

ROGÉRIO LIMA MOTA DE OLIVEIRA

**INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE TÉRMICA DO
PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO
VEGETAL**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2009

ROGÉRIO LIMA MOTA DE OLIVEIRA

**INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE TÉRMICA DO
PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL**

DISSERTAÇÃO APROVADA pelo
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Área de Concentração: Transferência de
Calor e Mecânica dos Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues
de Carvalho.

Uberlândia – MG

2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- O48i Oliveira, Rogério Lima Mota de, 1983-
 Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão
 vegetal / Rogério Lima Mota de Oliveira. - 2009.
 111 f. : il.
- Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
 Inclui bibliografia.
1. Carvão vegetal - Produção - Teses. I. Carvalho, Solidônio Rodrigues de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 662.71

A toda família Rogtariana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Rogério Mota e Sônia Lima, ao meu irmão Rodrigo, à Dica, à Elaine e ao Tio Helvécio por todo o amor, carinho, respeito e compreensão.

Ao Prof. Solidônio pela oportunidade, motivação e orientação.

Ao amigo Serge Silvestrini por todo apoio e incentivo.

À turma da Empresa envolvida neste trabalho por me conceder esta excelente parceira.

Aos órgãos de fomento CAPES, CNPq (Edital MCT/CNPq N º 06/2008 – Jovens Pesquisadores), e FAPEMIG.

Ao Pessoal do LTCM, Bruno, Edson, Elvio, Guilherme, John Weyne, Zé e Valério, por todo companheirismo.

A todos meus amigos.

Para vocês, ofereço esta página...

LIMA MOTA, R. O. **Instrumentação e Análise Térmica do Processo de Produção de Carvão Vegetal**. 2009. 111f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A qualidade do carvão vegetal produzido em um forno é dependente dos procedimentos de controle de sua temperatura interna. Porém, na maioria das aplicações práticas, existem poucos modelos térmicos e o controle do processo, muitas vezes, é determinado pelas verificações visuais da fumaça por carbonizadores. Além disso, o tempo de secagem da madeira, o tempo da previsão de produção e homogeneidade da carbonização são também variáveis a serem controladas pelos carbonizadores. Isto significa que o controle da qualidade do carvão é diretamente dependente da experiência dos carbonizadores, mostrando-se ineficiente. No presente trabalho, os valores de temperaturas do processo de carbonização em fornos de alvenaria do tipo RAC 220 foram obtidos por sensores de temperatura pt100 localizados em vários pontos do forno e enviados para um sistema supervisão de monitoramento de temperatura desenvolvido, com o objetivo de se estabelecer uma relação entre a temperatura e a qualidade do carvão, para que futuramente seja desenvolvido um procedimento de controle automático. Os dados de temperatura coletados, são enviados para um sistema supervisão através uma comunicação sem fio, devido às condições adversas do meio. Este procedimento de medição com uma análise estatística representa uma ferramenta importante para a redução do tempo de secagem, pirólises e resfriamento. Este procedimento também pode minimizar as perdas e aumentar a eficiência térmica do forno quando analisada a produção histórica de carvão vegetal da planta. Outra consequência importante deste trabalho é a contribuição para redução da emissão de gás de efeito estufa.

Palavras Chaves: Carvão Vegetal, Controle de temperatura, Eficiência Térmica.

LIMA MOTA, R.O. **Instrumentation and Thermal Analysis of the Process of the Charcoal Production**. 2009. 111p. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

The quality of charcoal production produced by a kiln is strongly dependent on the procedures of temperature control inside of the kiln. However, in practical applications, there are no thermal models and the temperature control is usually done by a carbonizing agent from visual verifications of the coal smoke. In addition, green wood time of drying, forecast production time and carbonization homogeneity are also variables to be controlled by the carbonizing agent. It means, this quality control is dependent the agent experience and is very inefficient. The main objective of this work is to use temperature measurement from thermocouple located in various points inside the kiln to establish a relationship between temperature and quality charcoal. In this sense, a control automatic procedure can, then, be developed. Due to the characteristic of the aggressive combustion medium, temperature data acquired from the thermocouples will be sent to be processed by a wireless net system. This measurement procedure with a statistical analysis represents an important tool to reduce the time of drying, pyrolysis and cooling. This procedure can also minimize the losses and increase the thermal efficiency considering the charcoal historical production of the plant analyzed. Another important consequence of this work is the contribution to reduce greenhouse effect gas emission.

Keywords: Charcoal, Temperature control, Thermal Efficiency.

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Árabes

bs	Base seca	%
CF	Teor de carbono fixo	%
CZ	Teor de cinzas	%
m	Massa da amostra	g
m0	Massa inicial da amostra	g
m1	Massa final	g
m2	Massa inicial do cadinho somada à massa da amostra	g
m3	Massa final do cadinho somada à massa da amostra	g
MV	Teor de materiais voláteis	%
estéreo	Unidade de volume	st
TU	Teor de umidade	%

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - Introdução.....	01
CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica.....	07
2.1. Histórico sobre a produção de carvão vegetal.....	07
2.2. Processos tradicionais de produção de carvão vegetal.....	10
2.2.1. <i>Forno de terra</i>	10
2.2.2. <i>Forno de alvenaria</i>	12
2.3. Novas tecnologias voltadas ao processo de produção de carvão vegetal.....	17
2.4. Influência da temperatura no processo de carvoejamento.....	23
2.5. Proposta de trabalho.....	26
CAPÍTULO III - Instrumentação Térmica dos Fornos de Carvão Vegetal.....	27
3.1. O problema industrial.....	27
3.2. Componentes do sistema.....	29
3.2.1. <i>Sensores térmicos</i>	29
3.2.2. <i>Central de controle</i>	32
3.2.3. <i>Servidor</i>	35
CAPÍTULO IV - Análises dos Ciclos de Carbonização da Madeira.....	39
4.1. Introdução.....	39
4.2. Primeiro ciclo: prática padrão da empresa.....	39
4.3. Análises de ciclos de carbonização a partir da medição de temperaturas nos fornos.....	49
4.4. Ciclo de carbonização monitorado pelo sistema supervisorio de temperatura.....	55

CAPÍTULO V - Análises de Ciclos de Carbonização em Fornos RAC 220 Adaptados com Gaseificador.....	63
5.1. Os fornos com gaseificador.....	65
5.2. Instrumentação térmica dos fornos.....	63
5.3. Análise de um ciclo de produção nos fornos RAC 220 adaptados com gaseificador.....	67
CAPÍTULO VI – Estudo de Caso e Análise da Viabilidade da Implantação do Sistema Supervisório de Temperatura.....	77
6.1. Introdução.....	77
6.2. A prática padrão dos carbonizadores e os perfis de temperatura medidos a partir do sistema supervisório.....	78
6.2.1. <i>Estudo de caso 1: temperaturas medidas em 12/2008.....</i>	<i>78</i>
6.2.2. <i>Estudo de caso 2: temperaturas medidas em 04/2009 a 05/2009.....</i>	<i>79</i>
CAPÍTULO VII - Análise Imediata do Carvão Vegetal.....	83
7.1. Introdução.....	83
7.2. Preparação das amostras.....	88
7.3. Procedimentos para a determinação da análise imediata.....	89
7.2.1. <i>Umidade.....</i>	<i>89</i>
7.2.2. <i>Materiais voláteis.....</i>	<i>90</i>
7.2.3. <i>Cinzas.....</i>	<i>91</i>
7.4. Cálculo dos parâmetros da análise imediata do carvão.....	92
7.4.1. <i>Cálculo do teor de umidade.....</i>	<i>92</i>
7.4.2. <i>Cálculo do teor de materiais voláteis.....</i>	<i>92</i>
7.4.3. <i>Cálculo do teor de cinzas.....</i>	<i>93</i>
7.4.4. <i>Cálculo do teor de carbono fixo.....</i>	<i>93</i>
7.5. Resultados das análises imediatas.....	94

CAPÍTULO VIII – Conclusões.....	99
8.1. Cálculo dos parâmetros da análise imediata do carvão.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Conhecido desde aproximadamente 1200 a.C., o ferro caracterizou a transição de épocas, vinda com a purificação do minério transformando-o em metal. Com a extrema abundância deste elemento na natureza, sua utilização torna-se muito usual.

Admite-se que o ferro tenha sido descoberto ainda no período neolítico, encontraram-se contos de ferro nas tumbas de al-Gezirat, Egito, datadas de 4000 a.C. Fragmentos desse minério, que circundavam as fogueiras feitas para aquecer os homens nas cavernas, foram reduzidos a metal sólido pelo calor e o contato com a madeira carbonizada (Tabela Periódica, 2009).

Após diversas experiências e inventos, o ferro chegou aos altos-fornos em meados do século XV. O ferro obtido em alto-forno tem o nome de ferro-gusa, ferro fundido ou simplesmente gusa. As temperaturas mais elevadas permitiram que o ferro absorvesse mais carbono e se transformasse em gusa, o qual sai do forno em estado líquido incandescente (História do ferro, 2009).

Foi a partir de 1921 que realmente se iniciou o desenvolvimento da produção brasileira de ferro-gusa, com a instalação de diversos altos-fornos. Já em 1936 fabricavam-se no país cerca de oitenta mil toneladas (Tabela Periódica, 2009).

Atualmente, o ferro é utilizado principalmente em fabricações de automóveis, edifícios e na fabricação de ligas, sendo que sua produção mundial é predominantemente destinada à indústria siderúrgica. Atualmente, classificam-se os maiores produtores mundiais de gusa como sendo a China em primeiro lugar com 46,4% do mercado, seguido por Japão (9,7%), Rússia (5,9%), EUA (4,3%), Ucrânia (3,8%) e Brasil (3,7%). Apesar de ocupar a sexta posição na *ranking* dos maiores produtores mundiais de gusa, o Brasil é o maior exportador mundial de ferro gusa, com aproximadamente 40% do mercado (BNDES, 2008).

Segundo projeções da área de Insumos Básicos do BNDES, a capacidade instalada de aço bruto do Brasil duplicará, passando das atuais 36 milhões de toneladas/ano para cerca de 72 milhões de toneladas anuais, ao final dos próximos cinco anos. Assim, será registrado o maior salto de escala da história da siderurgia brasileira. "A produção brasileira de aço crescerá em ritmo superior ao chinês. Serão como setenta anos em cinco", ressaltou Fiocca, presidente do BNDES (BNDES, 2009).

Minas Gerais é um exemplo único no mundo de articulação de extração e verticalização do minério de ferro. Aqui estão disponíveis todas as ferramentas e elementos fundamentais à sua transformação: imensas jazidas localizadas na região central do estado (SINDIFER, 2009).

O ferro é encontrado na natureza em forma de óxido, podendo variar em óxido ferroso (FeO) ou óxido férrico (Fe_2O_3). Para a fabricação do ferro-gusa, é imprescindível a retirada dos óxidos agregados às moléculas de ferro. Para isso, utilizam-se de carbono para o processo de redução do minério. Depois que o ferro é processado no alto-forno, recebe o nome de ferro-gusa, que é a principal matéria-prima do aço. Sua produção depende de um insumo básico, o carvão, devido à grande concentração de carbono. Para o processo de obtenção do ferro-gusa, tanto o carvão vegetal quanto o carvão mineral podem ser utilizados.

Em Minas Gerais está localizada a mais importante região de produção de ferro-gusa do Brasil e um dos mais significativos modelos de auto-sustentabilidade industrial do mundo: grandes aplicação de tecnologia em siderurgia a carvão vegetal, a partir de biomassa cultivada (SINDIFER, 2009).

Minas também é responsável por 60% da produção de gusa com uso de carvão vegetal no País. Porém, os restantes 40% de produção estão concentrados, principalmente, em Carajás, no Pará, onde grande parte dos guseiros (como são chamados) recorrem à derrubada de matas nativas (NASCIMENTO, 2007). A obtenção de carvão de mata nativa é bem mais lucrativa, daí o porquê do reflorestamento não ser uma prática fluente neste ramo. O desmatamento não-autorizado chega a fornecer cerca de 57,5% da madeira que alimenta os fornos das carvoarias (ALVES, 2009).

O carvão vegetal é produzido a partir da lenha pelo processo de carbonização ou pirólise. Ao contrário do que aconteceu nos países industrializados, no Brasil, o uso industrial do carvão vegetal continua sendo largamente praticado. O Brasil é o maior produtor mundial desse insumo energético (INFOENER, 2009).

No ano de 2007 de todo o carvão vegetal produzido em todo o país, o setor industrial, basicamente constituído por empresas do ramo de siderurgia, metalurgia e de cimento, consumiu aproximadamente 90,4% de todo o carvão vegetal produzido, seguido pelo setor residencial que consumiu aproximadamente 8,3%, o setor comercial com 1,2% e o setor agropecuário com 0,1% (MME, 2008). A Fig. 1.1 exemplifica o consumo de carvão vegetal por setor.

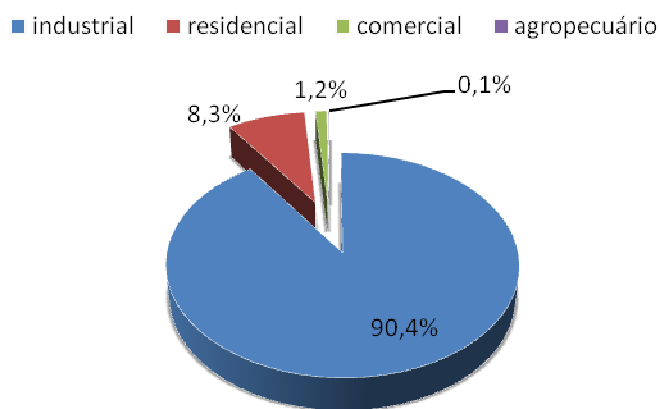


Figura 1.1 Consumo de carvão vegetal por setor (MME, 2008)

Predominantemente, as carvoarias situam-se em meio à mata e seus fornos possuem uma geometria circular, semelhantes aos iglus, chamados de fornos rabo-quente. Muitas vezes utilizam de trabalho escravos ou fornecem péssimas condições de trabalho para seus funcionários que em sua grande maioria não são registrados oficialmente. PIMENTA et. al. (2006) diz que os trabalhadores que executam suas tarefas em processos de produção de carvão vegetal que utilizam fornos do tipo rabo-quente, gastam mais energia do que sua própria capacidade para produzir. Em outro estudo realizado por MINETTE et. al. (2007) diz que, a atividade de carbonização em fornos do tipo rabo-quente requer esforço físico do trabalhador acima do limite recomendado da capacidade cardiovascular, sendo a atividade classificada como pesada.

A produção do carvão vegetal causa ainda grandes impactos ambientais. Primeiramente, com o desmatamento e queima descontrolada de madeira. Durante a carbonização são emitidos altos níveis de monóxido e dióxido de carbono, além da grande emissão de metano e alcatrão. Estas substâncias agravam a poluição atmosférica e contribuem para a poluição do solo e suas subcamadas, como os lençóis freáticos.

O processo de produção de carvão vegetal, na maioria das empresas, é o mesmo que o de três mil anos atrás, em que consome parte da madeira como combustível a fim de fornecer a energia necessária para a carbonização do restante da madeira. Processos mais modernos utilizam de outros combustíveis, muitas vezes provenientes do próprio processo de carbonização. Também, para minimizar efeito de poluição, técnicas de injeção de alcatrão dentro dos fornos de carbonização estão sendo desenvolvidas e utilizadas.

Na maioria das indústrias de grande escala de produção de carvão vegetal, são utilizados fornos de alvenaria de tamanhos variados, de acordo com a necessidade de produção. Atualmente os mais utilizados são os fornos retangulares de alvenaria, cujo processo pode ser mecanizado. Porém o processo ainda é realizado de forma primitiva sendo que em sua maioria, os fornos não costumam ter nenhum tipo de instrumentação.

Os pequenos produtores de carvão vegetal, normalmente utilizam fornos construídos de alvenaria revestidos com barro. Esses fornos normalmente são feitos em barrancos ou na terra e não possuem formatos padronizados. Suas formas e tamanhos distinguem de uns para outros, fazendo com que o processo seja muito irregular e que seja dependente de forma direta de seus operadores. Também é normal que nesses fornos não haja nenhum tipo de

mecanização e tampouco instrumentos de medição das variáveis importantes no processo, prejudicando o rendimento quanto à qualidade final do produto.

A diferença entre os grandes e pequenos produtores de carvão vegetal, é que o processo de carbonização da madeira dos grandes produtores é padronizado (práticas e a madeira enforcada). No entanto, os fornos utilizados são de maior capacidade, tornando um processo de difícil controle.

Pensando nesses fatores e sabendo a importância da eficiência da produção de carvão vegetal para o desenvolvimento da economia no país, propõe-se neste trabalho um estudo para otimizar o processo de produção de carvão vegetal. O objetivo é desenvolver um sistema de equipamentos para instrumentar e otimizar o processo de produção de carvão vegetal em um forno retangular. Em sua concepção, a instrumentação térmica deverá atuar em pelo menos três aspectos: aumento da eficiência térmica do forno permitindo um aumento na produtividade e na qualidade do carvão; diminuição do tempo para produção de carvão; diminuição do tempo de secagem e aproveitamento de energia excedente.

Assim, no Capítulo II, foi realizada uma revisão bibliográfica, mostrando o surgimento do carvão vegetal. Em seguida, foi realizado um estudo sobre os diferentes tipos de fornos, partindo desde os fornos de batelada, como os de terra, passando pelos fornos de alvenaria e terminando nos fornos metálicos, semi-contínuos e contínuos, com suas inovações tecnológicas. Também, no Capítulo II, foi apresentada a influência da temperatura no processo de carbonização da madeira e com isso sugestões de melhoria a partir do controle desta.

Buscando obter ganhos de produção e de qualidade do carvão, foi instrumentado um forno RAC 220 com sensores de temperatura. O Capítulo III apresenta a instrumentação térmica deste forno juntamente com informações técnicas detalhadas do desenvolvimento de um sistema supervisor capaz de monitorar as temperaturas no interior do forno durante o processo de carbonização da madeira.

Depois de ter instrumentado um forno e desenvolvido um sistema supervisor, foram acompanhados diferentes ciclos de carbonização da madeira com práticas operacionais variadas. Esse estudo é apresentado pelo Capítulo IV onde também se encontram curvas e perfis térmicos de um forno RAC 220. Com o levantamento das curvas de temperatura foi possível encontrar erros frequentes existentes no processo. Também é apresentado outro ciclo

de carbonização em que foram realizadas interferências de acordo com as temperaturas levantadas pelo sistema de monitoramento.

