80% e CO - 20%). Os balanços de massa e de energia evidenciam o papel da temperatura final atingida durante a carbonização, pois temperaturas mais altas causam maior extração e formação de voláteis e, conseqüentemente, maiores perdas de massa, ainda que o tempo de exposição térmica seja menor.

Segundo Demirbas (2004a), o teor de água da biomassa pode variar entre 10 e 70%. O teor de água influencia a combustão e diminui o volume de energia produzida pelo produto inicial, lenha. O poder calorífico do combustível "lenha" diminui com o aumento do

¹³ Para diferenciar os componentes polissacarídeos e lignina, dos componentes não integrantes da parte estrutural da parede celular (lamela média), os extrativos são substâncias químicas facilmente solúveis em solventes orgânicos neutros ou em água. Os extrativos são, freqüentemente, responsáveis por determinadas características da lenha como: cor, cheiro, resistência natural ao apodrecimento, gosto e propriedades abrasivas. Sua composição e quantidade relativas dependem de fatores, como: espécie, idade, região de procedência e etc. Cerca de 3 a 10% da lenha seca é constituída de extrativos sendo que, geralmente para as lenhas de coníferas esse teor fica na faixa de 5 a 8%; para as folhosas de regiões temperadas na faixa de 2 a 4%, podendo chegar a valores superiores a 10% na lenha de espécies de regiões tropicais. Os extrativos compõem uma extraordinária diversidade de compostos. As proporções exibem ampla variação e alguns desses componentes são encontrados em quantidade significativas em somente algumas espécies ou gêneros. Assim, determinadas lenhas podem ser caracterizadas pela natureza e quantidade de seus extrativos. Os extrativos ocorrem na casca, folhas e acículas, flores, frutos e sementes e quase sempre as quantidades nessas partes da árvore são proporcionalmente maiores que na lenha (FENGEL e WEGENER, 1984, citado por KLOCK et al, 2005).

teor de água inerente. Os biocombustíveis sólidos, com elevados teores de água, podem apresentar problemas durante a fase de pré-carbonização. Um alto teor de água pode causar problemas, pois aumenta a temperatura necessária à ignição, fato que por sua vez dificulta a reação de combustão. Além disso, segundo Demirbas (2004b), alto teor de água provoca intensa geração de gases. A presença de água na biomassa influencia o seu comportamento durante a carbonização, afetando as propriedades físicas e a qualidade dos gases e do carvão produzidos.

De acordo com Moreschi (s.d.), a circulação de água pelos tecidos da lenha ocorre fibra a fibra, através de micro aberturas com diâmetro da ordem de milésimos de micron. Assim, quando a lenha é submetida a aumento progressivo de temperatura ocorre perda maior de água. Esse aumento de temperatura força incremento na pressão de vapor d'água no interior das fibras, causando a ruptura das células e dando origem a trincas internas. Assim, quanto maior a área do cerne, maior o número de trincas, principalmente em lenhas de maior densidade.

Segundo Eaton e Hale (1993), a água na lenha pode ser classificada como: (i) água livre¹⁴, (ii) água de embebição¹⁵ e (iii) água de constituição¹⁶. A água contida na lenha reduz a quantidade de energia global produzida durante a combustão. Parte da energia da lenha é utilizada para aquecer e vaporizar essa água. Para Eaton e Hale (1993), são necessários 2,43 kJ para evaporar 1 g de água livre. Mas, se a água estiver fortemente ligada à lenha, é preciso maior quantidade de energia.

2.1.1. A dessorção térmica dos compostos orgânicos da lenha

De acordo com experimentos desenvolvidos pela FAO (1983), a temperatura e a marcha de carbonização desempenham papel fundamental nas diversas transformações físicas na lenha e nas reações químicas envolvidas, levando à geração de produtos e subprodutos com características físicas e químicas distintas.

Segundo Tillman (1978) citado por Cunha et al. (1989), a estrutura física não é um parâmetro importante na determinação do valor energético das lenhas, mas a composição química o é. Freitas (1977), citado por Cunha et al. (1989), relata que a variação na

¹⁴ A água, abundante e em estado líquido, contida nos espaços intra e intercelulares. Na secagem, a remoção de toda a água livre até o ponto de saturação das fibras não apresenta qualquer interferência na alteração das dimensões das peças ou nas propriedades da lenha (EATON e HALE, 1993).

¹⁵ Água localizada no interior da célula, correspondendo ao estado de umidade de saturação ao ar, ou ponto de saturação das fibras, que equivale a um teor de cerca de 30% de água. É a sua circulação, entrada ou saída deste tipo de água, a responsável pelas variações dimensionais e mecânicas da lenha (EATON e HALE, 1993).

¹⁶ Água da própria composição química da lenha (EATON e HALE, 1993).

composição química, dimensões, forma e arranjo dos elementos anatômicos e a ocorrência de extrativos acarretam uma diferenciação nas características energéticas de várias lenhas.

Segundo Jara (1989), o poder calorífico superior da lenha e o teor de água, são influenciados pela constituição química da lenha, principalmente a lignina e extrativos (resinas, óleos-resinas, matérias graxas, óleos, etc.).

Assim as coníferas, que apresentam um conteúdo de resinas e lignina maior que as latifoliadas, tem maior poder calorífico superior (que pode variar conforme a parte da árvore que esteja em combustão: casca, nós, ramos ou lenha do toco). Browning (1963), afirma que o poder calorífico será mais alto quanto maior o teor de lignina e extrativos, pois eles têm menor teor de oxigênio que os polissacarídeos presentes na holocelulose (celulose e hemicelulose).

De uma forma geral, os componentes químicos da madeira podem ser divididos em componentes extrativos e componentes fundamentais, conforme mostrado na Figura 2 (NUMAZAWA, 2000). E que devido à complexidade estrutural e organizacional, aliado a uma distribuição não uniforme ao longo dos tecidos, tornam o estudo direto das características químicas da madeira difícil (BROWNING, 1963).

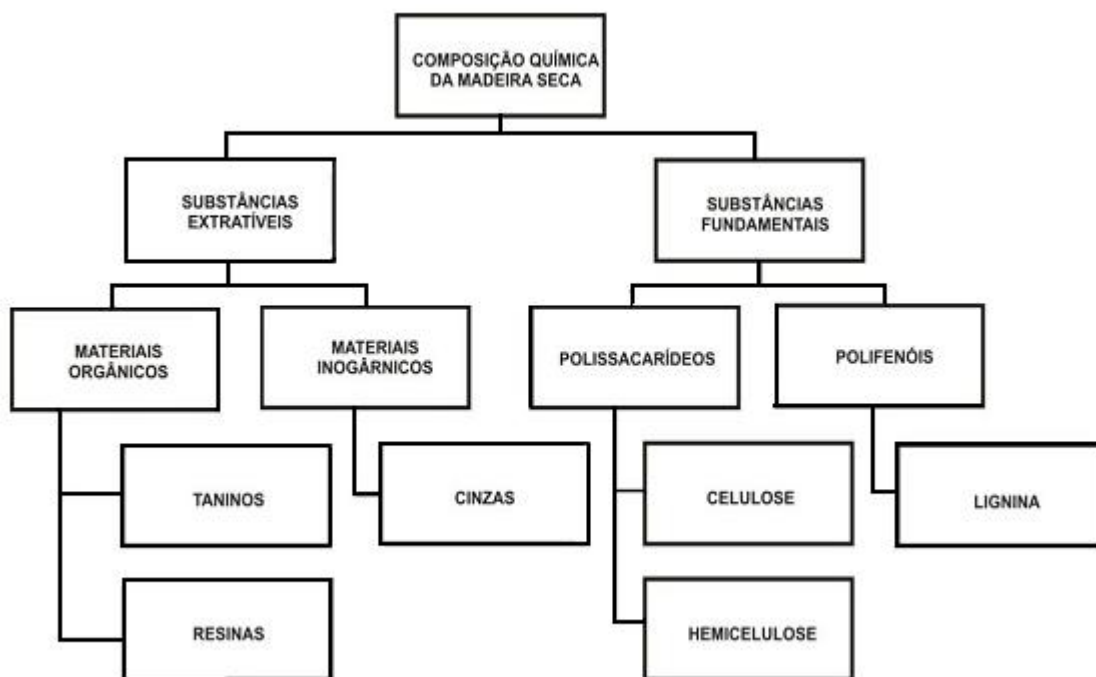


Figura 2 - Os principais componentes da madeira.

Colet (1955), citado por Brito e Barrichelo (1981), ao estudar uma série de lenhas, demonstrou que a quantidade de carbono fixo produzida por unidade de lenha enforcada é função da concentração de lignina na lenha. O mesmo autor afirma que o teor de celulose presente na lenha não tem relação definida com a quantidade de carbono fixo produzido.

Para Jenkins et al. (1998) e Demirbas (2004a), a biomassa possui teores significativos de compostos voláteis, que são removidos dos tecidos, durante as fases da carbonização, na forma de vapores e gases, como: hidrocarbonetos leves, monóxido e dióxido de carbono, hidrogênio, vapor d'água e alcatrões. Devido à sua alta concentração da fração volátil, os biocombustíveis entram em ignição com mais facilidade, mesmo em baixas temperaturas. A combustão da biomassa (lenha e/ou carvão vegetal) é esperada ocorrer de forma rápida e, portanto, tem de ser controlada para apresentar maior rentabilidade. Os gases e os subprodutos combustíveis dessorvidos durante a pirólise favorecem o aproveitamento da combustão do hidrogênio, pois tem sua concentração aumentada com o aumento da proporção de carbono fixo gerado e, em menor medida, com o aumento da proporção de oxigênio em relação ao carbono. A rápida liberação de grande fração de voláteis torna necessário dispor de mais zonas em alta temperatura, a fim de alcançar uma combustão completa e de alta eficiência, garantindo a não emissão de poluentes.

De acordo com Moraes et al. (2005), os extrativos, considerados constituintes secundários do processo de carbonização, são compostos químicos ausentes na estrutura da parede celular. Somando pequenas quantidades e de baixo peso molecular, englobam os óleos essenciais, resinas, taninos, graxas e pigmentos. Os extrativos representam entre 1 e 10% da massa total da lenha seca, e o seu conteúdo varia entre as espécies. Tem por função, manter a estabilidade química da solução que circula entre os tecidos e, ao mesmo tempo, servir de barreira contra a penetração de agentes agressivos nos tecidos. Essas substâncias são responsáveis pelo cheiro, cor, sabor e resistência natural ao apodrecimento de certas espécies (BROWNING, 1963). A maior parte dos extrativos está concentrada no cerne das árvores, o que explica a coloração mais escura em algumas espécies (KOLLMANN e CÔTE Jr., 1968). Os extrativos são substâncias passíveis de remoção e/ou extração por meio do uso de solventes orgânicos como: etanol, acetona e o diclorometano (ROWELL et al., 2005a e 2005b). Dentre os principais compostos extrativos, podem ser destacados os compostos terpênicos, alifáticos (resinas, ácidos graxos, etc.) e fenólicos que compõem os taninos e flavonóides (ROUSSET, 1993).

Para Steward (1974), a dessorção térmica, ou termoxidação orgânica, acontece sob aquecimento, onde compostos químicos de baixo ponto de ebulição são volatilizados e separados de um meio. Sua aplicabilidade se estende a resíduos orgânicos (de refinarias, piche, lenha, etc.), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, dioxinas, pesticidas e produtos derivados do petróleo. O processo de dessorção favorece a liberação de fumaça e, com isso, difunde compostos extrativos que, por sua vez, podem sofrer alterações físico-químicas. A extração dos constituintes químicos presentes em um meio é função do aumento da taxa de transferência dos produtos encontrados na fase líquida para a fase

gasosa. Sabe-se que essa transferência de massa é função de diversos fatores, como: viscosidade da água e dos compostos orgânicos presentes; tensão superficial entre os compostos orgânicos e a fase gasosa; e a solubilidade efetiva dos compostos orgânicos.

De acordo com Simons (1984), os ganhos com eficiência e produtividade no emprego de carvão vegetal requerem conhecimentos mais profundos da etapa de volatilização dos seus extrativos. Esta etapa pode ser dividida em três fases distintas: pirólise (decomposição química, com transporte de voláteis através dos poros do material e pelas reações secundárias, que alteram os produtos químicos do gás e/ou causam deposição de produtos voláteis na parede dos poros, retendo-os ou não). Para o mesmo autor, a volatilização pode ser melhor caracterizada por meio de processos de natureza química e da dinâmica de fluidos no interior do substrato sólido. Seguindo esta linha de raciocínio e utilizando-se de um modelo de evolução de poros (diâmetro de poros) a mecânica de fluidos tem papel fundamental sobre o rendimento da fixação do carbono, com os materiais voláteis sendo transportados nos pequenos poros por difusão da parede para fora e por convecção nos grandes poros (PHUOC e DURBETAKI, 1987). Para Simons (1984) a circulação de líquidos do menor para o maior poro, tem velocidade controlada pelos processos de difusão de Knudsen, difusão pura, arrasto viscoso, arrasto aerodinâmico e escoamento. A transição de difusão pura para transporte viscoso é determinada pela taxa de pirólise e contrapressão (PHUOC e DURBETAKI, 1987). Isso ajuda a explicar o porquê de madeiras com grãos e texturas diferentes apresentarem resultados de carbonizações diferentes.

Segundo White (1988), os modelos que regem a seqüência operacional da carbonização da lenha (e que, por sua vez, podem ser estendidos e aplicados ao processo de resfriamento da massa de carvão) são baseados na equação de conservação de energia, os quais incluem termos que concorrem para a contribuição ao balanço interno de energia, tal como descrito pela equação 4.

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) - q_{\text{pirolise}} \left(\frac{\partial m}{\partial t} \right) = \rho C_p \text{ lenha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

em que

T	- Temperatura,	K;
x	- Localização da frente de carbonização,	m;
m	- Massa de solutos voláteis,	kg;
t	- Tempo,	s;
q_{pirolise}	- Calor de pirólise,	K; e

c_p lenha - Calor específico da lenha, à pressão constante. kJ/(kg K).

Segundo Williams e Cooley (1975), a condutividade térmica expressa a quantidade de calor que passa, por unidade de tempo, através de uma subcamada transversal delimitada por duas superfícies de um corpo, devido ao gradiente de temperatura aplicado na direção do fluxo, tal como expresso pela equação 5.

$$k = \left(\frac{q''}{S \left(\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \right)} \right) \quad (5)$$

em que

- q'' - Fluxo de calor, W/m²;
- S - Área da seção transversal, m²;
- T_1 - Temperatura da superfície do corpo (maior temperatura), K;
- T_2 - Temperatura da superfície do corpo (menor temperatura), e K; e
- Δx - Espessura da subcamada. m.

Para Steward (1974), a descrição matemática da transferência de calor por irradiação, pelo balanço energético por unidade de área, em um corpo lignocelulósico, resultando, inclusive, na liberação de material volátil, pode ser representada pelas equações 6a e 6b.

$$\left(\frac{\partial \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} \right) + a I \exp^{-ax} = \sum_i Q_i r_i - \left(\frac{\partial (m_{\text{volateis}} C_{p \text{ volateis}} T)}{\partial t} \right) \quad (6a)$$

e

$$\sum_i Q_i r_i - \left(\frac{\partial (m_{\text{volateis}} C_{p \text{ volateis}} T)}{\partial t} \right) = \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (6b)$$

em que

- a - Coeficiente de absorção por irradiação para materiais sólidos, kW/m²;
- I - Intensidade da radiação térmica, kW/m²;
- Q_i - Entalpia à pressão constante da reação, kJ/mol;
- $c_{p \text{ volateis}}$ - Calor específico médio dos voláteis, à pressão constante, kJ/(kg K).
- r_i - Taxa de reação química que obedece à equação de Arrhenius, kJ/mol; e
- m_v - Taxa de liberação de voláteis por área de superfície. mol/m².

De acordo com Pinto (2005), os trabalhos realizados por Kanury et al. (1970), White (1988), Willians (1974), Steward (1974), Kollmann (1968) e Browne (1958) colaboraram para a compreensão da carbonização da lenha e dos seguintes fatores envolvidos no processo: difusão de vapores internos, convecção interna, propriedades da lenha parcialmente carbonizada, convecção, cinética da pirólise, taxa de carbonização, tempo de aquecimento, propriedades da lenha, fluxo de calor e gases.

Guedira (1988) e Vovelle e Mellottee (1982) classificaram a redução de massa que ocorre na lenha em carbonização em cinco fases: (i) entre a temperatura ambiente e 100 °C¹⁷; (ii) entre 100 e 250 °C¹⁸; (iii) entre 250 e 330 °C¹⁹; (iv) entre 330 e 370 °C²⁰; e (v) acima de 370 °C²¹. Para entender os efeitos sobre a resistência mecânica do carvão produzido, tem-se que considerar o fluxo térmico, que ocorre na estrutura da lenha por radiação, condução e convecção de calor através do ar contido no lúmen das células. Sendo que os dois últimos mecanismos são os de maior eficiência na transferência de calor, segundo Ilmari et al. (1996) são mostrados na Figura 3.

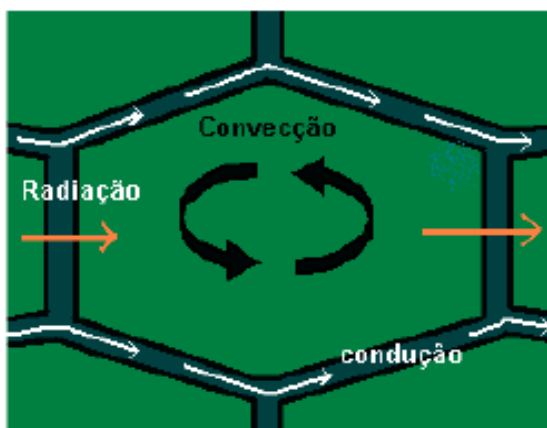


Figura 3 - Formas de transferência de calor perpendicular à grã da lenha.

Segundo Briane e Doat (1985a e 1985b), durante o processo de combustão da lenha anidra, são liberados diversos compostos, além de CO₂ e H₂O, como mostrado na Figura 4.

¹⁷ Faixa térmica, na qual ocorre a saída da água livre e água higroscópica da lenha, retidas, no lúmen e nas paredes das células, respectivamente (GUEDIRA, 1988) (VOVELLE e MELLOOTTEE, 1982).

¹⁸ Faixa térmica, também, ligada à eliminação de água, sendo parte higroscópica (adsorvida nas hidroxilas das cadeias de polissacarídeos e da lignina) e a outra parte de água de constituição (cuja eliminação é acompanhada por degradação irreversível da lenha, sobretudo em seus grupos hidroxílicos) (GUEDIRA, 1988), (VOVELLE e MELLOOTTEE, 1982).

¹⁹ Faixa térmica na qual acontece o processo de degradação da hemicelulose (GUEDIRA, 1988), (VOVELLE e MELLOOTTEE, 1982).

²⁰ Faixa térmica na qual acontece o processo de degradação da celulose (GUEDIRA, 1988), (VOVELLE e MELLOOTTEE, 1982).

²¹ Faixa térmica com produção de carvão, estando fortemente correlacionada com a degradação da lignina (GUEDIRA, 1988), (VOVELLE e MELLOOTTEE, 1982).

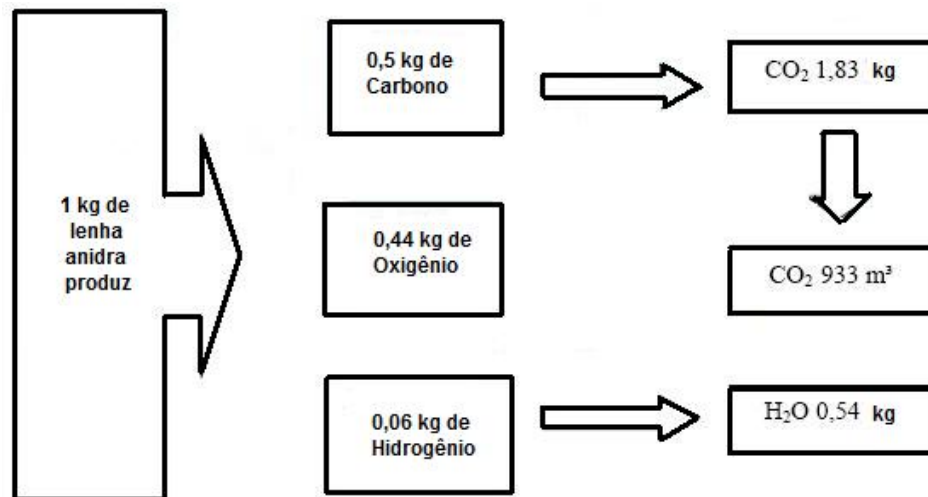


Figura 4 - Produtos liberados durante a combustão da lenha.

Na etapa de carbonização da lenha, segundo Briane e Doat (1985a e 1985b), tem-se um percentual maior de compostos gerados (Figura 5).

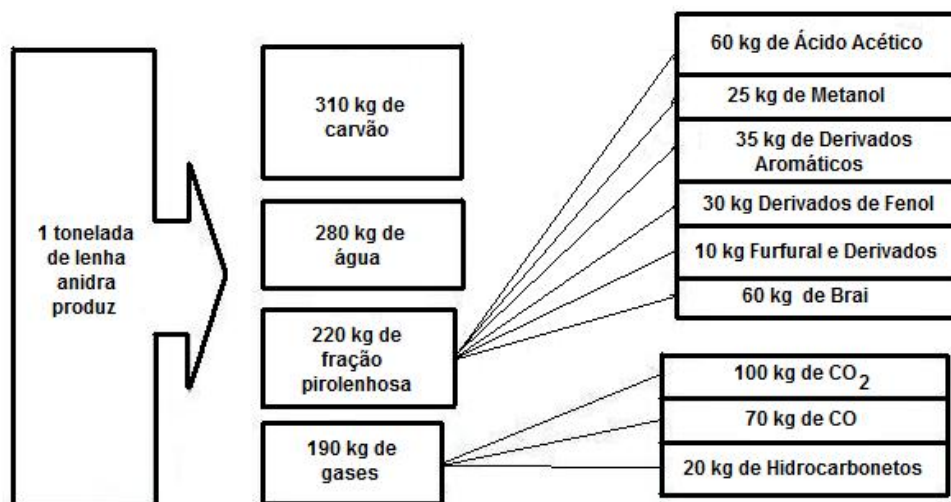
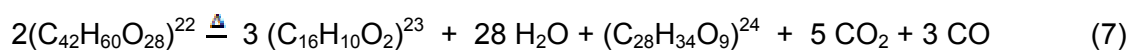


Figura 5 - Produtos liberados durante a carbonização da lenha.

Segundo Wenzl (1970), os produtos resultantes do processo de carbonização podem ser representados, genericamente, pela equação 7, de reação química:



Segundo Bridgwater e Peacocke (1995) e Bridgwater (1991), podem-se observar quatro fenômenos físico-químicos quando a biomassa de pré-carbonização é exposta a um aumento gradativo de temperatura: (i) à temperatura de até 200 °C ocorre a secagem do

²² Composição química padrão que caracteriza a lenha.

²³ Composição química padrão que caracteriza o carvão vegetal.

²⁴ Composição química padrão que caracteriza o alcatrão de origem vegetal.

material, envolvendo, além da água, traços de CO₂, ácido fórmico e ácido acético, dentre outros; (ii) à temperatura na faixa de 200 °C a 300 °C, em que os produtos anteriores atuam em maiores quantidades e a biomassa é convertida em carvão vegetal por meio de torrefação-decomposição térmica da hemicelulose e parcial da celulose; (iii) às temperatura na faixa de 300 °C a 500 °C, acontece a degradação térmica da celulose, em presença de reações exotérmicas, e há a liberação de grandes quantidades de CO, H₂, CH₄, etanol, ácido acético, ácido fórmico, formaldeídos e alcatrão (voláteis e licor pirolenhoso); (iv) às temperaturas acima de 500 °C, em que predominam reações dos produtos gasosos já formados com o resíduo sólido, resultando produtos combustíveis. Nessa fase, a água e o CO₂ podem reagir com o carvão produzindo CO e H₂.

2.2. Análises do carvão

Segundo Briane e Doat (1985b), para acompanhar a qualidade do carvão são realizadas: análises químicas (teores de água, de carbono fixo, de material volátil e de cinzas) e análises físicas (massas específicas verdadeira e aparente; porosidade; tamanho médio do carvão; finos). A massa específica do carvão é influenciada pela temperatura de carbonização e pela massa específica da lenha (quanto mais densa, maior o rendimento em carvão).

Segundo SBRT (2007), a higroscopicidade do carvão vegetal pode variar de 4 a 16%. Quanto maior a temperatura de carbonização, menor é o seu poder higroscópico. Tem-se, então: (i) carvão obtido com temperatura máxima de carbonização em 150 °C que absorve 21% de água; (ii) obtido a 250 °C que absorve 7% (iii) obtido a 350 °C que absorve 6%; (iv) obtido a 450 °C que absorve 4% e (v) obtido a 1.500 °C que absorve 2%.

2.2.1. Impactos ambientais do processo de carbonização

Segundo FAO (2005), o aprimoramento e/ou revitalização dos fornos e as melhorias técnicas do processo de produção visam minimizar a emissão de metano (CH₄), um dos causadores do efeito-estufa. A forma limpa de produção do carvão, também, reduz a emissão de CO₂. Em geral, a produção de carvão vegetal é realizada por produtores rurais, muitas vezes em situação insalubre, sem o devido equipamento individual de proteção, sem os devidos cuidados com sustentabilidade ambiental local e não respeitando a Legislação Trabalhista vigente. Com esse “modus operandi”, ocorre o desmatamento da vegetação nativa (fonte não renovável em curto prazo) para suprir a produção de carvão, causando

grande impacto ambiental, pois a forma de desmatamento empregada é o de corte raso em extensas área contínuas, reduzindo a biodiversidade.

2.2.2. Controle das emissões gasosas

Segundo Allocca et al. (2003), a diferença de pressão que provoca a circulação do ar através das aberturas em um ambiente, do exterior para o interior e vice-versa, é ocasionada por diferença de temperaturas. A posição das aberturas (entrada e saída) determina a distribuição da temperatura no ambiente interno. Se as aberturas não estiverem obstruídas (no presente estudo são: chaminé, “baianas” e “tatus”), o ar frio fluirá para o interior do ambiente, através das aberturas inferiores (neste estudo são: tatus e baianas) e o ar quente fluirá para o exterior através da abertura superior (abertura na parte superior da parede do forno, próxima à abóboda do forno e chaminé). Essa ventilação, denominada ventilação de deslocamento, cria estratificação térmica, modificando a velocidade térmica²⁵ do meio.

Segundo Mazon (2006), Mazon (2005) e Heiselberg et al. (2001), quando há grande separação vertical entre as aberturas de entrada e saída do ar e se tem ampla diferença entre temperaturas internas e externas, acontece fluxo de ar mais intenso para o ambiente e no interior dele. A pressão interna mais elevada na abertura superior dirige o fluxo de ar para o exterior, e a pressão interna mais baixa na abertura inferior facilita a entrada do ar exterior, que substitui o ar quente que saiu. Esse fluxo dirigido pelo empuxo térmico é o conhecido efeito-chaminé e pôde ser utilizado, neste estudo, como uma forma de acelerar, ou não, a velocidade e o tempo de carbonização.

Segundo Li e Delsante (2003) e Toledo (1999), quando não há vento, o efeito-chaminé é o único responsável pela renovação do ar, isto é, situação das mais simples oferecidas pela ventilação natural. Se há incidência de vento, essa ação deve ser somada ao efeito-chaminé, agregando ventilação natural com maior intensidade. Quando não há a união desses dois fenômenos (vento e efeito-chaminé), o efeito contrário deles pode causar inconvenientes como pressões maiores devido ao vento nas aberturas superiores em relação àquelas provenientes do efeito-chaminé, impedindo o escapamento de fumaça e poeiras geradas internamente, causando poluição do meio ambiente.

2.2.3. Queima dos gases da carbonização

²⁵ Aquecimento ou resfriamento.

Na grande maioria dos fornos, os gases não são coletados e nem utilizados, sendo lançados no meio ambiente. Como esses gases são combustíveis, podem e deveriam ser queimados, gerando energia térmica para uso em cogeração.

Todo o processo de combustão deve atender a princípios fundamentais que assegurem eficiência na queima do combustível. Para isso, é necessário controlar os fatores que interferem na qualidade da combustão e assegurar a presença de três elementos que compõem o chamado “triângulo da combustão”: temperatura, combustível e oxigênio. É imperativo que estes se combinem na dosagem certa e no tempo adequado, para promoverem combustão completa e eficiente. Para uma boa combustão, três condições devem ser observadas: (i) temperatura igual ou superior à de ignição (a câmara de combustão deve propiciar condições adequadas para que o combustível atinja a temperatura de ignição e para que a combustão seja auto-sustentada); (ii) mistura ou turbulência adequada do ar com o combustível (é necessário que o comburente e o combustível sejam colocados em contato íntimo); e (iii) tempo e espaço suficientes para que ocorra combustão.

2.2.4. Fornalha para queima da fumaça

Segundo Milori (2004), os gases componentes da fumaça oriunda da carbonização e que contribuem para o efeito-estufa são: CO_2 , CH_4 , óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3). Quando incinerados, os gases da fumaça produzem ar quente (que pode ser aproveitado na secagem da lenha), restitui parte do CO_2 a ser reabsorvida pela vegetação por meio da fotossíntese, diminui a concentração de agentes carcinogênicos no meio ambiente e diminui a possibilidade de incêndio florestal.

Para a queima de gases, normalmente são utilizadas fornalhas incineradoras projetadas para garantir a queima completa deles, de forma eficiente e contínua, visando, ou não, ao aproveitamento máximo de sua energia térmica liberada durante o processo. Uma fornalha deve possuir volumes e dimensões mínimas, ideais para uma combustão eficiente, e trabalhar com pequeno excesso de ar comburente. Volumes pequenos podem implicar em combustão parcial, retendo material combustível nos gases que deixam a fornalha, como incombusto. Mas volumes grandes, por terem maior superfície de irradiação, podem causar menores temperaturas na câmara de combustão, dificultando o processo de ignição das partículas do combustível (LOPES, 2002). Segundo esse mesmo autor, os parâmetros de maior relevância no projeto de fornalhas são: (i) volume da câmara de combustão; (ii) área da grelha ou da célula de queima; e (iii) entradas de ar primário e secundário. O tamanho e forma de uma fornalha dependem da natureza do combustível, do dispositivo de queima e

da quantidade de calor a ser liberado em um intervalo de tempo, pois cada combustível apresenta propriedades diferentes.

Para se obter incineração satisfatória, torna-se necessário conhecer não somente a temperatura de combustão, mas também o tempo de oxidação do material a ser incinerado. A câmara de combustão deve ser projetada para permitir velocidade de propagação dos gases no seu interior, garantindo um tempo mínimo de residência dos gases para que ocorra a sua queima completa (FERREIRA, 2000).

De acordo com Bizzo (2003) no interior do queimador, quando em pleno funcionamento, forma-se uma zona de reação com temperaturas que variam de 1.000 a 1.200 °C, capazes de destruir termicamente todos os componentes tóxicos e cancerígenos presentes na fumaça, transformando-os em gases quentes e com o mínimo de particulados em suspensão. Na base da chaminé do queimador, geralmente é instalado um obturador de fluxo, que gera pressão negativa tipo sucção capaz de controlar o fluxo, forçando a sua passagem no centro da zona de queima.