Depois de avaliados os vários ciclos de carbonização de um forno retangular de alvenaria modelo RAC 220, o Capítulo V apresenta análises do ponto de vista térmico, de dois fornos RAC 220 interligados, adaptados com a tecnologia DPC. Estes fornos também foram instrumentados e monitorados através do sistema supervisório desenvolvido.

Posteriormente, as curvas térmicas foram comparadas com as de um forno RAC 220 padrão a fim de exibir possíveis ganhos (lucro) em relação ao procedimento convencional. Este estudo pode ser acompanhado pelo Capítulo VI

Para avaliar os ganhos futuros com o carvão fabricado com as diferentes práticas operacionais, o conhecimento de parâmetros químicos do carvão vegetal é de grande importância. Assim, no Capítulo VII, apresenta-se a Análise Imediata de amostras provenientes de diferentes ciclos e processos de carbonização. Por fim, no Capítulo VIII apresentam-se as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico Sobre a Produção de Carvão Vegetal

O registro mais antigo do uso do carvão vem do pigmento preto usado nas pinturas de cavernas européias que datam em torno de 32.000 anos atrás. Não se sabe se este carvão foi produzido deliberadamente. É possível que o uso mais antigo do carvão como combustível, comece nas fundições de cobre, a mais de 7000 anos atrás. Os egípcios, os quais eram especialistas em trabalhos com metais, descobriram a fundição do ferro a quase 5000 anos atrás. Porém, a primeira evidência concreta do envolvimento do homem com o carvão, utilizando-o para fins energéticos é datada em torno do ano de 3500 a.C, no sul da Europa e no Oriente Médio. (UK Agriculture, 2009).

Em 1864, o italiano G. Passerini realizou pela primeira vez uma análise de pedaços de carvão vegetal pré-históricos, no contexto das recentes e impressionantes descobertas do período Neolítico e do Bronze. Nesta época, foram destinados para análises somente materiais que vinham de estruturas de forno pré-históricos e as interpretações buscadas pelos investigadores eram limitadas aos interesses paleontológicos. Porém, o foco do uso do carvão pelos grupos pré-históricos era basicamente como combustível (ASOUTI, 2009).



Figura 2.1 – Microfotografia de um pedaço de madeira de carvalho carbonizada da Idade do Bronze, Grécia (ASOUTI, 2009)

Na Finlândia e Escandinávia, o carvão era considerado o subproduto da produção de piche de madeira. Os melhores piches eram produzidos a partir de pinheiro, assim os pinheiros estavam sendo cortados para que fossem pirolisados a fim de obtenção do piche. O carvão residual era extremamente utilizado como substituto do coque metalúrgico em fornos de fundição. Porém, em meados do século XVI, quando praticamente as florestas da Europa já estavam devastadas, o carvão vegetal foi substituído pelo carvão mineral. Na Finlândia a produção de piche conduziu um desmatamento rápido, tanto que, calcula-se que todas as florestas finlandesas possuam menos de 300 anos de idade. (OUKA, 2009).

Historicamente, a produção de carvão vegetal começou em localidades onde havia uma grande abundância de madeira e data épocas muito antigas. O processo de produção de carvão vegetal é muito rústico e pode ser considerado artesanal, devido a não uniformidade do produto. Também este processo é desprovido de grandes tecnologias. Pelas Figs. 2.2 e 2.3 pode-se observar que as mesmas práticas utilizadas na produção de carvão no século passado perduram nos tempos de hoje.



Figura 2.2 – Produção de carvão vegetal no século XIX (Wikipédia, 2009)



Figura 2.3 - Produção de carvão vegetal nos tempos atuais (Traditional Charcoal Production, 2009)

A seguir são apresentados alguns tipos de fornos e a evolução gradual do processo de carbonização da madeira.

2.2 Processos Tradicionais de Produção de Carvão Vegetal

A produção de carvão vegetal no Brasil é destinada ao atendimento da demanda de diversos segmentos da indústria (siderurgia, metalurgia, cimento, etc.), bem como para utilização residencial urbana e rural. A principal utilização, no entanto, se faz ver na indústria de siderurgia. (BRITO, 1990). Dessa forma, com o crescente aumento do consumo do carvão vegetal impulsionado principalmente por parte do setor industrial (MME, 2008), a evolução do processo de carbonização é inevitável. A seguir, são apresentadas modelos de fornos, suas respectivas práticas de carbonização e a evolução das tecnologias voltadas ao processo de produção de carvão vegetal.

2.2.1 Forno de Terra

Os fornos de terra são muito utilizados atualmente devido à facilidade de construção e ao pequeno investimento. Basicamente, a produção de carvão nestes fornos consiste em empilhar pedaços ou toras de madeira, formando uma pilha cônica, com aberturas para a ignição e também para admitir ar. A pilha inteira pode ser coberta com relva, terra ou com barro. Logo em seguida, é dada a partida. O fogo é colocado pelo fundo, que gradualmente esparrama ao longo do monte. Nesse procedimento, o sucesso da operação depende da taxa da combustão. (WALKER, 2009).

Dentre os fornos de terra, destaca-se o forno caieira. Em sua construção, primeiramente é necessário que limpe e nivele um espaço de aproximadamente 5 m de diâmetro, conhecido como “praça”. No centro desse espaço limpo, colocam-se pedaços de lenha em pé para dar a forma aproximada de um cone. Outras camadas de lenhas são postas em redor dessas até “quanto dê a coragem do carvoeiro”. Em seguida, cobre-se essa pilha com terra frouxa e seca de modo a formar um pequeno monte, que é conhecido como “balão”. Pela parte superior desse monte, introduz-se material combustível sob a forma de folhas e lenha seca, macia e fibrosa, ateando-se fogo em seguida. Quando o fogo está bem avivado, fecha-se a abertura superior e faz-se um buraco na parte de baixo para permitir a entrada de ar e assim provocar a descida do fogo, vagarosamente. (PIERSON, 1966).

O forno caieira é um dos modelos mais rústicos e pela sua fácil construção, seu uso ainda é muito comum e difundido. Na caatinga, as alternativas de renda para os agricultores no período de seca são muito escassas. Neste período, muitos agricultores utilizam a madeira seca para produção de carvão vegetal. Este produto é para o consumo das famílias e para comercialização. Em algumas áreas do sertão de Pernambuco, esta atividade está contribuindo para a devastação da caatinga, visto que, o carvão é produzido em grande escala e vendido para indústrias na capital Recife (CAVALCANTI, 2009).

Um forno caieira pode apresentar volumes e geometrias diversificadas. A Fig. 2.4 mostra alguns tipos de forno caieira.



Figura 2.4 – Fornos caieiras (CARNEIRO, 2007 e CAVALCANTI, 2009)

Também entre os fornos de terra, destaca-se o “Forno Meda”. Estes fornos são extremamente primitivos e normalmente ficam situados em meio à própria vegetação de onde

são extraídas as lenhas para a produção de carvão. O “Forno Meda” se resume em lenhas cobertas por galhos, relvas e ramos de árvores.

Para o bom funcionamento do processo de produção de carvão vegetal, o controle da entrada de ar é imprescindível. Devido a uma série de variáveis que acompanham o processo de carbonização e dificultam o controle do mesmo, este se torna bastante empírico, principalmente em se tratando de fornos de terra que são desprovidos de qualquer instrumento de controle, acarretando baixos rendimentos de produção. Dessa forma, o processo de carbonização evoluiu, o que proporcionou o desenvolvimento de outros fornos.

2.2.2 Forno de Alvenaria

Os fornos de alvenaria são a evolução dos fornos de terra. Basicamente, eles são construídos de tijolos de barro, podendo variar na geometria, tamanho, número de chaminés. A chaminé foi a mais importante das inovações introduzidas nos aparelhos de carbonização por processo de combustão parcial. Com tal artifício se conseguiu melhor o balanço térmico na carbonização com aproveitamento de gases quentes produzidos, que são conduzidos através da lenha ainda fria. A chaminé, por si só, desde que convenientemente localizada, representa um ganho de 4 a 24% em rendimento gravimétrico no processo de carbonização (BRITO e BARRICHELO, 1981).

Os fornos de alvenaria apresentam outra vantagem, a de possuírem baixos custos (quando comparado com fornos metálicos). Também possuem rendimentos superiores os fornos de terra. Quanto à operação, estes fornos são caracterizados como sendo de fácil operação (CARNEIRO, 2007).

No Brasil, o sistema predominante de produção de carvão vegetal é constituído de fornos de alvenaria e argila, comumente chamados de fornos meia-laranja ou rabo quente. Tais fornos ainda são conhecidos como fornos de superfície, quando o terreno é plano, ou fornos de encosta, quando estes são construídos em regiões de relevo acidentado e que podem carbonizar diferentes volumes de lenha, normalmente na faixa de 6 a 20 estéreos (quantidade de lenha que pode ser empilhada ordenadamente em um metro cúbico) (BRITO, 1990).

Os fornos de encosta, segundo BRITO e BARRICHELO (1981), também chamados de fornos de barranco, são formados por um cilindro que suporta uma abóboda e possui condições de enformamento de 21,6 m³ de madeira. A parte cilíndrica do forno é construída embutida no barranco, daí seu nome. O número de chaminés desse forno varia de um a três, por onde se dão a saída dos gases. O acabamento do forno é em alvenaria. O processo de produção de carvão em tais fornos apresenta um ciclo médio de 8 a 10 dias para uma produção de 8 a 10 m³ de carvão vegetal.



Figura 2.5 – Forno de encosta ou barranco (CARNEIRO, 2007)

Outro forno bastante difundido no Brasil e um dos mais utilizados é o chamado forno superfície. Parecido ao forno de encosta quanto ao formato, porém diferenciado por não estar embutido em um barranco.

Este tipo de forno também apresenta algumas vantagens em relação aos de terra: produz mais carvão com a mesma quantidade de lenha; o carvão é mais limpo, porque não sai misturado com terra ou pedras; o trabalho é mais seguro e mais fácil; necessitam menos cuidados durante a queima. Esse tipo de forno é apropriado para pequenos produtores porque o seu custo de construção é baixo e pode realizar uma queima por semana (Construção e operação do forno rabo quente melhorado, 2006).

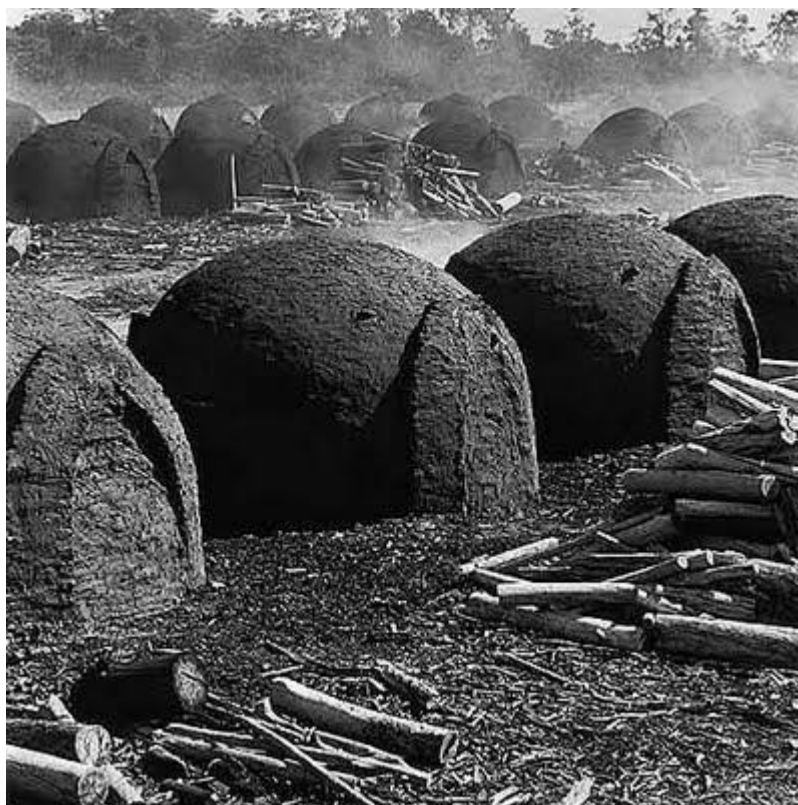


Figura 2.6 – carvoaria com fornos de superfície (Historiar, 2009)

O forno de superfície possui maiores dimensões e maior número de aberturas e chaminés, podendo chegar ao número de seis, facilitando o controle do processo quando comparado aos anteriores. Ao longo do tempo, esses fornos vêm sofrendo muitos tipos de alterações objetivando uma melhor adequação do processo.

Hoje, a conversão dos fornos tradicionais de 6 chaminés para 1 única chaminé central ou lateral é bastante apregoada no sentido da melhoria das condições de produção de carvão vegetal. Seu ciclo médio de produção é de 8 a 10 dias para uma produção de 19 a 20 m³ de carvão, ou seja, em média, uma produção de 0,42 kg carvão/m³ hora.

A evolução dos fornos traz, paralelamente, novas metodologias operacionais. FILHO (2007) apresenta um forno de superfície com chaminé lateral única vinculado a um método operacional para atender pequenas comunidades no agreste. Seu estudo resultou em um ganho de até 100% em relação ao método tradicional de caieira e reduziu o impacto

ambiental e carga de trabalho sobre o trabalhador. A Fig. 2.7 mostra o forno desenvolvido por FILHO (2007).



Figura 2.7 – Forno JG-AGRESTE 2,50 (FILHO, 2007)

Outra adaptação muito importante nos fornos de superfícies foi a chegada das câmaras externas de combustão e as câmaras de admissão de ar. Estas câmaras apresentaram uma maior dinâmica no processo, pela facilidade da ignição e permitindo um melhor controle do processo. Outro fator muito importante é que as câmaras fornecem toda a energia necessária para o início da produção aumentando significativamente o rendimento gravimétrico (relação entre o peso do carvão produzido e madeira enfornada: cálculo em base seca). A Fig. 2.8 apresenta um modelo de forno de superfície com câmara de combustão externa desenvolvido pela Arcelor-Mittal na década de 80.

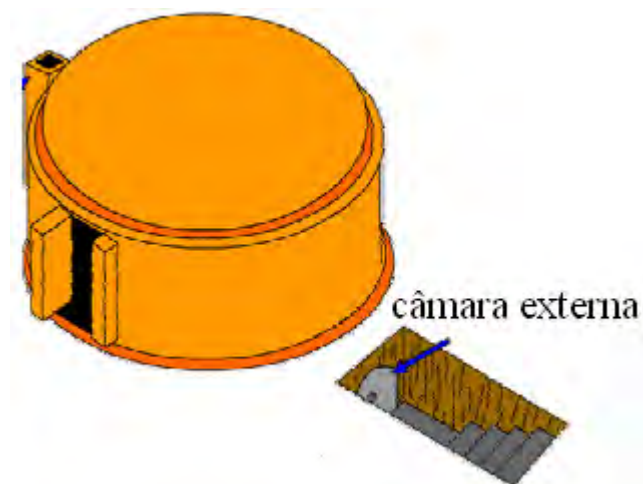


Figura 2.8 – Forno de superfície com câmara externa (CARNEIRO, 2007)

Um salto na evolução da produção de carvão vegetal veio na década de 90 com a construção de um forno retangular de alvenaria. Este forno de 40 m³ foi equipado com uma grande porta metálica, denominado RAC 40 (R=Retangular, AC=Acesita, Capacidade=40 m³), o que permitiu iniciar o processo mecanização durante a maior parte da fase de carregamento e de descarregamento. No final dos anos 90, foi realizada uma melhoria em cima do já existente RAC 40. Este forno passou a ter um maior volume, 110 m³ (RAC 110) e possibilitou mecanizar o processo de carregamento da madeira e a descarga do carvão. Este forno foi o primeiro a utilizar uma proteção por estrutura metálica e a apresentar inovações que proporcionaram o conceito de campanha de 20 anos do forno retangular. Posteriormente, veio o RAC 220 que inovou ao possuir duas portas e, mais recentemente o RAC 700 com capacidade para 1000 m³ de madeira (CARRIER, 2007). A Fig. 2.9 apresenta a evolução dos fornos retangulares de alvenaria.



Figura 2.9 - Forno RAC 40, RAC 110, RAC 220 e o RAC 700 respectivamente (CARRIER, 2007)

2.3 Novas Tecnologias Voltadas ao Processo de Produção de Carvão Vegetal

Com o constante crescimento do consumo de carvão vegetal (MME, 2008), estudos relacionados com o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para a produção vêm ganhando espaço na comunidade científica (MOREIRA, 1964) e sendo financiados por indústrias do setor e órgão de fomento.

Buscando uma melhor eficiência do processo de produção de carvão vegetal, os tradicionais tijolos de alvenaria foram substituídos por estruturas metálicas. Hoje, os fornos metálicos são o que há de mais moderno no universo do carvão vegetal, pois conseguiram ganhos em relação aos fornos tradicionais de alvenaria tais como: redução do tempo de carbonização, aumento no rendimento gravimétrico, diminuição do tempo de resfriamento, recuperação dos subprodutos, melhor eficiência energética, melhoria nas condições de trabalho e a redução de impactos ambientais.

Dentre estes fornos, destaca-se o “forno Container” que foi desenvolvido no final dos anos 80, sendo a primeira unidade construída para pequenos volumes de lenha. Não

apresentava exaustão forçada e nem queima da fumaça, possuía um poço isolante, construído com tijolos e um sistema com talhas para içar e retirar o container. Posteriormente, esse forno apresentou modificações e foi ampliado para atender um volume de 4 st de lenha. Foi o início dos estudos mais profundos a respeito desta tecnologia. (GUIMARÃES NETO, 2005).

GUIMARÃES NETO (2005) levantou um estudo técnico e econômico de um forno Container de 8 st apresentando sua viabilidade. O forno estudado apresentava características bem diferentes do protótipo construído no início dos anos 80. Este apresentava secadores de lenha que utilizam gases provenientes do processo para a secagem da lenha e um sistema de movimentação de carga e descarga do container. O forno Container de 8 st é constituído em duas partes: a primeira é o poço isolante que possui câmaras de ignição, chaminé, portas de aço janela regulável para o controle da entrada de ar. A segunda parte do forno é o container metálico que com sua geometria cilíndrica, apresenta um volume nominal de 9 m³ e um peso de 800 kg. As Figs. 2.10 e 2.11 representam o forno descrito.



Figura 2.10 – Poços isolantes (GUIMARÃES NETO, 2005)



Figura 2.11 – Containeres metálicos (GUIMARÃES NETO, 2005)

Outros fornos metálicos que entram em destaque são os do sistema DPC (*Drying, Pyrolysis, Cooling*). O sistema foi desenvolvido para atuar em três etapas do processo de produção de carvão vegetal, secagem, pirólise e resfriamento, conforme mostrado pela Fig. 2.12.

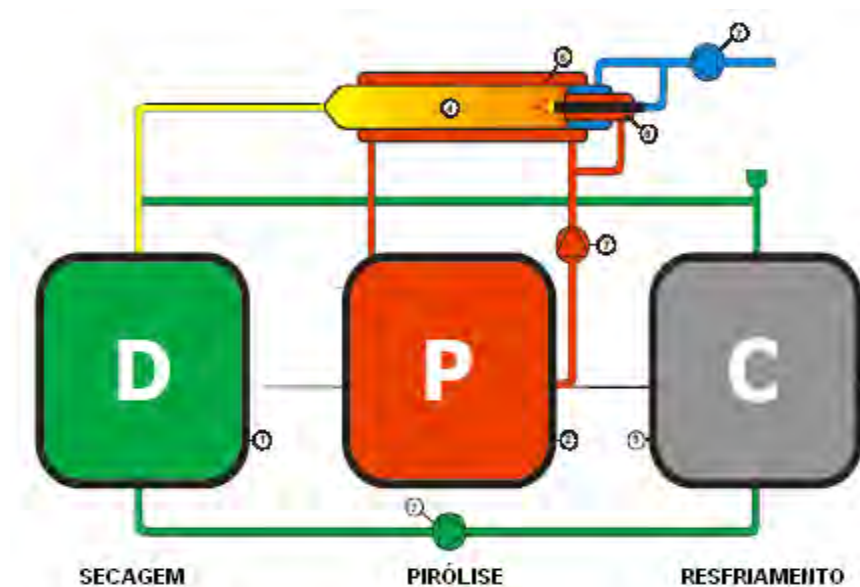


Figura 2.12 – Diagrama básico do sistema DPC (DPC, 2008)

O sistema DPC consiste basicamente em interligar certa quantidade de fornos por meio de tubulações e um gerador de atmosfera ou gaseificador. Para iniciar o processo, aciona-se o gaseificador que fornece energia para um forno com o objetivo de secar a madeira e, posteriormente, iniciar a etapa de pirólise. Quando os gases provenientes da pirólise, ricos em metano e com alto poder calorífico (LÚCIO, 2006), começam a ser liberados, passam a ser queimados e injetados dentro de outro forno abastecido com lenha verde, para a secagem e o início da pirólise, resultando em um ciclo permanente. A Fig. 2.13 apresenta um modelo de forno metálico tipo DPC.



Figura 2.13 – Forno metálico – Reator DPC (DPC, 2008)

O sistema DPC apresenta algumas vantagens em relação a outros modelos de fornos apresentados anteriormente, são elas: não há emissão de gases nocivos para a atmosfera; não é necessário serrar a madeira em pequenos toletes; não importa a umidade da lenha a ser enforcada; rendimento gravimétrico mais elevado. (DPC, 2008).

As tecnologias apresentadas anteriormente são classificadas como processos semi-contínuos de produção de carvão vegetal, nos quais os fornos são interligados e apresentam

fases de carbonização independentes. Há, no entanto, fornos contínuos nos quais todas as fases ocorrem simultaneamente. No Brasil, apenas um forno metálico contínuo (retorta) operou, especificamente na ACESITA, entre 1986 e 1993 (LATORRE e CUNHA, 2006).

Entre os processos contínuos de carbonização da madeira, citam-se o VMR localizado na Noruega, o O.E.T Calusco CARBOLISI na Itália, LAMBIOTTE-CISR na Bélgica e o DEGUSSA na Alemanha (SANTOS, 2007). No entanto, a maioria deles ou não foram demonstrados ainda em escala industrial ou exigem condições muito especiais de funcionamento (material na forma de serragem, cavacos, etc.) (BRITO e BARRICHELO, 1981).

Entre todos os sistemas de produção contínua, o sistema SIFIC (Lambiotte) é aquele que tem mostrado os melhores resultados quanto ao processo industrial de produção de carvão vegetal e outros produtos da destilação seca. No mínimo o sistema possui uma tradição industrial bastante grande, com unidades em funcionamento contínuo há mais de 20 anos e, hoje ainda, econômica e tecnicamente bastante produtivas. (BRITO e BARRICHELO, 1981).

O sistema SIFIC (Société Industrielle Financière pour l'Industrie Chimique) foi desenvolvido na França, existindo instalações nesse país, bem como na Austrália, Bélgica, Espanha e Checoslováquia. Trata-se de um sistema altamente automatizado e de grande produtividade. O equipamento principal é constituído pelo forno, que é uma retorta de chapa metálica, cilíndrica, com 1,75 a 3,00 m de diâmetro e 20 a 22 m de altura. Para a secagem da madeira há uma instalação especial à parte (secador), composta por um cilindro vertical de 6 m de diâmetro e 18 m de altura, dotado de *skips* para carregamento pelo topo e de um mecanismo para descarga de madeira seca na parte baixa (BRITO e BARRICHELO, 1981).

No sistema SIFIC, o carregamento é feito pela parte superior e em cargas regulares com controles automáticos. A descarga do carvão é feita pela base, sendo que esta parte inferior funciona como câmara de resfriamento. O aquecimento do forno é feito mediante a passagem de gases não condensáveis queimados e recuperados do processo. Outras vantagens do processo contínuo é que permite recuperar, além do carvão, subprodutos tais como: ácido acético, acetona, metanol, alcatrões e outros. (BRIANE e DOAT, 1985).

No sistema SIFIC, pode se esperar uma produção de 15 a 21 toneladas de carvão vegetal por dia, dependendo do teor de umidade da madeira. Quanto mais seca estiver a

madeira, maior será a produção. O forno Lambiotte tipo SIFIC foi projetado para funcionar a uma determinada temperatura na qual produzirá um carvão com um teor de carbono fixo de 80 a 85% (Carbonización Industrial, 2009). A Fig. 2.14 mostra a retorta vertical do sistema SIFIC construído na França.

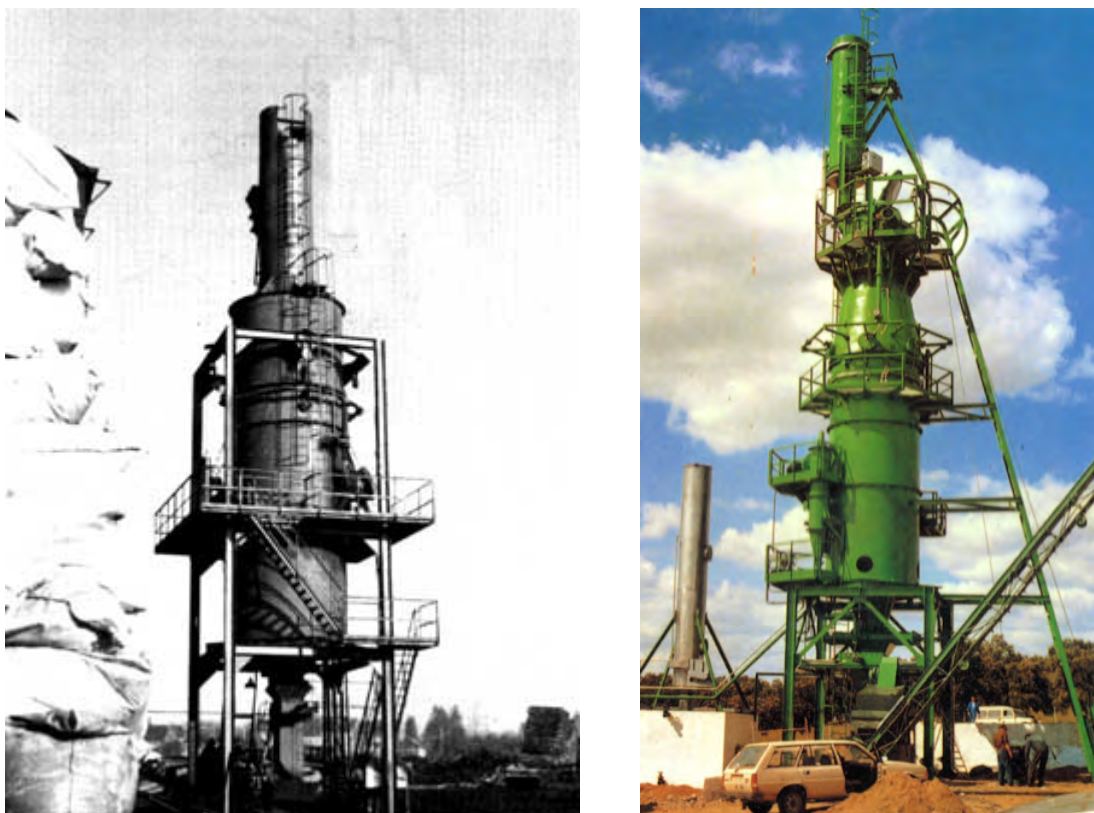


Figura 2.14 – Retorta Lambiotte (FAO, 2009) e (Carbonización Industrial, 2009)

Dessa forma, foram apresentados os diversos tipos de fornos voltados à produção de carvão vegetal, a evolução histórica das tecnologias e as modificações nos processos de carbonização da madeira.

MOREIRA (1964), por sua vez, apresentou um estudo que mostra que as temperaturas e a velocidade de carbonização são os principais fatores que influenciam nas características do carvão. Assim, realizou-se na seqüência um estudo de trabalhos voltados para a medição e análise das temperaturas no interior de fornos de produção de carvão vegetal.

2.4 Influência da Temperatura no Processo de Carvoejamento

O estudo da influência da temperatura nos processos de produção de carvão vegetal é de grande importância, pois a temperatura influencia diretamente nas características do carvão vegetal (SILVA e TRUGILHO, 2003). Outro ponto que se deve levar em consideração no processo é a marcha de carbonização de um forno de carvão vegetal. MOREIRA (1964) afirmou que carbonizações mais lentas, alteram a compressão radial nas peças de madeira resultando em um carvão de maior resistência mecânica. VELLA et. al. (1989) complementa e mostra em seu trabalho que há um decréscimo linear da densidade aparente do carvão com elevação da velocidade de carbonização da madeira, conforme pode ser observado na Fig. 2.15.

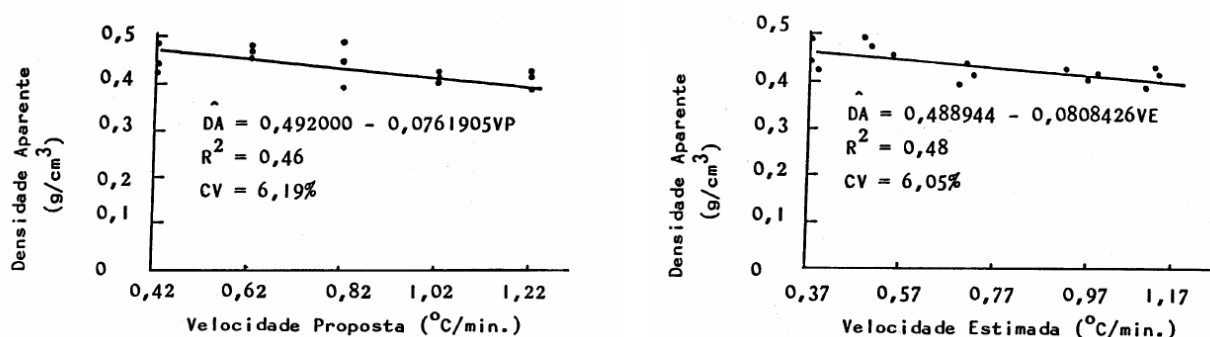


Figura 2.15 – Densidade aparente às velocidades propostas e estimadas (VELLA et. al., 1989)

MEDES et. al. (1982) também estudaram a velocidade da taxa de aquecimento em fornos de carvão vegetal e concluíram que carbonizações realizadas com taxas de aquecimento mais lentas apresentam carvões com melhores características físicas sendo mais adequado para o processo siderúrgico.

Empresas do setor carvoeiro fabricam seu produto esperando atender padrões de qualidade exigidos pelas empresas siderúrgicas. Esses parâmetros podem ser físicos (resistência mecânica, porosidade, friabilidade, entre outros) ou químicos (teor de materiais voláteis, teor de cinzas, teor de carbono fixo e outros). Para a siderurgia, destaca-se o teor de carbono fixo, um dos parâmetros mais importantes, pois se refere à quantidade de carbono que será inserida no alto-forno no processo de obtenção do ferro-gusa.

Outro fator extremamente importante para as empresas do setor carvoeiro que está vinculado com a sua rentabilidade é a quantidade de carvão produzido por fornada. SILVA et al. (1986) mostraram que o rendimento de um forno é dependente da temperatura de carbonização. Em seus estudos concluíram que o rendimento gravimétrico de carvão das três espécies diferentes de eucalipto se mostraram inversamente correlacionados com a temperatura.

TRUGILHO e SILVA (2001) também concluíram que o rendimento gravimétrico da carbonização diminui com o aumento da temperatura final de carbonização com tendência de estabilização nas temperaturas mais elevadas. Porém, apresentaram pontos positivos em relação ao aumento da temperatura em fornos de carvão vegetal. Mostraram que o teor de carbono fixo, principal parâmetro exigido pelas siderurgias e o poder calorífico superior aumentam com a elevação da temperatura final de carbonização. Concluíram, dessa forma, que a temperatura final de carbonização é determinante na qualidade do carvão vegetal.

A temperatura pode influenciar ainda na friabilidade do carvão aumentando em quantidades significativas a quantidade de finos gerados pelo processo. Portanto, sendo desejável um carvão vegetal que apresente uma menor geração de finos, deve-se usar, de preferência, árvores de menor diâmetro e controlar o quanto for possível o processo de carbonização (COUTINHO e FERRAZ, 1988).

O objetivo de qualquer indústria é maximizar a produção e desenvolver produtos de melhor qualidade a um menor custo. Dessa forma, COSTA; RAAD; WINTER (2008) propuseram um estudo experimental da fluidodinâmica dos gases de carbonização em fornos de alvenaria. Um dos objetivos era verificar a influência da configuração de exaustão dos gases na produtividade do forno e na qualidade do carvão vegetal. Para monitorar os campos térmicos e a massa de madeira inserida no forno, os autores instrumentaram um forno com sensores de temperatura e uma balança. A Fig. 2.16 apresenta o perfil térmico no interior do forno ao longo de alguns dias de carbonização e a redução da massa de madeira.

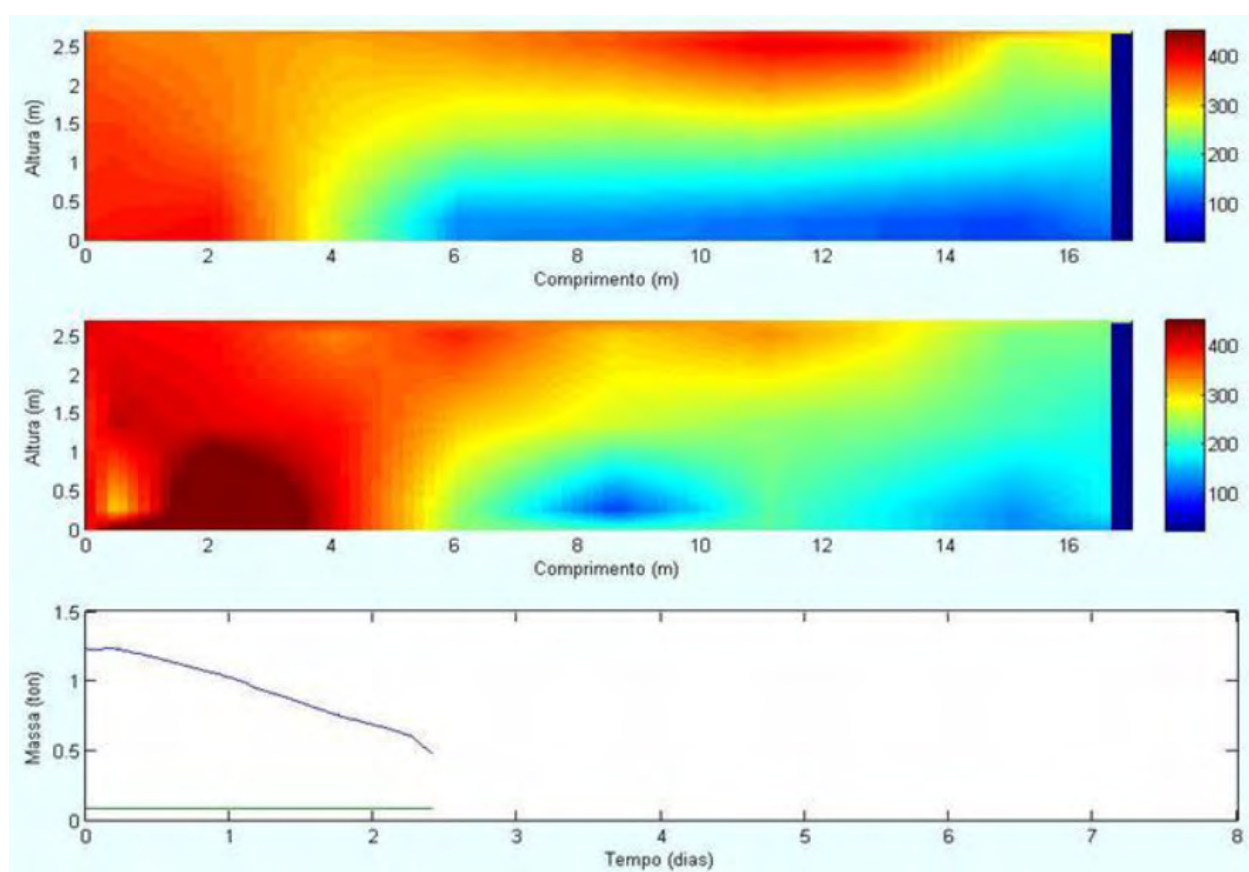


Figura 2.16 – Perfil térmico de carbonização em fornos com diferentes configurações (COSTA; RAAD; WINTER, 2008)

Conforme mostrado na Fig. 2.16, os campos de temperaturas dentro de um forno retangular de alvenaria variam com o comprimento, com a altura e com o tempo de carbonização. Assim, em uma mesma fornada um forno retangular de alvenaria pode produzir carvão com diferentes características. Todas essas informações mostram a importância do controle da temperatura em fornos de produção de carvão vegetal.