Para Ferreira (2004), os queimadores não devem ser construídos distantes do corpo do forno, pois outros periféricos podem interagir sobre a quantidade de calor perdida pela chama e sobre a sua temperatura (da chama e do queimador). No início da carbonização e estando, ainda, as paredes da câmara de combustão frias, a fumaça oriunda do forno, composta por gases e vapor d'água, faz com que a chama de queima perca calor rapidamente, dificultando a sua manutenção e até apagando, interrompendo a queima dos gases. Mas, uma vez atingida a temperatura ideal, estando o teor de água dos gases na concentração ótima e a chama na altura certa, todos os gases serão queimados.

Segundo Bizzo (2007), as paredes do queimador com lajotas refratárias quentes fazem com que haja irradiação de calor de volta à chama, aumentando sua temperatura e favorecendo a intensidade de combustão, tornando a chama menor e mais intensa.

2.2.5. Condições térmicas da carbonização

Segundo Buchanan (2001), o entendimento da evolução térmica (resfriamento), facilita a compreensão da lógica da carbonização (e do resfriamento), com relativa precisão, a partir da sua simulação, camada por camada, do início até atingir a estabilização térmica em cada ponto da pilha de lenha (ou massa de carvão). Durante a carbonização a distribuição e a variação da temperatura na massa de lenha, dependem dos seguintes fatores: dimensões e geometria da lenha (e da massa de carvão resultante); propriedades térmicas da lenha (condutividade térmica, calor específico); e condições ambientais (temperaturas do ar e estruturas adjacentes). Outra que deve ser considerada é a

difusividade térmica, que se correlaciona com a velocidade com que ocorrem as trocas de calor através da massa de carvão. Quanto maior a difusividade térmica, mais facilmente o calor mover-se-á através da pilha e no interior da própria lenha. Pode ser determinada por meio de ensaios em laboratório ou indiretamente por meio da relação entre a condutividade do material, seu calor específico e massa específica.

A massa específica é um dos principais índices de qualidade da lenha e, segundo Brasil (1972), citado por Vale et al. (2000), os métodos que se apóiam na massa específica básica, são os que mais satisfatoriamente medem a quantidade de substância lenha por unidade de volume. Segundo Cunha et al. (1989), não há correlação entre densidade básica e o poder calorífico. Entretanto, em relação ao volume de lenha a ser queimada a massa específica está positivamente relacionada com o conteúdo calórico da lenha, estimulando o interesse de lenhas pesadas para a queima.

A condutividade térmica fornece o fluxo de calor transmitido através de uma seção de área unitária de material, sob gradiente de temperatura unitário, e é influenciada pelas características intrínsecas e pelo teor de água, massa específica e temperatura da pilha de lenha.

Segundo Veras et al. (2002), o processo de carbonização (pirólise) é regido pela taxa de decomposição química dos biopolímeros, devendo ser analisado também quanto aos aspectos de transferência de calor e de massa, devido a estes contribuírem, decisivamente, para os resultados do processo, principalmente quanto a etapa de volatilização.

2.3. Propagação térmica

Segundo Incropera et al. (2008), é possível quantificar processos de transferência de calor, em termos de taxa. E esse equacionamento pode ser usado para quantificar o teor de energia que é transferido por unidade de tempo. A equação 8 é conhecida como lei de Fourier²⁶.

$$q_x'' = -k \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (8)$$

em que

- | | | |
|---------|--------------------------|--------------------|
| q_x'' | - Fluxo de calor, | W/m ² ; |
| k | - Condutividade térmica, | W/(m K); e |

²⁶ É considerada uma lei fenomenológica, isto é, foi desenvolvida a partir de fenômenos observados ao invés de ter sido derivada a partir de princípios fundamentais.

$\frac{dT}{dx}$ - Gradiente de temperatura na direção x. K/m.

O fluxo de calor é a taxa de transferência de calor na direção x, por unidade de área perpendicular à direção de transferência, sendo proporcional ao gradiente de temperatura dT/dx , nesta direção. O sinal negativo é consequência do fato do calor ser transferido na direção decrescente da temperatura.

Independentemente da natureza específica do processo de transferência de calor por convecção, a equação da taxa de transferência pode ser representada pela equação 9, ou lei de resfriamento de Newton:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (9)$$

em que

- q'' - Fluxo de calor por convecção na direção x, por área W/m^2
- h - Coeficiente de transferência de calor por convecção, $W/(m^2K)$;
- T_s - Temperatura da superfície, K; e
- T_∞ - Temperatura do fluido. K.

O fluxo de calor por convecção é proporcional à diferença de temperaturas da superfície e do fluido. É considerado positivo se o calor for transferido a partir da superfície de maior temperatura para a superfície de menor temperatura ($T_s > T_\infty$) e negativo se o calor for transferido da superfície de menor temperatura para a de maior temperatura ($T_\infty > T_s$). A equação (9) é, também, conhecida como lei de resfriamento de Newton. O termo “h” depende das condições na camada limite, as quais, podem ser influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do movimento do fluido e por propriedades termodinâmicas e de transporte do próprio fluido. O fluxo de calor por convecção é considerado positivo, se o calor for transferido a partir da superfície e negativo se o calor for transferido para a superfície (INCROPERA et al., 2008).

A radiação emitida pela superfície tem sua origem na energia térmica da matéria delimitada pela superfície e pela taxa na qual a energia é liberada por unidade de área (W/m^2) é conhecida como poder emissivo, E^{27} , da superfície.

²⁷ Há um limite superior para o poder emissivo, que é determinado pela lei de Stefan-Boltzmann dada por:

$$E_n = \sigma T_s^4$$

em que:

T_s - temperatura da superfície K, e

σ - constante de Stefan-Boltzmann ($= 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$)

Para Incropera et al. (2008), a transferência de calor é por essência um processo de não-equilíbrio. Para que a transferência de calor ocorra, deve existir um gradiente de temperatura, ou seja, um não-equilíbrio termodinâmico. Assim, a Primeira Lei da Termodinâmica, ou lei da conservação da energia, durante um intervalo de tempo Δt , pode ser transcrita como: “O aumento na quantidade de energia acumulada, ou armazenada, em um volume de controle, deve ser igual à quantidade de energia que entra, no referido volume, menos a quantidade de energia que deixa o mesmo volume”. Se a entrada e a geração de energia térmica excedem a energia de saída, haverá um aumento na quantidade de energia térmica armazenada no volume de controle; se acontecer o inverso, acontecerá uma diminuição na energia térmica acumulada. Se a entrada e a geração igualarem à saída, deve prevalecer uma condição de regime estacionário tal que não haverá variação na quantidade de energia térmica acumulada no interior do volume de controle. O termo da geração de energia está associado à conversão de alguma forma de energia (química, elétrica, eletromagnética ou nuclear) em energia térmica. Esse é um fenômeno volumétrico e é, geralmente, proporcional à magnitude desse volume.

Segundo Sias (2006), calor é o processo de transferência de energia de um corpo para outro quando há diferença de temperatura entre eles. O processo é espontâneo e ocorre do corpo de maior para o de menor temperatura, tal como exemplificado pela Figura 6.



Figura 6 - Transferência de calor.

Segundo Lienhard IV e Lienhard V (2002), a equação fundamental da calorimetria, segundo a qual uma quantidade de calor sensível (Q) trocada por um corpo é diretamente proporcional à massa (m) do corpo e à variação de temperatura ($\Delta T = T_1 - T_2$) que ele sofre ($Q = m c \Delta T$). O coeficiente c_p , ou calor específico a pressão constante, do material que constitui o corpo, pode ser entendido como a quantidade de calor que esse material deve receber por unidade de massa para sofrer variação de temperatura unitária.

Portanto, para elevar a temperatura da massa de vapor de T_2 para T_1 ²⁸, ou resfriar a massa de carvão de T_1 para T_2 ²⁹, deve-se fornecer, ou retirar (mantendo pressão e/ou volume constantes, respectivamente), uma quantidade de energia na forma de calor dada pelas equações 10 e 11.

²⁸ T_1 – temperatura da massa de carvão no final da carbonização e início do processo de resfriamento.

²⁹ T_2 – temperatura da massa de vapor empregada no resfriamento.

$$Q_{\text{massacarvao}}^* = m_{\text{carvao}} \int_{T_1}^{T_2} C_{p \text{ carvao}} \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad (10)^{30}$$

ou

$$Q_{\text{massavapor}}^* = m_{\text{vapor}} \int_{T_2}^{T_1} C_{p \text{ vapor}} \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad (11)$$

2.4. O porquê do uso do vapor d'água para resfriamento

Segundo Avallone e Baumeister (2006) e Babcock e Wilcox (1985), o vapor é o agente de transporte do calor do combustível queimado na fornalha da caldeira para o ponto onde se necessita usar esse calor. Ou seja, no presente estudo, usou-se o vapor para modificar a atmosfera do forno de carbonização, pois a água (e o vapor d'água), é um excelente amortecedor de variações de temperatura. Assim, em um processo térmico qualquer, para que o resfriamento, utilizando vapor d'água, seja bem sucedido, depende-se das características físicas do vapor e de como e onde ele é aplicado.

Além de combinar tempo, temperatura e velocidade de circulação do vapor³¹ no interior do corpo quente e em incandescência. A velocidade³² do vapor através dos orifícios de injeção deve ser conhecida para se conseguir o efeito de resfriamento e de abafamento desejados. O tempo é importante, pois quanto mais rápido for carregado o vapor sobre o carvão, menor é o tempo disponível para que um dado volume desse vapor condense-se sobre o carvão. Assim, a transferência de calor do carvão para o vapor aumenta, pois o filme de vapor formado sobre o carvão, tem pouca espessura, o que favorece o aumento de sua temperatura interna, dificultando a sua condensação.

Segundo Incropera et al. (2008), no estudo e análise de transferência de calor, é necessário o conhecimento e uso de várias propriedades da matéria: (i) termofísicas – de transporte: que incluem os coeficientes das taxas de difusão (k , condutividade térmica na transferência de calor), e ν (viscosidade cinemática); (ii) termodinâmicas - relacionadas ao estado de equilíbrio de um sistema tais como: massa específica (ρ) e calor específico (c_p), em que o produto (ρc_p) em $\text{kJ}/(\text{m}^3\text{K})$, denominado capacidade calorífica volumétrica, mede a capacidade de um material em armazenar energia térmica. Para os mesmos autores, o

³⁰ O símbolo (*) que aparece por sobre a letra Q na formula 10, substitui um ponto (.). Foi assim feito, pois o ponto na formula original estava causando duvidas na leitura. O termo Q ponto indica movimento de fluxo de energia.

³¹ Por exemplo: vapor “duro” é um vapor superaquecido e com uma alta velocidade. Pode-se, ainda, ter vapor saturado, superaquecido, com baixas ou altas velocidades, entre eles combinados. Adaptado de Carzino (2006).

³² Uma pressão baixa de vapor saturado e uma velocidade de 1 a 3 m/s. Adaptado de Carzino (2006).

transporte de energia térmica através de uma interface sólido-fluido ocorre por meio de mecanismo de convecção, sendo o fluxo de calor proporcional à diferença de temperaturas nas duas fases (Lei de Newton para o resfriamento).

$$\frac{Q}{S} = q'' = h(\Delta T) \quad (12)$$

em que

- q'' - Fluxo de calor na interface, W/m^2 ;
- h - Coeficiente de transferência de calor por convecção, $W/(m^2 K)$; e
- ΔT - Diferença de temperaturas nas duas fases. K .

A condução de calor em uma superfície nas direções x , y e z , descrita pela Lei de Fourier, equação 12, pode ser escrita de uma forma mais geral como:

$$q'' = -k \nabla T = -k \left(x \frac{\partial T}{\partial x} + y \frac{\partial T}{\partial y} + z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (13)$$

em que ∇T é o gradiente térmico (K/m) e ∇ é um operador diferencial tridimensional.

Fica implícito na equação 14, que o vetor fluxo térmico, encontra-se em uma direção perpendicular às superfícies. Conseqüentemente, uma forma alternativa da lei de Fourier é dada por:

$$q_n'' = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (14)$$

em que q_n'' é o fluxo térmico na direção n , normal à superfície. O fluxo de calor é uma grandeza direcional (INCROPERA et al.,2008).

A transferência de calor é mantida pelo gradiente de temperatura ao longo da direção escolhida. O vetor fluxo térmico pode ser decomposto em coordenadas cartesianas, resultando em:

$$q'' = x q_x'' + y q_y'' + z q_z'' \quad (15)$$

Portanto, tem-se:

$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}; \quad q_y'' = -k \frac{\partial T}{\partial y}; \quad q_z'' = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (16)$$

Cada uma das expressões da equação 16, relaciona o fluxo térmico através de uma superfície, nas direções x, y ou z, ao gradiente de temperatura perpendicular à superfície. Está implícito na equação 16 que o meio, através do qual a condução ocorre é isotrópico (no caso do presente estudo, acontece quando se trabalha com uma única espécie de lenha enforcada). Em tal meio o valor da condutividade térmica³³ é independente da direção da coordenada e indica a taxa pela qual a energia é transferida pelo processo de difusão (INCROPERA et al., 2008). Portanto, para o eixo X, tem-se:

$$k_x = \frac{q_x''}{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)} \quad (17)$$

Definições semelhantes estão associadas à condutividade térmica nas direções y e z (k_y e k_z). Para um dado gradiente de temperatura, o fluxo térmico por condução aumenta com o aumento da condutividade térmica. Segundo Moura e Bonnemann (1986), a capacidade térmica e a condutividade térmica da madeira são características físicas importantes e que devem ser consideradas quando do desenvolvimento de processos de carbonização. Pois possui baixa capacidade e baixa condutividade térmicas, quando comparada com outros materiais, desempenhando papel fundamental no processo de carbonização, explicando por que deve manter uma baixa taxa de aquecimento quando o produto final desejado é o carvão vegetal.

A baixa condutividade aliada à baixa capacidade térmica necessita de uma pequena taxa de aquecimento para que se consiga uma isoterminia maior entre o exterior e o interior da madeira, resultando em carbonização e não em uma termo-degradação.

³³ A propagação do calor na madeira, segundo Numazawa, 2000, é maior no sentido paralelo às fibras e menor no sentido perpendicular. E as relações observadas são:

- a) Quanto maior for a massa específica (menor a quantidade de ar por unidade de volume, maior será a sua condutividade térmica.
- b) Quanto maior for o teor de umidade, maior será a condutividade térmica.
- c) Quanto maior for o teor de extrativos, maior será a condutividade térmica da madeira;
- d) Quanto maior for o gradiente de temperatura, a partir da temperatura na qual se determina um coeficiente de condutividade térmica de referência, maior será a condutividade térmica da madeira.

Aplicando a equação 18 à condução de calor em uma tora de lenha com grande comprimento, para poder considerar apenas o transporte de calor no sentido radial, chega-se à equação de balanço entálpico diferencial.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (18)$$

em que r é a coordenada radial, em m.

Para melhor entendimento matemático do processo de carbonização da lenha e do resfriamento da massa de carvão, é necessário saber que para se resolver uma equação diferencial de segunda ordem são necessários duas condições de contorno, pois são necessários duas integrações em r , uma condição inicial e uma integração em t . Essas condições de contornos são descritas por:

$$\text{C.I.} \rightarrow \text{para } t = 0, \quad T = T_0, \quad \forall r \leq R \quad (19)$$

$$\text{C.F.1} \rightarrow \text{para } r = 0, \quad \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0, \quad \forall t \quad (20)$$

$$\text{C.F.2} \rightarrow \text{para } r = R, \quad -k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) = h (T - T_{\text{fluido refrigerante}}) \quad \forall t > 0 \quad (21)$$

em que

R	- Raio,	m ;
C.I.	- Condição inicial	
C.F.1	- Condição final 1	
C.F.2	- Condição final 2	
T_0	- Temperatura inicial,	K ; e
$T_{\text{fluido refrigerante}}$	- Temperatura do fluido refrigerante.	K .

A primeira condição de contorno, dada pela equação 19, é oriunda da condição inicial do sistema sob estudo, isto é, a tora está na mesma temperatura T_0 em todos os pontos. A condição de contorno, dada pela equação 20, resulta da simetria da tora em questão, ou sistema. A condição de contorno, dada pela equação 21, resulta do balanço entálpico na interface fluida que envolve a tora de lenha com a utilização da Lei de Newton como condição de contorno.

Segundo Carslaw e Jägger (1959), a solução da equação diferencial 13 é dada, em termos de uma soma de parcelas onde aparecem as raízes de ordem n , de funções de Bessel. Uma solução adimensionalizada da equação 13 é função de três números adimensionais, ou seja:

$$\frac{T_{\text{refrigerante}} - T}{T_{\text{refrigerante}} - T_0} = f \left(\frac{\alpha t}{R^2}, \frac{k}{hR}, \frac{r}{R} \right) \quad (22)$$

Fica evidente que a temperatura em um dado ponto da tora de lenha e do pedaço de carvão, depende: (i) dimensões, (ii) propriedades físicas (k , c_p e ρ) e de h , (iii) do coeficiente de transferência de calor. O mesmo raciocínio pode ser aplicado a uma tora real com diversidade de tecidos estruturais.

Devido aos fenômenos de capilaridade e adsorção, parte do vapor d'água que circula no interior da massa de carvão pode ficar retido nos poros existentes na superfície do carvão. A eficiência da capilaridade está, pois, ligada à afinidade entre o carvão e a água, gerando interfaces entre vapor d'água-ar e os poros. Estas interfaces água-ar geram estruturas denominadas meniscos, que apresentam uma curvatura que é tanto maior quanto menor for o poro. A curvatura é dependente da energia térmica presente na manta de vapor d'água e, por isso, diz-se que tanto menor o poro, tanto mais retida ficará a água na superfície do carvão. Assim, para esvaziar um poro grande precisa-se aplicar menos energia, quando comparada ao consumo energético utilizado para esvaziar um poro pequeno. Como a superfície do carvão possui uma grande variedade de poros (variando em formas e diâmetros), quando se aplica uma dada energia térmica à massa de carvão, esvaziam-se inicialmente os poros maiores. Aumentando-se a energia aplicada, devido à migração de calor do interior do carvão para a periferia, esvaziam-se os poros menores, gerando uma circulação forçada de vapor retido no interior da massa. A capilaridade atua, por sua vez, na retenção de água, mantendo os poros razoavelmente cheios de água. Quando a superfície do carvão, com elevada temperatura, interna e superficial, se seca, os poros vão se esvaziando e uma nova manta de vapor d'água recobre os poros, o sistema se repete. Nestas condições, o fenômeno de adsorção passa a dominar a retenção de água. A energia de retenção da água nestas condições é muito maior ainda e, por isso, grandes quantidades de energia são exigidas para se retirar esta água do carvão. Esta forma de circulação e retirada de energia térmica favorece o resfriamento.

Diversos fatores afetam a retenção da água por um carvão vegetal. O principal deles é a textura, pois ela determina diretamente a área de contato entre as partículas superficiais do carvão e o vapor d'água, estabelecendo as proporções de poros e os seus diferentes tamanhos e volumes. Pois se a manta de vapor d'água atingir a superfície do carvão a uma taxa que exceda a taxa de infiltração máxima permitida pela superfície do carvão, isso resultará em: (i) escoamento superficial, (ii) danos na estrutura do carvão e (iii) redução na taxa de troca de calor. Se a precipitação é na forma de grandes gotas (do tipo encontrado

em mangueiras de incêndio) com alta energia cinética, isso, também, danificará a estrutura do carvão reduzindo a taxa de troca de calor, alterando o resfriamento da massa de carvão.

Mas tanto a capilaridade quanto a textura do carvão são dependentes da forma como foi conduzida a carbonização, pois é a velocidade da carbonização aliada à temperatura que irão determinar a qualidade do carvão produzido. Se houver excesso de água, o carvão ficará encharcado, mas, não necessariamente, repleto de trincas e de baixa resistência mecânica.

Uma consequência da interação entre o fluido(vapor)-superfície(carvão), segundo Incropera et al. (2008), é o desenvolvimento de uma região no fluido, através da qual a velocidade de circulação varia entre zero, na superfície, e um valor infinito, associado ao fluxo. Esta região é denominada camada limite hidrodinâmica.

Como o vapor é fornecido saturado e possui um bulk (porção de um material qualquer na sua fase condensada (sólido ou líquido), que mantém suas propriedades físico-químicas macroscópicas), torna-se necessário o conhecimento do efeito de Leidenfrost. O termo “efeito de Leidenfrost” é comumente utilizado para descrever qualitativamente o conjunto de efeitos observados quando pequenas porções de água, ou bulks, são postas sobre uma superfície quente, tal como indica a Figura 7 (GOTTFRIED (1966), BRANCALION (2006)). Segundo Wares et al. (1966), citado por Brancalion, (2006), o ponto principal é a formação de uma camada de vapor entre a gota e a superfície quente, que “protege” a gota da troca direta de calor, mantendo-a na fase líquida. Isso é responsável, também, pelo rápido movimento da gota, uma vez que a camada gasosa atua como um redutor de atrito, favorecendo o seu escoamento.



Figura 7 - Representação esquemática do efeito de Leidenfrost: a gota fica “protegida” da superfície quente pela camada de vapor superaquecido.

O desenvolvimento teórico para o efeito de Leidenfrost postula alguns processos físicos de transferências de massa e energia térmica (calor) ocorrendo simultaneamente, que são responsáveis por manter a condição praticamente estacionária, como é resumido na Figura 8. Ao entrar em contato com a superfície quente, a parte inferior da gota é aquecida por condução (Q_c) até sua temperatura de saturação à pressão constante.

Durante o processo de aquecimento, parte da massa (da porção inferior da gota) passa à fase gasosa, formando o filme de vapor, tal como mostrado pela Figura 7, até atingir uma condição semi-estática.

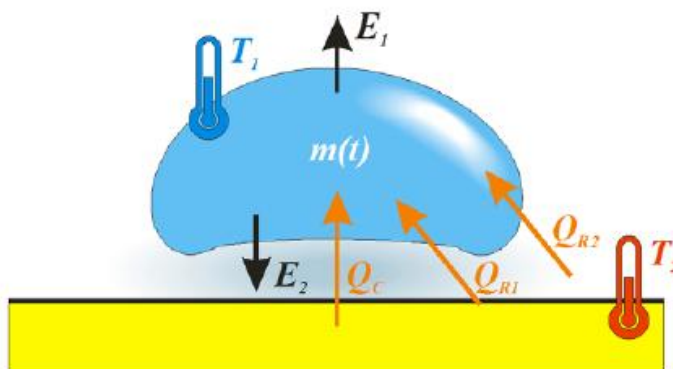


Figura 8 - Representação dos processos de transferências de energia térmica (calor) e de massa, postulados para o efeito de Leidenfrost.

Como mostrado nas Figuras 7 e 8, o filme de vapor não permite a condução direta de calor entre a superfície aquecida, na temperatura T_1 , e a gota, na temperatura T_2 ; porém, existem ainda a condução de calor através do próprio filme (Q_C) e as trocas por radiação da placa (Q_{R1}) e do vapor (Q_{R2}), menos expressivas. Como a gota está praticamente em condição isotérmica na sua temperatura de saturação (T_2), as trocas de calor geram processos de evaporação do líquido (E_1 e E_2), sendo que o primeiro resulta em perda de massa para o ambiente, enquanto que o segundo atua como um alimentador do filme gasoso abaixo da gota. Assim, o excesso de pressão deste filme suporta a gota líquida, que tem sua massa $m(t)$ sendo “perdida” ao longo do tempo (GOTTFRIED (1966), BRANCALION, (2006)).

A principal consequência do efeito de Leidenfrost, ou da formação do filme de vapor abaixo da gota, é a redução da eficiência na troca de calor entre a superfície aquecida e a porção líquida. Isso resulta diretamente no aumento do “tempo de vida” da gota (tempo necessário para a sua evaporação total).

Partindo das temperaturas mais baixas e aumentando-as, o tempo de evaporação total da gota vai sendo reduzido, o que era esperado, já que é resultado direto da maior troca de calor. No entanto, ao atingir a temperatura de saturação do líquido à pressão ambiente, forma-se o filme de vapor que “protege” a gota da troca de calor, aumentando abruptamente o tempo necessário para o processo de evaporação. Esta temperatura define o chamado ponto de Leidenfrost, que consiste na diferença de temperatura ($\Delta T = T_1 - T_2$) em que o fenômeno começa a ser observado.

Segundo Visčňorová (2007) e adaptando a este estudo, a transferência de calor da superfície do carvão para o vapor, para valores altos de $\Delta T = T_1 - T_2$, o calor é transferido

por condução e radiação. Para baixo ΔT , o calor é transferido por convecção natural. A camada de vapor que cobre a massa de carvão, de área A, abafando-a, forma-se uma fina película que retira a energia térmica da superfície do carvão, transferindo-a para o vapor saturado, transformando-o em superaquecido. Assim, o vapor saturado e o superaquecido vão circulando sobre a superfície com velocidade v_f e formando fina camada de espessura média d_f . A temperatura interna ao filme de vapor saturado aumenta, pois recebe calor. A energia térmica removida da massa de carvão é, então, lançada no meio ambiente, utilizando o vapor como meio de transporte. Tal como mostrado na Figura 9.

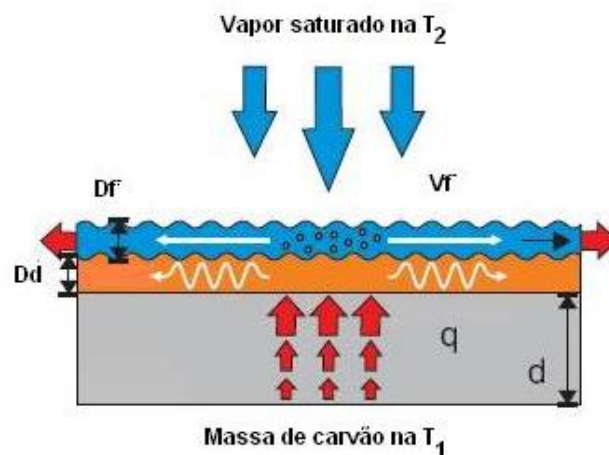


Figura 9 - Circulação do vapor sobre a superfície do carvão, com a formação de uma película de vapor. (VISČEROVÁ, 2007).

em que

- | | | |
|-------|--|-----------------|
| D_f | - Espessura do filme do vapor saturado sobre a massa de carvão, | μm ; |
| D_d | - Espessura do filme do vapor superaquecido, | μm ; |
| V_f | - Velocidade de circulação do vapor saturado, | m/s ; |
| d | - Espessura da subcamada de carvão, | μm ; |
| q | - Quantidade de calor transferido do interior para o exterior, da massa de carvão. | kJ . |

Desta forma, no presente estudo, o escoamento do vapor pela massa de carvão, é induzido por forças de empuxo, que são originadas por diferenças de densidade causadas por variações de temperatura no fluido (INCROPERA et al. 2008). O vapor que entra em contato com a massa de carvão sofre um aumento de temperatura e, portanto, uma redução em sua densidade. Estando mais leve, e sob forças de empuxo, acontece sua movimentação no sentido vertical ascendente e assim o ciclo continua com a chegada de nova massa de vapor.

A massa específica (ρ) e calor específico (c_p) são duas propriedades amplamente utilizadas em análises termodinâmicas. O produto (ρc_p) em ($\text{J/m}^3\text{K}$), denominado capacidade calórica volumétrica, representa a capacidade de um corpo, ou material, em

armazenar energia térmica. Na análise da transferência de calor, a razão entre condutividade térmica e a capacidade volumétrica é uma propriedade importante chamada de difusividade térmica α (m^2/s) que mede a capacidade de um material em conduzir energia térmica em relação à sua capacidade em armazená-la (INCROPERA et al.;2008).

As condições de resfriamento mostradas na Figura 9 interpretadas por Visčňorová (2007), foram adaptadas a este estudo. O coeficiente de difusividade da transferência de calor do vapor d'água na temperatura T_2 , para a superfície da massa de carvão na temperatura T_1 pode ser derivado a partir dos valores medidos T_1 (t). Tal como mostrado nas equações 23 e 24:

$$\alpha = - \left(\frac{C_{pT_1} S \rho_S}{T_1 - T_2} \frac{\partial T_1}{\partial t} \right) \quad (23)$$

$$\Delta\alpha \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial h(x_i)}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \Rightarrow$$

$$\Delta\alpha \approx \sqrt{\left[\left(\frac{\rho dT}{T_2 - T} \Delta c_p \right)^2 + \left(\frac{c_p T}{T_2 - T} \Delta(\rho \Delta x) \right)^2 + \left(\frac{\rho d c_p T}{(T_2 - T)^2} \Delta T \right)^2 + \left(\frac{\rho d c_p}{T_2 - T} \Delta T \right)^2 \right]} \quad (24)$$

em que c_{pT_1} é o calor específico a pressão constante da superfície na temperatura T_1 , em $\text{J}/(\text{kg K})$.

Desta forma materiais com valores elevados de (α) responderão rapidamente a mudanças nas condições térmicas impostas a ele, enquanto aqueles com baixo (α) , responderão mais lentamente, levando um tempo maior para atingir uma nova condição de equilíbrio (INCROPERA et al.;2008).

Assumindo-se então:

$$T = \frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T(t + \Delta t) - T(t - \Delta t)}{2 \Delta t} \quad (25)$$

De acordo com Threlkeld (1970), a adsorção do vapor pela massa do corpo (carvão) é um fenômeno puramente físico, no qual parte da fase gasosa (vapor) a dada temperatura, e em regime permanente e de não equilíbrio termodinâmico, é transferida para a superfície do adsorvente (carvão). Entre um fluido gasoso e um corpo, com características químicas apolares, existe uma forma de interação entre a superfície e as moléculas do fluido que

podem ser adsorvidas, ou não, e tais interações são causadas por forças intermoleculares fracas do tipo van der Waals. Esse processo de atração superficial não é ilimitado, pois ao saturar a superfície não há mais o fenômeno de adesão do fluido. A dessorção, dos voláteis que acontece na carbonização, é o processo inverso, onde os componentes do fluido, agora em fase gasosa, são transferidos para o exterior da lenha. A caracterização dos processos térmicos envolvidos durante a ocorrência desses fenômenos é bastante complexa.

O uso de vapor de água, segundo Nogueira et al. (2005a e 2005b), Perry et al. (1988) e Shields (1982), como vetor de transporte de energia térmica traz grandes vantagens, que explicam sua disseminação, pois a água é uma substância facilmente disponível, pouco agressiva quimicamente e com grande capacidade de transportar energia. Essa quantidade de calor pode ser transferida do vapor para um corpo a ser resfriado (aquecido) e depende, dentre outras coisas, da diferença de temperatura entre ambos (vapor e corpo) e da superfície através da qual o calor vai ser transferido. Um resfriamento ideal da massa do corpo pode acontecer se o efeito da relação temperatura do ar ambiente mais a temperatura do vapor tiver condições de reduzir essa temperatura abaixo daquela que seria atingida caso tivesse somente vapor. Quanto maior a quantidade de ar na mistura (vapor mais ar), menor seria a temperatura na massa do corpo. Mas, quanto maior a quantidade de ar, na relação ar mais vapor, mais espessa será a película de ar, que cria uma camada na superfície do corpo, abafando-o e diminuindo sua temperatura. Como a distribuição e o formato da massa de carvão não são homogêneos, a turbulência gerada pelo vapor, ao circular, se estabelece com maior facilidade, favorecendo o abafamento e o resfriamento.

Para Babcock e Wilcox (1985), como consequência da utilização do vapor mantendo-se as demais condições constantes, pode-se inferir que, quanto maior for a temperatura do vapor e a sua pressão, maior será a taxa de transferência de calor do vapor para o corpo a ser aquecido (ou resfriado). Assim, quanto maior for a superfície de transferência, maior será a quantidade de calor transferido (ou retirada), por unidade de tempo.

Segundo Hinds (1982), o processo da evaporação favorece a absorção gasosa em relação à absorção de partículas. Essa seletividade relativa é conveniente, já que o componente gasoso de interesse muitas vezes está presente tanto na fase gasosa quanto na agregação de partículas, e a sua discriminação pode ter consequências ambientais relevantes. Assim, muitos dos possíveis contaminantes que estejam dispersos no interior do forno e da massa de carvão podem ser removidos por meio do vapor circulante, diminuindo o índice de material volátil presente, pois o carvão pode reabsorvê-los.

2.4.1. Um modelo simplificado transiente macroscópico da carbonização e do resfriamento

Com o encerramento da carbonização, inicia-se o processo de resfriamento do forno e da massa de carvão, onde são aplicados os seguintes métodos: abafamento para extinção de focos de fogo e em incandescência, abaixando os níveis de oxigenação no meio. O oxigênio, segundo Vlassov (2001), é encontrado na atmosfera na proporção de 21%, e, quando a sua concentração em um processo de combustão é limitada a 16%, o fogo deixa de existir. Assim, a operação do forno no nível ótimo de excesso de ar minimiza a perda de calor nos gases e melhora a eficiência da carbonização.

As trocas de energia que ocorrem entre o interior e exterior do forno tem como determinante o efeito causado pelo envelope construtivo, isto é, sua estrutura em alvenaria. Assim, para o cálculo do resfriamento, devem ser avaliadas as dissipações térmicas e a demora devido à inércia térmica: (i) do pavimento em concreto do fundo do forno e condução pelo solo; (ii) das paredes laterais e convecção para o ambiente; (iii) da abóbada e convecção para o ambiente; (iv) da parede do fundo e convecção para o ambiente; e (v) da parede frontal do forno e convecção para o ambiente.

Como há troca de energia entre o forno e o meio ambiente, pelos mecanismos de radiação e convecção, a temperatura na face externa irá aumentar em relação à temperatura inicial, isto é, anterior à ignição, pois, a temperatura no interior do forno será muito maior, devido à liberação de calor pela carbonização da lenha, causando fluxo de calor por condução no interior da parede. A intensidade desse fluxo dependerá, dentre outros fatores, da espessura (Δx), do calor específico (c_p), de sua massa específica (ρ) e da condutividade térmica (k) do material.

Ainda não existe forma ou mecanismo eficiente de controle externo para determinar por quanto tempo a massa de carvão deve permanecer em resfriamento, sob vapor ou não, para que atinja a temperatura ideal para a abertura do forno, ficando esse controle na dependência prática do operador do sistema. Assim, de acordo com Incropera et al. (2008), em relação ao aquecimento e ao resfriamento, a taxa de transferência de calor por condução, no interior de um corpo de prova, é diretamente proporcional à diferença de temperaturas; que seja diretamente proporcional à área S da seção transversal do escoamento; é inversamente proporcional à distância entre as duas superfícies que delimitam o corpo de espessura Δx , representada pela equação 26.

$$Q \propto S \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (26)$$

Conforme metodologia proposta por Moran e Shapiro (2002), a condição essencial para que aconteça a transmissão de calor é que os corpos , estando em um mesmo local, tenham diferentes temperaturas. O corpo A cede, gradativamente, parte de sua energia térmica, provocando uma redução de sua temperatura, enquanto o corpo B, ao se adequar a energia térmica recebida, sofre acréscimo em sua temperatura. O processo continua até que as temperaturas se igualem ($T_1 = T_2$), alcançando o equilíbrio térmico. Quando a diferença de temperaturas entre um corpo e o meio não é grande, o calor transferido na unidade de tempo, por condução, convecção e radiação é proporcional à diferença de temperatura entre o corpo e o meio.

Conforme Lienhard IV e Lienhard V (2002), para a análise de um corpo aquecido, no qual se possa admitir uma simplificação, assumindo a mesma temperatura T_1 em todos os seus pontos, se um agente refrigerante, com temperatura T_2 ($T_2 \ll T_1$), encontrar esse corpo, haverá circulação de energia térmica do mais quente para o mais frio. Observações experimentais indicam que a corrente térmica estabelecida, isto é, a quantidade de calor transferida do mais quente para o mais frio por unidade de tempo, dQ/dt , é proporcional à diferença de temperaturas ($T_1 - T_2$) entre a massa e o refrigerante aplicado, tal como descrito pela equação 27.

$$\frac{dQ}{dt} = h S (T_1 - T_2) \quad (27)$$

Assim, considerando (i) a massa de carvão um reservatório finito de calor, (ii) o vapor um reservatório infinito, (iii) que a temperatura (T_1) irá variar, (iv) que a temperatura (T_2) do vapor ficará constante com o tempo, e (v) haverá estratificação térmica da massa de carvão em subcamadas com espessura Δx , quanto maior a diferença de temperatura ($\Delta T = T_1 - T_2$), quando da aplicação do vapor na massa de carvão, maior será a troca de calor entre a massa e o vapor. Ressalta-se que a transferência de uma quantidade infinitesimal de calor dQ da massa de carvão ao vapor é igual ($\Delta T - (C\Delta T)$), em que (i) ΔT é a variação de temperatura na subcamada de carvão que transfere este calor e (ii) C é a capacidade calorífica ou capacitância térmica do carvão em perder ou ganhar calor, pode-se, após a análise de um balanço de energia, reescrever a equação 27 da seguinte forma:

$$\frac{dT}{(T_1 - T_2)} = - \left(\frac{1}{\tau} \right) dt \quad (28)$$

em que $\tau = C/(h S)$ é o tempo necessário para atingir o equilíbrio térmico.

A equação 28 é uma equação diferencial onde a variável do primeiro membro é a temperatura (T_1), da massa de carvão, e a variável do segundo membro é o tempo (t) de resfriamento. Admitindo-se que em $t = t_0$ a temperatura do sistema seja t_0 e integrando o primeiro membro da equação 28 de t_0 a t e o segundo membro de t_0 até um instante t , tem-se:

$$T = T_1 + (T_0 - T_1) \exp \frac{-(t - t_0)}{\tau} \quad (29)$$

Conforme Lienhard IV e Lienhard V (2002), e considerado neste estudo, a modelagem da transferência de calor em regime transiente é unidirecional, isto é, assume-se temperatura uniforme em cada volume da subcamada de carvão (T_1). Fazendo um balanço térmico para uma subcamada 1, de massa de carvão de espessura Δx , que perdeu calor e é mantida à temperatura T_a , e para outra subcamada 2 de massa de carvão de mesma espessura Δx , logo abaixo, com temperatura T_b , e que é exposta a um fluxo de vapor d'água com temperatura T_2 , tem-se:

$$\frac{k S}{\Delta x} (T_a - T_b) = h S (T_b - T_2) \quad (30)$$

ou

$$\frac{(T_a - T_b)}{(T_b - T_2)} = \frac{\frac{\Delta x}{k S}}{\frac{1}{h S}} = \frac{R_{\text{condução}}}{R_{\text{convecção}}} = \frac{h \Delta x}{k} = Bi \quad (31)$$

em que

T_a	- Temperatura da superfície da subcamada 1,	K;
T_b	- Temperatura da superfície da subcamada 2,	K;
$R_{\text{condução}}$	- Resistência à condução térmica,	K/W;
$R_{\text{convecção}}$	- Resistência à convecção térmica, e	K/W;
Bi	- Número de Biot (razão entre o coeficiente de transferência convectiva e a condutância específica do sólido).	adimensional.

O número de Biot, neste estudo, expressa a razão entre as resistências interna (condução) e externa (convecção), e dá a medida da variação térmica na massa de carvão relativo à diferença de temperatura entre a superfície da massa de carvão e o vapor d'água. Se: (i) $Bi \ll 1$ é razoável assumir uma distribuição de temperatura uniforme na massa de carvão de espessura Δx , em qualquer tempo durante o processo transiente. ($T(\Delta x, t) \approx T(t)$);

(ii) aumentando-se o valor do Bi, o gradiente de temperatura dentro da massa de carvão é significativo; (iii) $Bi \gg 1$ o gradiente de temperatura na massa de carvão é muito maior que entre a massa de carvão e o vapor d'água.

A taxa de perda de calor em um volume da massa de carvão ($V_{\text{massa carvão}}$) através de uma superfície de seção S, devido à aplicação do vapor, é igual à taxa de variação da energia interna, definida pela equação 32.

$$-E_{\text{termica retirada}} = E_{\text{termica armazenada}} \quad (32)$$

ou

$$\left(-h S (T_i(t) - T_1)\right) = \rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{carvão} \left(\frac{dT(t)}{dt}\right) \quad (33a)$$

$$\left(-h S (T(t) - T_1)\right) = \rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{carvão} \left(\frac{dT(t)}{dt}\right) \quad (33b)$$

Pode-se definir:

$$\theta_i(t) = (T_i(t) - T_1) \quad (34a)$$

$$\theta(t) = (T(t) - T_1) \quad (34b)$$

Substituindo as equações 34 em 33, respectivamente, tem-se que:

$$\left(\frac{\rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{carvão}}{h S}\right) = \ln\left(\frac{\theta_i}{\theta}\right) \quad (35)$$

Essa equação pode ser usada para calcular a temperatura da massa de carvão em qualquer tempo t.

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \left(\frac{T(t) - T_1}{T_i - T_1}\right) = \left[\exp\left(-t \frac{h S}{\rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{carvão}}\right)\right] \quad (36)$$

O termo $\left(\frac{h S}{\rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{carvão}}\right) = \frac{1}{\tau}$, em que τ é a constante de tempo térmica,

pode ser substituído na equação 36, obtendo-se:

$$\left(\frac{\theta_i}{\theta}\right) = \frac{T(t) - T_1}{T_i - T_1} = \exp\left(-t \frac{1}{\tau}\right) \quad (37)$$

Utilizando-se da analogia com circuitos elétricos, em que a constante de tempo é o produto da resistência elétrica pela capacitância elétrica encontrada em um dado circuito elétrico, e considerando $\left(\frac{1}{h S}\right) = R$ (onde R é a resistência à transferência de calor por convecção) e $\rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{ carvão} = C$ (C é a capacitância térmica da massa de carvão) então $\tau = R C$. Aumentando-se o valor de R ou de C , a massa de carvão responderá mais lentamente às mudanças térmicas do meio e, desta forma, aumentará o tempo para se atingir o equilíbrio térmico.

A energia total transferida Q , durante a fase de resfriamento, é dada por:

$$Q = \int_0^t Q dt = h S \int_0^t \theta dt \quad (38)$$

Substituindo θ na equação 39, resulta em:

$$Q = h S \int_0^t \theta_i \exp\left(-t \frac{h S}{\rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{ carvão}}\right) dt \quad (39)$$

ou

$$Q = \rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{ carvão} \theta_i \left(1 - \exp\left(-t \frac{h S}{\rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{ carvão}}\right)\right) \quad (40)$$

O mesmo raciocínio, segundo Incropera et al. (2008), leva a inferir que a condução transiente é o processo no qual a massa do carvão sofre alteração em sua temperatura, ou seja, considerando a massa do carvão em fase final de carbonização, em uma temperatura (T_1) e que é resfriada por uma massa de um agente refrigerante (vapor d'água) de temperatura (T_2).

Se o resfriamento foi iniciado em tempo $t = 0$, a temperatura do corpo (carvão) irá diminuir para um tempo $t > 0$, até que alcance, por fim, a temperatura do agente refrigerante (vapor d'água), estabelecendo um equilíbrio térmico entre ambas. Essa redução de temperatura é devida à transferência de calor por convecção na interface corpo-agente refrigerante (carvão-vapor d'água). A essência desse método é a consideração de que a

temperatura da massa de carvão é espacialmente uniforme em qualquer instante durante a transferência de calor, ou seja, ocorrerá troca de calor por convecção da massa de carvão com o vapor, sem que haja geração de calor e nem alteração da massa de carvão. Matematicamente, resulta:

$$\rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{ carvão} \frac{dT_1}{dt} = -h S (T_1 - T_2) \Rightarrow$$

$$\frac{\rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{ carvão}}{h S} \frac{dT_1}{dt} = -(T_1 - T_2) \Rightarrow$$

$$\frac{dT_1}{dt} = -\left(\frac{1}{\tau}\right)(T_1 - T_2) \quad (41)$$

Assim, chega-se à temperatura de equilíbrio, sendo τ a constante de tempo calculada por:

$$\tau = \left(\frac{\rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{ carvão}}{h S} \right) \quad (42)$$

Observa-se que com o aumento da inércia térmica (definida pelo produto $\rho V_{\text{massa carvão}} C_p \text{ carvão}$), altera-se (neste caso, aumentando-se) o tempo para atingir o regime permanente, o que é razoável. Como isso não dá para ser feito, na prática, o que se faz é esperar e deixar que a própria inércia térmica se encarregue de estabelecer o equilíbrio térmico entre massa de carvão e vapor. Assim, o cálculo da taxa de transferência de calor por convecção até um instante t é dado por:

$$Q = \int_0^t Q_{\text{convecção}} dt \Rightarrow Q = h S \int_0^t (T_1 - T_2) dt \quad (43)$$

Substituindo a equação 42 na equação 43, e integrando, resulta em:

$$Q = \rho V_{\text{massa carvão}} c_p \text{ carvão} (T_1 - T_2) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (44)$$

Quanto maior a condutividade térmica e menor a espessura da subcamada de carvão, delineado na Figura 10, menor será a resistência à condução no seu interior em comparação com a resistência térmica à convecção entre a subcamada e o vapor d'água, conseqüentemente, a distribuição de temperatura será mais uniforme e, assim, menor o índice de Biot para o sistema. A variação de energia no fluxo de vapor é, aproximadamente, igual à taxa de transferência de calor entre a superfície da subcamada de carvão e o vapor, resultando na equação 45:

$$m_{\text{vapor}} C_p \text{ vapor} (T_S - T_{S+1}) = S \Delta x (T - T_b) \quad (45)$$

em que

- T_b - Temperatura no interior da subcamada de carvão, K;
- T_S - Temperatura da superfície superior da subcamada, K;
- T_{S+1} - Temperatura da superfície inferior da subcamada. K e
- Δx - Espessura da subcamada m.

Como a temperatura nas subcamadas de carvão, durante a aplicação do vapor, não é constante, utiliza-se o equacionamento do balanço de energia para se conhecer a verdadeira distribuição térmica. A Figura 10 representa um bloco de volumes de controle, útil no cálculo do balanço de energia térmica.

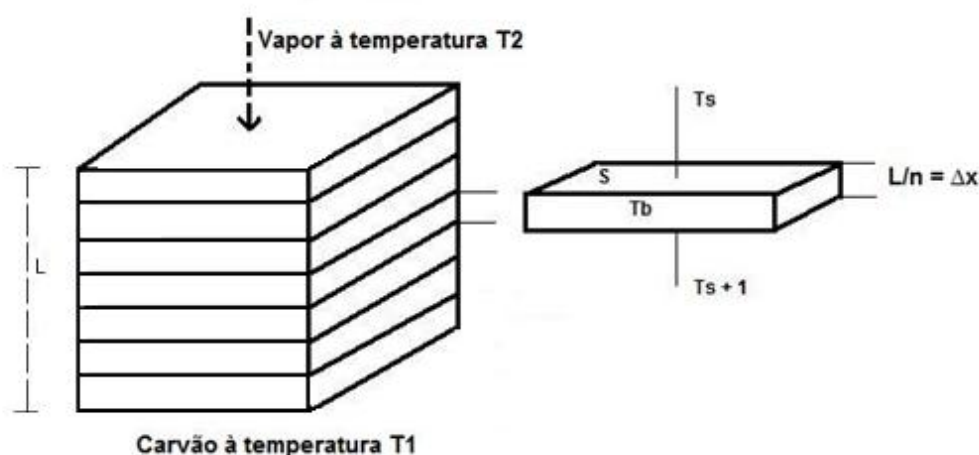


Figura 10 – Bloco de massa de carvão de altura L , subdividida em n camadas.

O balanço de energia na seção de área S e espessura Δx da subcamada considerada como volume de controle, é apresentado na equação 46.

$$(\rho_{\text{carvao}} S \Delta x) (1 - \varepsilon) C_p \text{ carvao} \left(\frac{dT_{\Delta x}}{dt} \right) \Big|_{\Delta x} = m_{\text{vapor}} C_p \text{ vapor} (T_s - T_{s+1}) \quad (46)$$

em que

- ε - fração de vazios no interior da massa de carvão, adimensional;
- $dT_{\Delta x}$ - variação de temperatura na subcamada de carvão. K.

Sendo T_b a temperatura na subcamada de espessura Δx e desenvolvendo a equação 46, chega-se a:

$$T_{b(T+\Delta T)} = T_{b(T)} + \left[\frac{m_{\text{vapor}} C_p \text{ vapor} (T_s + T_{s+1})}{(\rho S \Delta x) (1 - \varepsilon) C_p \text{ carvao}} \right] \quad (47)$$

Considerando a massa de carvão contida no interior do envelope construtivo do forno como uma estrutura tridimensional com x metros de comprimento, y de altura e z de largura, assim, o equacionamento matemático da distribuição térmica³⁴ no corpo da massa se processa tal como mostrado na Figura 11.

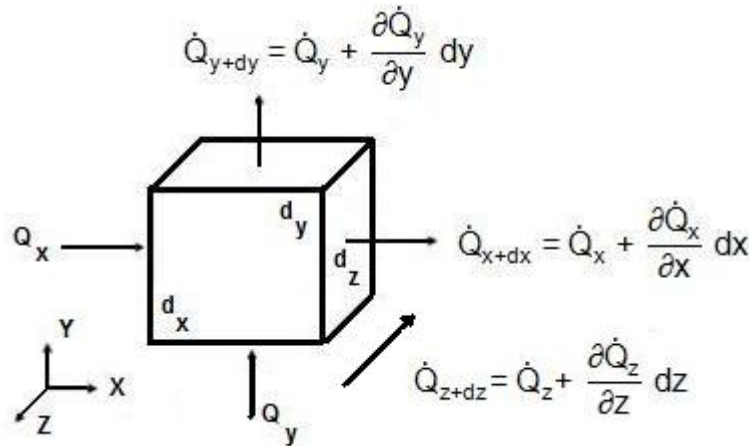


Figura 11 - Distribuição térmica tridimensional em um volume de controle de referência, nas direções x e y .

Portanto, tem-se:

$$Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sai}} = - \left(\frac{\partial Q_x''}{\partial x} dy dz dx \right) - \left(\frac{\partial Q_y''}{\partial y} dx dz dy \right) - \left(\frac{\partial Q_z''}{\partial z} dy dx dz \right) \quad (48)$$

³⁴ Mas no caso da etapa de resfriamento do envelope construtivo, sem rachaduras em sua estrutura, não haverá fluxo de calor para o interior da estrutura, podendo-se desconsiderar o item d_z . Situação difícil de acontecer na prática.

Com base na Lei de Fourier, obtém-se:

$$\vec{Q} = -K \Delta T \quad (49)$$

$$\vec{Q} = -\text{div} (k \Delta T) = \nabla (k \Delta T) \quad (50)$$

$$d\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (51)$$

Segundo Incropera et al. (2008), a Figura 11, define um volume de controle diferencial, onde se identifica os processos de transferência de energia relevantes e onde, também, pode-se substituir as equações das taxas de transferência de calor apropriadas. O resultado é uma equação diferencial cuja solução, para condições especificadas, fornece a distribuição de temperaturas no meio sob estudos. Isto é, a Figura 11 pode ser usada para representar um meio homogêneo, no interior do qual, não há variação térmica e a distribuição de temperaturas $T(x,y,z)$ será representada por coordenadas cartesianas. Se houver um gradiente de temperatura, haverá transferência de calor por condução através de cada uma das superfícies que delimitam e compõem o meio. As taxas de transferência de calor por condução perpendiculares a cada uma das superfícies, na posição de coordenadas x , y e z , são indicadas por q_x , q_y e q_z , respectivamente. As taxas de transferência de calor por condução nas superfícies opostas, podem ser expressas como uma expansão da série de Taylor na qual, desprezando-se os termos de ordem superior, tem-se:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (52a)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (52b)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (52c)$$

A equação 52a indica que o componente x da taxas de transferência de calor na posição $(x + dx)$ é igual ao valor desse componente em x , somada à quantidade, pela qual, ele varia com x multiplicado por dx . O mesmo raciocínio se aplica às equações 52b e 52c.

Assim, o fluxo de calor em qualquer direção, no forno e na massa de carvão sob resfriamento, pode ser definido como um vetor representado por:

$$\vec{Q}'' = Q_x'' \vec{X} + Q_y'' \vec{Y} + Q_z'' \vec{Z} \quad (53)$$

em que

$$Q_x'' = -k \frac{dT}{dx}; \quad Q_y'' = -k \frac{dT}{dy}; \quad Q_z'' = -k \frac{dT}{dz} \quad (54)$$

Agora, considerando que a massa de carvão seja uniforme, pode-se inferir que a quantidade de calor que entra (calor retirado da massa de carvão para a massa de vapor) e o calor que sai (calor adicionado ao vapor, que o torna superaquecido), durante o resfriamento, como:

$$Q_{entra}^* = Q_x'' dy dz + Q_y'' dx dz + Q_z'' dx dy \quad (55)$$

$$Q_{sai}^* = Q_{x+dx}'' dy dz + Q_{y+dy}'' dx dz + Q_{z+dz}'' dx dy \quad (56)$$

Se houver alguma alteração na estrutura do envelope construtivo de forma que possibilite a entrada de ar, favorecendo o re-acendimento da massa de carvão, pode-se, agregar uma de fonte de energia, associado-a à taxa de geração interna de energia térmica, o que pode ser representado por:

$$Q_{agregado} = \left(q^* dx dy dz \right) \quad (57)$$

em que $\left(q^* \right)$ é a taxa de calor por unidade de volume que foi agregada pelo comburente em

contato com a massa de carvão, em W/m^3 .

Segundo Incropera et al. (2008), além desse efeito, podem, também, ocorrer variações na quantidade de energia térmica interna armazenada pela matéria, no interior do volume de controle. Na ausência de mudança de fase, os efeitos da energia latente não são significativos, de forma que o termo acúmulo de energia pode ser representado por:

$$Q_{armazenado}'' = \rho C_{p\text{carvao}} \frac{\partial T}{\partial t} (dx dy dz) \quad (58)$$

em que $\rho C_{p\text{carvao}} \frac{\partial T}{\partial t}$ é a taxa de variação da energia térmica com o tempo, por unidade de volume da massa de carvão.

A forma geral da exigência de conservação de energia é representada por:

$$E_{\text{entra}} + E_{\text{agregada}} - E_{\text{sai}} = \dot{Q}_{\text{armazenada}} \quad (59)$$

Como as taxas de transferência de calor por condução constituem a entrada de energia, E_{entra} , energia agregada devido a rachaduras no envelope construtivo, E_{agregada} e a saída de energia, E_{sai} , e substituindo as equações 57 e 58 na equação 59, tem-se:

$$q_x + q_y + q_z + \left(\dot{q} \, dx \, dy \, dz \right) - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho C_{p\text{carvao}} \frac{\partial T}{\partial t} (dx \, dy \, dz) \quad (60)$$

Substituindo as equações 52 na equação 60, tem-se:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \right) dx - \left(\frac{\partial q_y}{\partial y} \right) dy - \left(\frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dz + \left(\dot{q} \, dx \, dy \, dz \right) = \rho C_{p\text{carvao}} \frac{\partial T}{\partial t} (dx \, dy \, dz) \quad (61)$$

As taxas de transferência de calor por condução podem, assim, ser calculadas pela lei de Fourier, como:

$$q_x = -k \, dy \, dz \, \frac{\partial T}{\partial x} \quad (62a)$$

$$q_y = -k \, dx \, dz \, \frac{\partial T}{\partial y} \quad (62b)$$

$$q_z = -k \, dx \, dy \, \frac{\partial T}{\partial z} \quad (62c)$$

Substituindo as equações 62 na equação 61, resulta em:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q^* = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (63)$$

A equação 63 postula que, “em qualquer ponto do meio, a taxa líquida de transferência de energia por condução para o interior de um volume unitário, somada à taxa volumétrica de geração de energia térmica deve ser igual à taxa de variação da energia térmica acumulada no interior desse volume.”

Segundo Incropera et al.(2008), a equação 63, é a forma geral, em coordenadas cartesianas, da equação de difusão de calor em um meio. Essa equação fornece o ferramental para a análise da condução de calor, base para a obtenção da distribuição de temperaturas $T(x,y,z)$ em função do tempo. A parcela $\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$ está relacionada ao fluxo líquido de calor por condução para o interior do volume de controle, na direção da coordenada x , o mesmo raciocínio se aplica às outras coordenadas. Assim, multiplicar-se por dx , resulta em:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx = q''_x - q''_{x+dx} \quad (65a)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy = q''_y - q''_{y+dy} \quad (65b)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz = q''_z - q''_{z+dz} \quad (65c)$$

2.4.2. A discretização da evolução térmica

O objetivo da análise térmica em um corpo é determinar o campo de temperatura em um meio resultante das condições impostas em suas fronteiras. Desta forma a distribuição de temperatura, que representa como a temperatura do meio varia com a posição (ou marcha da carbonização ou marcha do resfriamento). Uma vez que a distribuição de temperaturas seja conhecida, o fluxo de calor por condução em qualquer ponto de um meio ou em sua superfície pode ser estimado pela lei de Fourier. Neste caso define-se um volume de controle diferencial, identifica-se os processos relevantes de transferência de energia e introduz-se as equações apropriadas das taxas de transferência de calor. Isto resulta em

uma equação diferencial cuja solução, para as condições de contorno estabelecidas, fornece a distribuição de temperatura no meio (INCROPERA et al., 2008). Assim, a partir de uma equação que caracteriza um dado volume de controle, pode-se fazer a integração, no tempo e no espaço, da equação diferencial do volume de controle ou fazer o balanço de energia no referido volume.

Segundo Maliska (2004), e adaptando ao presente trabalho, como o volume do domínio, ou seja, o ponto central do forno (C) apresenta a condução de calor nas fronteiras mais o calor gerado internamente, o ponto de partida para a discretização da equação deste volume pode ser a equação da difusão de calor de Fourier representada pela equação 66.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_x}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_y}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_z}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q^* = \frac{\partial (\rho T)}{\partial t} \quad (66)$$

em que q^* é a taxa de geração de calor interna (caso haja infiltração de comburente e reacenda a massa de carvão) no volume de controle (kJ/h).

Admitindo-se que não haja geração interna de calor no volume de controle e que as propriedades sejam constantes no tempo, tem-se:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (67)$$

Para estabelecer a discretização térmica do envelope construtivo mais o conteúdo de massa de carvão, faz-se, inicialmente, um balanço de energia em nível de um volume de controle interno do forno, tal como mostrado na Figura 12, e para facilitar precisa-se encontrar as equações aproximadas para cada volume de controle no corpo, levando em consideração as suas condições de fronteira. Tomando como referência o sistema de coordenadas cartesiano, pode-se nomear as seis faces do envelope construtivo mais o conteúdo de massa de carvão, da seguinte forma:

- plano xy: Porta de Entrada (PE) e a face Parede do Fundo (PF).
- plano xz: Piso do Forno (PI) e a face Abóboda (ABO).
- plano yz: Parede Lateral com termopares (PLT) e a face Parede Lateral Sem termopares (PLS).
- das paredes laterais do forno no plano YZ: uma parede recebeu o conjunto de termopares para a monitoração térmica e a parede lateral oposta não recebeu

termopares, sendo denominadas, respectivamente, Parede Lateral com termopares (PLT) e Parede Lateral Sem termopares (PLS).

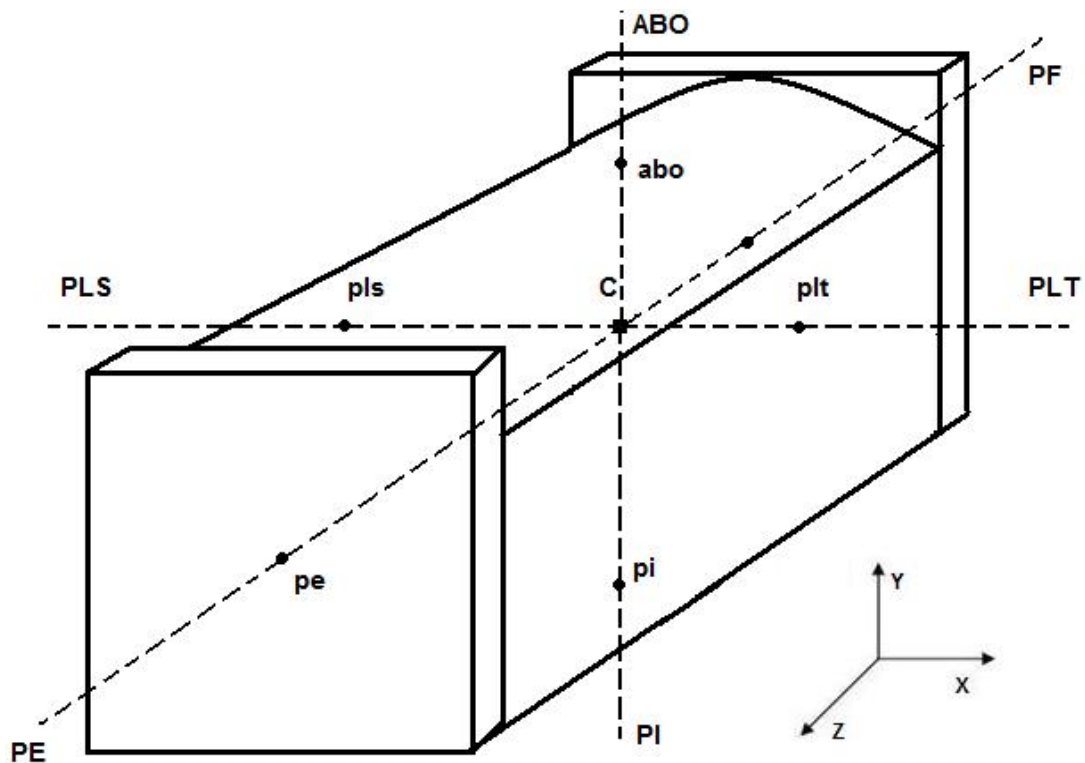


Figura 12 - Discretização térmica, em escala, dos pontos estabelecidos para o forno.