2.5 Proposta deste trabalho

Baseado nas informações apresentadas na revisão bibliográfica, este trabalho propõe a instrumentação térmica de fornos retangulares de alvenaria com capacidade individual de produzir 20 toneladas de carvão vegetal por ciclo de carbonização. O objetivo é medir as temperaturas usando sensores térmicos localizados em vários pontos internos do forno e determinar uma relação entre temperatura e qualidade do carvão vegetal produzido. Nesse sentido, este trabalho consiste em instalar sensores de temperatura em cada forno, que são conectados a uma placa-mãe responsável por emitir os valores das temperaturas por meio de uma rede sem fio. A partir de um sistema eletrônico supervisorio estas temperaturas são armazenadas e, via software com interface gráfica, são visualizadas na forma de gráficos e tabelas. Ressalta-se que a concepção, desenvolvimento e montagem de todos os equipamentos eletrônicos ocorreram na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. O sistema atualmente está em fase de testes e monitora em tempo real as temperaturas nos fornos e permite ainda estudar históricos de ciclos de produção passados. No futuro, tais informações devem guiar e ajudar o carbonizador durante todos os estágios da produção de carvão vegetal. Esse processo de medição, juntamente com análise estatística representa uma importante ferramenta para redução do tempo de pirólise e resfriamento em fornos de alvenaria, minimizando perdas e aumentando a eficiência térmica durante o processo de produção.

CAPÍTULO III

INSTRUMENTAÇÃO TÉRMICA DOS FORNOS DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

3.1 O Problema Industrial

Um dos objetivos deste trabalho é medir a temperatura dentro de fornos de alvenaria, modelo RAC220, conforme apresentado na Fig. 3.1.



Figura 3.1 - Forno típico de alvenaria modelo RAC220

A instrumentação térmica consiste na instalação de 22 sensores do tipo pt100 em cada forno estudado. Estes sensores serão conectados a uma placa-mãe que emite sinais a um computador por meio um circuito eletrônico e uma rede sem fio. Os dados de temperatura são armazenadas em um sistema supervisorio que retorna os dados medidos sob a forma de

gráficos e tabelas. A Fig. 3.2 apresenta a proposta de instrumentação térmica e a instalação dos equipamentos em um forno.

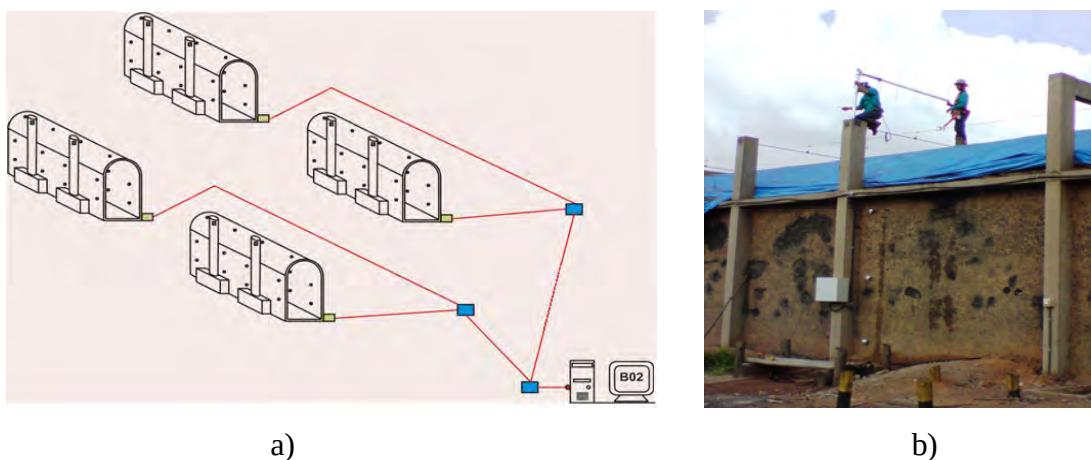


Figura 3.2 - Instrumentação térmica: a) Proposta da instrumentação; b) A instalação dos equipamentos em um forno RAC 220

A concepção dos equipamentos e do sistema eletrônico, relacionados a outros já existentes no mercado, baseou-se na redução de custos com relação a outros sistemas industriais, a facilitação de instalação, desenvolvimento de tecnologia própria para parcerias futuras e a possibilidade de atualização e de incorporação de novas funções e componentes.

Depois que uma pesquisa sobre sistemas industriais já existentes no mercado e outros desenvolvidos por instituições de ensino, foi verificado que a compra direta dos instrumentos de medição e acessórios aumentaria muito o custo do projeto. Neste sentido, apenas alguns componentes do sistema foram comprados, tais como: sensores térmicos (pt100), cabos e componentes eletrônicos. Em contra partida, hardwares e softwares foram desenvolvidos na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Na sequência, apresentam-se os componentes do sistema.

3.2 Componentes do sistema

3.2.1 Sensores Térmicos

Para a medição da temperatura, foi realizado um estudo prévio sobre os sensores disponíveis no mercado capazes de suportar temperaturas superiores a 500°C, além de resistir às condições de operação a céu aberto. Após estudo, foram identificados dois tipos de sensores capazes de atingir os objetivos: os RTD (Resistance Temperature Detectors) e os termopares, cada um com suas particularidades na forma de retornar o valor medido.

Os termopares fornecem valores de tensão elétrica, o que facilita a leitura do sinal medido a partir do uso de um conversor analógico-digital (ADC). Porém, os valores obtidos são muito baixos (ordem de milivolts) o que implicaria na necessidade de conversores mais sensíveis e conseqüentemente mais caros. O uso de amplificadores operacionais poderia ser outra opção, porém elevam o custo do projeto além de contribuir na amplificação de ruídos que são amenizados com filtros para as frequências indesejadas. O uso de termopares implica ainda na necessidade da compensação térmica, isso é, na necessidade de medir o valor da temperatura presente na ponta fria, a fim de corrigir o valor medido na ponta quente, por meio de transdutores que medissem a temperatura de forma direta, como um RTD, que estaria presente, por exemplo, no ponto onde se acumularia os valores lidos.

Os sensores RTD, por sua vez, são resistências que variam seu valor conforme a temperatura, por outro lado, não necessitam de uma comparação com outros valores a fim de se obter o valor real da temperatura. Porém, a entidade a ser medida é o valor na resistência elétrica, que não pode ser medida de forma direta por meio de um ADC, necessitando assim de um meio para intermediar a entidade resistência para tensão elétrica. A Fig. 3.3 apresenta um sensor RTD típico e aplicações práticas do mesmo.

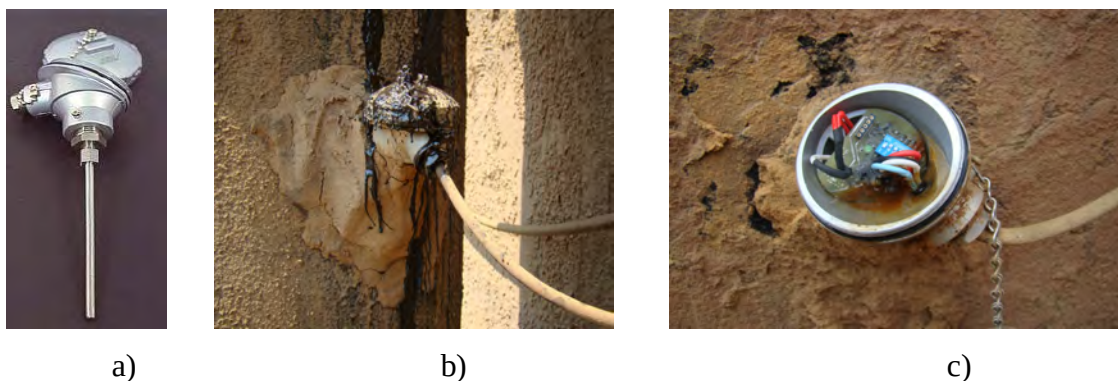


Figura 3.3 – RTD pt100 a) pt100 típico; b) Sensor instalado no forno; c) Sensor submetido a condições adversas

Uma solução encontrada na literatura de equipamentos já presentes no mercado é o uso de um circuito RC (resistor-capacitor), no qual o valor do capacitor pode ser ajustado para gerar frequências que variem de forma a permitir uma resolução compatível aos valores desejados de temperatura. Com essa solução pode-se medir o valor da temperatura a partir da frequência resultante. O problema é a não linearidade da resposta do circuito RC, gerando assim a necessidade circuitos ou tabelas para a linearização do resultado.

No estudo das relações entre entidades elétricas, é sabido que a relação entre tensão e resistência é linear quando esta é atravessada por uma corrente de valor constante. Assim, a solução proposta é a utilização de uma fonte de corrente constante alimentando o RTD. Medindo-se a queda de tensão do mesmo, tem-se um valor proporcional à temperatura que o pt100 está submetido. Transistores são utilizados no desenvolvimento da fonte de corrente constante.

Para a leitura dos valores analógicos, um micro-controlador com conversor analógico-digital foi usado. O micro-controlador adotado foi da família PIC16F, desenvolvido pela MICROCHIP, que possui um conversor ADC de 10 bits, resultando em uma escala de 1024 pontos, mais que suficiente para medir range de temperatura no processo de produção do carvão, ou seja, 400°C de temperatura média e 700°C de temperatura limite ou temperatura de chama. O micro-controlador possui comunicação USART, usualmente conhecida por porta serial, usada como ponte de comunicação entre o PIC e as demais partes do sistema.

Analisando-se novamente a Fig. 3.3, verifica-se que os sensores têm que resistir às circunstâncias industriais e ao ambiente. A Fig. 3.3b apresenta um sensor instalado no forno.

Neste caso, o pt100 é posicionado no forno através de um furo na parede. Barro é colocado entre o sensor e o furo para evitar a entrada de ar no forno. Durante o ciclo de carbonização é comum encontrar alcatrão em cima dos sensores termoeletricos, em especial naqueles próximos às chaminés. A Fig. 3.3c mostra que a base do pt100 deve ser vedada para evitar a entrada da poeira e água da chuva. Nota-se ainda o circuito eletrônico posicionado dentro do sensor. Neste trabalho os sensores e o sistema eletrônico foram calibrados previamente usando uma célula quente para uma escala da temperatura entre 30°C a 500°C apresentando um perfil linear conforme apresentado na Fig. 3.4.

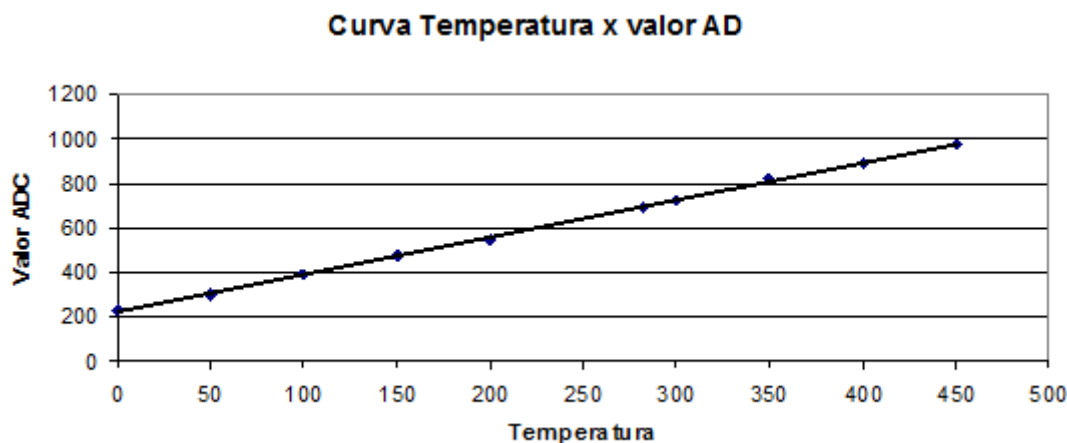


Figura 3.4 – Curva de calibração.

A Fig. 3.5 apresenta a foto do circuito eletrônico responsável pela leitura dos valores de resistência medidos pelo pt100 e comunicação com a placa-mãe. Na Fig. 3.5c estão destacados os blocos do sensor: 1) Fonte de tensão, saída de 5Vcc; 2) Interface de comunicação; 3) Fonte de corrente; 4) Micro-controlador PIC16F.

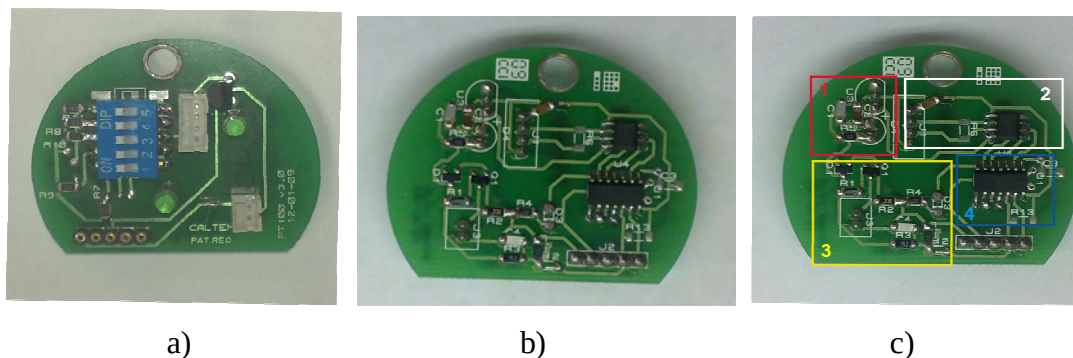


Figura 3.5 – a) Parte superior do circuito; b) Parte inferior; c) Blocos envolvidos no circuito

3.2.2 Central de controle

Para controlar a comunicação entre os sensores, enviar os dados adquiridos ao servidor e armazená-los, desenvolveu-se uma central de controle.

Tal circuito tem como base um micro-controlador, também desenvolvido pela MICROCHIP, responsável por quase todas as funções executadas pela central, com exceção da gravação dos dados localmente, que neste caso é realizada por um módulo desenvolvido por outra empresa.

Para o controle dos fornos, os valores de temperatura medidos devem estar disponíveis aos operadores sob a forma de gráficos e tabelas em tempo real. Assim, os valores obtidos nos fornos devem ser enviados a um servidor, o que faz com que o carbonizador tenha acesso contínuo aos perfis térmicos nos fornos. Além disso, o servidor enviará os dados para um sítio eletrônico que permitirá que os mesmos sejam acessados por usuários cadastrados fora da unidade de produção de carvão.

O circuito da placa-mãe conta também com um sistema de armazenamento local, no caso, uma memória portátil. O mesmo foi escolhido tendo em vista seu baixo custo e mobilidade de acesso aos dados no caso de falhas no sistema de comunicação de rádio-frequência (RF). Ressalta-se que a central pode operar tanto em modo “ligado” (*on-line*), enviando os dados em tempo real ao servidor via RF, quanto no modo “desligado” (*off-line*), caso ocorra algum erro de comunicação com o servidor ou falta de energia elétrica. Neste caso, a mudança entre os modos é realizada automaticamente pelo sistema.

Para a comunicação entre os fornos e o servidor, foi escolhida a transmissão via RF, pela inviabilidade de instalação de cabos além de reduzir gastos quanto à instalação.

Um problema encontrado no projeto da comunicação RF foi com relação à conexão entre o módulo usado, presente na placa-mãe, e a antena, instalada acima do forno. Neste caso, o tipo e o comprimento do cabo de conexão devem ser bem definidos a fim de evitar problemas com ondas estacionárias o que pode resultar na queima do transmissor. A solução encontrada foi desenvolver um módulo transmissor separado da placa-mãe. Assim, a antena é conectada diretamente ao módulo, enquanto um cabo manga 6 vias conecta o módulo à placa mãe. Tal procedimento simplificou a montagem e reduziu custos de instalação.

Como quase toda a comunicação entre o micro-controlador e as demais partes do circuito é serial, existe um conjunto de chaves para controle de acesso dos mesmos, o que inibe a interferência de comunicação entre cada parte do circuito e reduz o número de pinos necessários no micro-controlador.

No pendrive, por sua vez, são gravados a data e a hora de cada amostragem. As informações de tempo são obtidas a partir de um circuito RTC (Real Timer Clock), externo ao micro-controlador. A vantagem do uso do mesmo externamente é a redução de operações não importantes ao processo de aquisição das temperaturas, uma vez que o modelo do micro-controlador não conta com um periférico dedicado, além de permitir que em caso de queda de energia no circuito, o mesmo continue em funcionamento com uma bateria de 3V, semelhante a usada em relógios, fazendo com que as informações não sejam perdidas.

Existe também um circuito responsável pela detecção de queda de energia e outro para medir o nível de carga nas baterias, que retornam ao micro-controlador o estado destes circuitos, e este grava no pendrive o instante em que ocorreu tal falha, permitindo também um histórico. O sistema também é capaz de controlar o gasto de energia, o que garante maior tempo de operação independente de energia na rede elétrica.

A presença de um UPS (*no breaker*) no sistema se faz necessário, pois o processo de produção de carvão independe da presença de energia elétrica e, portanto, na ausência de energia, o sistema deve continuar monitorando as temperaturas no interior dos fornos.

A Fig. 3.6 apresenta duas versões da central de aquisição instaladas em campo, com as partes do circuito destacadas na Fig. 3.7.