Ao analisar a configuração da Figura 12, pode-se destacar os pontos *pe*, *pf*, *pi*, *abo*, *plt* e *pls*, que são os pontos centrais dos volumes de controle adjacentes. E também o ponto *C*, que representa o ponto central do volume do forno. Assim posto, tem-se um total de 33 (trinta e três) volumes de controle, em escala com o volume real do envelope construtivo, com condições de fronteira diferentes nas faces, ou seja, condução ou convecção, conforme mostrado na Figura 13, que organiza a distribuição dos volumes de controle dentro do forno, conforme a posição estabelecida a partir do sistema de coordenadas XYZ, isto é, variando os valores de *x* e *y* de 1,2,3, e *z* de 1,2,3,4, ou seja, o Volume (1,1,1) até o Volume (3,3,4).

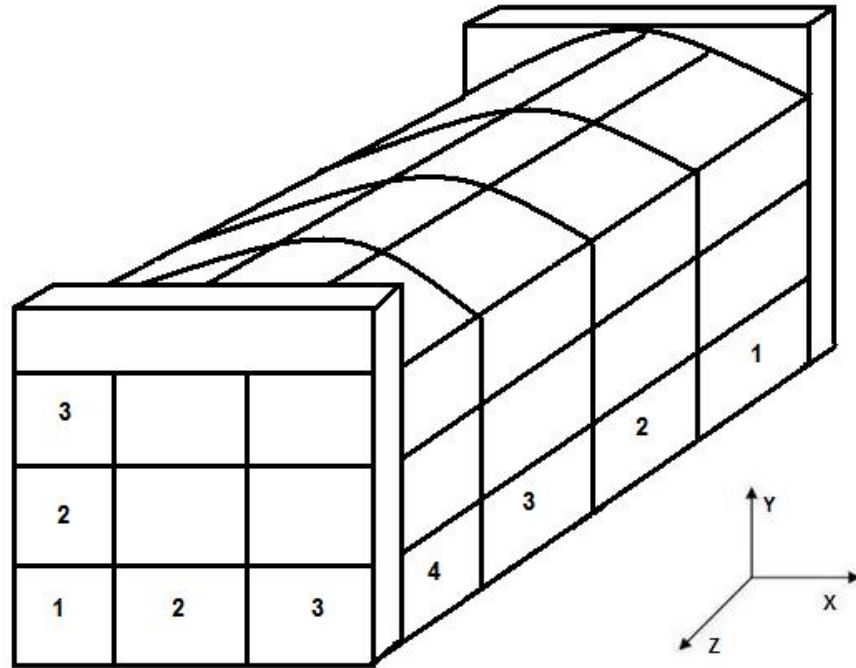


Figura 13 - Discretização volumétrica, em escala, do forno.

Para se estabelecer a discretização da equação do volume de controle do domínio e para todos os outros volumes da fronteira foi utilizado o processo do balanço de energia no volume de controle. Então, para a análise da variação de energia no volume de controle, pode-se escrever essa variação na equação 67 através da representação dos fluxos de condução de calor nas faces do volume de controle. Tem-se a equação do balanço térmico em um ponto:

$$q_{plt}^{cond} - q_{pls}^{cond} + q_{pe}^{cond} - q_{pf}^{cond} + q_{abo}^{cond} - q_{pi}^{cond} = C_{p\text{carvao}} \left(\frac{\partial(\rho T \Delta x \Delta y \Delta z)}{\partial t} \right) \quad (68)$$

em que

- q_{plt}^{cond} - Taxa de transferência de calor por condução na face "plt"³⁵. W/m²
Plano ZX.
- q_{pls}^{cond} - Taxa de transferência de calor por condução na face "pls". W/m²
Plano ZX.
- q_{pe}^{cond} - Taxa de transferência de calor por condução na face "pe". W/m²
Plano XY.
- q_{pf}^{cond} - Taxa de transferência de calor por condução na face "pf". Plano XY.

³⁵ Os índices plt, pls, pe, pf, abo e pi são mostrados na Figura 12.

- q_{abo}^{cond} - Taxa de transferência de calor por condução na face “abo”. W/m²
Plano YZ.
- q_{pi}^{cond} - Taxa de transferência de calor por condução na face “pi”. Plano YZ W/m²

O sinal positivo na equação 68 representa a quantidade de energia que entra no volume de controle e o sinal negativo representa a quantidade de energia que sai dele. O mesmo raciocínio pode ser melhor interpretado, considerando as temperaturas nos volumes de controle adjacentes e no ponto central do volume do forno em estudo, ou seja, o ponto central recebe, ou encara, o calor de frente e o lado oposto dissipa este calor recebido. Conforme esquematizado na Figura 13, pode-se calcular as derivadas, considerando a aproximação da derivada central.

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_i = \frac{T(x_i + \Delta x) - T(x_i - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (71)$$

em que T é função da temperatura.

Esta aproximação é a de menor erro, por isso, a derivada segunda também é aproximada por uma derivada central, escrita por:

$$\left. \frac{d^2 T}{dx^2} \right|_i = \frac{T_{i+1} + T_{i-1} - 2T_i}{\Delta x^2} \quad (72)$$

Reescrevendo a equação 66, substituindo os fluxos de calor, mostrados na Figura 12, aproximados na equação do balanço de energia e fazendo o segundo membro da equação 66 variar no tempo e $\dot{q} = 0$ (isto é, não há vazamento na estrutura do envelope construtivo), e considerando o envelope construtivo mais massa de carvão como um corpo todo, tem-se:

$$\begin{aligned} & -\left. \frac{k\Delta y\Delta z}{c_p\delta x} \right|_{plt} (T_C - T_{PLT}) + \left. \frac{h\Delta y\Delta z}{c_p} \right|_{pls} (T_\infty - T_C) - \left. \frac{k\Delta x\Delta y}{c_p\delta z} \right|_{pe} (T_C - T_{PE}) + \left. \frac{h\Delta x\Delta y}{c_p} \right|_{pf} (T_\infty - T_C) - \\ & \left. \frac{k\Delta x\Delta z}{c_p\delta y} \right|_{abo} (T_C - T_{ABO}) + \left. \frac{h\Delta x\Delta z}{c_p} \right|_{pi} (T_\infty - T_C) = \frac{\rho\Delta x\Delta y\Delta z}{\Delta t} T_C - \frac{\rho\Delta x\Delta y\Delta z}{\Delta t} T_C^0 \end{aligned} \quad (73)$$

em que

T_C - Temperatura no ponto central do volume do forno, K;

T_C^0	- Temperatura no ponto central no volume do forno instante inicial	K;
T_{PLT}	- Temperatura no ponto central no volume de controle parede lateral com termopares,	K;
T_{PLS}	- Temperatura no ponto central no volume de controle parede lateral sem termopares,	K;
T_{PE}	- Temperatura ponto central - volume de controle parede porta de entrada,	K;
T_{ABO}	- Temperatura no ponto central no volume de controle abóboda,	K;
T_∞	- Temperatura ambiente.	K;

O sinal positivo na equação 73 representa a quantidade de energia térmica da massa de carvão e o sinal negativo representa a quantidade de energia que o volume de vapor retira da massa de carvão. A equação reorganizada a partir de uma nova formulação apresenta o formato:

$$AC T_C = A_{plt} T_{PLT} + A_{pe} T_{PE} + A_{abo} T_{ABO} + D \quad (74)$$

em que:

$$AC = A_{plt} + A_{pls} + A_{pe} + A_{pf} + A_{abo} + A_{pi} + M^* \quad (75a)$$

$$D = A_{pls} T_\infty + A_{pf} T_\infty + A_{pi} T_\infty + M T_C^0 \quad (75b)$$

$$\dot{M} = \frac{\rho \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (75c)$$

$$A_{plt} = \frac{k \Delta y \Delta z}{cp \delta x} \Big|_{plt} \quad (75d)$$

$$A_{pls} = \frac{h \Delta y \Delta z}{cp} \Big|_{pls} \quad (75e)$$

$$A_{pe} = \frac{k \Delta x \Delta y}{cp \delta z} \Big|_{pe} \quad (75f)$$

$$A_{pf} = \frac{h \Delta x \Delta y}{cp} \Big|_{pf} \quad (75g)$$

$$A_{abo} = \frac{k\Delta x\Delta z}{cp\delta z} \Big|_{abo} \quad (75h)$$

$$A_{pi} = \frac{h\Delta x\Delta z}{cp} \Big|_{pi} \quad (75i)$$

2.4.3. O resfriamento do forno e da massa de carvão

Segundo Yannas e Maldonado (1995), para a análise dos sistemas de carbonização utilizando resfriamento a vapor, devido ao fato de se armazenar calor na estrutura do forno e na massa de carvão funciona como um dissipador de calor, evitando a oscilação e picos térmicos por insolação durante o dia e estabelecendo uma dissipação do calor mais eficiente à noite, é necessário identificar e controlar a inércia térmica³⁶ da estrutura em estudo.

Para que o estudo de trocas de calor seja realizado com maior precisão, utiliza-se um recipiente fechado incapaz de trocar calor com o ambiente e com seu interior. Assim, os agentes (carvão e vapor) trocam calor até atingir o equilíbrio térmico. Considerando que os agentes não trocam calor com o forno e nem com o meio em que se encontram, toda a energia térmica passa de um agente ao outro.

Quando um sistema com massa grande é colocado em contato com um sistema com massa pequena que está em diferente temperatura, a temperatura de equilíbrio resultante está próxima à do sistema grande. Ao absorver calor ($Q > 0$) e ao transmitir calor ($Q < 0$), a soma de todas as energias térmicas é nula, ou seja:

$$\sum Q = 0 \text{ ou } Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = 0 \quad (76)$$

2.4.5. Balanço termo-energético do forno

O balanço termo-energético do forno, princípio segundo o qual a quantidade de calor fornecida a um sistema é igual àquela retirada, seja ela utilizada ou perdida, pode ser,

³⁶ Inércia térmica é a capacidade de um corpo em armazenar e liberar calor. Um material com baixa inércia mantém mínima a variação da temperatura externa e, com inércia infinita, a temperatura interna permanecerá constante. A necessidade de grande inércia térmica aumenta quanto maior a variação da temperatura externa, radiação solar e, ou, ganhos de calor. A razão entre o calor absorvido e o calor nos materiais, depende da capacidade térmica do material. A capacidade térmica por unidade de superfície é o produto da densidade, espessura e calor específico dos componentes. A capacidade térmica dos componentes é, quase completamente, dependente da massa da estrutura. Relacionados à inércia térmica, têm-se os parâmetros: (i) atraso térmico e (ii) capacidade de amortecimento térmico (YANNAS e MALDONADO, 1995). No presente estudo, a massa térmica do forno está contida em paredes, piso e teto, constituídos de material de grande capacidade térmica, como concreto, tijolos e argamassas.

também, verificado com base em todas as formas de energia que entram no forno e todas as energias perdidas ou gastas durante a carbonização, incluindo até o resfriamento a vapor. Por isto, todo balanço energético tem suas particularidades. A equação do balanço é sempre elaborada para um dado intervalo de tempo (VLASSOV, 2005). Dentre elas foram eleitas as mais importantes ou mais significativas para o cálculo. A equação do balanço foi adaptada de Carzino (2006), para este estudo, e é:

$$Q_f + Q_1^{\text{inicial}} + Q_{\text{suple}}^{\text{inicial}} + Q_{\text{exo}} = Q_1^{\text{final}} + Q_{\text{gas escape}} + Q_{\text{estrutura}} + Q_{\text{suple}}^{\text{final}} + Q_{\text{endo}} \quad (77)$$

em que

Q_f	- calor fornecido pela lenha,	kJ;
Q_1^{inicial}	- calor da massa lenha que entra no forno,	kJ;
$Q_{\text{suple}}^{\text{inicial}}$	- calor suplementar fornecidos para a ignição,	kJ;
Q_{exo}	- calor fornecido pelas reações exotérmicas na carbonização,	kJ;
Q_1^{final}	- calor do carvão pronto,	kJ;
$Q_{\text{gas escape}}$	- calor perdido pelos gases de escape,	kJ;
$Q_{\text{estrutura}}$	- calor perdido para o ambiente pela estrutura do forno,	kJ;
$Q_{\text{suple}}^{\text{final}}$	- calor suplementar retirado do forno,	kJ; e
Q_{endo}	- calor perdido pelas reações endotérmicas.	kJ.

Nesse cálculo, e com base nos mesmos autores, não foi considerado a quantidade de calor devida à carbonização incompleta (geração dos tiços).

Já o calor gerado pela lenha, para iniciar o aquecimento do forno até atingir a temperatura ideal de ignição e iniciar a carbonização é dado por:

$$Q_{\text{combustível lenha}} = B \left(Q_c + Q_{\text{lenha}} + Q_{\text{ar quente}} \right) \tau \quad (78)$$

em que: B é o consumo, ou a quantidade de combustível (lenha) utilizado para se atingir as condições necessárias e suficientes para que o envelope construtivo se aqueça e mantenha uma temperatura ideal para a ignição e manutenção da carbonização da massa de lenha em kg/s. o índice Q_c é o calor físico do combustível, calculado por:

$$Q_c = (c_c + t_c) \quad (79)$$

em que

c_c - Calor específico médio da lenha utilizada kJ/kgK

t_c - Temperatura inicial do combustível K

O calor físico do ar quente pode ser calculado por:

$$Q_{\text{ar quente}} = \alpha \left(V_{\text{ar}}^0 c_{p \text{ ar}} \Delta t \right) \quad (80)$$

em que

α -

V_{ar}^0 - Volume de ar m^3

C_p - Calor específico médio do ar kJ/m³K

Δt - Diferença de temperaturas entre o ar aquecido e ar ambiente K

O ar aquecido é utilizado para melhorar as condições da carbonização, isto é, prepara melhor a lenha para o processo de ignição e combustão, aumentando e favorecendo o fluxo de calor para as superfícies a serem aquecidas.

O calor da lenha, a ser carbonizada, pode ser definido por:

$$Q_{\text{lenha}} = \rho_{\text{lenha}} m_{\text{lenha}} C_{p \text{ lenha}} T_{\text{lenha}} \quad (81)$$

O calor total do ar comburente necessário pode ser calculado por:

$$Q_{\text{ar comburente}} = \rho_{\text{ar comburente}} m_{\text{ar comburente}} C_{p \text{ ar comburente}} T_{\text{ar comburente}} \quad (82)$$

em que

$Q_{\text{ar comburente}}$ - Calor do ar comburente, kJ;

$c_{p \text{ ar comburente}}$ - Calor específico do ar à pressão constante, kJ/(kg K);

$T_{\text{ar comb}}$ - Temperatura do ar comburente. K.

Assim, para a finalidade esperada desse balanço e adaptado de Carzino (2006), tem-se que a quantidade de calor, $Q_{\text{útil}}$, é aquele teoricamente ideal para uma carbonização ótima e será considerado a relação entre a quantidade de calor real da massa de lenha enforcada e o calor do carvão em fim de processo, dada por:

$$Q_{\text{util}} = Q_{\text{util}}^{\text{carvao}} - Q_{\text{util}}^{\text{lenha enforcada}} \quad (83)$$

Para facilitar o entendimento, pode-se assumir que o calor da massa antes da carbonização, $Q_{\text{util}}^{\text{lenha enforcada}}$, seja igual a:

$$Q_{\text{util}}^{\text{lenha enforcada}} = n_{\text{toras}} m_{\text{toras}} C_p \text{ lenha } T_{\text{forno}} \quad (84)$$

em que

- $Q_{\text{util}}^{\text{lenha enforcada}}$ - Calor da massa de lenha antes da carbonização, kJ;
- n_{toras} - Número de toras colocadas no forno, adimensional;
- m_{toras} - Massa de lenha enforcada, Kg; e
- T_{forno} - Temperatura da câmara na carga da lenha. K.

O mesmo raciocínio pode ser aplicado ao calor gerado pelas reações exotérmicas ($Q_{\text{exotermico}}$)³⁷ que acontecem durante a fase de dessorção dos compostos orgânicos presentes na lenha. Pode ser formado, principalmente, pelo calor cedido à lenha pelas reações que acontecem entre os compostos orgânicos e a água presente nos tecidos devido ao aquecimento progressivo da carbonização. Assim, pode ser definido como:

$$Q_{\text{exotermico}} = m_{\text{lenha}} + n_{\text{toras lenha}} + Q_{\text{dessorção}} + n_{\text{reacoes quimicas}} - \text{dessorcao} \quad (85)$$

em que m_{lenha} é a quantidade da lenha enforcada que foi consumida durante a fase do aquecimento pré-ignição. $n_{\text{reacoes quimicas dessorção}}$ indica o numero de reações de dessorção que acontecem até o sistema se estabilizar, isto é, não ter mais reações exotérmicas de dessorção. Segundo Carzino (2006), a quantidade de calor suplementar $Q_{\text{suplementar}}$ são: (i) o calor residual presente nas paredes do forno, (ii) o calor para a ignição da lenha e (iii) e devido a temperatura do ar comburente que circula no forno. O calor suplementar fornecido no início da carbonização é dado por $Q_{\text{suplementar}}^{\text{inicial}}$ e o calor, retirado no fim da carbonização $Q_{\text{suplementar}}^{\text{final}}$.

³⁷ Esta informação precisa ser verificada em laboratório.

O calor total dissipado pelo envelope construtivo para o ambiente durante a carbonização e na fase do resfriamento, sem reaproveitamento e que pode ser utilizado para co-geração de energia é dado pela equação 91:

$$Q_{\text{total de perdas}} = Q_{\text{conveccao}} + Q_{\text{conducao}} + Q_{\text{radiacao}} + Q_{\text{vaporizacao}} \quad (86)$$

Segundo Carzino (2006), calcula-se os números de Rayleigh³⁸ e de Nusselt³⁹ específicos para cada parede do forno. A partir dessas constantes, pode-se calcular o coeficiente de perda de calor para o ambiente. Tomando como base as paredes laterais (altura H e comprimento L), o número de Rayleigh é, respectivamente:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \left(\frac{1}{\alpha} \right) Q_{\text{exotermico}} = m_{\text{lenha}} + n_{\text{toras de lenha}} + Q_{\text{dessorcao}} + R_{\text{altura H}} =$$

$$= \left(\frac{g \beta (T_{\text{ revesti mento externo}} - T_{\text{ ambiente}}) (\text{altura H})^3}{\alpha V} \right) n_{\text{reacoes quimicas de dessorcao}} \quad (87)$$

$$R_{\text{comprimento L}} = \left(\frac{g \beta (T_{\text{ revesti mento externo}} - T_{\text{ ambiente}}) (\text{comprimento L})^3}{\alpha V} \right) \quad (88)$$

em que

g	- Aceleração da gravidade local,	m/s^2 ;
β	- Coeficiente de expansão volumétrica do ar,	$1/K$;
$T_{\text{ revesti mento externo}}$	- Temperatura da face externa do forno,	K ;
$T_{\text{ ambiente}}$	- Temperatura ambiente,	K ;
altura H	- Altura da parede lateral,	m ;
comprimento L	- Comprimento da parede lateral,	m ;
α	- Difusidade térmica,	m^2/s ; e
V	- Viscosidade cinemática.	m^2/s .

Com os valores do número de Rayleigh (Ra_H), e pode-se determinar o número de Nusselt específico para cada parede de altura H (Nu_H). O número de Nusselt para as faces laterais de altura H, Nu_H , é representado por:

³⁸ Número de Rayleigh (Ra) fornece uma medida da razão entre as forças de inércia e as forças viscosas atuando em um fluido (INCROPERA et al. 2008).

³⁹ Numero de Nusselt (Nu) fornece uma medida do gradiente de temperatura na superfície. (INCROPERA et al. 2008).

$$Nu_H = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \left(\sqrt[6]{Ra_H} \right)}{\left(1 + 16 \sqrt[9]{\left(\frac{0,492}{Pr_{ar}} \right)^9} \right)^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (89)$$

O número de Nusselt para a abóbada do forno ($Nu_{abóboda}$) é dado por:

$$Nu_{abóboda} = 0,15 \sqrt[3]{Ra_{abóboda}} \quad (90)$$

Assim, pode-se calcular o coeficiente de transferência de calor nas paredes laterais e pela abóboda do forno:

$$h_{paredes laterais} = \left(\frac{Nu_H k_{ar}}{H} \right) \quad (91)$$

$$h_{abóboda} = \left(\frac{Nu_L k_{ar}}{L} \right) \quad (92)$$

As quantidades de calor transferido pela parede da porta (parede frontal), pela parede do fundo, pelas paredes laterais, pelo revestimento de fundo e pelo teto do forno podem ser representadas por:

$$Q_{parede frontal} = Q_{parede fundo} = h_{parede lateral} (W H) (T_{revestimento} - T_{ambiente}) \quad (93)$$

$$Q_{paredes laterais} = h_{paredes laterais} (L H) (T_{revestimento} - T_{ambiente}) \quad (94)$$

$$Q_{revestimento fundo} = h_{revestimento fundo} (L W) (T_{revestimento fundo} - T_{ambiente}) \quad (95)$$

$$Q_{abóboda} = h_{abóboda} (L W) (T_{revestimento} - T_{ambiente}) \quad (96)$$

em que

- W - Largura da parede, m;
- H - Altura da parede, m; e

L - Comprimento da parede, m.

Logo, a quantidade de calor total perdido por convecção e condução pelo forno para o ambiente, durante a fase de carbonização, é dado por:

$$Q_{\text{convecção}} = Q_a + Q_b + 2Q_c + Q_d + Q_e \quad (97)$$

em que

- Q_a - Calor perdido por convecção pela parede da frente, kJ;
- Q_b - Calor perdido por convecção pela parede do fundo, kJ;
- Q_c - Calor perdido por convecção pelas paredes laterais, kJ;
- Q_d - Calor perdido por condução pelo piso, kJ; e
- Q_e - Calor perdido por convecção pela abóboda. kJ;

A quantidade de calor total perdido por convecção pelo forno para o ambiente, durante a fase pós-carbonização e com a aplicação de vapor, retirando uma quantidade de calor resiliente, $Q_{\text{pós vapor}}$, pois é demorado e complexo o processo de retirada de calor da massa de carvão com a aplicação de vapor, principalmente quando a temperatura da massa de carvão vai se aproximando da temperatura do vapor aplicado, e é dado por:

$$Q_{\text{convecção}} = Q_a + Q_b + 2Q_c + Q_d + Q_e + Q_{\text{pos vapor}} \quad (98)$$

E a perda de calor pelas faces laterais é igual a:

$$Q_{a+b+c+d+e} = \varepsilon_{\text{alvenaria}} F_{a+b+c+d+e} \sigma (2 H V + 4 L H) \left(T_{\text{revestimento fundo}}^4 + T_{\text{ambiente}}^4 \right) \quad (99)$$

em que

- a - Parede da frente,
- b - Parede do fundo,
- c - Paredes laterais,
- d - Piso,
- e - Abóboda.
- $F_{a+b+c+d+e}$ - Fator de forma dos itens a,b,c,d e e.

Logo a quantidade de calor perdido por condução, por convecção e por radiação para o ambiente pode ser representado, respectivamente, por:

$$Q_{\text{condução}} = Q_{a+b+c+d+e} \quad (100)$$

Dessa forma, por meio do balanço térmico, pode-se determinar a quantidade de calor útil, $Q_{\text{útil}}$, da carbonização (calor que realmente transforma lenha em carvão), e a partir da Lei de Newton para o resfriamento, pode-se chegar ao coeficiente total de transferência de calor da massa de lenha chamado de $h_{\text{total lenha}}$.

$$Q_{\text{util}} = h_{\text{medio lenha}} \cdot n_{\text{toras}} \cdot S_{\text{superficial}} (T_{\text{superficie}} - T_{\text{camara}}) \quad (101)$$

em que

- $S_{\text{superficial}}$ - área superficial da lenha enforcada, m^2 ;
- $T_{\text{superficial}}$ - temperatura na superfície da lenha enforcada, K; e
- T_{camara} - temperatura na câmara do forno, K.

2.4.6. Transferência de calor do envelope construtivo forno à massa de lenha

O coeficiente de transferência de calor total dado pelo envelope construtivo à massa de lenha h_{total} , durante as fases de carbonização e de resfriamento, atrasando-a, é composto por parcelas geradas por: convecção e radiação.

$$h_{\text{total}} = h_{\text{conveccao}} + h_{\text{radiação}} \quad (102)$$

Se for feito o cálculo, utilizando como base a equação 89, pode-se determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção do forno, isto é, o coeficiente total menos a parte transferida por radiação.

$$h_{\text{conveccao}} = h_{\text{tot}} - F_f \cdot \varepsilon_{\text{massa lenha}} \cdot \sigma (T_{\text{superficial}} - T_{\text{camara}}) (T_{\text{superficial}}^2 - T_{\text{camara}}^2) \quad (103)$$

em que F_f é o fator de forma a ser considerado.

Como a temperatura da superfície da massa de carvão varia durante o processo, a parcela transferida do envelope construtivo à massa de carvão varia também, considerando-se a emissividade do carvão constante. É importante frisar que quando se aplica vapor toda

a estrutura está em alta temperatura e a massa de carvão está incandescente, tornando-se necessário retirar calor do envelope construtivo para que, assim, se consiga resfriar com mais facilidade a massa de carvão. O coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser calculado por correlações baseadas na velocidade e na temperatura do vapor que circula na câmara, suas propriedades físicas, a temperatura do carvão e sua forma.

Também pode-se determinar, por meio do coeficiente de transferência de calor por convecção, o número de Nusselt característico para a câmara de carbonização.

$$Nu_{camara\ carboniza\c{a}o} = \left(\frac{h_{convec\c{c}ao} d_{massa\ carvao}}{k_{ar}} \right) \quad (104)$$

2.4.7. O gerador de vapor

O vapor, segundo Perry et al. (1988), pode ser gerado em caldeira pela transferência de calor para a água que, ao absorver suficiente quantidade, muda da fase líquida para a de vapor. A energia consumida na geração do vapor é obtida, geralmente, pela queima de combustíveis e, ou, do reaproveitamento de calor residual de algum processo. A massa de vapor uma vez pronta, o efeito da pressão força o vapor a fluir da caldeira para o sistema de distribuição. Segundo Shields (1982), as partes mais importantes de um sistema de geração são: (i) caldeira; (ii) sistema de alimentação de combustível; (iii) sistema de injeção de ar de combustão; (iv) sistema de alimentação de água; e (v) sistema de tiragem dos gases de exaustão. Esses sistemas formam um conjunto que opera em cascata, pois problemas ou alterações operacionais em um afetam o desempenho dos demais.

2.4.7. Sistema de distribuição de vapor

A função do sistema de distribuição, segundo Nogueira et al. (2005a e 2005b) e Babcock e Wilcox (1985), é transportar o vapor da caldeira, entregando-o em quantidades suficientes, nas pressões e temperaturas adequadas às aplicações de uso final.

Muitos sistemas de distribuição têm diversas linhas de transporte do vapor operando em diferentes pressões, e que são separadas por válvulas de isolamento, reguladoras de pressão e, às vezes, turbinas de contrapressão para estabelecer uma redução da pressão, favorecendo a eficiência energética. O desempenho eficiente de um sistema de distribuição requer balanceamento da pressão do vapor nas linhas, regulação eficaz da pressão, boa drenagem do condensado, perfeita estanqueidade e adequada isolamento térmica.

2.4.8. Eficiência térmica da caldeira

Segundo Avallone e Baumeister (2006) e Perry et al. (1988), o tempo de aquecimento de uma caldeira para geração de vapor d'água pode durar até 10 h, em se tratando de partida a frio. Esse fator requer programação antecipada da operação da unidade, o que impede seu funcionamento imediato em condições emergenciais. Isso pode ser contornado, mantendo-se a caldeira pré-aquecida.

As caldeiras apresentam rendimentos definidos como a relação entre a energia utilizada na transformação da água em vapor e a energia do combustível utilizado, representada pelo seu poder calorífico e pela vazão em massa, ou melhor, a relação entre a quantidade de calor útil e o conteúdo térmico total do combustível queimado.

$$\eta_T = \left(\frac{m_{\text{vapor}} (h_{v_{\text{saída}}} - h_{a_{\text{entrada}}})}{m_{\text{combustível}} \text{ PCI}} \right) \quad (105)$$

em que

η_T	- rendimento da caldeira,	decimal;
m_{vapor}	- vazão em massa de vapor,	kg/h;
$h_{v_{\text{Saída}}}$	- entalpia do vapor na saída da caldeira,	kJ/kg;
$h_{a_{\text{Entrada}}}$	- entalpia da água na entrada da caldeira,	kJ/kg;
$m_{\text{combustível}}$	- massa do combustível utilizada,	kg/h; e
PCI^{40}	- poder calorífico inferior do combustível,	kJ/kg.

2.4.9. Balanço energético na geração de vapor

O conhecimento do balanço energético característico de sistema de geração de vapor, segundo Nogueira et al. (2005b), facilita a identificação das perdas e, ou, possíveis problemas que reduzem a eficiência do sistema e fornecem um ponto de partida para a identificação de oportunidades e de seleção e implementação de ações de melhorias da eficiência. A caracterização de um balanço energético típico de um sistema de geração de vapor é mostrada na Figura 14.

⁴⁰ Poder calorífico - define-se como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa de lenha (JARA, 1989). No Sistema Internacional o poder calorífico é expresso em J/g ou kJ/kg. Segundo Cunha et al. (1989), não há correlação entre densidade básica e o poder calorífico. Entretanto, em relação ao volume de lenha a ser queimada a densidade está positivamente relacionada com o conteúdo calorífico da lenha, estimulando o interesse de lenhas pesadas para a queima.

Poder calorífico é correlacionado com a densidade da madeira, porém sendo amplamente afetado pelo teor de umidade, com o PCI diminuindo com o aumento da umidade (BRIANE e DOAT, 1985). De acordo com Numazawa (2000) a madeira tropical apresenta um poder calorífico da ordem de 17.466 a 21.380 kJ/kg, enquanto segundo Briane e Doat (1985), o carvão de 29.307,6 kJ/kg a 31.401 kJ/kg.

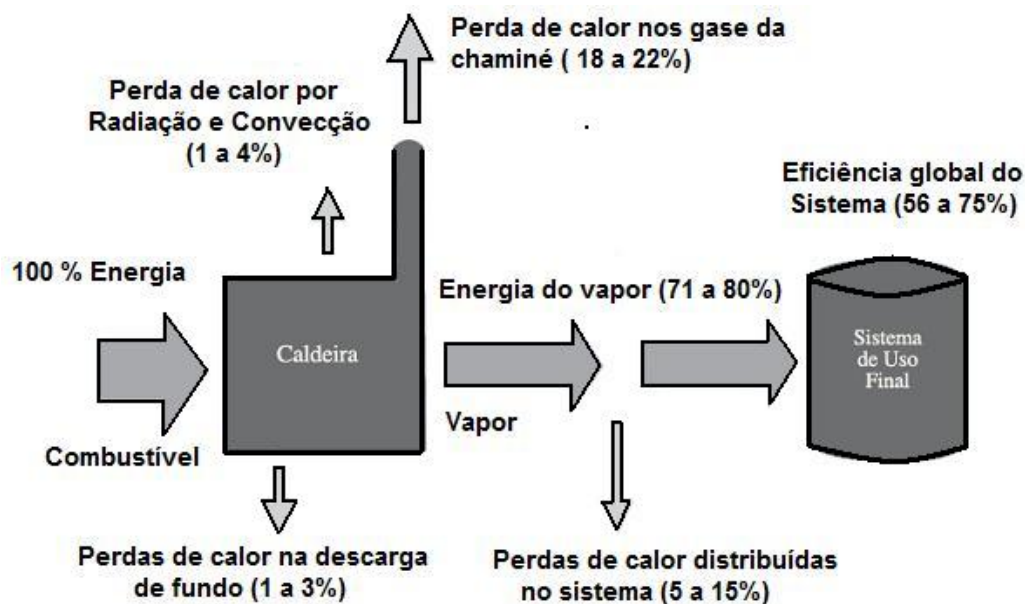


Figura 14 - Diagrama de balanço de energia com as perdas do sistema.

2.5. Implementação de controle eletrônico do processo de produção de carvão vegetal

Segundo Seborg et al. (2003) e Smith e Corripio (2005), para qualquer processo industrial as condições operacionais estão sempre sujeitas a alterações e mudanças ao longo do tempo, e essas condições podem variar. Segundo Luyben (1990), controlar um processo, em termos práticos, significa uma tentativa de influir no processo, ou atuar sobre ele, ou sobre as condições a que o processo está sujeito, de modo a atingir algum objetivo. Pode ser desejável mantê-lo sempre próximo de determinado estado estacionário, mesmo que efeitos externos tentem desviá-lo dessa condição. Esse estado estacionário pode ter sido escolhido por melhor atender aos requisitos de qualidade e segurança do processo e do produto pretendido. Em um sistema de controle devem ser seguidas e respeitadas as seguintes leis: (i) o sistema de controle mais simples que atende aos requisitos é o melhor; e (ii) entender o processo é requisito para poder controlá-lo.

Segundo Smith e Corripio (2005), a atuação de um controlador pode ser representada graficamente como um fluxo de informações entre módulos com funções operacionais e funcionais, eletronicamente distintas. Na Figura 15 apresenta-se, esquematicamente, um módulo de monitoração que recebe informação oriunda do processo e envia ao controlador (tal procedimento pode conter várias etapas, por exemplo, de conversão de sinais). O controlador recebe essa informação, toma decisões e comunica a um elemento final a ação a ser tomada. O elemento final, por sua vez, interfere em alguma condição de processo para tentar alterar o comportamento do processo.

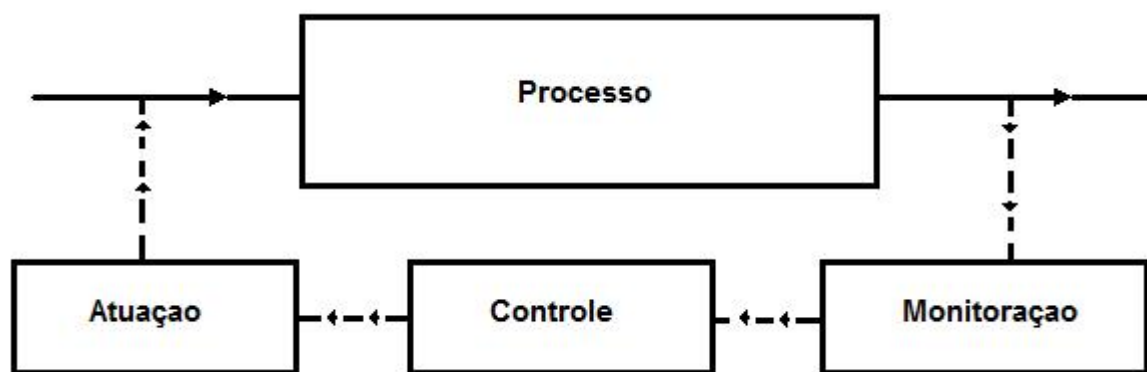


Figura 15 - Diagrama simplificado de um sistema de controle em malha fechada.

Segundo Seborg et al. (2003) e Smith e Corripio (2005), um sistema de controle confiável permite operar próximo aos limites impostos pela segurança, pelo meio ambiente e pelo processo (temperatura máxima, pureza mínima), o que permite alterar as condições de operação normais (linha tracejada na Figura 15) para uma condição mais favorável (linha contínua). O termo sistema refere-se à combinação de vários elementos que interagem entre si, a fim de atingir determinado objetivo. Um circuito desenvolvido para utilização futura está apresentado no Apêndice A.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido nos anos de 2007 e 2008, no Campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG (latitude de 20° 48' 45" S, longitude de 42° 56' 15" W), e dividido em duas fases.

- Fase 1- Realizada na Área de Armazenamento e Pré-Processamento de Produtos Vegetais, no Laboratório de Energias Alternativas para Secagem de Café do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA-UFV), onde foram: (i) avaliado um sistema de carbonização composto por um forno de superfície do tipo Missouri, uma câmara de fumaça, uma fornalha para queima dos vapores, aerossóis e gases efluentes não utilizados da carbonização e um gerador de vapor. Para a avaliação dos resultados foram utilizados os dados obtidos em quatro testes de carbonização, sendo: (a) um teste com a fornalha de queima afastada do forno e sem a aplicação de vapor para resfriamento e (b) três testes com a fornalha de queima próxima ao forno, sendo os três testes divididos em: (1) resfriamento sem a aplicação de vapor; (2) resfriamento com aplicação de vapor, com escoamento do vapor pelas baianas; (3) resfriamento com aplicação de vapor, com escoamento do vapor por uma abertura no topo da porta do forno.
- Fase 2- Realizada no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) do Departamento de Engenharia Florestal (DEF-UFV), onde foram realizadas as análises (teor de umidade, cinzas, materiais voláteis, carbono fixo, massa específica básica (da lenha e do carvão produzido).

Além dos testes conduzidos com *Eucalyptus pellita*, fornecido pela Arcelormittal Florestas, foi utilizado, também, biomassa coletada na UFV, constituída pelas espécies: angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida*); angico-preto (*Anadenanthera macrocarpa*); pata-de-vaca (*Bauhinia longifolia*) e pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*) e *Eucalyptus grandis*.

A massa de aparas resultante do corte para adequação do comprimento da lenha ao comprimento do forno foi pesada e utilizada como combustível para as fornalhas de queima da fumaça e para a caldeira do vapor.

Na alvenaria, utilizou-se tijolo maciço de argila, terra de barranco, areia e água. Foi feita uma reciclagem da argamassa da estrutura, que foi removida e o envelope construtivo

foi telado para receber uma nova argamassa. O telamento teve por função, dar maior resistência térmica e mecânica e dispensar o processo de barrelamento normalmente conduzido.

Para a etapa do abafamento e resfriamento da carbonização foi utilizado o vapor fornecido por uma caldeira com capacidade de evaporação de 50 kg/h de água.

Os gases desprendidos foram queimados na fornalha, resolvendo, em parte, problemas relacionados à emissão de poluentes para o ar.

Estabeleceu-se que a temperatura para encerramento do processo, carbonização e resfriamento, ou seja, da abertura e da descarga do forno protótipo, seria a temperatura do meio externo, mesmo que na indústria de carbonização a temperatura de abertura do forno seja, em torno, de 60 °C, ganhando mais tempo de uso do forno.

3.1. Norma para análises

Foi adotada, para a execução dos ensaios do carvão produzido, a ABNT NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análises Imediatas. Destinada à determinação dos teores de água, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo de carvão vegetal;

As análises foram realizadas em triplicata.

Antes da fase de carbonização, determinou-se o teor de água e massa específica básica da lenha.

3.2. Forno-piloto

O desenvolvimento e implementação do protótipo, em alvenaria de tijolo maciço, foi conduzido em duas etapas, mantendo a mesma estrutura do forno e variando o posicionamento da fornalha para queima dos gases e o dimensionamento da câmara de fumaça (parte estrutural que serve de transição entre o forno e a fornalha, conduzindo a fumaça errante que passa pela abertura na parede de fundo do forno e alcança a fornalha de queima da fumaça). As plantas baixas estão no Apêndice E. Sendo:

- Etapa 1: (i) Construção da estrutura de carbonização.
(ii) Testes preliminares para treinamento no processo de carbonização. Nesta fase foram utilizados um sistema de aquisição de dados com base em termopares do tipo K e um sistema Hydra Data Logger Fluke, com leituras e registro manual de hora em hora.
- Etapa 2: (i) telamento da estrutura.

- (ii) recolocação dos revestimentos internos e externos do forno com argamassa especial desenvolvida na U.F.V. (Apêndice D).
- (iii) construção da fornalha próxima ao forno.
- (iv) aplicação do vapor de água, na base da massa de carvão, para acelerar o resfriamento.

Nesta fase foi utilizado um sistema de monitoração térmica com base em termopares do tipo K e um sistema de aquisição de dados, com leituras e anotação de hora em hora. Estes dados foram armazenados em computador para posterior análise.

3.2.1. Construção do forno-piloto

Para a construção do forno, da câmara de fumaça (utilizada nos teste iniciais e posteriormente removida da estrutura) e da fornalha de queima da fumaça foram utilizados tijolos maciços de argila, terra e areia. A argamassa utilizada, na primeira etapa, foi uma mistura de terra de barranco, areia e água, formando um "barro" fácil de manusear e trabalhar. A argamassa da segunda fase foi feita à base de cimento CP II E 32, cal hidratada CH III e areia lavada e peneirada com peneira de malha de 2,4 mm.

3.2.2. Revestimento de proteção do piso do forno-piloto

Foi utilizada uma base de concreto com 100 mm de espessura, para evitar a contaminação do solo e do subsolo, facilitando, também, a coleta da moinha de carvão.

3.2.3. Paredes do forno-piloto

As quatro paredes foram construídas, em fiadas de dois tijolos (200 mm de comprimento por 100 mm de largura por 50 mm de espessura) utilizando 10 mm de argamassa entre os tijolos. Na base das paredes laterais, estão localizados os "tatus" e "baianas" para favorecerem a entrada e circulação do ar. Os "tatus" foram construídos na dimensão correspondente à seção transversal de um tijolo, de 200 por 200 mm e em número de um por parede lateral. Cada "baiana", em número de quatro, por parede lateral, tem diâmetro de 100 mm e 250 mm de comprimento. Na parede de fundo, abaixo da cumeeira da abóbada do forno, foi feito um duto com obturador controlador de fluxo com diâmetro de 150 mm, com a função de eliminar o excesso de vapor, caso fosse necessário. As dimensões dos fornos estão mostradas nas plantas baixas, no apêndice E.

3.2.4. Fechamento e vedação da porta

A porta do forno foi fechada erguendo-se uma parede de um tijolo, com espessura de 100 mm, fechando todo o vão (800 por 2.000 mm). A vedação deu-se por rejunte manual da superfície, tal como mostrado na Figura 16.



Figura 16 - Fechamento da porta do forno e colocação da massa de vedação.

3.3. Controle da velocidade de carbonização

O controle da velocidade da carbonização foi facilitada devido à existência de um obturador, na base da chaminé, e ao fechamento controlado das baianas e tatus.

No início da carbonização, a fumaça tende a sair por todas as aberturas (chaminé, duto na parede do fundo, tatus e baianas) e, com o fechamento progressivo das aberturas, passa a sair pela chaminé, favorecendo a carbonização. Na Figura 17, é mostrada a instalação da base da chaminé, onde foi montado um obturador de fluxo para controle do efeito chaminé e da velocidade da carbonização.



Figura 17 - Base da chaminé e local do obturador de fluxo.

3.4. Vedação do forno por barrelamento

Nos testes iniciais, e depois de completar a carbonização, o forno foi vedado com argamassa de barro, de duas a quatro vezes, para acelerar o resfriamento, favorecendo a sua estanqueidade. A argamassa do barrelamento tem consistência de mingau e é constituída de 50 kg de terra de barranco; 20 kg de moinha de carvão e 200 litros de água. A barrela⁴¹ pode ser aplicada com brocha (manualmente) ou jateamento mecanizado. Caso seja necessária a sua aplicação manual (fechamento de "tatu", "baiana" ou trincas), a barrela deverá ser mais consistente e, ou, feita com menor quantidade de água. Tal como mostrado na Figura 18.



Figura 18 - Barrelamento do forno.

3.6. Injeção direta do vapor para resfriamento

Para a diminuição de temperatura em um dado ambiente são necessários sistemas com grande eficiência. Para atingir esta redução térmica, é preciso encontrar a vazão ideal, saber a quantidade de massa de carvão aquecida e a área de contato necessária entre fluido refrigerante e a massa do corpo. As vazões mais altas de vapor provocam, até determinado limite, uma convecção mais intensa, elevando os coeficientes globais de transferência de calor. O aumento das vazões de vapor pode causar aumento da turbulência, favorecendo a transferência de calor. Uma recirculação parcial pode, também, ocorrer quando o vapor superaquecido, ainda existente no interior do forno, se mistura ao vapor saturado que está entrando. Mas, a partir do ponto em que a vazão do vapor se torna

⁴¹ Em fornos pequenos, o processo é totalmente manual, demandando coleta da matéria-prima, tempo para preparo e aplicação da argamassa e possível risco de acidente (o funcionário tem contato direto com a parede do forno em temperatura alta). Em um processo industrial, o custo é baixo, e a barrela é aplicada por meio de jateadores tratorizados. Segundo Zuchi (2000), prepara-se a mistura de água com argila, de forma que esta permaneça em solução, possibilitando o jateamento da superfície externa e da cúpula do forno e, também, vedação de pequenas fissuras. O barrelamento industrial é feito por um "João de Barro" (um reservatório contendo a mistura de água com argila, tracionado por trator), e aplicado com mangueira sob pressão obtida por meio de bomba hidráulica, acoplada ao conjunto motor.

muito alta, o contato entre o vapor e a massa de carvão se torna ineficiente, pois perde vapor por escoamento sem trocar calor.

Neste trabalho o vapor foi fornecido por uma caldeira com capacidade de geração de vapor de 50 kg/h, consumindo cerca de 7 kg/h de lenha depois da estabilização térmica, tal como mostrado na Figura 19. Embora o equipamento forneça vapor à pressão de até 7 Pa, durante a aplicação, a pressão de vapor foi de 1,5 Pa, necessária para vencer a resistência da massa de carvão à passagem do vapor, temperatura de 112 °C na massa de carvão.

Essas condições permitem que toda a capacidade de resfriamento do sistema, seja utilizada a maior eficiência na transferência e retirada do calor, estabelecendo um controle de temperatura, principalmente quando o vapor é misturado diretamente com o microclima do meio, em condições altamente turbulentas. Com essa forma de funcionamento, a massa de carvão alcança a temperatura do meio ambiente gradualmente.



Figura 19 - Caldeira para geração e linha para distribuição do vapor.

O vapor foi conduzido e fornecido à massa de carvão como vapor saturado ou vapor úmido⁴², recebe um impacto térmico devido à alta temperatura da massa de carvão e se torna vapor seco ou superaquecido⁴³. O vapor foi injetado na massa de carvão, por meio de tubos de ferro fundido (1850 mm de comprimento, com perfurações de 5 mm de diâmetro interno e espaçamento de 150 mm entre furos), distribuídos em três ramais na base da massa de carvão e o vapor, que não foi reaproveitado, escoou para o meio ambiente primeiro através das baianas e, segundo, através da abertura superior na porta do forno, processo denominado de sistema de uma só passagem e sem recuperação. Tal como esquematizado nas Figuras 20, 21 e 22.

⁴² contendo pequenas gotículas de água, sendo obtido da vaporização direta da mesma.

⁴³ obtido através do aquecimento conveniente do vapor saturado, resultando em um vapor seco.

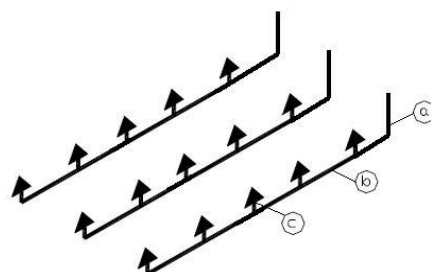


Figura 20 - Sistema de distribuição do vapor na base da massa de carvão, sendo (a) chegada do vapor, (b) distribuição longitudinal na base da massa de carvão e (c) orifício de saída do vapor.

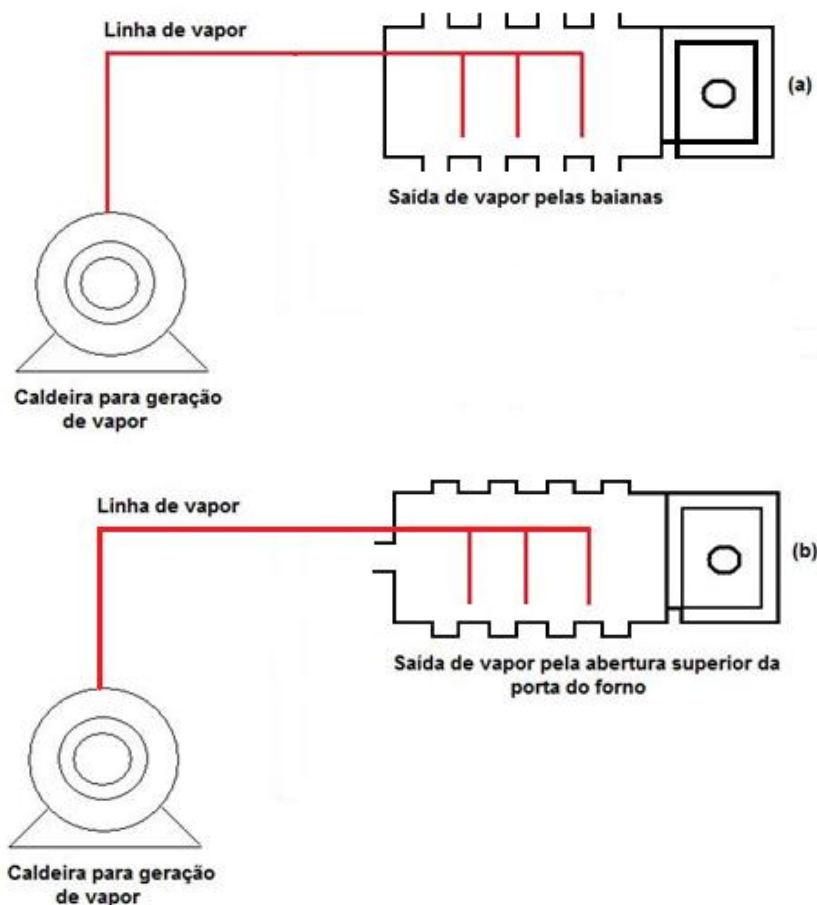
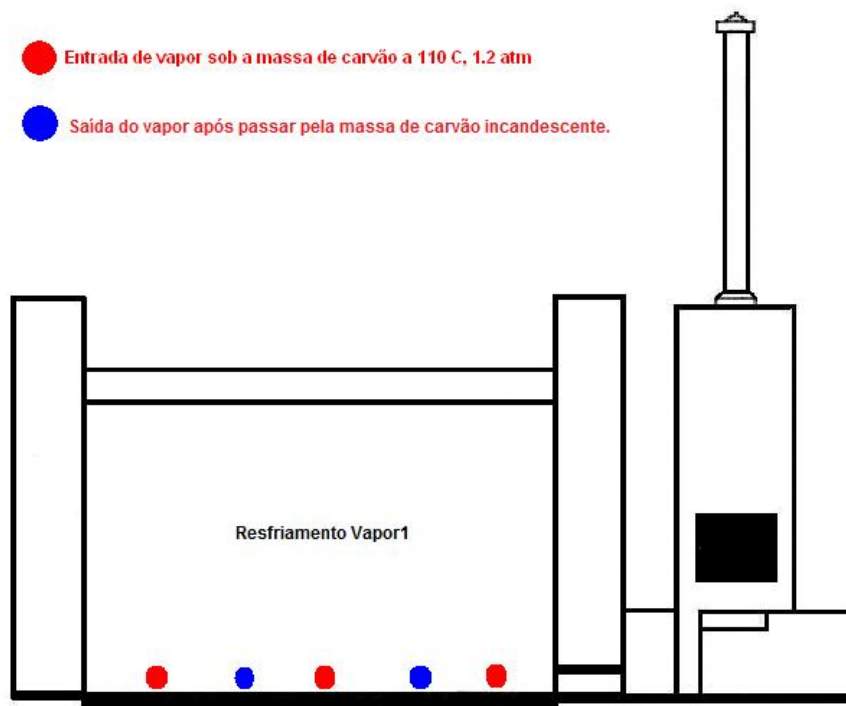
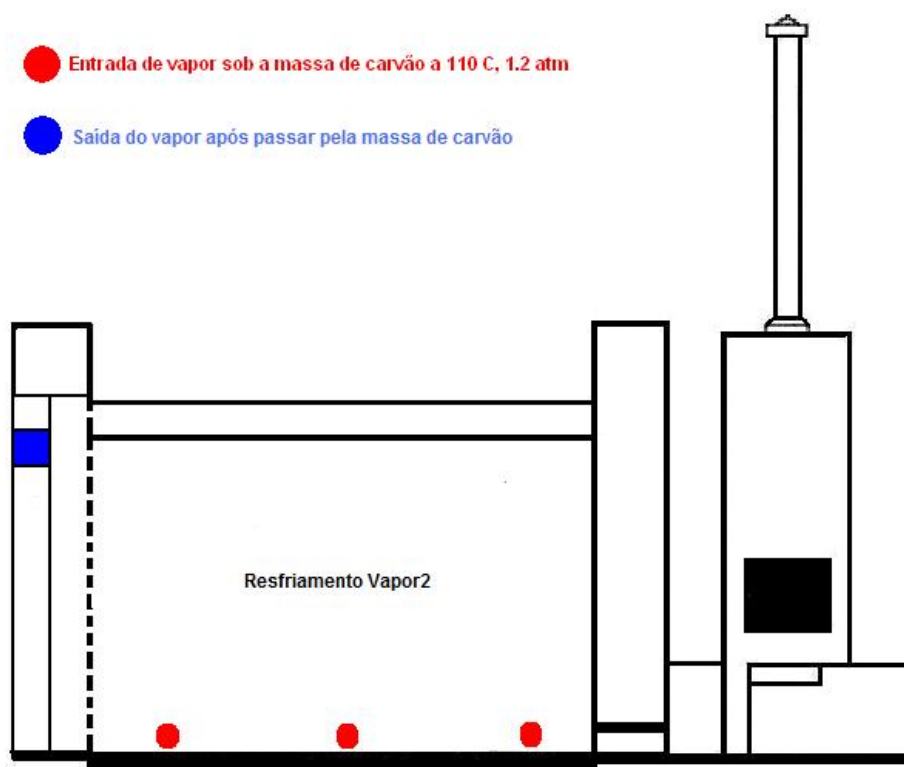


Figura 21 - Sistema de circulação do vapor com saída pelas baianas(a) e com saída pela abertura superior na porta do forno (b).



(c1)



(c2)

Figura 22 - Formas de distribuição do vapor pela parte inferior do forno, em vermelho, e a saída do vapor pelas baianas (c1) e pela abertura superior na porta do forno (c2), em azul.

3.8. Posicionamento dos dispositivos utilizados na monitoração térmica

A aquisição de dados foi realizada utilizando-se uma unidade de aquisição de dados acoplada a um computador. A temperatura foi medida utilizando-se termopares do tipo K (Cromel - Alumel), encapsulados em tubos de aço inoxidável com 8 mm de diâmetro externo e 6 mm de diâmetro de interno. Os comprimentos das hastes foram de 400 mm (12 unidades) e 1.600 mm (três unidades).

Foram utilizados 16 termopares, com a distribuição mostrada na Figura 23b. O sensor usado como ponto de referência operacional dentro da massa de lenha, para a representação dos gráficos foi o de número 12. Os sensores, de número 2 a 14, foram utilizados para monitorar a marcha de carbonização; o de número 16, a temperatura dos gases da chaminé; o de número 17, a temperatura dos gases na saída do forno; o de número 18, a temperatura na base da chama na fornalha de queima; e o de número 19, a temperatura do ambiente externo.



(a)



(b)

Figura 23a e b - Sistema de aquisição de dados (a) e indicação do posicionamento dos termopares colocados na parede lateral do forno (b).

A termometria da carbonização após a reforma no envelope construtivo abrangeu: (i) uma fornada sem aplicação do vapor e (ii) duas fornadas com aplicação do vapor. E identificadas como: (a) fornada sem aplicação de vapor e resfriamento natural, denominada Natural; (b) fornada com resfriamento a vapor e natural (após a aplicação do vapor e sem a utilização de outro tipo de resfriamento), com saída do vapor pelas baianas na base da parede lateral, denominada Vapor1; e (c) fornada com resfriamento a vapor e natural, com saída do vapor pela abertura na porta do forno, denominada Vapor2.

Para o equacionamento matemático dos dados experimentais da carbonização, realizou-se a análise de regressão não linear pelo método de decaimento exponencial de segunda ordem, utilizando o programa SPSS Versão 13.

Estimaram-se os valores dos parâmetros do modelo, em função da variável temperatura de carbonização.

Para relacionar os parâmetros do modelo estudado com a variável temperatura de carbonização, optou-se pelo modelo estatístico representado pela equação 106. Esta equação foi base para todos os modelos somente na fase do resfriamento (Natural, Vapor1 e Vapor2), isto é, a partir das maiores temperaturas registradas.

$$Z = y_0 + A_1 \exp\left(\frac{-x}{t_1}\right) + A_2 \exp\left(\frac{-x}{t_2}\right) \quad (106)$$

em que Y_0 - Valor observado do parâmetro, para o modelo em estudo, na temperatura i ; A_1 - Coeficiente da regressão na temperatura inicial i ; $-x$ - Variação da temperatura no sentido do resfriamento; t_1 - Tempo na temperatura inicial i (s); A_2 - Coeficiente da regressão na temperatura inicial $i + 1$; t_2 - Tempo na temperatura inicial $i + 1$ (s).

4. RESULTADOS

4.1. Curvas de carbonização

As curvas de carbonização com o envelope construtivo reformado foram denominadas: Natural, Vapor1 e Vapor2, e são mostradas na Figura 24. A tabela contendo os dados, encontra-se no Apêndice B, junto com os dados de simulação do resfriamento, Simula1 (relacionados a fornada Vapor1) e Simula2 (relacionados a fornada Vapor2).

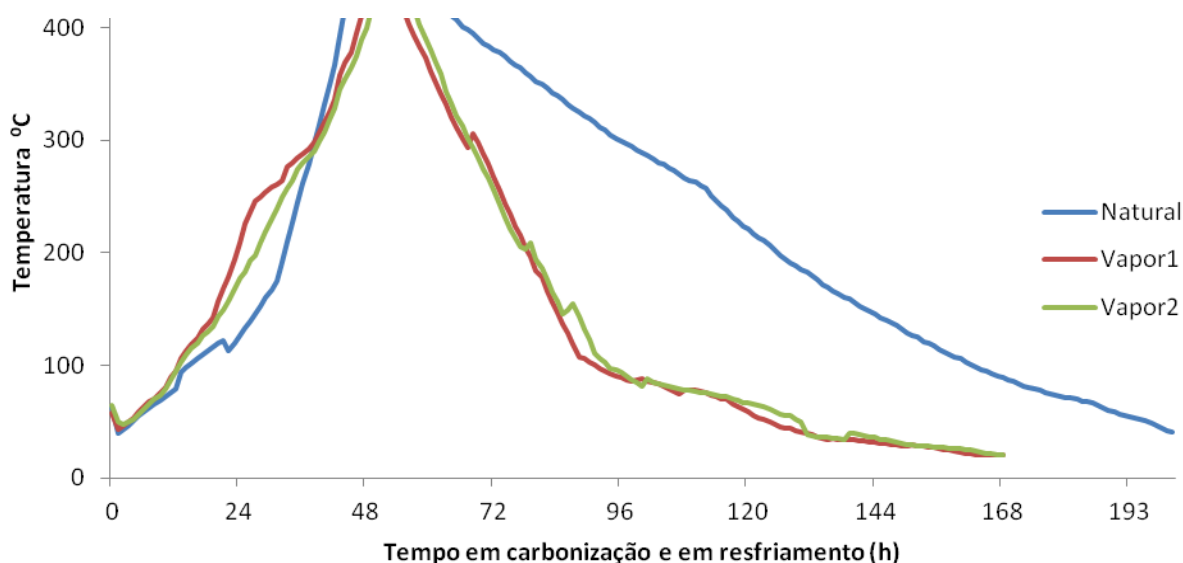


Figura 24 - Curvas de carbonização.

Na Figura 25, mostram-se a curva de resfriamento, obtida na fornada Natural e do modelo estimado de decaimento exponencial de segundo grau que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Os dados do eixo X, estão relacionados ao tempo de início do processo de resfriamento, que aconteceu depois da fase de carbonização, isto é, depois de 51 horas da ignição do forno.

As curvas e os parâmetros da equação foram obtidas utilizando-se o programa SPSS

Versão 13.

O coeficiente de determinação do ajuste, R^2 , foi de 0,99735.

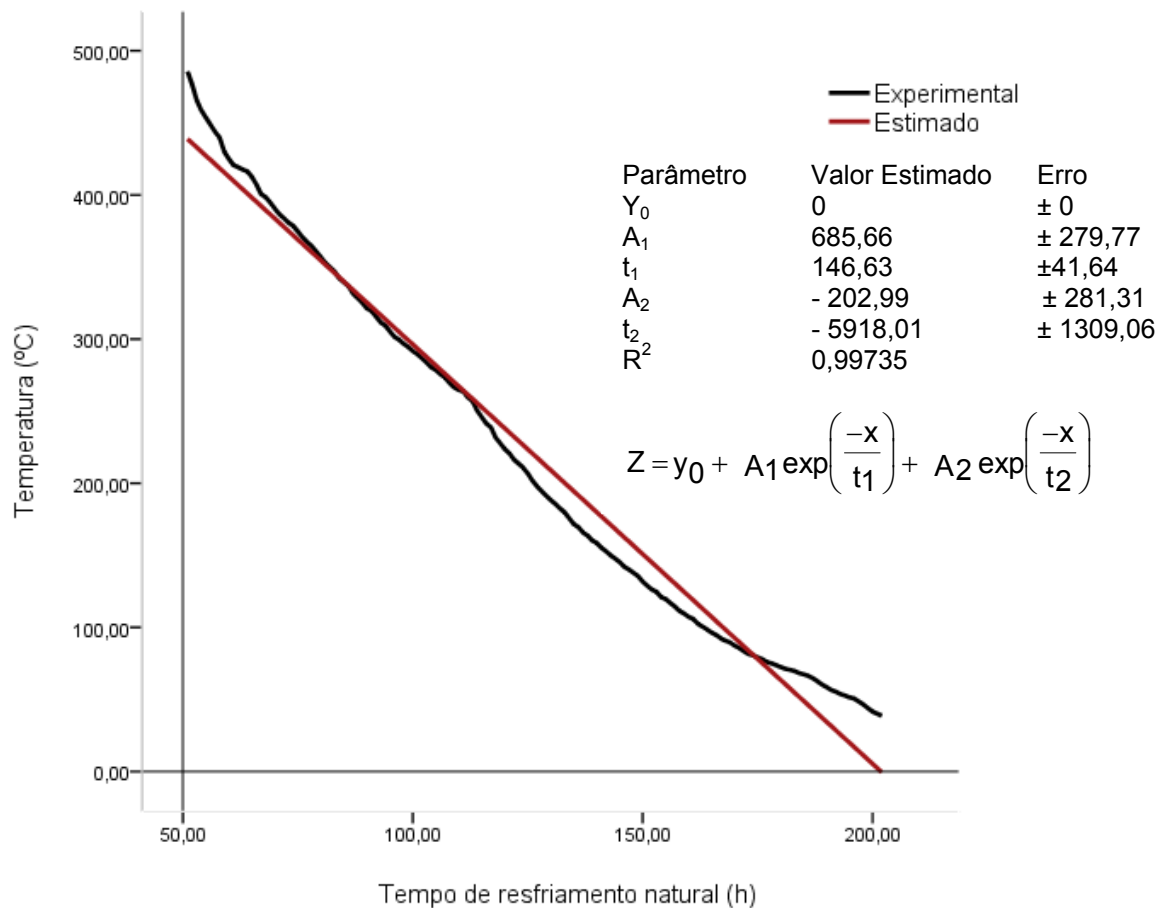


Figura 25 - Curva de resfriamento real e o estimado da fornada Natural.