Figura 3.6 – Central de aquisição: a) Armário instalado contendo a central de aquisição; b) Detalhe do circuito instalado - última versão

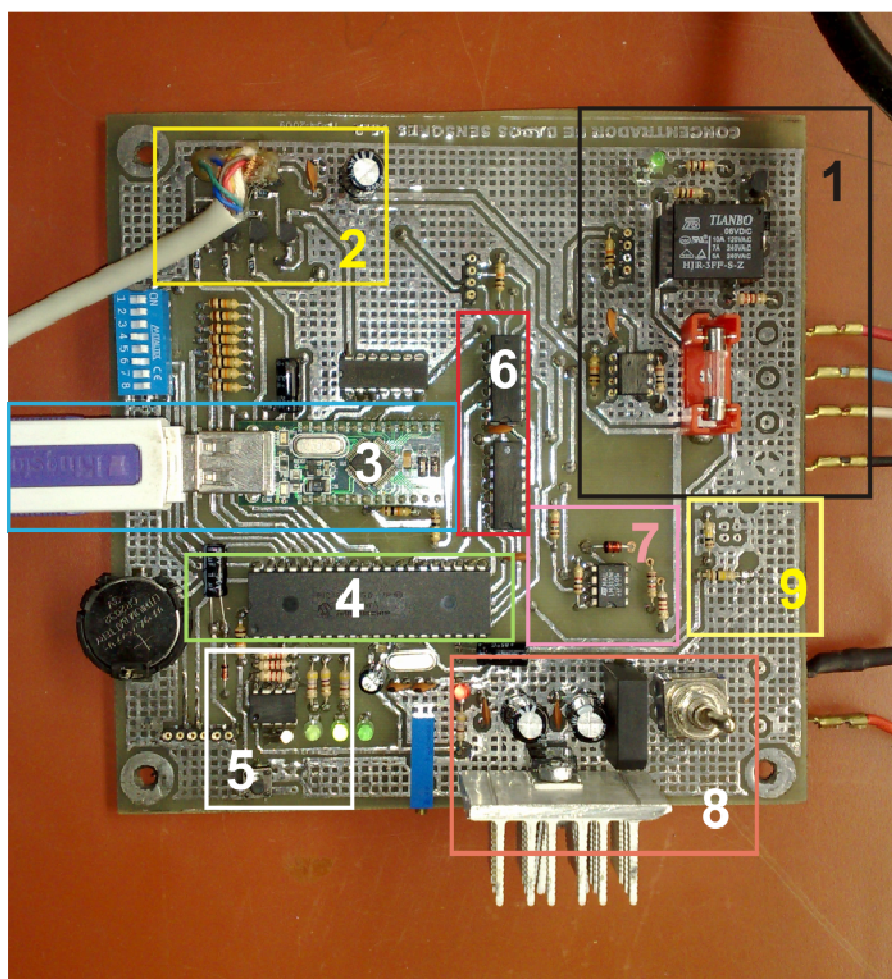


Figura 3.7 – Foto do circuito da placa-mãe – última versão

Pode-se observar na Fig. 3.7 algumas partes do circuito da placa-mãe, destacando-se:

1. Comunicação com os sensores, além do controle de consumo de energia;
2. Interface com o módulo RF, podendo-se ver parte do cabo usado na ligação entre as partes;
3. Módulo de gravação dos dados localmente, com um pendrive conectado;
4. Micro-controlador PIC18F;
5. Relógio de tempo real (RTCC);
6. Conjunto de chaves para controle do barramento serial interno ao circuito;
7. Detecção de falha no fornecimento de energia;
8. Fonte de energia;

3.2.3 Servidor

Para que os carbonizadores tenham acesso dos dados adquiridos nos fornos, um computador (servidor de dados) foi instalado no escritório da unidade. Além de permitir a visualização gráfica, o servidor armazena os ciclos térmicos de cada forno, além solicitar dados da produção, como por exemplo: tipo de madeira enfornada, diâmetro médio das toras, peso da madeira, peso e qualidade do carvão produzido, se houve alguma falha durante a produção.

O servidor por sua vez gerencia ainda a comunicação via internet, sincronismo das leituras dos fornos, realiza uma análise prévia dos valores de temperatura medidos, além de ter outras funcionalidades. O mesmo possui um receptor RF, responsável pela comunicação sem fio com os fornos. O receptor foi separado em duas partes, uma responsável pela recepção RF e outra pela comunicação com o computador. A comunicação e alimentação elétrica entre as duas partes ocorrem através um cabo de quatro vias, igual ao usado nos fornos. A Fig. 3.8 apresenta o servidor instalado na sede da empresa. A distância entre o servidor e cada forno varia, de uma distância mínima de 300 metros e máxima de 2.000 metros.

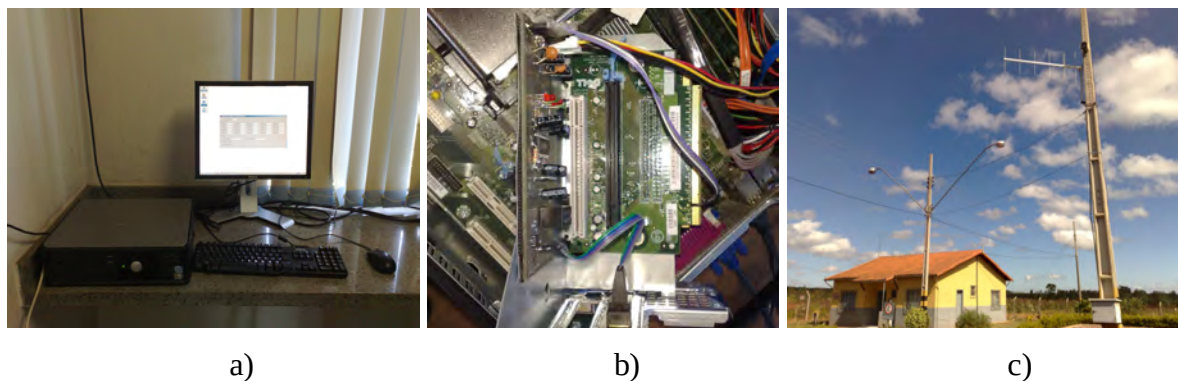


Figura 3.8 – a) Servidor instalado no escritório da empresa; b) Servidor desmontado mostrando a interface com o módulo RF; c) Antena instalada no escritório

No servidor existem instalados diversos softwares, cada um com a sua devida função: comunicação com a interface RF, administração de banco de dados, visualização gráfica e análise estatística da produção.

Conforme apresentado na Fig. 3.9 o software e alguns aplicativos apresentados anteriormente devem funcionar continuamente, pois são responsáveis pelo envio e recepção de dados entre o servidor e os fornos. Cópias de segurança dos dados são criadas em determinados períodos de tempo, para garantir a integridade dos mesmos, e assegurar que mesmo em caso de perda total do servidor os dados possam ser recuperados.



Figura 3.10 – Software desenvolvido

Outro aplicativo é responsável por enviar os dados para um servidor Web para ser acessado a qualquer momento e em qualquer lugar. Assim, usuários cadastrados podem

visualizar as temperaturas no interior dos fornos durante o período de produção, em forma de gráficos (Fig. 3.11b) ou ainda solicitar relatórios de produções anteriores.

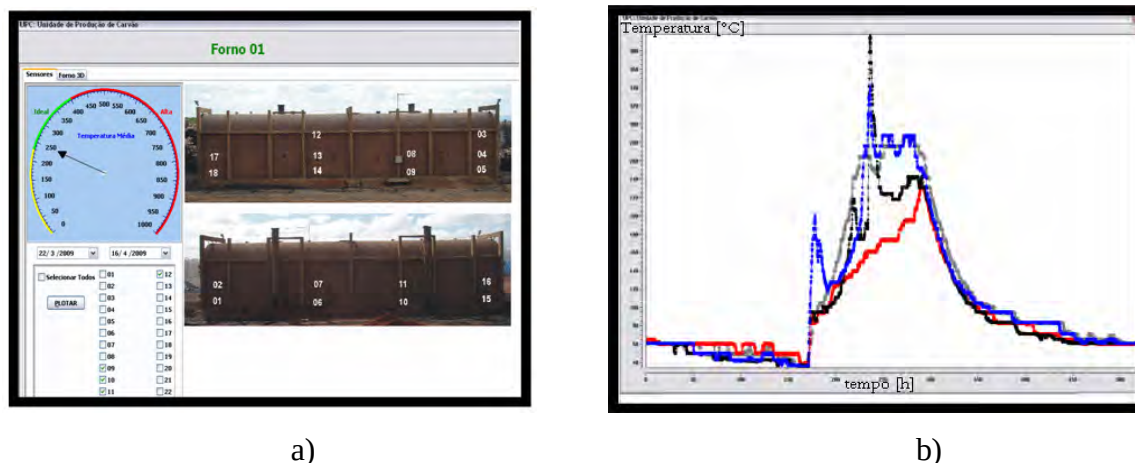


Figura 3.11 – Análise térmica: a) Localização dos sensores, com a temperatura média do forno; b) Gráfico temperatura x tempo

A partir de informações sobre as temperaturas, do desenvolvimento de um banco de dados sobre a produção, da experiência prática dos carbonizadores, propõe-se no futuro realizar uma análise estatística dos dados de forma a definir procedimentos otimizados de produção. Tais informações serão inseridas no software de modo que este possa melhorar a produção e orientar o carbonizador durante todo o ciclo de produção de carvão vegetal.

A partir da instrumentação dos fornos, apresenta-se no Capítulo IV uma análise térmica de diversos ciclos de produção.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DOS CICLOS DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

4.1 Introdução

No capítulo anterior, apresentou-se a construção e implantação do sistema de monitoramento de temperatura em fornos modelo RAC 220. Para isso são utilizados sensores RTD (pt100) que são fundamentais para o conhecimento dos campos de temperatura no interior do forno. Já neste capítulo, num primeiro momento, acompanhou-se um ciclo de carbonização da madeira em um forno RAC 220 de acordo com as práticas padrão da Empresa. Posteriormente, outros ciclos de carbonização foram analisados, porém, monitorando os campos de temperatura no interior do forno e correlacionando-os com as práticas operacionais. Por fim, acompanhou-se um ciclo de carbonização, no qual, realizaram-se intervenções na produção a partir das temperaturas medidas no forno.

4.2 Primeiro experimento: Prática Padrão da Empresa

Os fornos analisados neste trabalho são construídos de tijolos de alvenaria e possuem uma geometria retangular, relativo ao modelo RAC 220 (R = retangular, AC = Acesita, 220 m³ de capacidade), com as seguintes dimensões: 26 m x 4,0 m x 3,6 m e 1,2 m sendo o raio da copa. Seu volume interno é de aproximadamente 440 m³. O forno, em suas extremidades,

possui duas portas de aço revestidas com materiais refratários, objetivando a redução das perdas de calor. A Fig. 4.1 representa o forno em estudo.



Figura 4.1 – Forno retangular de alvenaria modelo RAC 220

Os fornos possuem quatro câmaras de combustão com dimensões 25 cm x 25 cm, que são essenciais para iniciar o processo de carbonização e também para o controle de oxigênio. As câmaras são interligadas a quatro entradas de ar com diâmetros de 25 cm. Também, o RAC 220 possui dois canais de fumaça, sendo que cada um deles é interligado a uma chaminé com dimensões de 50 cm, conforme apresentado pela Fig. 4.2.

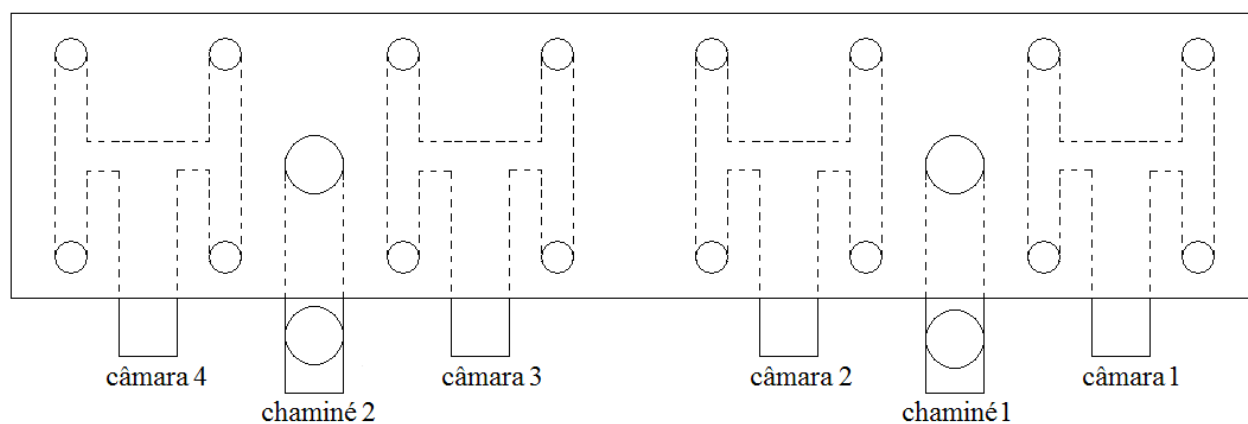


Figura 4.2 – Esquema das entradas e saídas de gases do forno RAC 220

Neste estudo, inicialmente acompanhou-se um ciclo de carbonização conforme a prática padrão da Empresa. Todavia, antes do início dessa prática, primeiramente foram considerados alguns dados da madeira enforcada, pois cada espécie pode produzir carvão vegetal com parâmetros diferenciados (CARNEIRO, 2007). A Empresa em questão utiliza como matéria prima madeira oriunda de diversas espécies de eucalipto: *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus ssp*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* entre outras.

A madeira adotada para a produção de carvão vegetal na Empresa possui idades de corte que variam entre sete a dez anos. Antes do transporte dessa madeira, a prática de pré-secagem é efetuada. O processo constitui em simplesmente deixar a madeira secar ao ar livre em torno de 30 a 60 dias. Segundo COSTA (2009) este procedimento proporciona uma redução de aproximadamente 400 kg para cada m³ de madeira transportado até o forno. Desta forma há redução nos custos com transporte e nas áreas de secagem devido ao menor peso e leve redução do volume da madeira.

Após a pré-secagem inicial da madeira, ela é transportada e estocada novamente em áreas próximas aos fornos aguardando o momento de serem enforcadas. Essa madeira fica estocada por um período que pode variar de 90 a 120 dias. Segundo MOREIRA (1964) quando a madeira é estocada de forma inadequada essa madeira produzirá uma menor quantidade de carvão de qualidade inferior. Com este tempo de estocagem, a Empresa assegura que as toras de madeira são enforcadas com aproximadamente 30% de umidade em base seca (bs).

Neste trabalho, foram feitas algumas análises térmicas da madeira a partir do aplicativo computacional DPT (BORGES, 2008). O objetivo é analisar, do ponto de vista térmico, a influência do diâmetro e do comprimento das toras usadas na produção de carvão. Inicialmente foram simuladas três toras de mesmo comprimento e diâmetro variável submetidas a uma fonte de calor constante. A distribuição de temperatura nas toras é apresentada na Fig. 4.3.

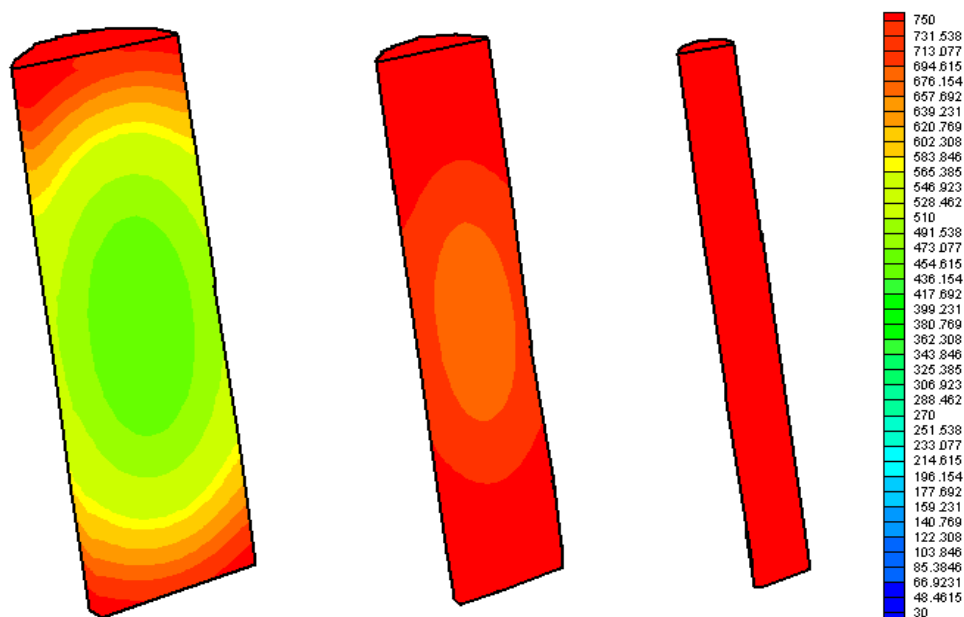


Figura 4.3 – Toras de mesmo comprimento e diâmetro de 30, 20 e 10 cm respectivamente

Neste caso é possível notar que, para o caso de toras de mesmo comprimento, quanto maior o diâmetro da tora, maior será tempo para que a madeira adquira uma distribuição de temperatura homogênea. Na prática isso significa que produzir carvão com toras de mesmo comprimento e diâmetro variável contribui para a formação do “tiço” (madeira verde: toras de maior diâmetro) e cinzas (toras de menor diâmetro). A partir da análise dos campos térmicos desenvolvidos, verifica-se que a temperatura no interior das toras de menor diâmetro atinge valores praticamente iguais ao da superfície enquanto que a tora de maior diâmetro apresentou valores de temperaturas em seu interior de menor intensidade quando comparados com os da superfície. Ressalta-se que os resultados apresentados são meramente ilustrativos e têm como finalidade mostrar um estudo térmico do processo de carbonização de madeira com diâmetros diferentes.

Em outra simulação realizada, utilizou três toras de madeira, variando o comprimento e diâmetro, porém com volume constante. Essas toras foram submetidas a uma fonte de calor constante durante o mesmo período de tempo da simulação da Fig. 4.3. A distribuição de temperatura nas toras é apresentada na Fig. 4.4.

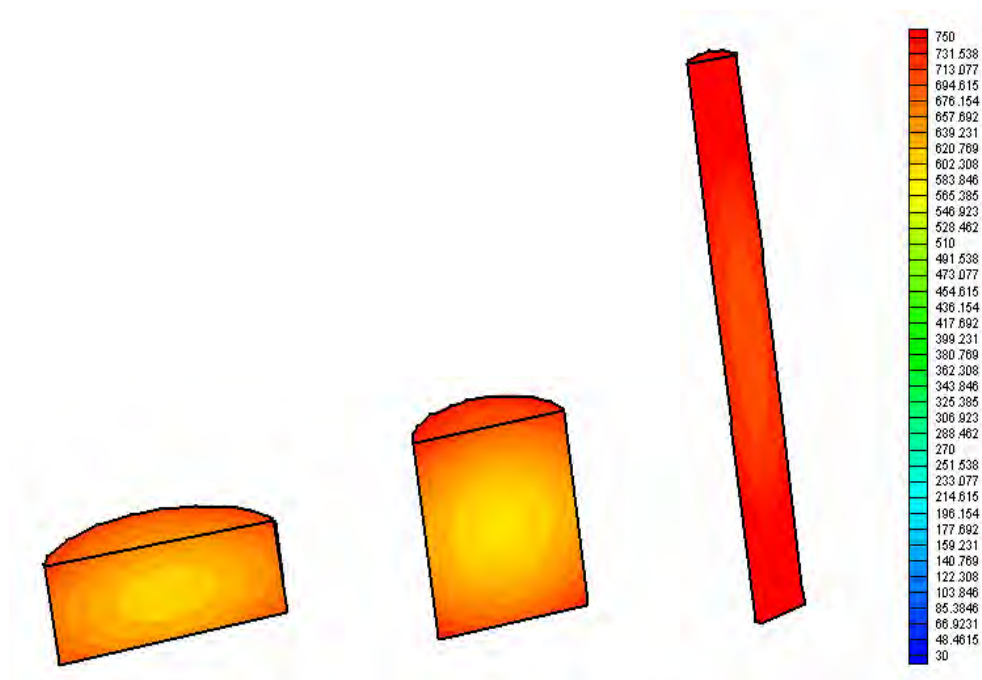


Figura 4.4 – Toras com mesmo volume e diâmetro de 30, 20 e 10 cm respectivamente

De acordo com os resultados apresentados pela Fig. 4.4, pode ser observado que toras de menores diâmetros, indiferentemente de seu comprimento, permitem uma melhor homogeneidade do calor em seu interior. Porém, o perfil térmico apresentado pela Fig.4.4 quando comparado à simulação mostrada pela Fig.4.3, mostra que as toras de mesmo diâmetro, porém com comprimentos reduzidos, permitem uma carbonização mais rápida.