Na Figura 26, mostram-se a curva de resfriamento, obtida na fornada Vapor1 e do modelo estimado de decaimento exponencial de segundo grau que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Os dados do eixo X, estão relacionados ao tempo de início do processo de resfriamento com a aplicação de vapor d'água, que aconteceu depois da fase de carbonização, isto é, depois de 51 horas da fase ignição do forno.

As curvas e os parâmetros da equação foram obtidas utilizando-se o programa SPSS Versão 13.

O coeficiente de determinação do ajuste, R^2 , foi de 0,99524.

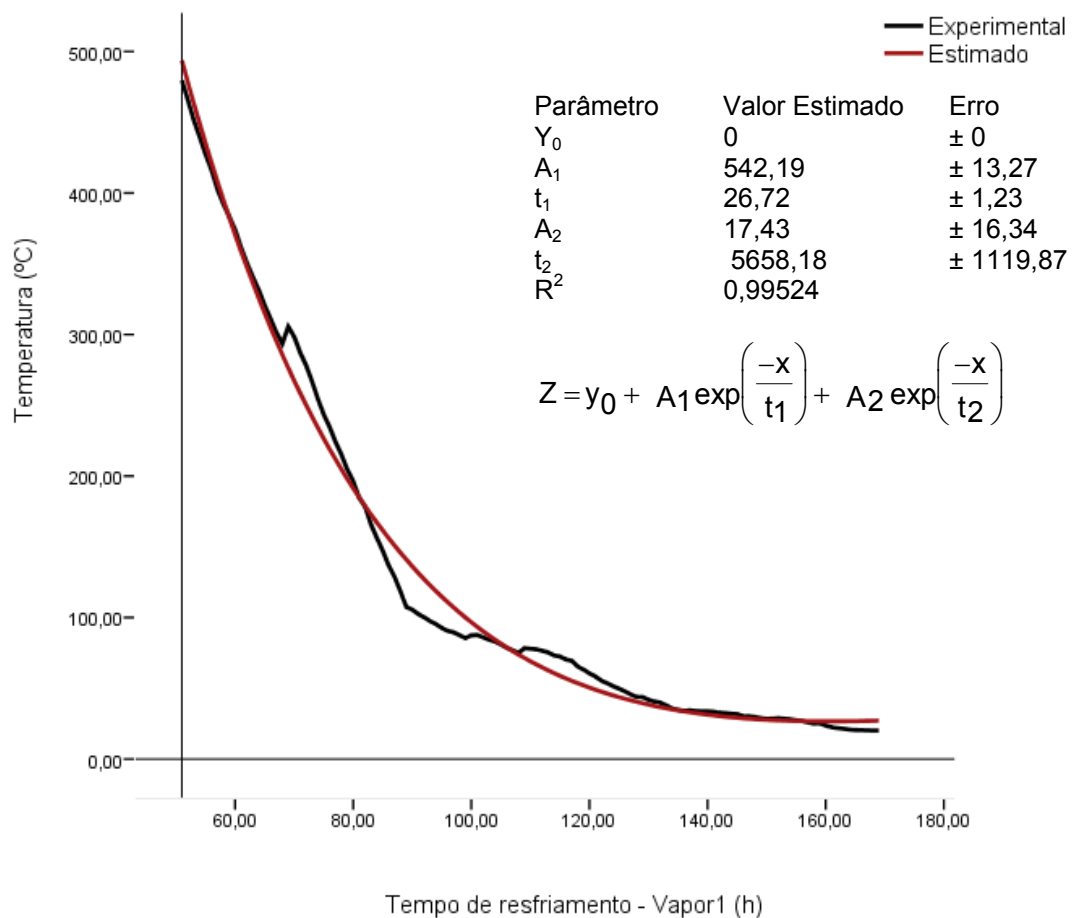


Figura 26 - Curva de resfriamento real da fornada Vapor1.

A Figura 27 mostra a comparação entre a curva teórica de simulação do resfriamento da massa de 1.032 kg de carvão, que se encontrava a 479,60 °C, quando do início do processo de resfriamento com a aplicação do vapor d'água até à temperatura de 112 °C do vapor fornecido, utilizando-se uma massa de vapor d'água de 50 kg /h, e a curva com os dados reais, com base nos dados da fornada Vapor1, encerrando-se a aplicação de vapor quando a temperatura da massa de carvão atingiu 107,4 °C. Considerando que foram gastos 38 horas, a partir da temperatura maior (479,60 °C) até à menor (107,4 °C), pode-se dizer que o gradiente térmico médio de redução foi de 9,80 °C/h.

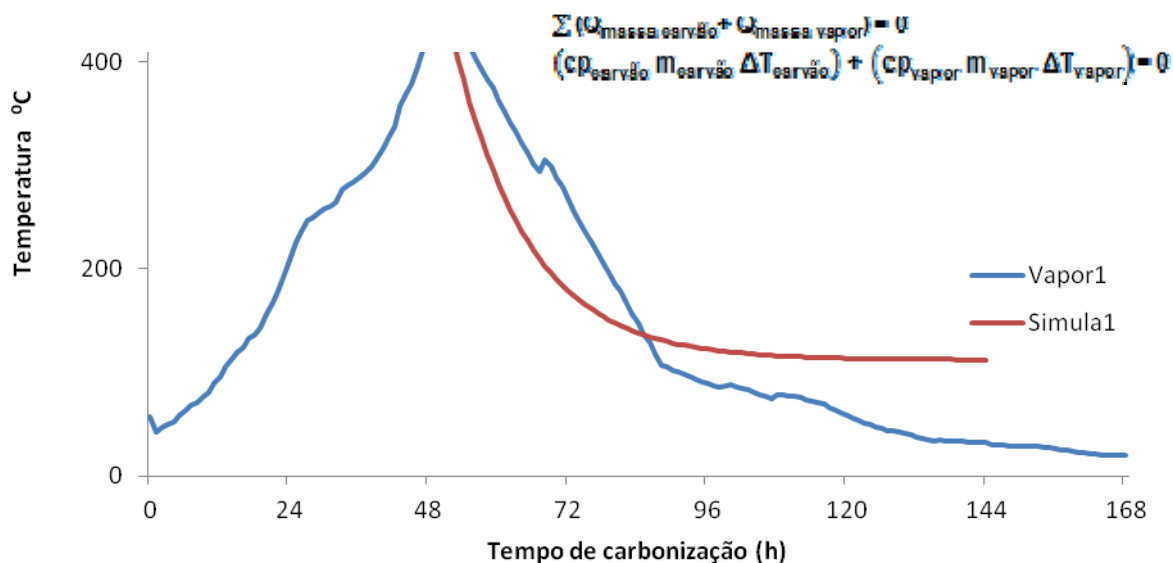


Figura 27 - Comparação entre simulação e dados reais da fornada Vapor1

Na Figura 28, mostram-se a curva de resfriamento, obtida na fornada Vapor2 e do modelo de decaimento exponencial de segundo grau que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Os dados do eixo X, estão relacionados ao tempo de início do processo de resfriamento com a aplicação de vapor d'água, que aconteceu, aproximadamente, depois de 54 horas da ignição do forno.

As curvas e os parâmetros da equação foram obtidas utilizando-se o programa SPSS Versão 13.

O coeficiente de determinação do ajuste, R^2 , foi de 0,98678.

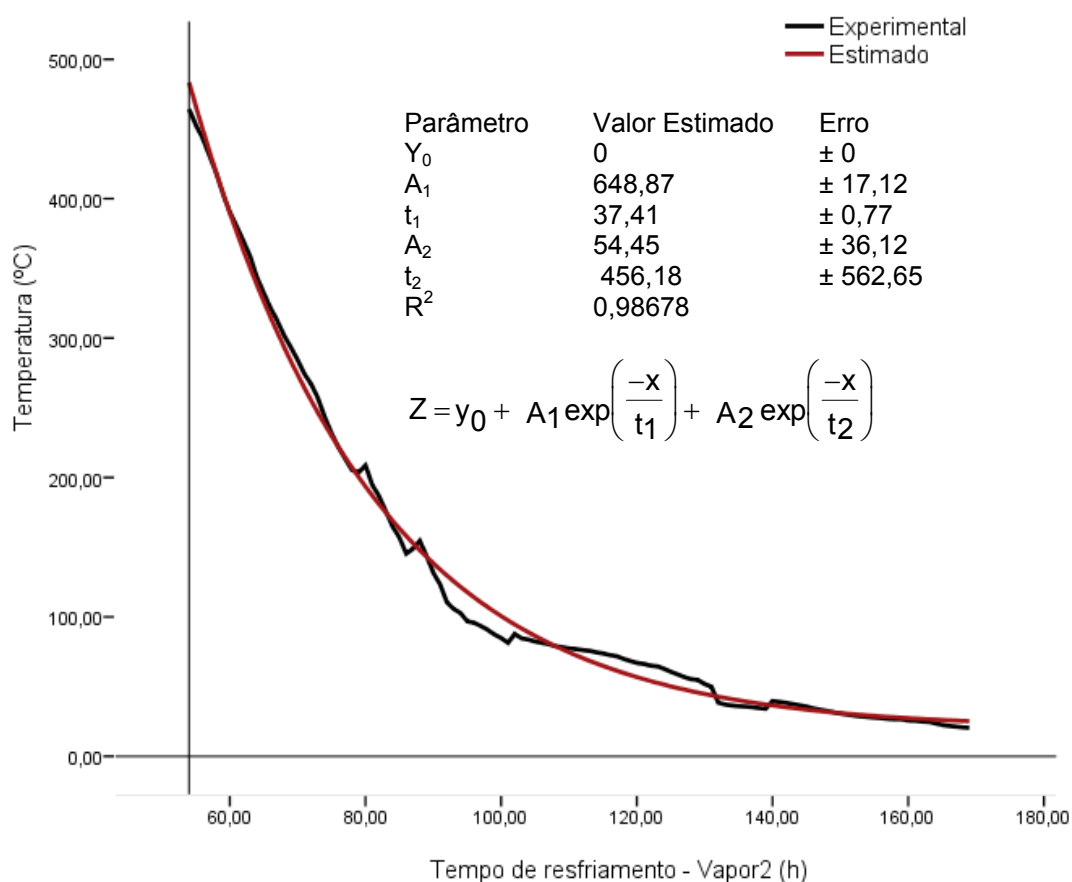


Figura 28 - Curva de resfriamento real da fornada Vapor2.

A Figura 29 mostra-se a comparação entre a curva teórica de simulação do resfriamento da massa de 991 kg de carvão, que se encontrava a 462,20 °C, quando do início do processo de resfriamento com a aplicação do vapor d'água até à temperatura de 112 °C do vapor fornecido, utilizando-se uma massa de vapor d'água de 50 kg /h, e a curva com os dados reais, com base nos dados da fornada Vapor2, encerrando-se a aplicação de vapor quando a temperatura da massa de carvão atingiu 107,4 °C. Considerando que foram gastos 38 horas, a partir da temperatura maior (462,20 °C) até à menor (110,4 °C), pode-se dizer que o gradiente térmico médio de redução foi de 9,26 °C/h.

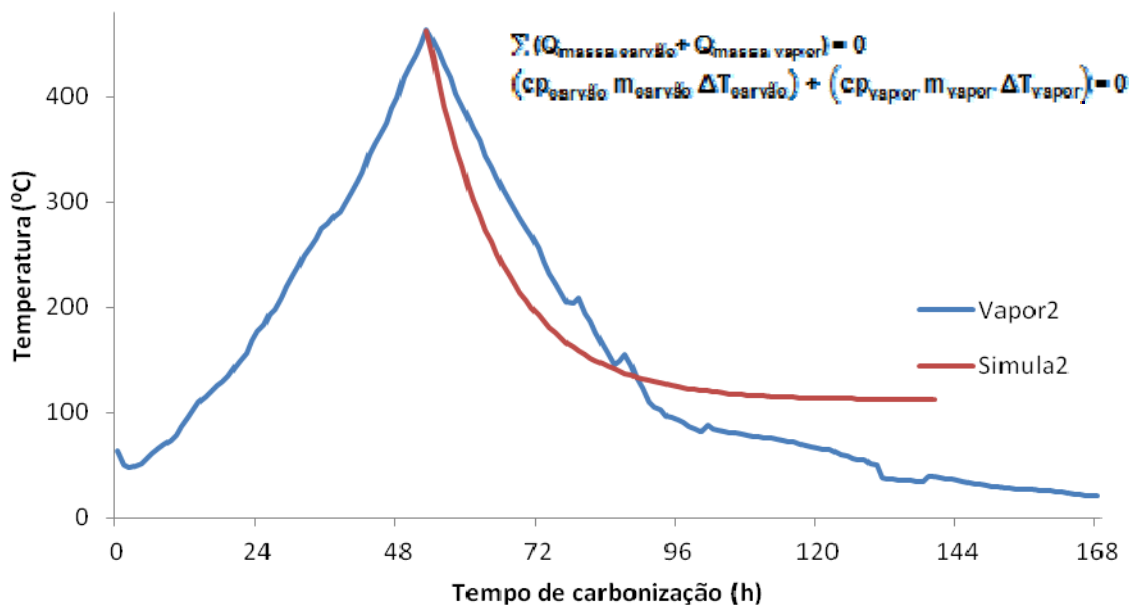


Figura 29 - Comparação entre simulação e dados reais da fornada Vapor2.

A simulação, que estabeleceu as curvas mostradas nas Figuras 27 e 29, adotou como base as equações 112 e 113, onde foi considerado o calor específico da água (vapor) igual a 1,56 kJ/ kg °C, do carvão vegetal igual a 0,936 kJ/ kg °C.

Como visto pela curva dos dados da fornada Vapor1, Figura 26, em 293,6 °C, foi detectado aumento na temperatura interna (pico de 305,6 °C) do forno, devido ao aparecimento de rachaduras nas paredes, alterando o resfriamento pois, naturalmente, a temperatura interna da massa de carvão cai rapidamente, mas o comburente que entra faz com que a massa de carvão entre em ignição, reacendendo-a, consumindo carvão e causando o aumento da temperatura da massa. Assim, o vapor tem que agir, abafando, o novo foco de incêndio e, conseqüentemente, atrasando o processo de resfriamento.

$$\sum (Q_{\text{massa carvão}} + Q_{\text{massa vapor}}) = 0 \quad (107)$$

$$(c_p \text{ carvão } m_{\text{carvão}} \Delta T_{\text{carvão}}) + (c_p \text{ vapor } m_{\text{vapor}} \Delta T_{\text{vapor}}) = 0 \quad (108a)$$

$$\left((0,936 \times 1032 \times (T_{\text{equilíbrio}} - 479,6)) \right) + \left(1,56 \times 50 \times (T_{\text{equilíbrio}} - 112) \right) = 0 \quad (108b)$$

$$(965,93 \times T_{\text{equilíbrio}} - 463270,58) + (78 \times T_{\text{equilíbrio}} - 8736) = 0 \quad (108c)$$

$$T_{\text{equilíbrio}} = \left(\frac{463270,58 + 8736}{965,93 + 78} \right) = \left(\frac{472006,58}{1043,98} \right) = 452,12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (108d)$$

E assim sucessivamente, até atingir a temperatura de equilíbrio com o vapor fornecido.

A diferença nas curvas, como mostrado nas figuras 27 e 29, entre os dados reais e os dados teóricos representada pelas equações 107 e 108a, sugere a existência de fatores relevantes que não foram contemplados nas análises matemáticas, tal com mostrado nos parágrafos do item 2.4. O porquê do uso do vapor d'água para resfriamento. Por exemplo, quando a temperatura da massa de carvão vai se aproximando da temperatura do vapor, fica cada vez mais difícil retirar calor da massa de carvão, podendo-se, assim, subentender o decaimento da temperatura real como uma seqüência de estados térmicos. Para cada um desses estados intermediários entre a temperatura inicial e a temperatura ideal de abertura do forno, tem-se uma temperatura para: (i) a massa de carvão; (ii) o forno como um todo; (iii) as faces interior e exterior das paredes do forno; (iv) as faces interna e externa da abóbada; e (v) para o concreto no fundo do forno.

Conseqüentemente, para cada estado térmico intermediário analisado, dentro do espaço temporal de uma hora, tem-se uma nova velocidade de resposta do resfriamento do conjunto forno e massa de carvão, pois as condições operacionais variam com o tempo em função de: (i) se a temperatura na superfície de um sólido é alterada, a temperatura no seu interior varia; (ii) passa-se um tempo antes que seja atingida uma distribuição térmica estacionária no corpo e (iii) no presente estudo, a energia térmica é transferida por convecção e radiação nas superfícies (paredes e massa de carvão) e por condução no interior da massa de carvão.

Como a massa de carvão, em fase de pré-resfriamento, é submetida a uma variação térmica repentina, pois se encontra na temperatura $T_{\text{massa carvão}} = T_1$, e recebe um volume de vapor d'água a $T_{\text{vapor}} = T_2$, onde $T_1 > T_2$, no tempo $t = 0$. Para $t > 0$, onde a temperatura da massa de carvão irá decrescer até T_∞ (temperatura de abertura do forno), é necessário que haja transferência de calor por convecção na interface massa de carvão – vapor. Como o resfriamento acontece no todo (estrutura do forno e massa de carvão) e, uma vez vencida a inércia térmica do conjunto, a velocidade do processo tende a aumentar, fazendo com que a curva tenha decaimento mais acentuado quando comparada com o resfriamento teórico. A perda de calor pela alvenaria facilita, também, a perda de calor pela massa de carvão, e esse processo de perdas associado à menor temperatura do vapor, favorece o resfriamento no conjunto todo.

4.2. Rendimento da produção

O rendimento referência foi calculado, pela equação 110, que relaciona a quantidade de lenha enforcada e a quantidade real de carvão útil produzida. Embora trabalhos realizados pelo CETEC (1988), citem rendimentos gravimétricos de até 40% para os fornos de alvenaria brasileiros, na literatura, segundo Numazawa, 2000, encontram-se valores entre 18 e 25% como os rendimentos médios, normalmente aceitos pela comunidade científica, segundo Antal Jr., 1990, um rendimento de 38%, é considerado um máximo normalmente conseguido. Assim, utilizou-se dados da fornada Natural como referência, e os resultados são mostrados na Tabela 1.

$$\eta\% = \frac{(\text{massa de carbonizados obtidos})}{(\text{massa de lenha enforcada})} = \frac{(\text{massa de carvão} + \text{moinha} + \text{tiços})}{(\text{massa de lenha enforcada})} = \frac{(968 + 38 + 19)}{2619} = 39,14\% \quad (109)$$

$$\eta\% = \frac{(\text{massa real de carbonizados obtidos})}{(\text{massa de lenha enforcada})} = \frac{(\text{massa de carvão})}{(\text{massa de lenha enforcada})} = \frac{(968)}{2619} = 36,97\% \quad (110)$$

Tabela 1 – Horas de carbonização e Rendimento com o uso de vapor d'água

Fornada	Hscarb	HsResf	Lenha	Carvão	Moinha	Tiços	$\eta\%$	$\eta\%_{\text{real}}$
Natural	50	166	2619	968	38	19	39,14	36,97
Vapor1	50	118	2575	985	33	14	40,07	38,26
Vapor2	53	115	2605	947	30	14	38,05	36,35

em que

Hscarb	-	Horas de carbonização,	hs;
HsResf	-	Horas de resfriamento,	hs;
Lenha	-	Quantidade de lenha enforcada,	kg;
Carvão	-	Quantidade de carvão produzido,	kg;
Moinha	-	Quantidade de moinha produzida,	kg;
Tiços	-	Quantidade de tiços produzidos,	kg;
$\eta\%$	-	Rendimento total	adimensional; e
$\eta\%_{\text{real}}$	-	Rendimento em carvão	adimensional.

A figura 30 mostra o rendimento real entre a quantidade de lenha enforcada e a quantidade de carvão obtida, tal como descrita na Tabela 1.

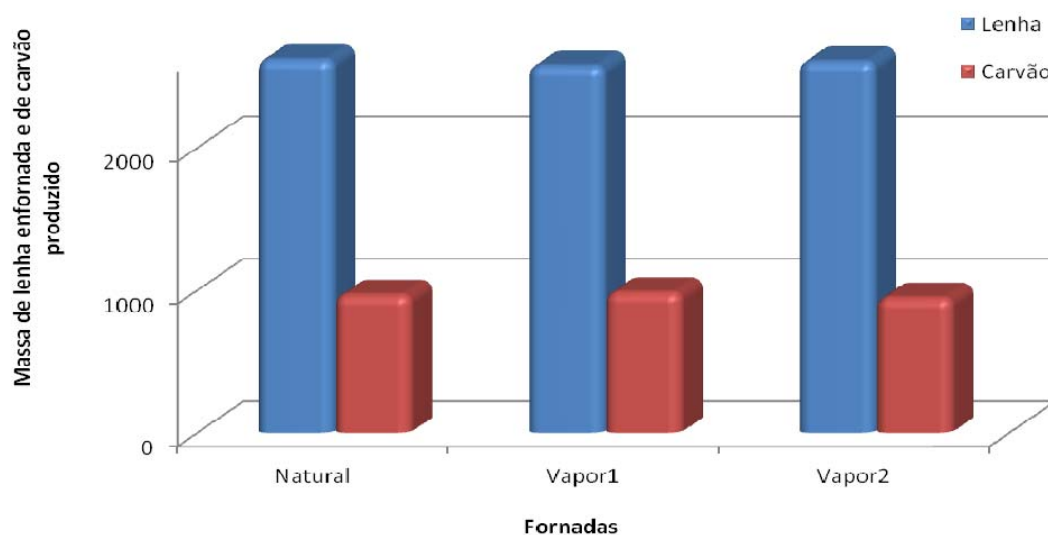


Figura 30 - Relação carvão X lenha, em cada fornada.

A Figura 31 mostra os ganhos de produtividade das fornadas Vapor1 e Vapor2 comparada a Natural. O índice Ganho representa a produtividade das fornadas Vapor1 e Vapor2 em relação ao Natural na produção de carvão.

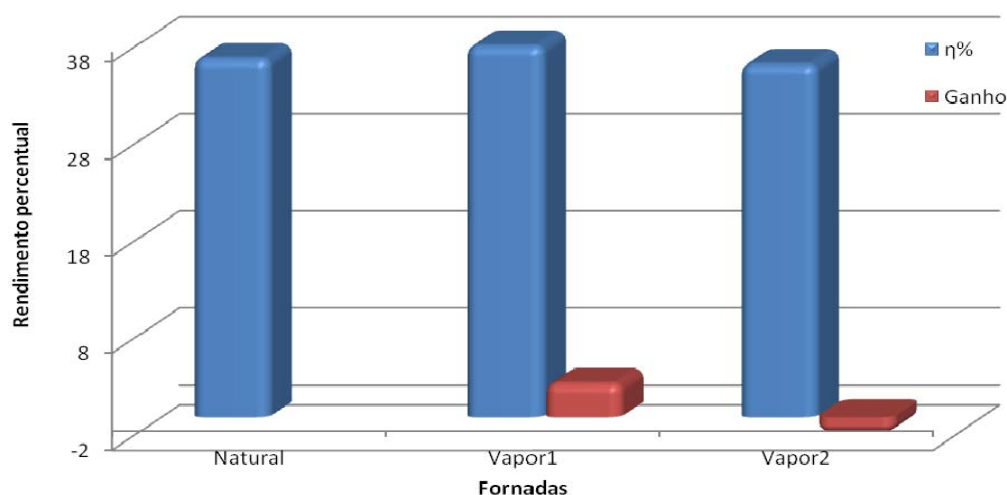


Figura 31 - Rendimento em carvão, por fornada.

O índice da fornada Vapor2, se apresentou negativo, pois o envelope construtivo apresentou grandes rachaduras, registrados nas Figuras 28 e 29. Como houve, então,

entrada de ar comburente, a massa de carvão reacendeu-se, consumindo carvão e diminuindo a produtividade.

Mas quando da fase de aplicação de vapor acontece o abafamento dos focos de incandescência na massa, diminuindo a queima de carvão, conseqüentemente, reduzindo o teor de moinha e cinzas, gerando, então, uma maior rotatividade operacional. Isto ficou provado na fornada Vapor2, mesmo com a presença de rachaduras e suas estanqueidades. Tal como mostrado na Figura 32.

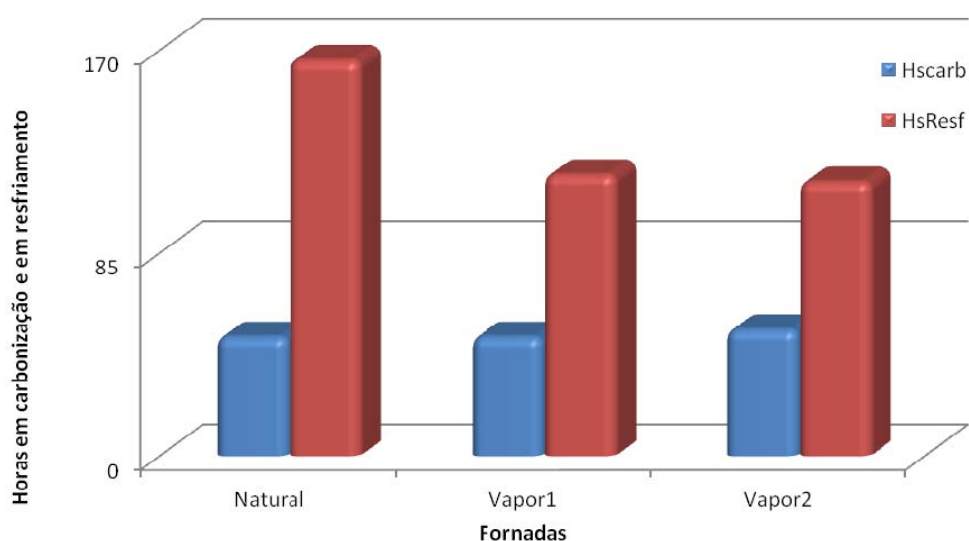


Figura 32 - Horas de carbonização e resfriamento natural e utilizando-se vapor d'água.

A Tabela 2 mostra o número total de horas em resfriamento utilizando vapor, onde são indicadas o número de horas de aplicação de vapor d'água e o número de horas de forma natural.

Tabela 2 – Horas de resfriamento forçado com aplicação de vapor

Fornada	HsResf	Vapor	Pós-vapor
Vapor1	118	19	99
Vapor2	115	18	97

Tal como mostrado na Figura 32, o total de horas de resfriamento com a aplicação do vapor foi significativo no processo, pois foi menor em relação ao resfriamento da fornada

Natural. A partir dos dados da Tabela 1, e mostrados na Figura 33, os ganhos em tempo (aqui denominado rendimento), com resfriamento natural após aplicação do vapor em horas do Vapor1 e Vapor2 em relação ao Natural foram, respectivamente, de 28,96 e 30,73 %.

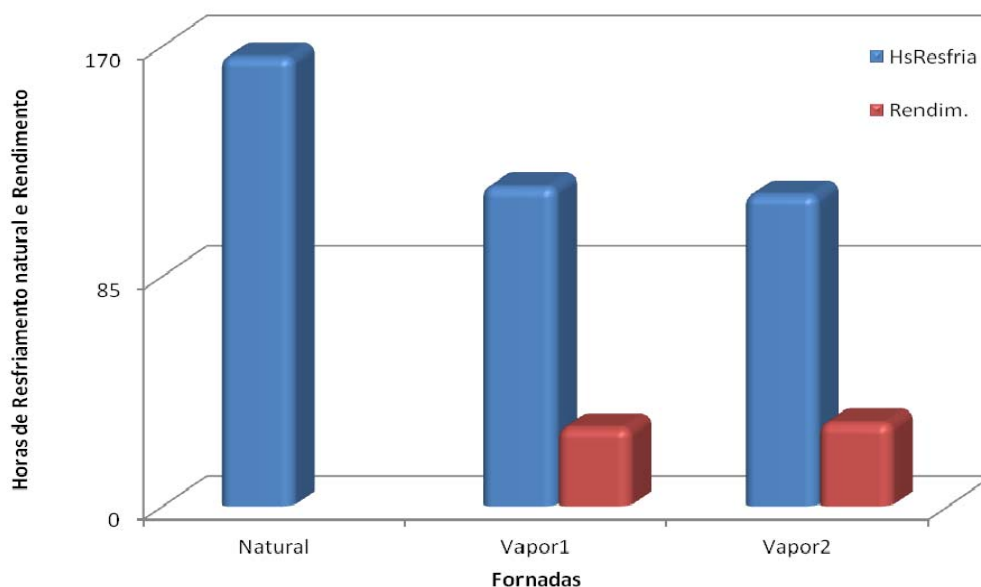


Figura 33 – Horas em resfriamento e ganhos com a reforma e aplicação de vapor.

4.3. Análise química imediata

Tabela 3 - Resultados das análises químicas do carvão

Fornada	Umidade (%)	Materiais Voláteis (%)	Cinzas (%)
Natural	8,51	35,49	2,83
Vapor1	8,48	12,71	1,34
Vapor2	5,69	29,38	1,42

A manta de vapor após circular pela massa de carvão é lançada no ambiente de forma que o produto possa, então, receber um novo calor oriundo de uma nova manta, proporcionando uma maior eficiência no processo de resfriamento e uma redução no tempo de ocupação do forno. Uma velocidade maior de circulação do vapor pode melhorar, sensivelmente, a transferência de calor da massa de carvão ao vapor e vice-versa.

Com a aplicação do vapor d'água, as concentrações de voláteis, tal como mostrado na Tabela 3, diminuíram. Cabe aqui conferir se o vapor conseguiu arrastar parte do material volátil ou se esta redução é função da forma da carbonização e do tipo de lenha utilizado. Para a validação desta informação é necessário fazer-se análises de cromatografia gasosa, cromatografia líquida e espectrometria de massas das amostras por carbonização.

A liberação do vapor d'água mais voláteis em suspensão ao meio ambiente sem seu reaproveitamento e sem sua recirculação, retardaram o processo de resfriamento pois isto permitia a entrada de ar, mantendo a massa de carvão sob a ameaça de re-ignição. Isto ficou evidente quando massas de estanqueidade e vedação das paredes caíam, durante o resfriamento, e a massa entrava em re-ignição, tal como mostrado nas Figuras 26 e 28.