Para uma aplicação prática, o ideal seria toras finas de comprimento infinito. Portanto muitas vezes as florestas ou a madeira disponibilizada para o processo de carbonização são desfavoráveis. Em muitos casos, toras de diâmetros acima de 20 cm são freqüentemente utilizadas. Para isso, conforme mostrado pelas simulações, o melhor seria reduzir o comprimento das toras para aumentar o rendimento da produção. No entanto, esta prática demandaria um maior tempo e custo para a preparação das toras de madeira.

Contudo, o mais interessante para um processo de carbonização da madeira, é que tenha uma padronização das toras de madeira para a homogeneidade da qualidade do carvão. COUTINHO e FERRAZ (1988) mostraram em seus estudos variações consideráveis no índice de friabilidade do carvão produzido com toras de diâmetros diferentes (COUTINHO e FERRAZ, 1988).

De acordo com a prática padrão da Empresa, a madeira ou lenha enforcada é classificada inicialmente como sendo fina (abaixo de 10 cm de diâmetro médio), média (com valores de diâmetro médio entre 10 e 18 cm) e grossa (acima de 18 cm de diâmetro médio). Atualmente, a Empresa tenta padronizar ao máximo o diâmetro médio das toras enforcadas, tendo em vista a redução de tiço e finos e o aumento da qualidade do produto final.

Já para a redução dos impactos ambientais causados pelo processo, algumas medidas são tomadas como essenciais. Atualmente é retirado o alcatrão e o líquido pirolenhoso, que são depositados em tambores para serem posteriormente utilizados em outras aplicações. Além disso, todos os resíduos gerados na área são recolhidos e encaminhados para os coletores localizados no pátio. Todavia, não há controle da quantidade de emissão de gases para a atmosfera.

Depois de conhecido os procedimentos, o forno é carregado com as toras de madeira oriunda dos estoques onde acontece a secagem da madeira ao tempo. Devido às condições operacionais, essas toras de madeira são posicionadas dentro do forno de forma horizontal, em cima de "travesseiros de lenha" que permitem o fluxo dos gases quentes entre as toras localizadas na parte inferior.

Na Empresa a quantidade de madeira enforcada é controlada através de uma estimativa do seu volume, não havendo precisão na medida. Para esse tipo de prática, estima-se que o volume médio de madeira enforcada em forno RAC 220 é de 150 m³, porém este valor pode variar devido a vários fatores, agravado pela dependência da habilidade dos operadores das máquinas e do diâmetro das toras.

Juntamente com o carregamento da madeira, as câmaras do forno são abastecidas com tiço para que se possa iniciar o acendimento do forno de forma mais fácil. Em seguida, fecha-se as câmaras das extremidades (1 e 4) e as chaminés para que se possa dar a ignição nas câmaras centrais (2 e 3), conforme ilustrado pela Figs. 4.2 e 4.5.



Figura 4.5 – Ignição das câmaras centrais

Com as chaminés lacradas, as fumaças provenientes do processo escapam por uma clarabóia. Depois de quatro horas do processo já iniciado, ou então, se o pirômetro infravermelho acusar uma temperatura igual ou superior a 80°C na fumaça, fecha-se a clarabóia e efetua-se a abertura das chaminés. Ao fechar e lacrar a clarabóia, é também realizado o controle das câmaras centrais. Elas são abafadas, no intuito de reduzir a entrada de oxigênio dentro do forno, conforme mostrado pela Fig. 4.6.

O processo de carbonização consiste em controlar a entrada de oxigênio para transformar a madeira em carvão. O resultado esperado é que se retire 110 m^3 de carvão em cada ciclo de carbonização, com apenas 5 a 10 m^3 de tiço em cada fornada.



Figura 4.6 – Controle das câmaras centrais

Após dez a doze horas do fechamento da clarabóia, é iniciada a ignição das câmaras das extremidades que serão controladas da mesma forma que as câmaras centrais depois de oito horas de funcionamento, conforme já ilustrado anteriormente pela Fig. 4.6.

Quando o pirômetro acusa uma temperatura de 90° C na tampa das chaminés, é feito o barrelamento das câmaras centrais, apenas nas bordas, deixando somente a janelinha aberta, conforme ilustrado pela Fig. 4.7.



Figura 4.7 – Câmara com o controle de barrelamento, semi-lacrada

Quando a temperatura nas chaminés atingir 100°C , deve-se começar a diminuir gradativamente a entrada de ar nas câmaras 2 e 3. Quando a temperatura medida no mesmo ponto equivaler a 130°C , é eliminando por completo a abertura da janelinha, como sugere a Fig. 4.8.



Figura 4.8 – Câmara totalmente lacrada

Neste momento, o controle da temperatura deve ser feito pelas portas. Ao acusar um valor de 95°C a uma altura de 1,20 m do chão na superfície externa da porta, correspondente a câmara, esta deve ser barreada em suas bordas, conforme já mostrado pela Fig. 4.7. Posteriormente, deve-se começar a reduzir a abertura da janelinha quando a temperatura da porta correspondente atingir 105°C no rodapé. As câmaras serão lacradas somente quando a temperatura no rodapé da porta correspondente acusar valores iguais ou maiores que 120°C. Este momento caracteriza a transição do processo de carbonização para o processo de resfriamento do forno, pois juntamente com o lacre das câmaras 1 e 4 também é efetuado o lacre das chaminés.

Por último, para a abertura do forno, o controle da temperatura é feito pelas portas. Em torno de 6h da manhã, são coletados valores de temperatura indicados por pirômetros a 1,20 m do chão. Quando esses valores são menores que 30°C, é o momento ideal para a abertura dos fornos e o início do descarregamento, finalizando assim o ciclo de carbonização.

Neste momento os fornos de alvenaria RAC 220 são revestidos com barro para evitar eventuais entradas de oxigênio pelas frestas dos tijolos, indesejadas no processo. Desta maneira, o carbonizador deve estar atento para corrigir os vazamentos decorrentes nas paredes, portas e chaminés do forno durante o processo de carbonização.

Podem ser encontradas algumas anomalias durante os ciclos de carbonização. Por isso, algumas medidas corretivas já estão pré-definidas. No carregamento do forno pode ocorrer da madeira ser enfiada com um teor de umidade muito alto, atrasando o processo de carbonização da madeira. Esta disfunção no processo normalmente é causada pela falta de planejamento da equipe envolvida. Para solucionar este possível erro, faz-se um estoque de madeira com teor de umidade de aproximadamente de 30% (bs) aos arredores da UPC, conforme relatado anteriormente.

Outro erro muito freqüente no processo, já identificado pela Empresa, é a carbonização decorrente em fornos com os canais das câmaras e chaminés obstruídos. Suas possíveis causas são: limpeza mal efetuada, a carga de abastecimento das câmaras fora dos padrões, entradas de ar ao longo do forno e a eventual falta de prática dos carbonizadores envolvidos com o processo. Para solucionar e minimizar estes erros deve-se observar com freqüência os procedimentos operacionais e, constantemente, analisar e adaptar as práticas operacionais existentes.

Após a análise da prática padrão, propõe-se a análise de outros ciclos de carbonização, porém, monitorando os campos de temperatura no interior do forno e correlacionando-os com as práticas operacionais.

4.3 Análise de ciclos de carbonização a partir da medição das temperaturas nos fornos

De acordo com a prática de carbonização utilizada pela Empresa, foi possível observar que o controle do forno é baseado em indicações fornecidas por fatores externos. Para um melhor acompanhamento desse processo e conhecer os fenômenos que ocorrem no interior do forno, foram analisados ciclos de carbonização nos quais se mediram as temperaturas no interior do forno via sistema supervisório proposto neste trabalho.

Para este estudo, também foram considerados algumas informações da madeira. As toras de madeiras foram secadas naturalmente em um período aproximado de seis a oito meses, garantindo uma porcentagem de umidade média de aproximadamente 30% (bs). As madeiras são provenientes de florestas clonais de eucalipto de espécies variadas e foram classificadas como sendo lenha fina, com diâmetro abaixo de 10 cm.

De acordo com a experiência prática dos carbonizadores, as regiões mais próximas das portas, são as que possuem as temperaturas mais baixas quando comparadas as de outras regiões de dentro do forno. Neste caso é comum a encontrar uma grande quantidade de tiços (pedaços de madeira não carbonizados) nestas regiões, pois não houve um controle adequado da temperatura. Segundo CARNEIRO (2007), o controle da temperatura no processo de carbonização é indispensável. Nesse sentido, seis sensores RTD (pt100) foram instalados na região da porta, distribuídos da seguinte maneira: dois sensores na base, dois na parte superior, um na extremidade superior do forno, chamada de copa, e finalmente um na chaminé.

Subseqüentemente, foram instalados outros dezesseis sensores, distribuídos ao longo do forno totalizando em vinte e dois sensores de temperatura divididos em cinco zonas distintas do forno: cinco sensores na zona 1 próxima à porta esquerda do forno, dez sensores nas zonas 2 e 3 próximas ao centro do forno, cinco sensores na zona 4, próxima à porta direita e 1 sensor em cada chaminé, como apresentado na Fig. 4.9.

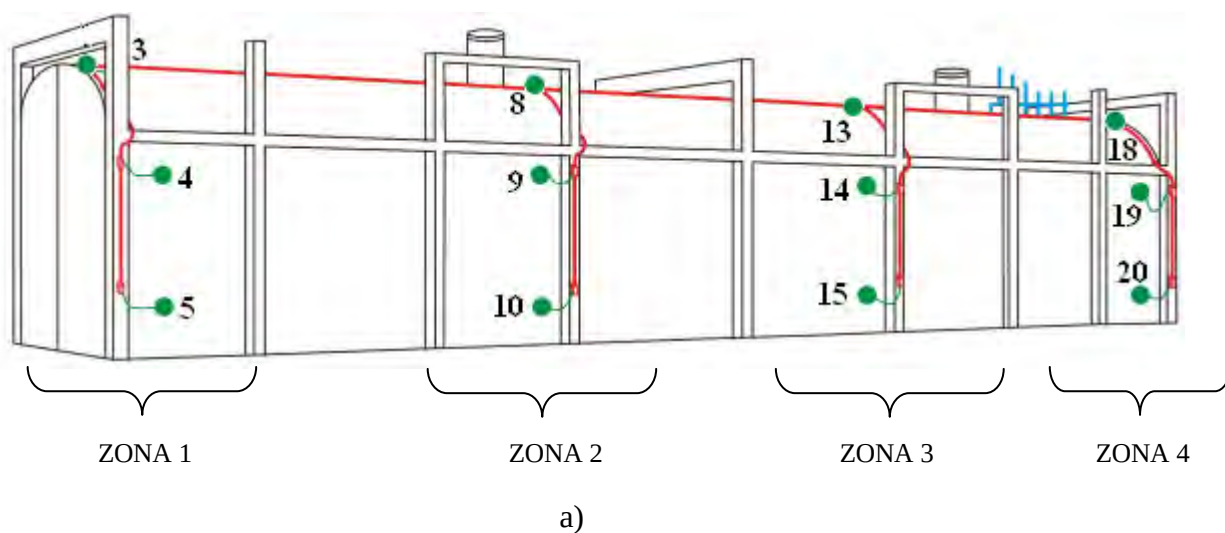


Figura 4.9 – a) Esquema da instrumentação térmica de um forno RAC220 e a divisão de suas zonas; b) Forno RAC 220 instrumentado

O processo de carbonização pode ser dividido em três etapas. Na primeira etapa, a madeira enforcada, começa a desprender grandes quantidades de água mantidas em seu interior. Essa etapa é chamada de secagem. Na etapa posterior, a madeira começa a ser pirolizada, onde acontece a transformação da madeira em carvão. Por fim, na terceira, acontece o estágio de resfriamento. Este estágio começa quando, segundo a experiência do carbonizador, a madeira praticamente já se transformou em carvão. No resfriamento, o carvão deve permanecer dentro do forno que, por sua vez, é totalmente lacrado, para que não

haja entrada de ar. O ciclo termina quando a temperatura da porta permanece próxima à temperatura ambiente.

Outra informação obtida pela prática dos carbonizadores é que as temperaturas mais elevadas normalmente se encontram na parte superior do forno, próximas ao domo ou copa.

Assim, para avaliar tais afirmações dos carbonizadores, para um dado ciclo de carbonização, analisaram-se as temperaturas na zona 1 próxima à porta esquerda do forno. A Fig. 4.10 apresenta as curvas obtidas durante esta primeira análise.

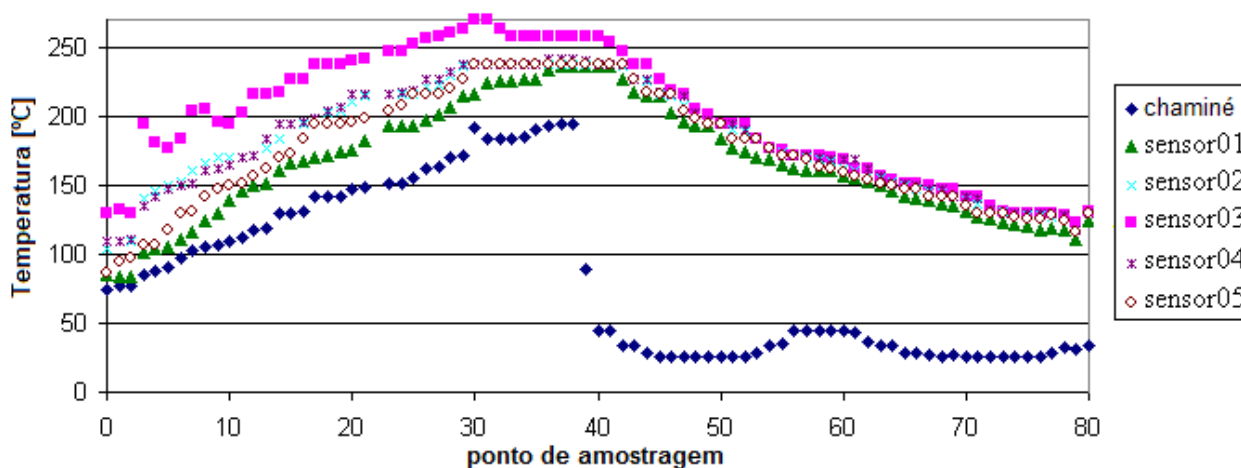


Figura 4.10 – Temperaturas da região da porta esquerda, zona 1

A Fig. 4.10 apresenta a transição entre duas etapas, da fase de pirólise para a fase de resfriamento. Essa transição pode ser observada no ponto 40 quando as temperaturas atingem os seus níveis máximos. Esta transição pode ser observada com maior clareza, analisando-se o sensor “chaminé”. Neste instante de tempo, fecham-se os canais de fumaça, interrompendo o fluxo dos gases de pirólise na chaminé, fazendo com que a temperatura caia abruptamente.

Outro fato importante mostrado pela Fig. 4.10 e que entra em conformidade com as informações relatadas pelos carbonizadores, é que a parte superior do forno, chamada de região da copa, apresenta maiores níveis de temperatura quando comparada às temperaturas na base do forno.

A Fig. 4.10 não fornece, no entanto, informações suficientes que mostram diferenças entre as temperaturas da região das portas para as zonas centrais do forno (zonas 2 e 3).

Dessa forma, outros ciclos foram analisados para que se realizem comparações entre as temperaturas das diferentes zonas do forno.

As Figs. 4.11 e 4.14 apresentam outro ciclo de carbonização, no qual as temperaturas foram adquiridas em intervalos de um em um minuto, totalizando em aproximadamente 17640 amostras.

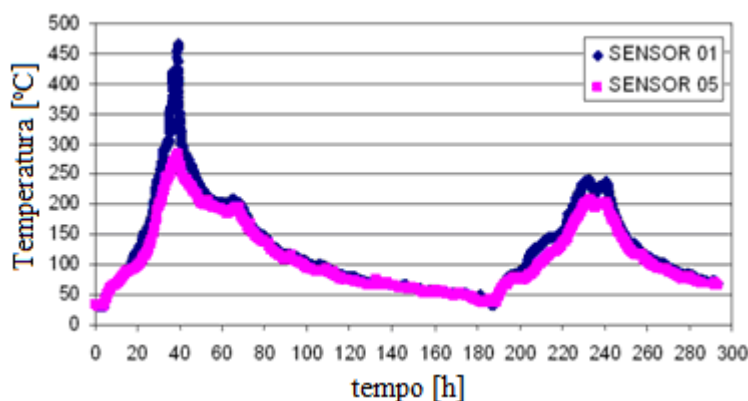


Figura 4.11 – Temperaturas dos sensores da base da zona 1 de um forno RAC 220

Neste caso, o tempo de um ciclo de carbonização completo foi de 294 horas, o que corresponde a 12 dias de processo. A Fig. 4.11 mostra que as temperaturas medidas pelos sensores 01 e 05, que estão situados de forma simétrica, apresentam valores diferentes durante certos intervalos de tempo. Também pode ser visto que a temperatura medida pelo sensor 01 atinge valores altos, o que não era esperado.

Conforme descrito anteriormente, de acordo com a experiência prática dos carbonizadores, as zonas mais próximas das portas têm as mais baixas temperaturas quando comparadas às zonas centrais do forno. Além disso, a temperatura indicada para produzir carvão é aproximadamente de 250°C a 350°C (ASSIS, 2007). Nesta gama de temperatura é possível produzir carvão com carbono fixo entre 65% a 75% , o que é uma exigência da siderurgia nacional (JACOMINO et al., 2002).

A Fig. 4.12, apresenta as temperaturas medidas pelos sensores 02 e 04, situados também de forma simétrica na região superior do forno, perto da porta esquerda.

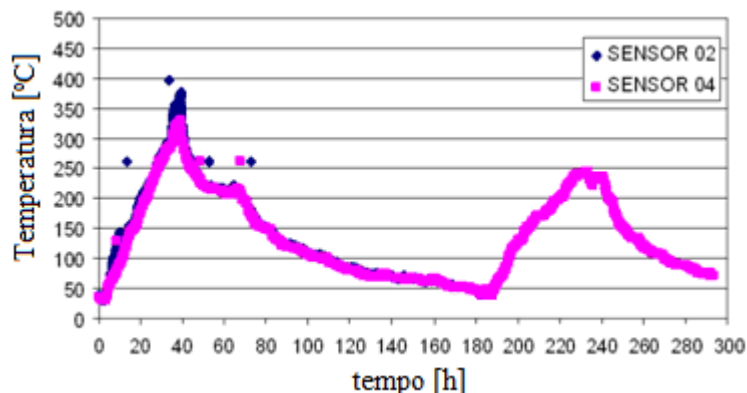


Figura 4.12 – Temperaturas dos sensores superiores da zona 1 de um forno RAC 220

A Fig. 4.13 apresenta as temperaturas medidas por sensores localizados na copa do forno onde se encontram as temperaturas mais elevadas. Pode ser visto que as temperaturas parecem ser semelhantes, porém o sensor 03, situado próximo à porta esquerda, apresentou picos de temperaturas depois de 30 horas de carbonização. Tal comportamento não é verificado no sensor 18, situado próximo à outra porta, que apresentou os menores valores de temperatura quando comparado aos demais.

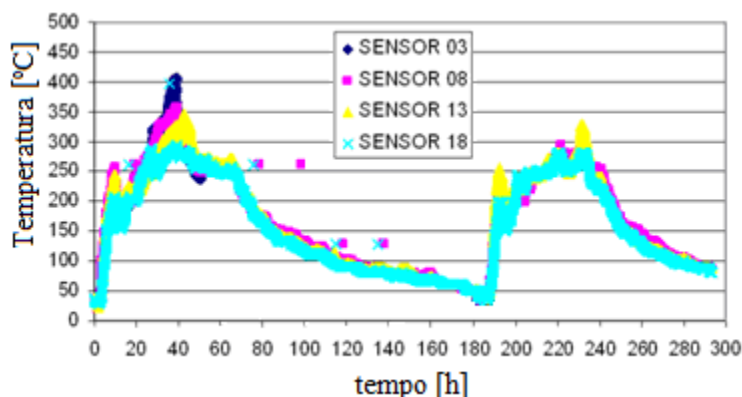


Figura 4.13 – Temperaturas dos sensores da copa das diversas zonas de um forno RAC 220

A Fig. 4.14 apresenta as temperaturas medidas pelo sensor 06, situado na base da zona 2, região central do forno. Nesta zona, de acordo com os carbonizadores, identificou-se uma rachadura na parede que estava permitindo a entrada de ar no forno. No caso do sensor 06 a temperatura chega a alcançar 500°C. ASSIS (2007) afirma que aquele carvão produzido a este nível de temperatura libera quantias pequenas de materiais voláteis, além disso, este

valor de temperatura colabora para redução do rendimento gravimétrico, além de aumentar a friabilidade do carvão, (característica na qual indica o quanto o carvão é quebradiço).

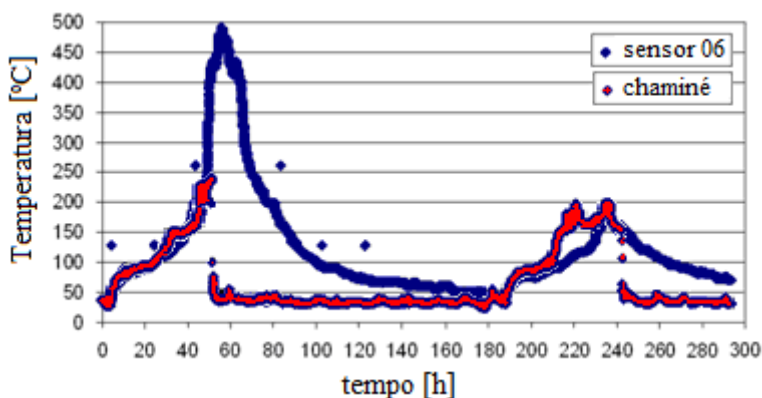


Figura 4.14 – Temperaturas de um sensor da base da zona 2 e da chaminé de um forno RAC 220

Na Fig. 4.14, verifica-se ainda a temperatura medida pelo sensor chaminé, correspondente as zonas 1 e 2 do forno. Neste caso é possível identificar o momento exato quando a chaminé está sendo fechada (depois de 50 horas) e o início da etapa de resfriamento do forno.

Um fato interessante nas Figs. 4.11 a 4.14 é que, em torno de 180 horas após o início do ciclo de carbonização - secagem, pirólise e resfriamento - os sensores indicam um novo aumento da temperatura, reiniciando a etapa de pirólise. Analisando o sensor da chaminé, verifica-se claramente o aumento da temperatura. Tal aumento ocorreu devido a alguma falha operacional que proporcionou a reentrada de ar no canal de fumaça. Analisando o mesmo sensor, pode-se observar que o problema só foi corrigido após 60 horas de reinício da pirólise.

Outro fato importante observado nas figuras anteriores é o instante exato no qual o forno foi aberto: 294 horas após o início do processo. Neste caso, verifica-se claramente outra falha no processo de produção, ou seja, nota-se que no momento da abertura do forno a temperatura no interior do forno era superior àquela identificada no instante 180 horas. Portanto, conclui-se que o forno ficou em operação durante mais 114 horas (aproximadamente cinco dias) devido a alguma falha ou engano durante a produção. Tal fato

gera prejuízos para a Empresa e pode ser evitado facilmente com o uso do sistema de supervisão proposto neste trabalho.

4.4 Ciclo de carbonização monitorado pelo Sistema Supervisório de Temperatura

Neste estudo de caso, um novo ciclo de carbonização foi analisado, no entanto, algumas intervenções no forno foram realizadas baseadas na avaliação dos campos térmicos desenvolvidos no Forno.

A lenha utilizada neste caso também foi classificada como sendo fina. Dessa forma, a Fig. 4.15 apresenta as temperaturas medidas na zona 1, próxima à porta esquerda do forno, na qual observa-se claramente a diferença entre as temperaturas medidas pelos sensores localizados na região superior do forno (02 e 04) e os demais localizados na região inferior (01 e 05) sendo que a distância entre os sensores da região inferior para a região superior é de 1,20 m. Neste caso, durante a pirólise, a diferença de temperatura entre os sensores do topo e da base chega a ser em torno de 50°C. No entanto, durante o processo resfriamento (após 140 h de produção) as temperaturas tendem a se igualar rapidamente.

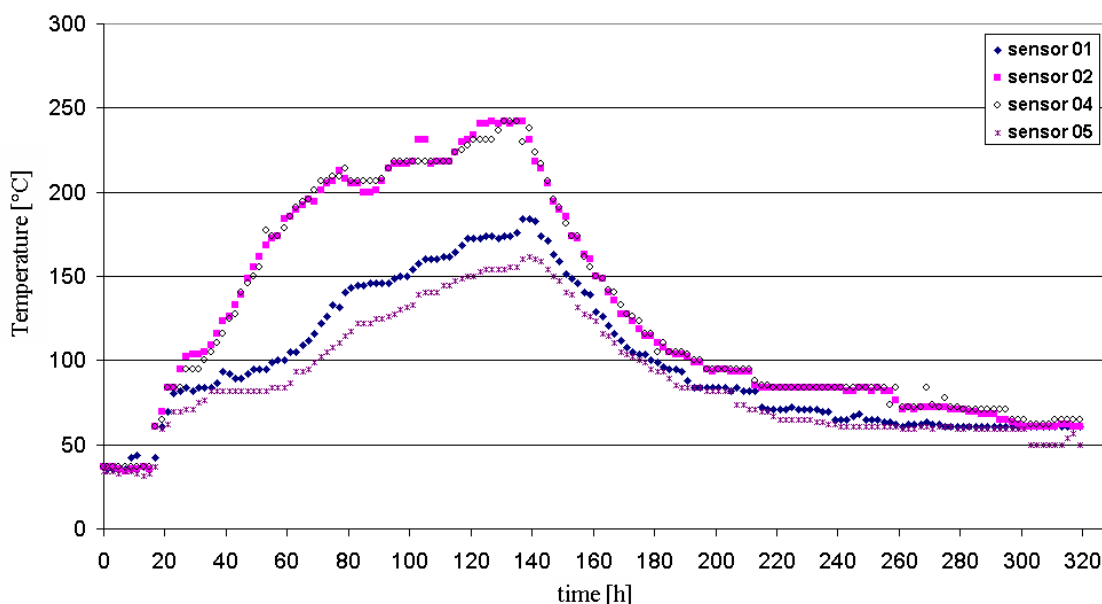


Figura 4.15 – Temperaturas da zona 1, porta esquerda

A Fig. 4.16 representa as temperaturas na zona 2 do forno, composta pelos termopares 06, 07, 09 e 10. Por ela pode ser observado que as temperaturas medidas pelos sensores da zona 2 são maiores do que as temperaturas da zona 1, porta esquerda. As temperaturas nas regiões superiores do forno alcançam 280°C e a diferença de temperatura entre as regiões superiores e inferiores chega a aproximadamente 90°C. Segundo a literatura, regiões do forno com temperatura abaixo de 250°C apresentam grandes quantidades de tiços. Esta faixa de temperatura é identificada predominante nas regiões inferiores do forno e regiões próximas às portas.

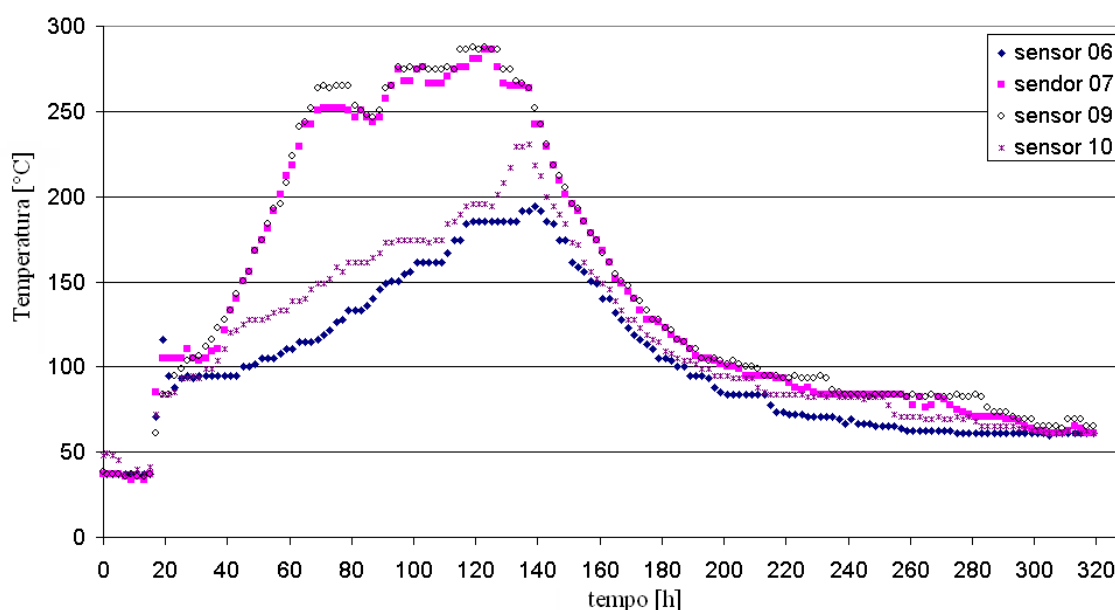


Figura 4.16 – Temperatura da zona 2, região central do forno próxima à porta esquerda

Durante todo o período de produção, a zona 3 foi a única a apresentar algumas irregularidades de temperatura, Fig. 4.7.

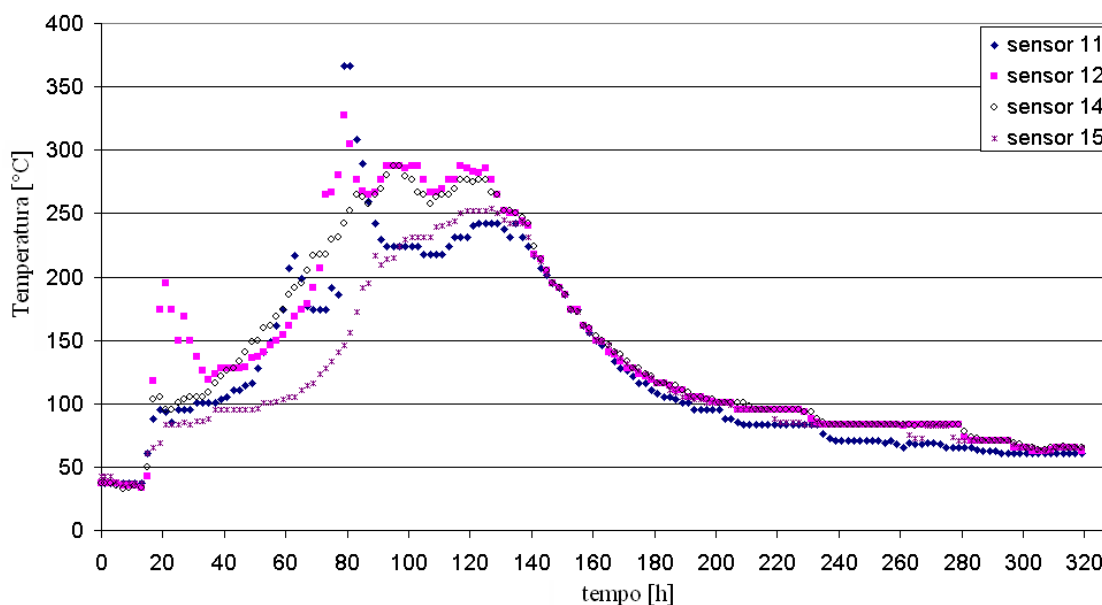


Figura 4.17 – Temperatura da zona 3, região central do forno próxima à porta direita

A Fig. 4.17 mostra que as temperaturas medidas pelos sensores 11 e 12 apresentaram valores muito elevados depois de três dias de carbonização. Assim, foi solicitado aos carbonizadores uma análise visual de irregularidades na zona 3 do forno. Neste caso, foram verificadas algumas rachaduras na parede, além disso, o barro não estava fixado de modo apropriado. Depois da correção do problema, o sensor 11 apresentou valores de temperatura semelhantes àqueles apresentados pelo sensor 15, situado de um modo simétrico na parte inferior do forno. O mesmo fato foi verificado para o sensor 12, que logo em seguida seguiu o comportamento do sensor 14, que também se encontra localizado de forma simétrica a ele.

Na Fig. 4.18, apresentam-se as temperaturas da zona 4 localizada próxima à porta direita do forno, onde se encontram os sensores 16, 17, 19 e 20.

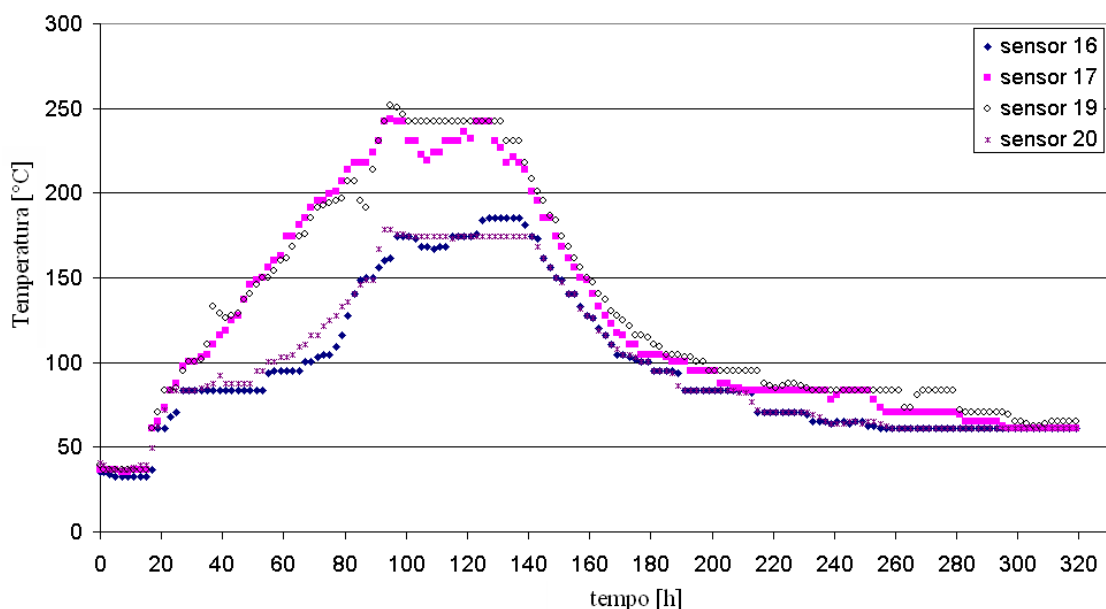


Figura 4.18 - Temperaturas da zona 4, porta direita

Como previsto, o sensor 17 e 19, situado na região superior do forno, apresentam temperaturas mais altas do que as medidas pelos sensores 16 e 20, situados na região inferior. Conforme esperado, do ponto de vista térmico, esta região se assemelha ao da zona 4, região da porta direita, apresentando valores de temperaturas menores do que aqueles apresentados nas regiões centrais do forno, confirmando que as zonas próximas às portas são as mais frias do forno. Apesar das portas serem revestidas de materiais refratários, elas são construídas com aço, o que contribui com a dissipação do calor. Assim, é comum a obtenção de tiços nestas regiões, conforme apresentado na Fig. 4.19.



Figura 4.19 – Tiços na região próxima a uma das portas

Os valores de temperatura obtidos nas chaminés são apresentados na Fig. 4.20.