4.4. Ganho anual de fornadas

A Tabela 4 mostra o ganho em produtividade devido ao uso de vapor d'água para resfriamento. Nas fornadas foi aplicada uma alta velocidade de carbonização, pois o interesse era o estudo do ganho em tempo com o processo de resfriamento empregando vapor d'água e isto deve ser considerado pois a carbonização quando mais lenta, quebra menos o carvão, obtendo-se maior rendimento na relação lenha e carvão, que por sua vez apresenta maior resistência mecânica.

Tabela 4 - Relação entre tempo de carbonização e o número de fornadas ao ano

Fornada	Carbonização dias ⁴⁴	Ganho com uso do vapor
Natural	9	
Vapor1 e 2	7	22,22 %

Assim, em um ano (365 dias), considerando a fornada natural onde gastou-se onze dias para todo o processo (um dia para carga + dois dias em carbonização + sete dias em resfriamento + um dia para descarga), têm-se trinta e três fornadas anuais.

⁴⁴ O índice carbonização em dias, engloba:

- 2 dias em carbonização e sete dias em resfriamento na fornada Natural;
- 2 dias em carbonização e cinco dias em resfriamento nas fornadas Vapor1 e Vapor2.

•

O mesmo raciocínio pode ser aplicado quando da utilização do vapor (um dia para carga + dois dias em carbonização + cinco dias em resfriamento + um dia para descarga), resultando em quarenta fornadas/ano com carga/descarga manuais e um ganho em numero de fornadas de 21,3%, tal como mostrado na Figura 34 e na Tabela 5.

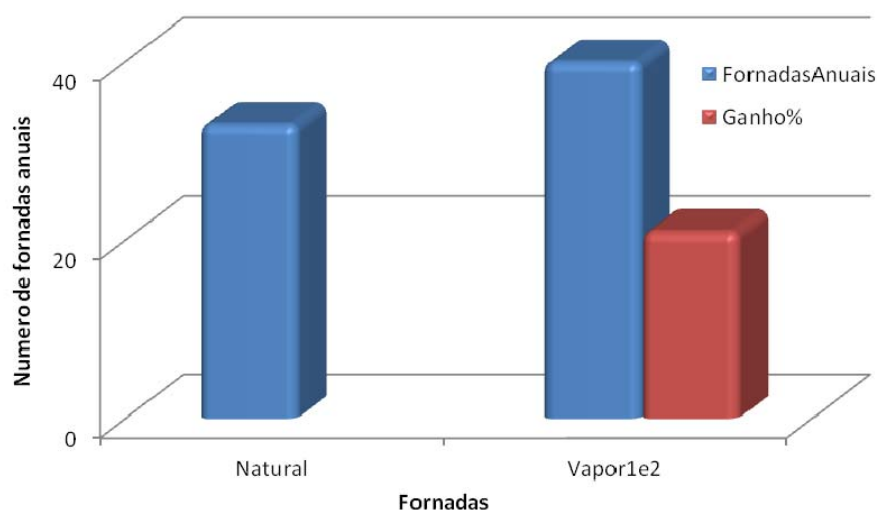


Figura 34 - Número de fornadas ano e ganho com aplicação de vapor.

Tabela 5 - Número de fornadas ano e ganho com aplicação de vapor.

	Natural	Vapor1e2
Fornadas Anuais	33	40
Ganho%		21

5. CONCLUSÕES

O vapor, quando está circulando, devido à sua lenta velocidade de assentamento, sobre a massa de carvão em incandescência, permanece suspenso no micro-clima ambiente por tempo suficiente, antes que chegue a molhar a massa de carvão e a ser devidamente escoado do ambiente forno + massa de carvão. O sistema de vaporização tem a vantagem de proporcionar uniformidade de distribuição térmica em todo o conjunto forno-massa de carvão, proporcionando eficácia significativa no resfriamento e pode, também, ser adaptado a fornos de estruturas mais simples, em que, a limitação pode ser o custo de implantação.

Os resultados do rendimento produtivo três fornadas são diferentes, pois o rendimento é função da unicidade da lenha, da condução da carbonização e da presença ou não de rachaduras na estrutura do forno. Isso é evidenciado pela alteração nas curvas das fornadas Vapor1 e fornada Vapor2, vistas nas Figuras 28, 30 e 31, 32 e 33, causando um aumento no tempo de resfriamento.

Através dos resultados, pode-se concluir que:

- A aplicação do vapor para o resfriamento pode gerar uma ótima relação custo/benefício, aumentando o número de fornadas por ano.
- Há aumento na capacidade produtiva devido ao ganho em dias pela ocupação e uso dos fornos.

Como sugestão para estudos futuros e para aplicação em uma UPC: (i) um forno estando em fase de carbonização e pré-resfriamento poderia receber vapor d'água oriundo de água circulando em tubulação apropriada, sob e sobre a massa, em um forno próximo e em plena carbonização, gerando aproveitamento máximo da temperatura do vapor e sem a necessidade de uma unidade geradora de vapor para cada forno. Esse ciclo operacional dependeria de estudos logísticos da produção e demanda do carvão; (ii) fazer análises de cromatografia gasosa, líquida e espectrometria de massas para qualificação e quantificação dos compostos presentes no vapor e no carvão, garantindo uma maior eficiência energética, pois não seria necessário consumir energia do carvão para “queimar” este material indesejável e, assim, entregar energia térmica limpa; (iii) avaliar outras aplicações de uso deste tipo de carvão “lavado” a vapor d'água.

A adoção de soluções de maior produtividade nas formas de carbonização implica em alterações significativas na sistemática produtiva vigente no Brasil, pois torna-se necessário a adoção de conceitos e tecnologias agroindustriais modernas e mais eficientes, mas de elevados investimentos iniciais e com ganhos ambientais significativos.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, J. de L. **Fontes de energia**. Brasília: Ed. UnB, 1994. 138 p.

ALLOCA, C.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L. R. Design analysis of single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**, v. 35, p. 785-795, 2003.

AMS – Associação Mineira de Silvicultura. **Anuário Estatístico 2007**. Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>. Acesso em: 12 out. 2008.

AMS – Associação Mineira de Silvicultura. **Perspectivas e tendências do abastecimento de lenha para a indústria de base florestal no Brasil, 2005**. Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>. Acesso em: 12 abr. 2009.

ANTAL Jr, M. J.; MOK, W. S. Review of methods for improving the yield of charcoal from biomass, In: **Energy e Fuels**, 1990,v,04, p 221 – 225.

ASRAR, G.; KANEMASU, E. T. Estimating thermal diffusivity near the soil surface using Laplace transform: uniform initial conditions. **Soil Science Society American Journal**, v. 47, n. 3, p. 397-401, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Normas técnicas NBR 8112: Carvão vegetal – análise imediata**. Brasília, out.1986.

AVALLONE, E.; BAUMEISTER, T. **Mark's standard handbook for mechanical engineers**. 10th edition. New York: McGraw-Hill Book Company, 2006. 1937 p.

BABCOCK e WILCOX. **Steam: its generation and use**. New York: Babcock e Wilcox, 1985.

BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Campinas, SP: Unicamp, 2003. (Apostila). Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP3.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2008.

BIZZO, W. A. **Tecnologias da biomassa para conversão de energia**. Universidade Estadual de Campinas, 2007. Disponível em: <[www.sedec.rn.gov.br/downloads/Bizzo_\(UNICAMP\)_%20Energia_Biomassa_06.06.07.pdf](http://www.sedec.rn.gov.br/downloads/Bizzo_(UNICAMP)_%20Energia_Biomassa_06.06.07.pdf)>

. Acesso em: 17 jun. 2008.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982. 712 p.

BRANCALION, M. L., **Avaliação de aspectos conFiguracionais e analíticos da técnica TSFFAAS**. Dissertação - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química. Campinas, SP: [s.n], 2006.

BRASIL, M. M. E. **Balanço energético nacional 2007: ano-base 2006**. Rio de Janeiro: EPE, 2007. 192 p.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide technique de la carbonization**, Édisud, França, 1985a, 180pgs.

BRIANE, D.; DOAT, J., **Technique de La Carbonisation La Fabrication Du Charbon de Bois**. Agence Française Pour La Matrixe de L'Energie. Association Bois de Feu. C. T. F. T.; Aix-en-Provence, ÉDISUD, 1985b. 180p

BRIDGWATER, A. V. **Review of thermo chemical biomass conversion**. Birmingham: Energy Research Group, Aston University, Ed. Crown, 1991. 76 p.

BRIDGWATER, A. V.; PEACOCKE, C. Biomass fast pyrolysis. In: BIOMASS CONFERENCE OF THE AMERICAS, 2., 1995, USA. **Proceedings...** USA, 1995. p. 1037-1047.

BRITO, J. O. Desafios e perspectivas da produção e comercialização de carvão vegetal. In: **Forum nacional sobre carvão vegetal**. Belo Horizonte, 2008.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com lenhas da Amazônia. **IPEF – Séries. Téc.**, v. 2, n. 5, p. 1-25, 1981.

BROWN, F. T. **Engineering system Dynamics**. [S.l.]: Marcel-Dekker, 2001.

BROWNE, F. L. Theories of the combustion of wood and its control, a survey of the literature. **FPL Report**, n. 2136, 1958.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**, John Wiley e Sons, Inc, EUA, 1963, 689 pgs.

BUCHANAN, A. H. **Structural for design fire safety**. Chichester (U.K.): John Wiley e sons Ltd., 2001.

CANTO, E. L. do. **Minerais, minérios, metais: de onde vêm? para onde vão?** São Paulo: Moderna, 1996.

CARSLAW, H. S., JÄGGER, J. C., **Conduction of Heat in Solids** , 2nd Ed., Oxford Univ. Press, London, 1959.

CARVALHO Jr., J. A. de; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

CARZINO, M. C. **Projeto e análise para dimensionamento automático de fornos para cozimento de pães e biscoitos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CETEC, **Teoria Simplificada da Combustão**, Belo Horizonte, MG: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1988, 30 pgs.

CUNHA, M. P. S. C.; PONTES, C. L. F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z. B.; BARBOSA, A. P. R. **Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras**. In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, v.2, p. 93-121, São Carlos, 1989.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004a.

DEMIRBAS, A. Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 71, n. 2, p. 803-815, 2004b.

DOAT, J. Le Pouvoir Calorifique des Bois Tropicaux, In: **Revue Bois et Forêts des tropiques** n, 172, 1977, Pgs 33-55.

DOE – Department of Energy. **Thermodynamics, heat flow and fluid flow**. Washington, D.C.: US Department of Energy, 20585, 1992. 274 p.

DORNY, C. N. **Understanding dynamic systems: approaches to modeling, analysis, and design**. NJ: Prentice-Hall, 1993.

DORNY, C. N.; FEGLY, K. A.; KRENDEL, E. S. Systems engineering. In: FINK, D.G.; McKenzie, A.A. **Electronic engineer's handbook**. 1st edition. [S.l. : s.n.], 1975.

EATON, R. A.; HALE, M. D. C. **Wood: decay, pests and protection**. London: Chapman e Hall, 1993.

EGGEBRECHT, L. C. **Interfacing to the IBM personal computer**. 2nd edition. USA. 1990. 345 p.

EMRICH, W. Handbook of charcoal making. **Solar Energy R e D in the European Community** – Series E – Energy from biomass, v. 7, p. 278, 1985.

FAO. **Métodos simples para fabricar carbón vegetal**. Roma: Estúdio FAO - Montes, 41, 1983.

FAO. **Yearbook of Forest products**. 57th ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005.

FERREIRA, O. C. Emissão de gases de efeito estufa na produção e consumo do carvão vegetal. In: **ECONOMIA E ENERGIA**, ano III. set./out. 2000. Disponível em: <<http://ecen.com/eee18/enerequi.htm#energiaeq>>. Acesso em: 05 maio 2008.

FERREIRA, W. P. M. **Avaliação de uma fornalha a carvão vegetal para aquecimento de aviário**. 2004. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da lenha. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Uso da lenha para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 27- 41.

GOTTFRIED, B. S.; LEE, C. J.; BELL, K. J.; “The Leidenfrost phenomenon: film boiling of liquid droplets on a flat plate”, **Int. J. Heat Mass Transfer**, 1966, 9, 1167-1187.

GUEDIRA, F. **Pyrolise lente de la biomasse: comportement compare des tourteux d olives, de la bagasse de canne a sucre et la sciure de bois (Pin maritime)**. 1988. 122 f. Thèse (Docteur) – Université Mohamed, Maroc, 1988.

HEISELBERG, P.; SVIDT, K.; NIELSEN, P. V. Characteristics of airflow from open windows. **Building and Environment**, v. 36, p. 859-869, 2001.

HINDS, W. C. **Aerosol technology**. New York: Wiley, 1982. p. 161.

HOMMA, A.K.O.; ALVES, R.N.B.; MENEZES, A.J.E.A.; MATOS, G.B. Guseiras na Amazônia:perigo para a floresta. **Ciência Hoje**, v. 39, n. 233, p. 56-59, 2006.

ILMARI, A.; SIHVONEN, J.; SIMO, K.; TEPPONEN, L.; KOSKELO, T.; OMI, T. Modeling fundamental properties of wood products. In: **INTERNATIONAL WOOD CONFERENCE**, 1996. v. 2, p. 487-494.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; THEODORE, L.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. **Fundamentals of heat and mass transfer**. Wiley, 2008.

INGHAM, J. M. Biomassa no mundo e no Brasil. In: MONTENEGRO, A. de A. **Fontes não-convencionais de energia: as tecnologias solar, eólica e de biomassa**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1999. 160 p.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, 1797).

JENKINS, B .M.; BAXTER, L. L.; MILES JR., T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, v.1-3, p. 17-46,1998.

JUVILLAR, J. B. Tecnologia de transformação de lenha em carvão. In: PENEDO, W.R. (Comp.). **Uso da lenha para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC-MG/SPT-001, 1980. p. 62-82.

KANURY, M. A.; BKACKSHEAR, Jr. On the combustion of wood II: Influence of internal convection on the transient pyrolysis of cellulose. In: **Combustion science and technology**, v. 2, p. 5-9, 1970.

KNIGHT, J. A. Pyrolysis of wood residues with a vertical bed reactor. **Progress in Biomass Conversion**, v. 1, p. 87-115, 1979.

KOLLMAN, F.; CÔTÉ Jr, W. A. **Principles of wood science and technology, I – solid wood**, New York, N, Y, Springer Verlag, Heidelberg, Germany, 1968. v. 1, 592 pgs.

LI, Y.; DELSANTE, A. Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces. **Building and Environment**, v. 36, p. 59-71, 2003.

LIENHARD IV, J. H.; LIENHARD V, J. H, "**A heat transfer textbook**". Houston: Projeto de Material Didático Livre dos Professores (M.I.T. e Universidade de Houston), 2002.

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

LUYBEN, W. L. **Process modeling, simulation and control for chemical engineers**. 2nd edition. New York: McGraw Hill, 1990.

MALISKA, C. R., **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 4 Ed., 2004.

MARTINS, H. Madeira como fonte de energia, In: **Uso da madeira para fins energéticos**, Belo Horizonte – MG, CETEC, 1980, p 9 – 26.

MAZON, A. A. O. **Ventilação natural em galpões utilizando lanternins**. 2005. 214 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2005.

MAZON, A. A. O.; SILVA, R. G. O. da; SOUZA, H. A. de. Ventilação natural em galpões: o uso de lanternins nas coberturas. **Rem. Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 2, 2006.

MBURU, F.; DUMARÇAY, S.; PETRISSANS, M.; GÉRARDIN, P. Evaluation of thermally modified *Grivellia robusta* heartwood as an alternative to shortage of Wood resource in Kenya: characterization of physicochemical properties and improvement of bioresitence. **Bioresource Technology**, v. 98, n.18, p. 3478-3486, 2007.

MEZERETTE, C.; VERGNET, L. F. La voie thermochimique, In: **Guide Biomasse Energie**, 1a, Edição, l'IEPF, Canadá, 1994, Pgs 144-200.

MILORI, D. M. B. P. **Efeito estufa X Agricultura**. Agronline, 29 mar. 2004. Disponível em: <<http://www.agronline.com.br/artigos/artigo.php?id=155>>. Acesso em: 12 abril 2008.

MONTEIRO, M de A.; SILVA R. P. da, AMARAL, M. D. B.; Desmatamento na Amazônia brasileira: desocultando o papel da produção de carvão vegetal nas mudanças espaciais recentes, **III ENCONTROS DA ANPPAS**, Brasília-DF, 2006.

MORAIS, S. A. L. de; NASCIMENTO, E. A. do; MELO, D. C. de. Análise da lenha de pinus oocarpa parte i – Estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. **"Princípios da termodinâmica para engenharia"**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 2002.

MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da lenha**. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR (Apostila). Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlindo/materiais/Tecnologiadalenhapdf>>. Acesso em: 06 out. 2008.

MOURA, L. F. B.; BONNEMANN, A. Tecnologia e industrialização da madeira I. In: **Manual do técnico florestal** – Apostilas do Colégio Florestal de IRATI. 1ª Ed. Vol. 4. Irati, Paraná. 1986. 364 pgs.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S.; TROSSERO, M. A.; FRISK, T. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília: ANEEL, 2000.

NOGUEIRA, L. A. H.; NOGUEIRA, F. J. H.; ROCHA, C. R. **Eficiência energética no uso de vapor**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras, FUPAI/EFFICIENTIA, 2005a.

NOGUEIRA, L. A. H.; ROCHA, C. R.; NOGUEIRA, F. J. H.; MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência energética no uso de vapor – Manual prático**. [S.l.]: ELETROBRÁS PROCEL e EFFICIENTIA/FUPAI, 2005b.

NUMAZAWA, S. Contribution à l'étude de la pyolyse lente sous pression du bois – Détermination des paramètres optima du procédé et caractéristiques des produits obtenus, **Tese de Doutorado**, Université de Technologie de Compiègne, França, 2000.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. London: Routledge, 1987. 435 p.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Perry's chemical engineers' handbook**. 7th edition. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988.

PHUOC, T. X.; DURBETAKI, P. Heat and mass transfer analysis of a coal particle undergoing pyrolysis, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 1987, Vol.30, N.11, pgs 2331 – 2339.

PINTO, E. M. **Determinação de um modelo pra taxa de carbonização transversal a grã para a lenha de E. citriodora e E. grandis**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

PISANI, M. Circuit yields accurate absolute values. **Design Ideas**, July 5, 2001. Disponível em: <www.ednmag.com>. Acesso em: 24 jun. 2008.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. 2. ed. Porto Alegre: D.C. Luzzatto Editores, 1986.

RONALDO, S. S.; PINHEIRO, P. C. da C.; REZENDE, M. E. A. 2006, **Seminário: Prática, Logística, Gerenciamento e estratégias para o sucesso da conversão da matéria lenhosa em carvão vegetal para uso na metalurgia e indústria**, Belo Horizonte – MG, Brasil.

ROUSSET, P. Modifications des constituants du bois sous l'effet de la chaleur et consequences sur ses proprietes, In: **Formation a la valorisation energetique de la biomasse lignocellulosique**, IDEFOR, Anguédédou, Côte d'ivoire, 1993, Pgs 171-192.

ROWELL, R. M.; LEVAN-GREEN, S. L. Thermal properties, In: **Handbook of wood chemistry and wood composites**, Ed, CRC Press, 2005a, Pgs 121-138.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. Cell wall chemistry, In: **Handbook of wood chemistry and wood composites**, Ed, CRC Press, 2005b, Pgs 35-79.

SALAZAR, C. M.; CONNOR, M. A. Kinetic studies of the pyrolysis of wood, with particular reference to eucalyptus regnans. In: AUSTRALIAN CONFERENCE ON CHEMICAL ENGINEERING, 11., 1983, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: [s.n.], 1983.

SBRT – Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas. **Produção de carvão vegetal**. Disponível em: <<http://www.sbrt.ibict.br>>. Acesso em: 11 dez. 2007.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process dynamics and control**. New York: John Wiley, 2003.

SHEARER, J. L. **Introduction to system dynamics**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1967.

SHIELDS, C. D. **Boilers type**; characteristics and functions. New York: MacGraw Hill, 1982.

SHOEMAKER, D. P.; GARLAND, C. W.; NIBLER, J. W. **Experiments in physical chemistry**. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 1996. 778 p.

SIAS, D. B. **A aquisição automática de dados proporcionando discussões conceituais na física térmica do ensino médio**. Dissertação (Mestrado) – IF-UFRS, 2006.

SIMONS, G. A. Coal Pyrolysis II. Species Transport Theory, **Combustion and Flame**, 1984, Vol 55, pgs 181 – 194.

SMITH, C.A.; CORRIPIO, A.B. **Principles and practices of automatic process control**. 3rd edition. New York: John Wiley, 2005.

STEWART, F. D. Ignition of cellulosic materials. In: PERRY, I. (Ed.). **Heat transfer in fires: thermo physics, social aspects, economic impact**. Minnesota: Blackshear, University of Minnesota , 1974. cap. 3, p. 163-92.

THRELKELD, J. L. **Thermal environmental engineering**. 2^{ed} ed. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1970.

TOLEDO, E. **Ventilação natural das edificações**. Maceió: EDUFAL, 1999. 170 p.

VALE, A. T.; LEÃO, A. L.; BRASIL, M. A. M. **Caracterização da madeira e da casca de Sclerolobium paniculatum, Dalbergia miscolobium e Pterodon pubescens para uso energético**, nº 26; 3º Encontro de Energia Rural, Agrener, 2000. Campinas SP.

VALENTE, O. F. Carbonização de lenha de eucalipto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.141, p.74-82, set. 1986.

VERAS, C. A. G.; CARVALHO Jr, J. A.; FERREIRA, M. A. The chemical percolation desvolatilization model applied to the desvolatilization of coal in high intensity acoustic fields, **Journal of Brazilian Chemical Society**, 2002, Vol 13, N. 03 pgs 358 – 367.

VINCENTI, W. G.; KRUGER Jr., C. H.; **Indrotuction to Physical Gas Dynamics**, Wiley, New York, 1986.

VISČŮROVÁ, R. **Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Spritzwasserkühlung unter Berücksichtigung des Einflusses der Verzunderung**. Ph. D. thesis, Technische UniversitSt Clausthal, 2007. Disponível em: <http://www.gbv.de/dms/clausthal/E_DISS/2007/db108527.pdf>. Acesso em: maio 2009.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001. 185 p.

VOVELLE, C.; MELLOOTTEE, H. Modelisation de la pyrolyse oxydante, ou, noxydante de bois de déchets végétaux à partir de leurs composants. In: PALZ, W.; CHARTIER, P. (Eds.). **Energy from biomass**. 2nd ed. London: Applied Sciences, 1982. p. 925-929.

WARES, C. (tradução); BELL, K. J. (introdução); “On the fixation of water in diverse fire”, **Int. J. Heat Mass Transfer.**, 1966, 9, 1153-1166. Uma adaptação de Leidenfrost, J.G.; “A Tract about some Qualities of Common Water”, Alemanha, 1756.

WENZL, H. F. J. **The chemical technology of wood**. New York: Academic Press, 1970. 692 p.

WHITE, R. H. **Charring rates of different woods species**. Thesis for degree of Ph. D. – University of Wisconsin-Madison U.S.A., 1988.

WILLIAMS, E. M.; COOLEY, W. L. Circuit principles. In: FINK, D.G.; McKENZIE, A.A. **Electronic engineers handbook**. 1st International Edition. [S.l. : s.n.t.], 1975.

WILLIAMS, F. Condensed-phase mass and energy balances. In: PERRY, I. (Ed.). **Heat transfer in fires: thermo physics, social aspects, economic impact**. Blackshear: University of Minnesota, 1974. Cap. 3, p. 163-192.

WOLVERINE TUBE, Inc. **Engineering data book III**. Written by Prof. THOME, J.R. (Director, Laboratory of Heat and Mass Transfer (LTCM), Faculty of Engineering Science and Technology. Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL) CH-1015. Lausanne. Switzerland, 2005.

YANNAS, S.; MALDONADO, E. (Eds.). **PASCOOL handbook** – Designing for summer comfort. Londres: Architectural Association Graduate School, 1995. Cap. 4: Thermal Inertia.

ZANZI, R. V. **Fast pyrolysis at height temperatures**. Ph. D. Thesis – Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2001.

ZUCHI, P. S. Avaliação ergonômica do trabalho na atividade de carvoejamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE ERGONOMIA E SEGURANÇA DO TRABALHO FLORESTAL E AGRÍCOLA, 1., 2000, Belo Horizonte. **Resumos**. B. Horizonte, 2000.

APÊNDICES

APÊNDICE A

A eletrônica do circuito proposto

Segundo Brown (2001), Dorny (1993 e 1975) e Shearer (1967), em termos genéricos, um sistema de aquisição de dados (DAQ – Data Acquisition) incorpora um dispositivo eletrônico que liga os elementos sensores (termopares, sensores de pressão, etc.) ou os atuadores (válvulas, motores de CC e CA, etc.) a uma unidade que processa e armazena uma informação (computador) e, com isso, pode atuar no funcionamento do processo.

O instrumento total proposto foi baseado em dois módulos básicos.

O primeiro tem por função: conectar todos os elementos sensores e fazer a multiplexação dos sinais emitidos pelos sensores; fazer pré-amplificação destes; passar esses sinais por blocos (somador, ajuste (offset)), demodulador e filtro (passa-baixas)); e transmiti-los, por meio de cabo blindado de seis pares com 2,5 m de comprimento, até o segundo módulo.

O circuito oscilador cujo diagrama esquemático é mostrado na Figura 1A tem por função gerar pulsos de sincronismo de toda a operação do circuito de interface dos termopares. É composto por dois osciladores utilizando portas inversoras TTL e um circuito integrado (CI) 7474, responsável pelos dois sinais de sincronismo, um operacional (pino 3 do CI U2) e, outro stand-by da operação (pino 2 do CI U2)). O CI 7474 monitora qualquer diferença na frequência entre os dois osciladores, tornando mais simples a transmissão do sinal e a implementação do contador de pulsos.

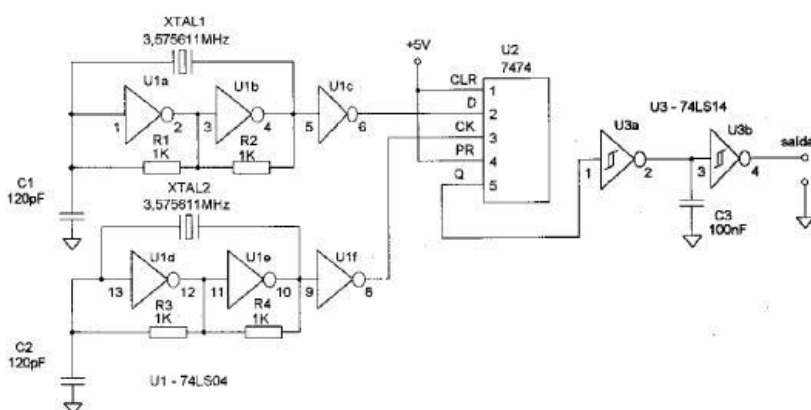


Figura 1A - Circuito oscilador.

A Figura 2A mostra um circuito de interface. Os CI's U1e U2, respectivamente, fazem a comparação de magnitude dos sinais de um sensor e o sinal de temperatura escolhido por meio de programa computacional e o CI U3 é o responsável pela decodificação de

endereço-base, isto é, pela comunicação com a porta de E/S do computador. O CI U4 (CI 8253) é composto por três contadores de 16 bits, cuja função é multiplexar os sinais de um sensor e do programa computacional, enviando-os por meio de cabo serial para a CPU, para processamento.

Os CI's U1 e U2 têm por função comparar valores e mostrá-los, por meio do pino 7, pino 6 e pino 5, gerando uma interface máquina-homem.

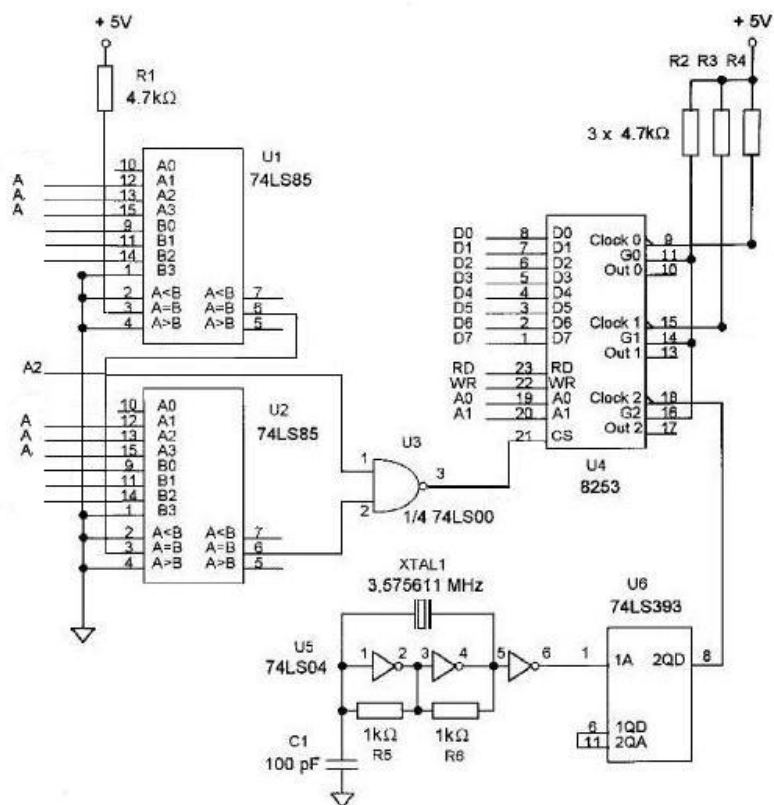


Figura 2A - Circuito de comparação.

Para que o operador, nas fases de encerramento da carbonização, da fase de resfriamento com aplicação do vapor e do resfriamento natural, saiba se a temperatura monitorada está maior que a desejada e que seja necessária uma atitude mais drástica, foi colocado um sistema de alarme no pino 5 do 74LS85, CI U1. Para saber que a temperatura de encerramento da aplicação do vapor é menor do que a ideal, foi colocado um sistema de alarme no pino 7 do 74LS85, CI U1. Para que se saiba que a temperatura de abertura e descarga do forno é menor do que a ideal, foi colocado um sistema de alarme no pino 7 do 74LS85, CI U2; essa informação é importante para agilizar a carga do forno, quando a supervisão operacional do forno indica, por meio do computador, que as temperaturas de aplicação de vapor e a de abertura do forno, os bits do pino 06 de U1 e U2, estão em 1. Como o tempo de resposta de conversão foi de 25 micro segundos, cada ponto armazenado corresponde ao valor médio de 10 leituras da sub-rotina de aquisição de dados que, por sua

vez, é uma média de 21 leituras do conversor A/D. Para essa função, qualquer microcomputador, com velocidade alta, pode ser utilizado.

Já o circuito mostrado na Figura 3A, com base em um projeto proposto por Pisani (2001), quando conectado a um circuito multiplexador dos termopares, fazendo a leitura de um termopar por vez, fornece um sinal de saída com precisão de 10 ppm, mantendo a integridade do sinal a ser medido e dando segurança ao processo térmico, mas não permitindo o aliasing do sinal.

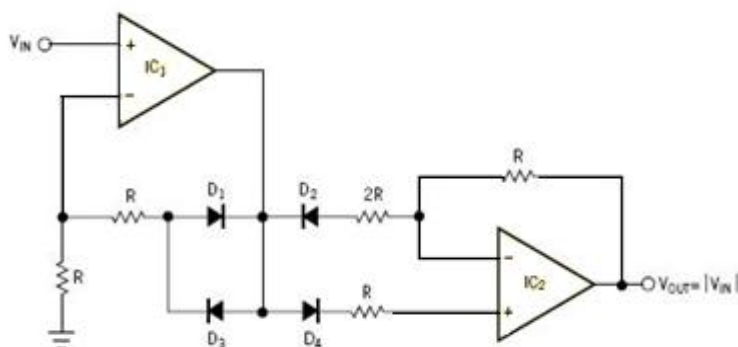


Figura 3A - O circuito, com acoplamento retificador em onda completa, fornece em sua saída o valor absoluto exato do sinal de entrada.

O circuito usa dois amplificadores operacionais (IC_1 e IC_2); quatro resistores idênticos ($1K\Omega$, 0,1%), R ; um resistor ($2K\Omega$, 0,1%), $2R$; e quatro diodos (2N4148). Quando o sinal de entrada, V_{IN} , é positivo, a saída de IC_1 é $2V_{IN} + V_{D3}$ (a queda de tensão no diodo D_3). Como D_2 está reversamente polarizado, comporta-se como um seguidor de tensão, resultando $V_{OUT} = R (V_{IC1} - V_{D4}) / 2R$.

Como a mesma corrente $I = V_{IN}/R$ circula em D_3 e D_4 e supondo suas características idênticas, $V_{D3} = V_{D4}$ e $V_{OUT} = V_{IN}$. Quando V_{IN} é negativo, a saída de IC_1 é $2V_{IN} - V_{D1}$. Com D_4 , reversamente polarizado, o amplificador IC_2 trabalha como amplificador inversor, resultando em $V_{OUT} = R (V_{IC1} + V_{D2}) / 2R$. A corrente que circula em D_1 e D_2 é resultante de V_{IN}/R , e $V_{OUT} = -V_{IN}$.

Para garantir um bom desempenho desse circuito: (i) os cinco resistores devem ser idênticos, garantindo um ganho simétrico; (ii) os pares do diodo, D_1 - D_2 e D_3 - D_4 , devem ter acoplamento térmico perfeito para minimizar erros em baixas tensões de entrada; e (iii) os amplificadores devem trabalhar com baixo offset.

No segundo módulo, os sinais são entregues à Interface de Aquisição e Controle de Dados, instalada na CPU, para processamento dos sinais. Os sinais dos sensores, como são recebidos um a um, são colocados no terminal de entrada de sensor e processados. As informações da CPU para o primeiro módulo são colocados no terminal de saída analógica.

Com base em um circuito desenvolvido por Eggebrecht (1990), representado por um diagrama em blocos de uma interface de aquisição de dados, mostrado na Figura 4A, foi desenvolvido uma interface de aquisição de dados composta pelas seguintes partes: (i) decodificador – responsável pelo mapeamento das portas de I/O da interface no barramento de endereço do computador, o circuito decodificador utiliza as linhas de endereço (A0 a A9) e as linhas de controle (/IORD/IOWR e AEN) do barramento do PC para decodificar os endereços das portas de I/O; (ii) conversor digital-analógico – converte o dado digital em um nível de tensão de saída. O circuito integrado (CI) conversor converte um sinal digital de 8 bits (D0 a D7), gerado pelo programa computacional, para seu equivalente sinal analógico; a operação de conversão inicia-se quando é ativado o sinal de escrita, dado pela linha de controle/IOWR, no endereço 305 h; juntamente é enviada, pelo barramento de dados, a palavra a ser convertida; o sinal analógico de saída do conversor pode variar de + 5V a 5V, de acordo com o valor digital escrito na porta; (iii) conversor analógico-digital – converte um nível de tensão de entrada em um dado digital de 8 bits; o CI conversor converte um sinal analógico em digital de 8 bits (D0 a D7), que pode ser interpretado e processado por meio de programas computacionais; o nível de tensão da entrada analógica pode variar de 0 a 5V; o tempo de conversão é de 100 μ s; a conversão pode iniciar de duas formas: por endereçamento pela base de tempo do contador 1 do 8254, ou conversão contínua; qualquer sensor pode ser acoplado à entrada analógica do conversor; e para tal são necessários os circuitos auxiliares: (a) Amplificador Diferencial – tem por função rejeitar os sinais em modo comum, ou atenuar qualquer ruído que surja no sinal. Possui ganho unitário, e o ganho de malha positiva e negativa é ajustado independentemente, obtendo-se máxima rejeição em modo comum; (b) Amplificador Programável – amplifica a tensão de entrada do sensor, já com o ruído em modo comum eliminado pelo amplificador diferencial; o ganho do amplificador é programável por meio de programas computacionais pelos bits D₄, D₅ e D₆ do registrador de saída; (c) Filtro Passa-Baixa – permite a passagem das componentes do sinal de entrada com frequências de até 1 kHz, caso aconteçam, evitando-se, assim, o efeito aliasing provocado pela amostragem do sinal analógico; e (d) Sample/Hold – retém o sinal de entrada analógico durante o processo de conversão. É controlado pelo bit D7 do registrador de saída. (iv) Circuito Temporizador Programável – usado como fonte de sincronismo para o início automático da conversão A/D e para a contagem de eventos externos. Gera um sinal de início de conversão A/D. É controlado por meio de programas computacionais, permitindo ao usuário especificar o período de conversão, programado via software. (v) Registrador de saída – permite o controle da interface, bem como o controle de um processo externo utilizando 4 bits de saída. O registrador de saída armazena o dado

proveniente do barramento de extensão. O dado de entrada controla: o sample/hold (1 bit) e o ganho do amplificador programável (3 bits) e fornece 4 bits de saída para uso externo.

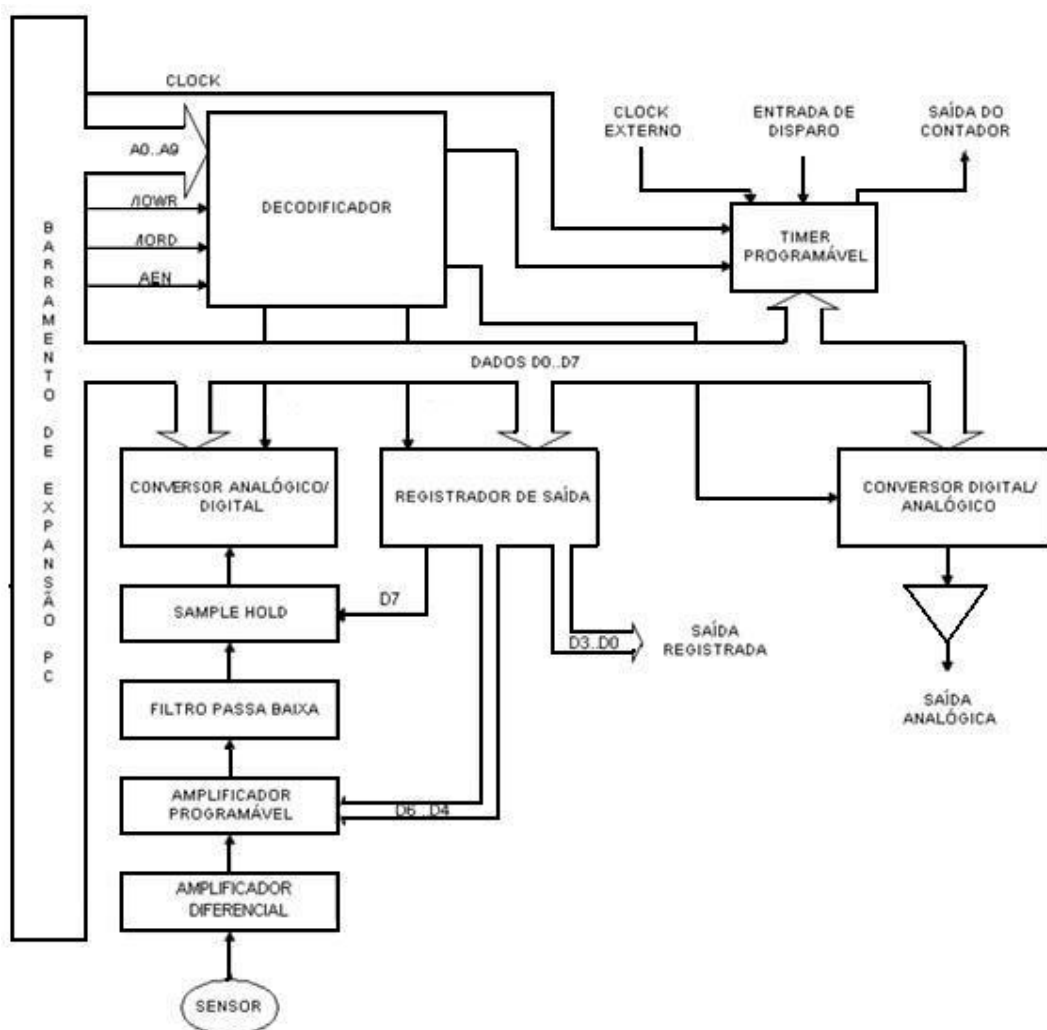


Figura 4A - Diagrama em blocos da Interface de Aquisição e Controle de Dados.

O tempo de resposta inercial do instrumento deve ser muito baixo, pois deve responder, fiel e instantaneamente, às mais rápidas flutuações de temperatura, visto que estas devem ser da ordem de 0,01%, ou menos.

Ressalta-se que o uso de computadores em instrumentação não deve ser encarado como uma substituição ao operador humano e, sim, como opção à liberação da mão de obra para atuar em áreas que complementam a confiabilidade dos resultados pretendidos.

Esse circuito foi testado utilizando-se o forno de um cromatógrafo gasoso VARIAN modelo 3700, como elemento de referencia térmica denominado sensor CG, onde foi programado uma corrida térmica com as seguintes referências: temperatura inicial de 25 °C, durante 5 minutos, após o que foi feito o gradiente de 1°C por minuto até a temperatura final

de 80 °C, onde ficou por 10 min. Terminada a corrida térmica, abriu-se a porta, resfriando o forno em 5 min.

Foi utilizado um termopar tipo K, com haste em aço inox de 400 mm de comprimento por 6 mm de largura, com parede de espessura de 1 mm e cabo de 3600 mm de comprimento.

Os dados foram coletados e armazenados para posterior processamento. Foi gerada uma tabela de dados que alimentaram o programa ORIGIN 5.0 para a análise de regressão, e os resultados foram para uma equação de primeiro grau $Y = a + bx$, tal como mostrado no gráfico da Figura 5A.

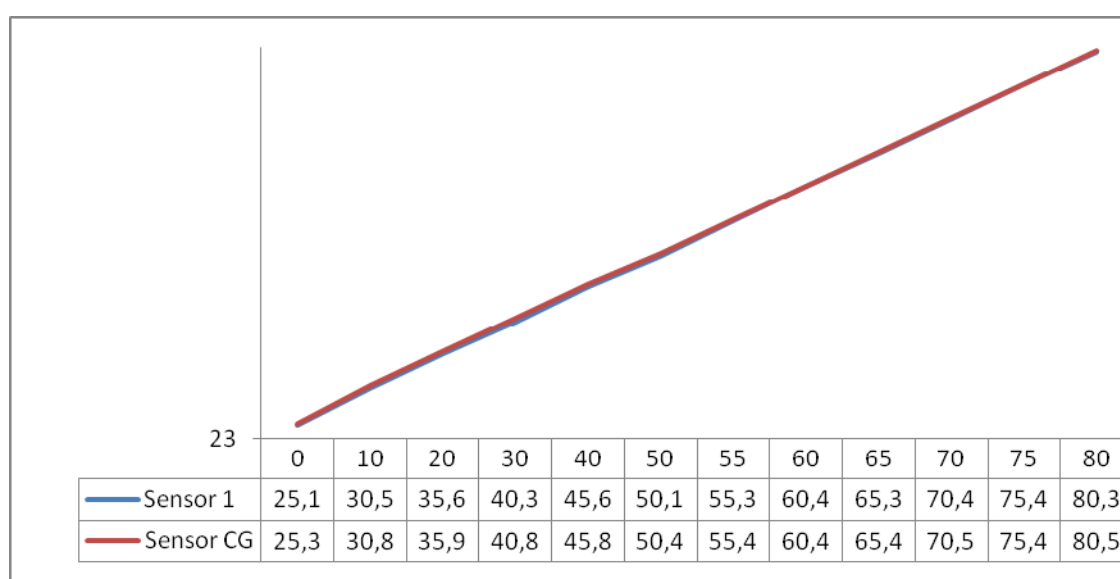


Figura 5A - Curvas de comparação entre sinal de termopar e sinal de referência.

Foi utilizado o programa SPSS Versão 13, para a análise de regressão, e os resultados foram para uma equação de primeiro grau $Y = a + bx$, em que $a = 21,46$ (erro = 0,196), $b = 1,03$ (erro = 0,004), com R^2 de 0,99933.

APÊNDICE B

Tabelas de dados da carbonização

Medida	Hora	Natural	Vapor1	Simula1	Vapor2	Simula2
1	08:00	62,7	57,3		63,9	
2	09:00	39,1	42,6		49,8	
3	10:00	42,7	46,8		47,8	
4	11:00	46,7	49,8		49,3	
5	12:00	50,9	52,8		51,9	
6	13:00	55,1	58,8		56,9	
7	14:00	58,5	63,6		60,8	
8	15:00	61,6	67,8		65,8	
9	16:00	65,7	70,3		69,8	
10	17:00	68,9	75,7		73,7	
11	18:00	72,1	80,6		78,9	
12	19:00	75,3	89,5		86,8	
13	20:00	78,5	95,3		94,8	
14	21:00	93,7	105,7		102,4	
15	22:00	98,5	112,6		109,5	
16	23:00	101,7	118,9		114,7	
17	00:00	106,5	124,6		119,5	
18	01:00	109,7	132,6		126,4	
19	02:00	112,9	136,8		129,8	
20	03:00	116,1	142,6		134,6	
21	04:00	119,3	156,5		142,9	
22	05:00	122,5	167,8		148,9	
23	06:00	113,4	178,6		156,9	
24	07:00	119,8	194,6		168,3	
25	08:00	126,3	208,5		176,9	
26	09:00	132,7	225,8		182,9	
27	10:00	139,2	235,6		193,2	
28	11:00	145,8	246,7		197,8	
29	12:00	152,9	249,7		208,6	
30	13:00	160,2	254,6		219,6	
31	14:00	167,5	258,3		230,6	
32	15:00	174,8	260,5		239,8	
33	16:00	192,2	263,8		249,6	
34	17:00	209,7	276,5		257,4	
35	18:00	227,1	279,9		264,7	
36	19:00	244,5	284,3		274,3	
37	20:00	262	287,5		279,8	
38	21:00	279,4	292,5		285,7	
39	22:00	296,8	298,4		290,4	
40	23:00	314,2	306,7		298,7	
41	00:00	331,7	315,7		307,4	

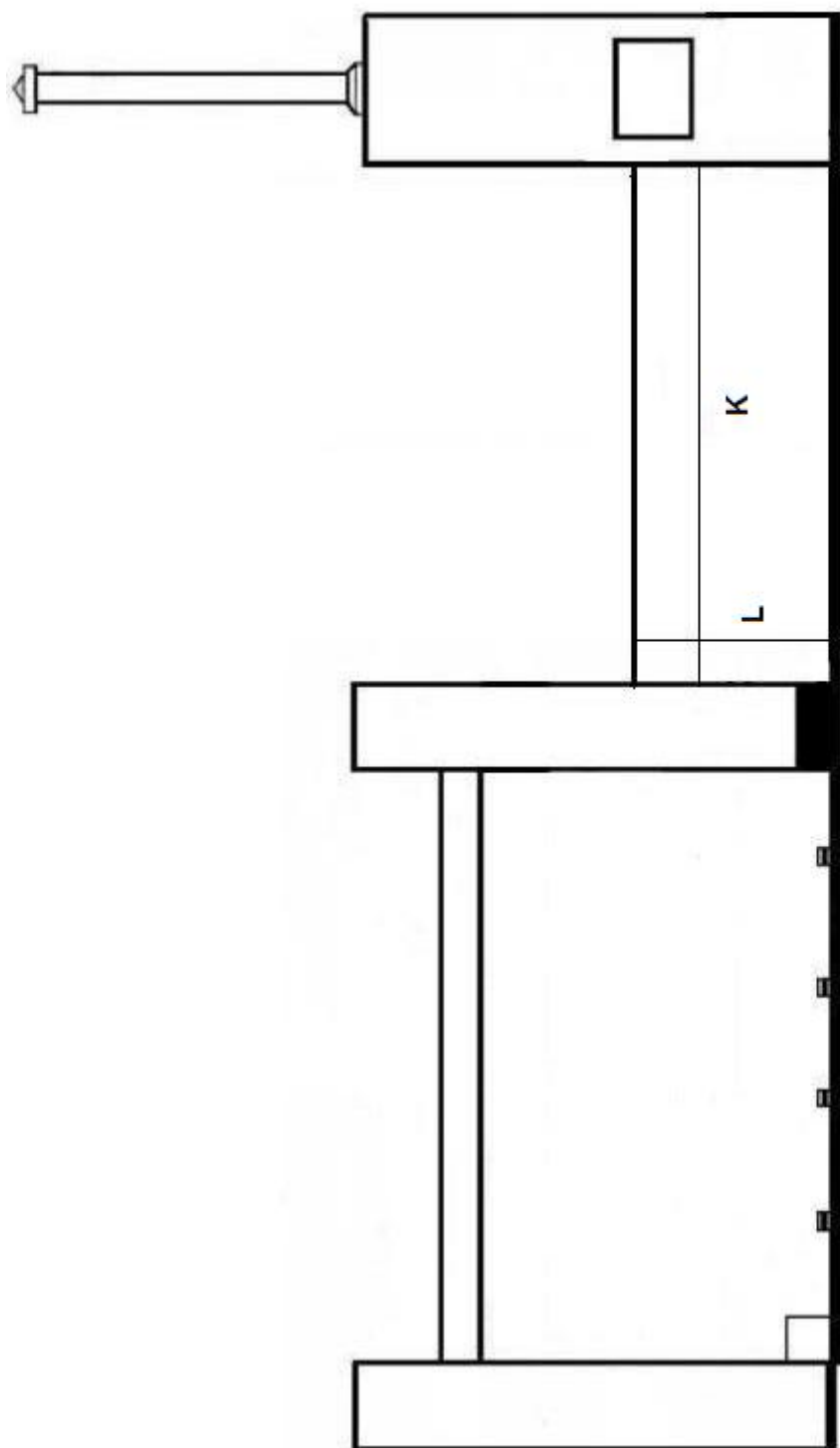
Medida	Hora	Natural	Vapor1	Simula1	Vapor2	Simula2
42	01:00	349,1	325,7		318,6	
43	02:00	366,5	336,8		328,7	
44	03:00	392,7	357,8		345,9	
45	04:00	418,8	369,6		354,7	
46	05:00	436,3	378,5		364,2	
47	06:00	453,7	395,3		375,1	
48	07:00	465,8	412,7		389,5	
49	08:00	463,8	439,8		399,5	
50	09:00	478,5	467,4		418,5	
51	10:00	485,7	479,6	479,6	428,6	
52	11:00	476,8	465,9	452,13	439,8	
53	12:00	465,8	451,7	426,72	450	
54	13:00	458,7	439,8	403,21	464,2	462,2
55	14:00	453,8	427,5	381,45	452,8	437,77
56	15:00	448,7	416,3	361,32	443,5	413,54
57	16:00	443,8	402,7	342,69	430,8	391,01
58	17:00	439,8	392,5	325,45	418,5	370,16
59	18:00	429,8	383,5	309,5	403,2	350,87
60	19:00	425,1	374,2	294,75	390,5	333,02
61	20:00	420,6	361,8	281,09	380,4	316,51
62	21:00	419,3	350,8	268,46	369,7	301,23
63	22:00	417,6	341	256,77	358,7	287,09
64	23:00	416,4	331,7	245,95	343,7	274,01
65	00:00	412,6	320,7	235,94	332,6	261,9
66	01:00	407,2	311,3	226,68	321,6	250,7
67	02:00	400,6	301,4	218,11	312,6	240,34
68	03:00	398,5	293,6	210,19	301,9	230,75
69	04:00	394,7	305,6	202,85	293,4	221,88
70	05:00	390,5	298,5	196,06	284,2	213,67
71	06:00	386,5	287,5	189,78	274,3	206,07
72	07:00	383,7	278,6	183,97	267	199,04
73	08:00	380,6	267,4	178,59	256,8	192,56
74	09:00	378,6	254,8	173,62	243,2	186,54
75	10:00	374,6	243,5	169,01	231,8	180,95
76	11:00	370,7	234,7	164,75	221,7	175,8
77	12:00	367,4	224,1	160,81	213,6	171,04
78	13:00	364,6	215,3	157,16	205,3	166,62
79	14:00	360,7	204,6	153,79	203,7	162,54
80	15:00	356,8	196,4	150,67	208,7	158,77
81	16:00	352,8	184,6	147,78	194,7	155,27
82	17:00	349,8	178,4	145,11	186,5	152,04
83	18:00	346,9	165,8	142,63	175,8	149,05
84	19:00	342,1	156,3	140,34	164,8	146,28
85	20:00	339,5	147,3	138,23	156,9	143,72

Medida	Hora	Natural	Vapor1	Simula1	Vapor2	Simula2
86	21:00	336,8	136,8	136,27	145,4	141,35
87	22:00	331,6	128,7	134,45	148,9	139,16
88	23:00	328,5	118,4	132,78	154,6	137,13
89	00:00	325,4	107,4	131,22	143,7	135,25
90	01:00	321,3	105,6	129,79	131,6	133,51
91	02:00	319,6	102,4	128,46	123,4	131,91
92	03:00	315,7	100,2	127,23	110,4	130,42
93	04:00	311,6	97,5	126,09	105,7	129,04
94	05:00	309,5	95,4	125,04	102,8	127,77
95	06:00	305,4	92,6	124,06	96,8	126,59
96	07:00	301,5	90,5	123,16	95,8	125,5
97	08:00	299,7	89,6	122,33	93,4	124,49
98	09:00	296,8	87,5	121,56	90,8	123,56
99	10:00	294,6	85,4	120,84	87,4	122,69
100	11:00	291,7	87,5	120,18	84,8	121,9
101	12:00	289,6	87,6	119,57	81,4	121,16
102	13:00	286,7	86	119	87,8	120,47
103	14:00	283,7	84,3	118,84	84,6	119,84
104	15:00	280,5	83,1	118	83,7	119,25
105	16:00	278,6	80,9	117,55	82,4	118,71
106	17:00	275,7	78,6	117,13	81,3	117,75
107	18:00	273,5	76,8	116,75	80,4	117,32
108	19:00	269,6	75,1	116,4	79	116,92
109	20:00	266,5	78,4	116,07	78,2	116,55
110	21:00	264,7	77,9	115,76	77,4	116,21
111	22:00	263,6	77,6	115,48	77	115,9
112	23:00	259,5	76,5	115,22	76,2	115,61
113	00:00	256,9	75,4	114,98	75,7	115,34
114	01:00	250,5	73,2	114,76	74,6	115,09
115	02:00	245,8	72,5	114,55	73,8	114,86
116	03:00	241,4	70,4	114,36	72,6	114,64
117	04:00	238,8	69,5	114,19	71,8	114,45
118	05:00	231,8	65,4	114,02	69,9	114,26
119	06:00	227,8	63,2	113,87	68,4	114,09
120	07:00	223,7	60,5	113,73	67	113,94
121	08:00	220,8	58,4	113,6	66,3	113,79
122	09:00	216,4	55,4	113,48	65	113,66
123	10:00	213,7	53,6	113,37	64,6	113,53
124	11:00	210,8	51,5	113,27	62,7	113,42
125	12:00	206,8	49,8	113,17	60,6	113,31
126	13:00	201,9	47,8	113,09	58,7	113,22
127	14:00	197,9	45,7	113,01	56,8	113,12
128	15:00	194,6	43,8	112,93	55,3	113,04
129	16:00	191,4	43,8	112,86	54,8	112,96

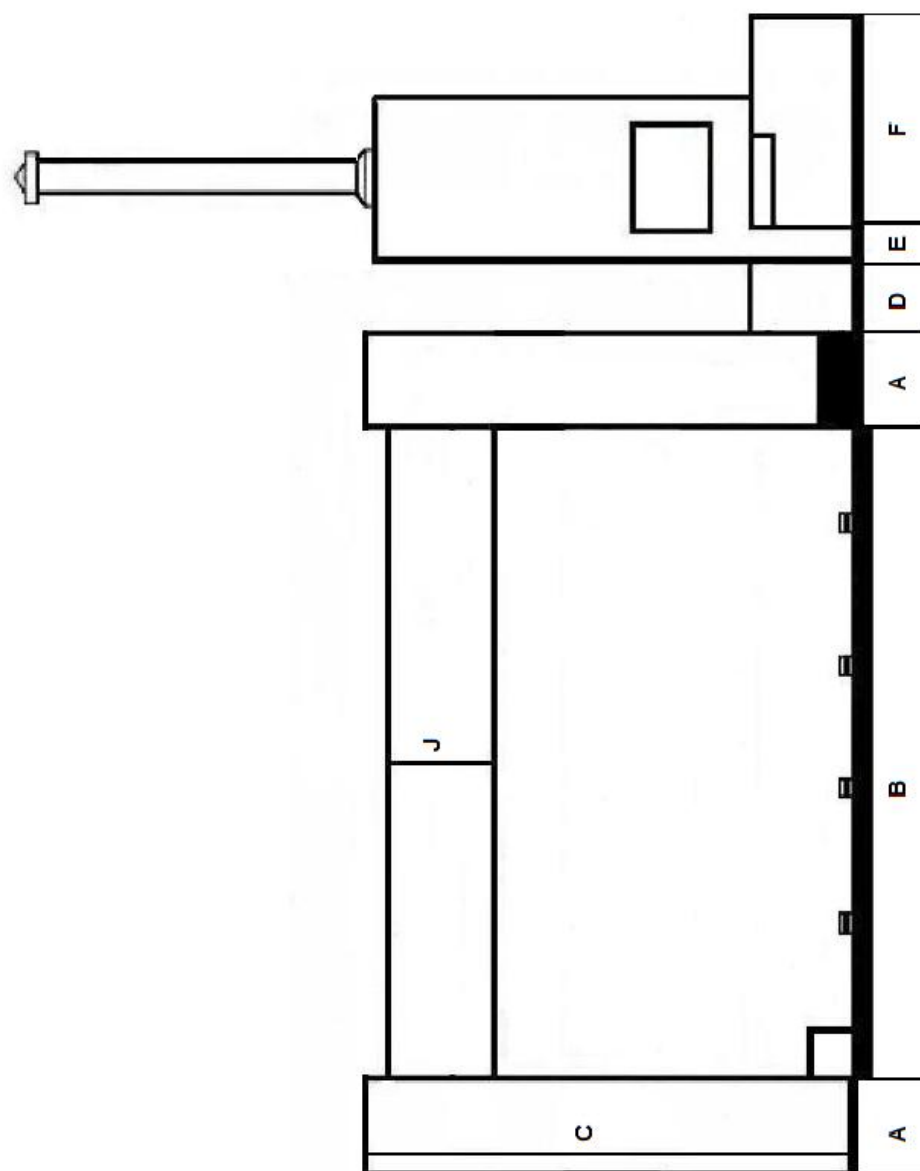
Medida	Hora	Natural	Vapor1	Simula1	Vapor2	Simula2
130	17:00	188,4	41,8	112,8	51,8	112,89
131	18:00	185,7	40,6	112,74	49,9	112,82
132	19:00	182,6	39,9	112,68	38,4	112,76
133	20:00	179,9	37,9	112,63	37,2	112,71
134	21:00	175,8	35,7	112,58	36,5	112,65
135	22:00	171,6	34,8	112,54	36	112,60
136	23:00	169,7	34,1	112,5	35,7	112,56
137	00:00	165,8	34,5	112,46	35,2	112,52
138	01:00	163,8	33,9	112,43	34,6	112,48
139	02:00	160,3	33,8	112,4	34,1	112,44
140	03:00	158,7	33,7		39,7	112,41
141	04:00	155,3	33,5		39,1	112,38
142	05:00	152,9	32,7		38,3	
143	06:00	150	32,5		37,4	
144	07:00	147,8	32,1		36,5	
145	08:00	145,3	31,8		35,7	
146	09:00	142	30,2		34,3	
147	10:00	140,2	30,3		33,5	
148	11:00	137,8	29,8		32,6	
149	12:00	135,6	28,9		31,5	
150	13:00	131,8	28,5		30,7	
151	14:00	128,9	28,6		29,9	
152	15:00	126,2	28,9		29,2	
153	16:00	124,8	28,4		28,6	
154	17:00	121	28,1		28,2	
155	18:00	119,8	27,4		27,7	
156	19:00	116,9	26,9		27,4	
157	20:00	114,5	25,8		26,9	
158	21:00	111,4	25		26,6	
159	22:00	109,6	25,3		26,5	
160	23:00	107,3	23,6		25,7	
161	00:00	105,9	22,5		25,5	
162	01:00	102,5	21,9		25	
163	02:00	100,5	21,5		24,7	
164	03:00	98,6	20,9		23,6	
165	04:00	96,3	20,5		22,5	
166	05:00	94,7	20,4		21,8	
167	06:00	92,3	20,3		21,3	
168	07:00	90,8	20,2		20,8	
169	08:00	89,6	20,2		20,5	
170	09:00	87,3				
171	10:00	85,7				
172	11:00	83,4				
173	12:00	81,6				

Medida	Hora	Natural	Vapor1	Simula1	Vapor2	Simula2
174	13:00	80,7				
175	14:00	79,1				
176	15:00	77,9				
177	16:00	76				
178	17:00	75,1				
179	18:00	73,9				
180	19:00	72,5				
181	20:00	71,3				
182	21:00	70,6				
183	22:00	69,8				
184	23:00	68,3				
185	00:00	67,5				
186	01:00	66,4				
187	02:00	64,8				
188	03:00	62,6				
189	04:00	60,3				
190	05:00	58,6				
191	06:00	56,6				
192	07:00	55,4				
193	08:00	53,8				
194	09:00	52,7				
195	10:00	51,4				
196	11:00	50,7				
197	12:00	48,6				
198	13:00	46,5				
199	14:00	43,9				
200	15:00	41,5				
201	16:00	40,2				

APÊNDICE D
Diagramas e dimensões do sistema de carbonização



K	- comprimento da câmara de fumaça	2.100 mm
L	- altura da câmara de fumaça	1.000 mm
	largura da câmara de fumaça	1.200 mm



A	-	espessura das paredes frontal e do fundo	250 mm
B	-	comprimento da parede lateral	2.650 mm
C	-	altura das paredes frontal e do fundo	1.800 mm
D	-	largura da câmara de fumaça	400 mm
E	-	espaço vazio	100 mm
F	-	comprimento da câmara de fumaça	900 mm
G	-	altura da câmara de fumaça	600 mm
H	-	altura da fornalha de queima da fumaça	2.000 mm
I	-	altura da chaminé com D.I. 320 mm	1.500 mm
J	-	altura da abóbada do forno	400 mm
		largura das paredes frontal e fundo	2.500 mm