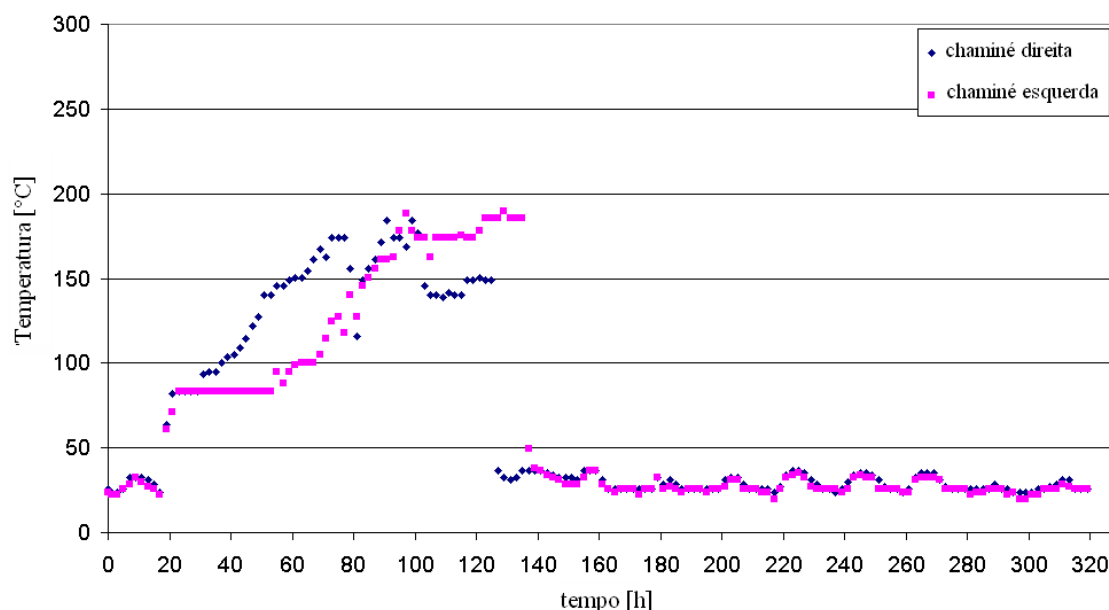


Figura 4.20 - Temperaturas medidas nas chaminés

Analisando as temperaturas nas chaminés é possível identificar claramente a transição da fase de pirólise (20h até 130h) para a fase de resfriamento (depois de 130h). A Fig. 4.20 também mostra que as chaminés não foram fechadas de forma simultânea. É possível observar uma diferença de 10 horas entre o fechamento das chaminés. Tal procedimento é baseado na prática padrão da Empresa, descrita no item 4.1 deste capítulo.

Pode ser observado que a primeira chaminé a ser fechada se localiza próxima à zona 3, onde as temperaturas mais altas foram observadas durante o processo de produção (Fig. 4.17). Neste caso, o uso de um sistema de supervisório poderia ajudar o carbonizador a tomar as decisões corretas de forma a aperfeiçoar o processo de produção.

A Figura 4.21 apresenta a evolução dos campos térmicos no interior do forno RAC 220 conforme este último experimento, um ciclo de carbonização. O eixo das abscissas (x) corresponde ao comprimento do forno, ou seja, $0 \text{ [m]} \leq x \leq 25 \text{ [m]}$, sendo definido como o comprimento desde a porta esquerda até a porta direita do forno (Fig. 4.9). O eixo das ordenadas (y) representa a altura do forno, ou seja, 4 [m] . Assim, analisando o eixo das

abscissas da esquerda para a direita, tem-se o perfil térmico no interior do forno conforme as zonas de aquecimento apresentadas na Fig. 4.9.

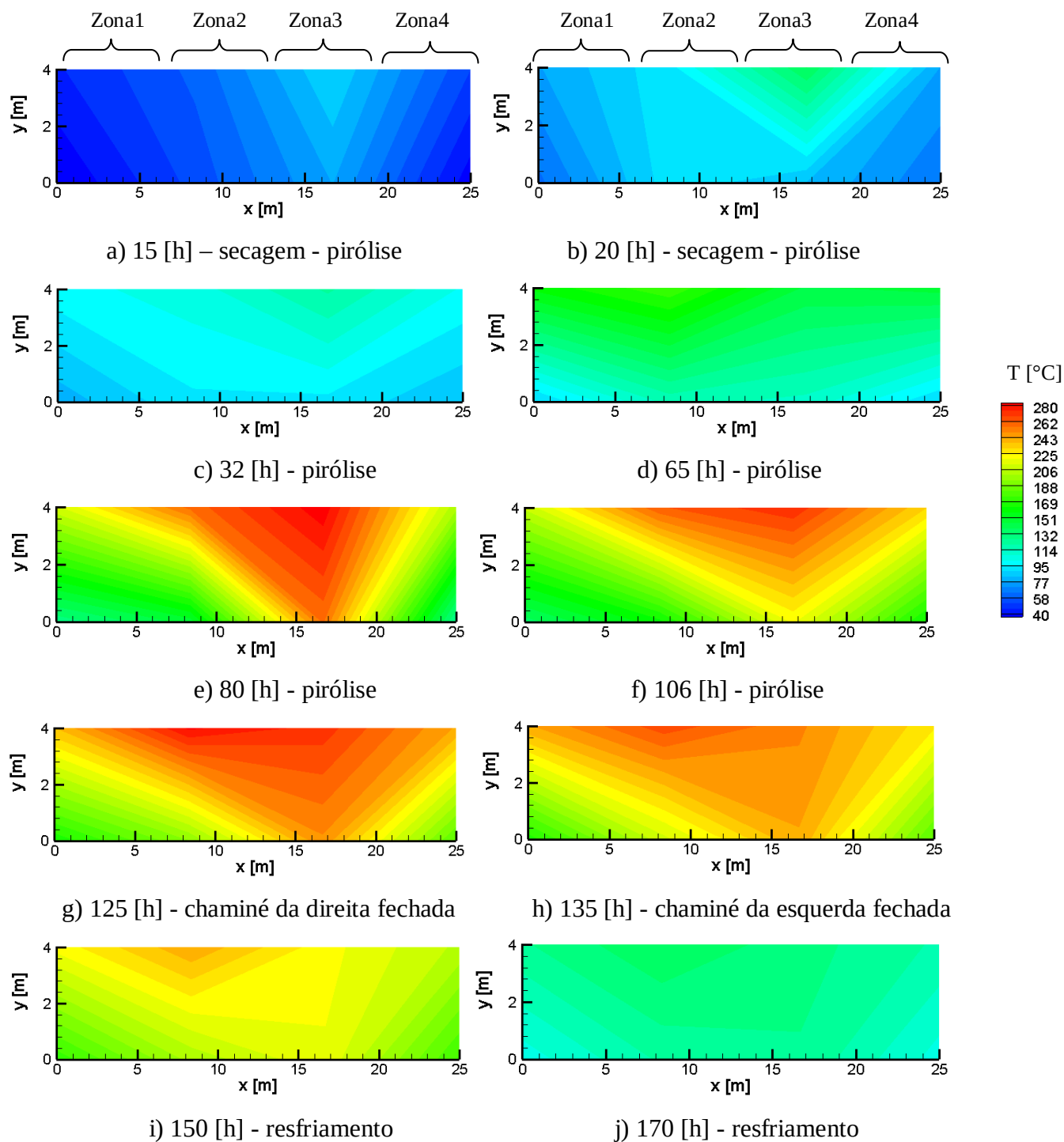


Figura 4.21 – Evolução dos campos térmicos no interior do forno RAC220

Na Figura 4.21, verifica-se claramente que os picos de temperatura identificados na zona 3, após 20 horas de ciclo (Figs. 4.17 e 4.21b), tiveram grande influência na carbonização, pois o perfil interno de temperatura do forno se tornou totalmente irregular. Analisando as Figs. 4.21h a 4.21j, verifica-se que a simetria térmica entre as zonas 1 e 4 (próximas às portas), e 2 e 3 (próximas às chaminés), só foi recuperada após 170h de ciclo na fase de resfriamento do forno. Este tipo de problema ocorre freqüentemente na Empresa, e tem interferência direta na qualidade do carvão produzido. No futuro, propõe-se evitar tal problema por meio de um aplicativo computacional de monitoramento das temperaturas. A partir de um histórico de temperaturas passadas e de um banco de dados com informações sobre a madeira enfornada e qualidade do carvão produzido, o aplicativo computacional poderá ser capaz de orientar o carbonizador durante todo o período de produção de carvão vegetal.

Analisando novamente todos os ciclos apresentados, é possível identificar claramente a transição da fase de pirólise para a fase de resfriamento, no entanto não é fácil distinguir o momento da transição da fase de secagem para a fase de pirólise. Com relação ao diâmetro das toras de madeira enfornada, é observado que não há uma uniformidade. Dessa forma, acredita-se que a fase de secagem acontece simultaneamente com a fase de pirólise no processo convencional da carbonização da madeira em fornos modelo RAC 220. Portanto algumas tecnologias inovadoras vêm sendo estudadas e desenvolvidas, tendo como um dos objetivos o controle dessas três etapas do processo. Dentre os diferentes tipos de fornos destinados a produção de carvão vegetal existentes, adaptou-se em fornos retangulares de alvenaria gaseificadores, e este será o tema de estudo apresentado pelo próximo capítulo desse trabalho.

CAPÍTULO V

ANÁLISE DE CICLOS DE CARBONIZAÇÃO EM FORNOS RAC 220 ADAPTADOS COM GASEIFICADOR

5.1 Os Fornos com Gaseificador

Os processos de carbonização convencionais são praticamente artesanais e queimam parte da madeira enforcada para fornecer a energia necessária ao processo de secagem. Porém, o calor de combustão dos voláteis contidos na madeira supera em quase duas vezes a demanda estimada para que a reação de carbonização ocorra (REZENDE, 2007). Já a tecnologia que envolve fornos adaptados com gaseificador, em teoria, consiste em reaproveitar as energias excedentes aplicando-as no próprio processo, o que contribui para um aumento de produção e redução de impactos ambientais.

Um forno adaptado com um gaseificador é constituído de tubulações que fazem a recirculação dos gases em sentidos preferenciais, homogeneizando a temperatura em todos os pontos do forno durante o estágio de secagem e pirólise. Tal procedimento reduz a quantidade de tiços e cinzas, além de aumentar a qualidade e produtividade de carvão. Neste sistema também foi implantado dispositivos com tubulações para atuar na redução do tempo de resfriamento. Neste estágio, produz-se uma atmosfera de vapor d'água no interior do forno que absorve o calor do carvão.

Para que essa adaptação seja funcional, ou seja, reaproveite energias excedentes durante a produção de carvão, necessita-se de um número mínimo de dois fornos interligados entre si. Neste trabalho, foram analisados do ponto de vista térmico, dois fornos RAC 220 adaptados com gaseificadores. Ressalta-se que os fornos possuem a mesma geometria e dimensões daqueles apresentados no Capítulo IV. Além disso, os fornos foram instrumentados com o Sistema Supervisório de Temperatura (SST) conforme apresentado no Capítulo III.

Entre os fornos, a empresa responsável por essas adaptações nos fornos, instalou um “gerador de atmosfera”, que é responsável por iniciar o processo a partir da injeção de energia ao sistema. A injeção acontece até que o primeiro forno atinja o início da etapa de pirólise. Ressalta-se que, no início do processo, a energia é proveniente da queima de toras de madeira no gerador de atmosfera. Este equipamento é desativado quando o forno começa a liberar quantidades suficientes de gases de pirólise para dar continuidade ao processo. O gás de pirólise, excedente do primeiro forno, é então queimado em um gaseificador e inserido no segundo forno, por um sistema de bombas elétricas injetoras, com o objetivo de secar a madeira verde. Após a secagem, a madeira no segundo forno começa a carbonizar liberando gases de pirólise. O primeiro forno é então reabastecido com madeira verde que passa a ser secada a partir dos gases provenientes do gaseificador. Tais características fazem com que o esse processo de produção apresentado seja semi-contínuo. Enquanto um dos fornos encontra-se no estágio carbonização, o outro encontra-se no estágio de secagem da madeira.

A Figura 5.1 apresenta as dependências da Empresa onde foi instalado o Sistema desenvolvido. Ressalta-se que a montagem do Sistema exige a conexão entre dois fornos retangulares de alvenaria modelo RAC 220.



a)



b)



c)

Figura 5.1 - Obra de adaptação e interligação dos fornos RAC 220. a) Visão geral dos fornos adaptados; b) Detalhe do gerador de atmosfera e gaseificador; c) Tubulação responsável pela circulação de gases quentes no interior do forno

5.2 Instrumentação Térmica dos Fornos

Além da adaptação dos fornos, instalou-se nos fornos 1 e 2 o Sistema de Supervisorio UFU (SST) proposto no Capítulo III. A Fig. 5.2 apresenta a instrumentação térmica dos fornos, nos quais foram instalados 18 sensores de temperatura divididos em quatro zonas distintas do forno: cinco sensores na zona 1, próxima à porta esquerda do forno, nove sensores nas zonas 2 e 3, zonas centrais do forno e quatro sensores na zona 4, próxima à porta direita.

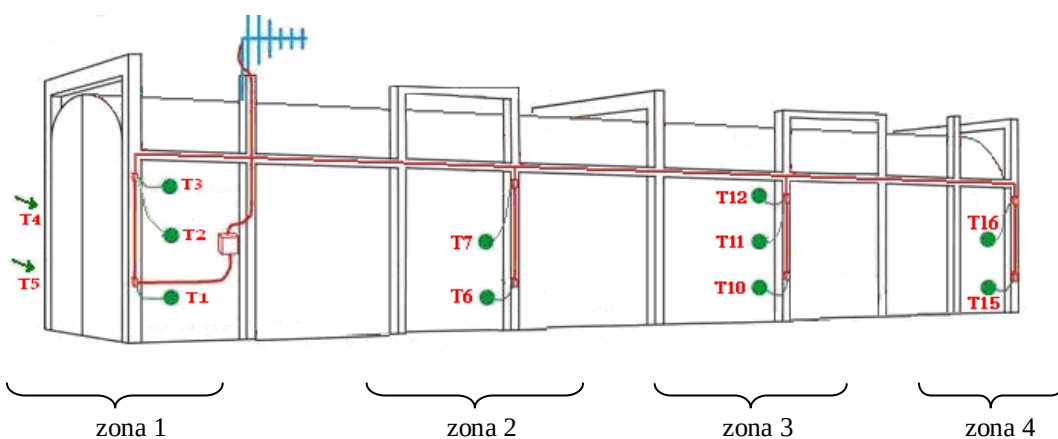


Figura 5.2 – Instrumentação térmica dos fornos adaptados – posição dos sensores de temperatura

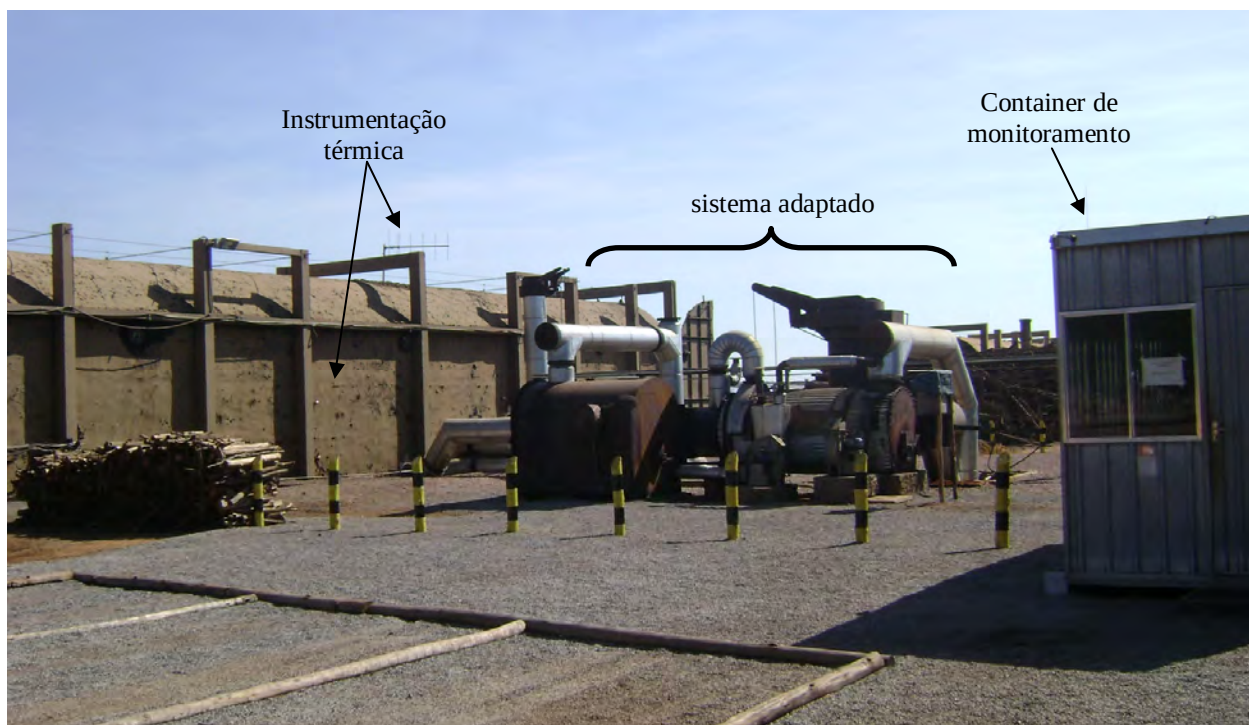


Figura 5.3 – Fornos RAC 220 instrumentados e adaptados

Como a tecnologia implantada nos fornos não se encontra totalmente disponibilizada para o uso decorrente da Empresa, para avaliar essas adaptações foram realizadas comparações entre os fornos RAC 220 adaptados com gaseificador e um forno RAC 220 padrão, instrumentado com sensores de temperatura e monitorado pelo SST.

Ressalta-se que durante todo o processo de produção de carvão vegetal nos fornos adaptados, houve monitoramento via Sistema Supervisório de Temperatura, porém não houve nenhuma intervenção no processo com base nas temperaturas obtidas. Este monitoramento possui apenas um caráter de acompanhamento para conhecimento do processo.

5.3 Análise de um Ciclo de Produção nos Fornos RAC 220 Adaptados com Gaseificador

O primeiro passo, conforme definido nos ciclos anteriores, é conhecer as características da madeira enforcada. Assim, em todos os dois fornos adaptados com o sistema de gaseificador foram utilizadas madeiras provenientes de plantios clonais de

Eucalyptus urophylla, com idade de 10 anos. O corte da madeira ocorreu nos meses de abril e maio de 2008 e o seu processamento em toras de 3 metros nos meses de junho a setembro de 2008. O referido volume de madeira foi estocado em pilhas ao longo da estrada de acesso à UPC e em seu entorno, onde permaneceram de julho de 2008 junho de 2009. A análise estatística do diâmetro médio das toras de madeira é apresentada pelas Figs. 5.4 e 5.5.

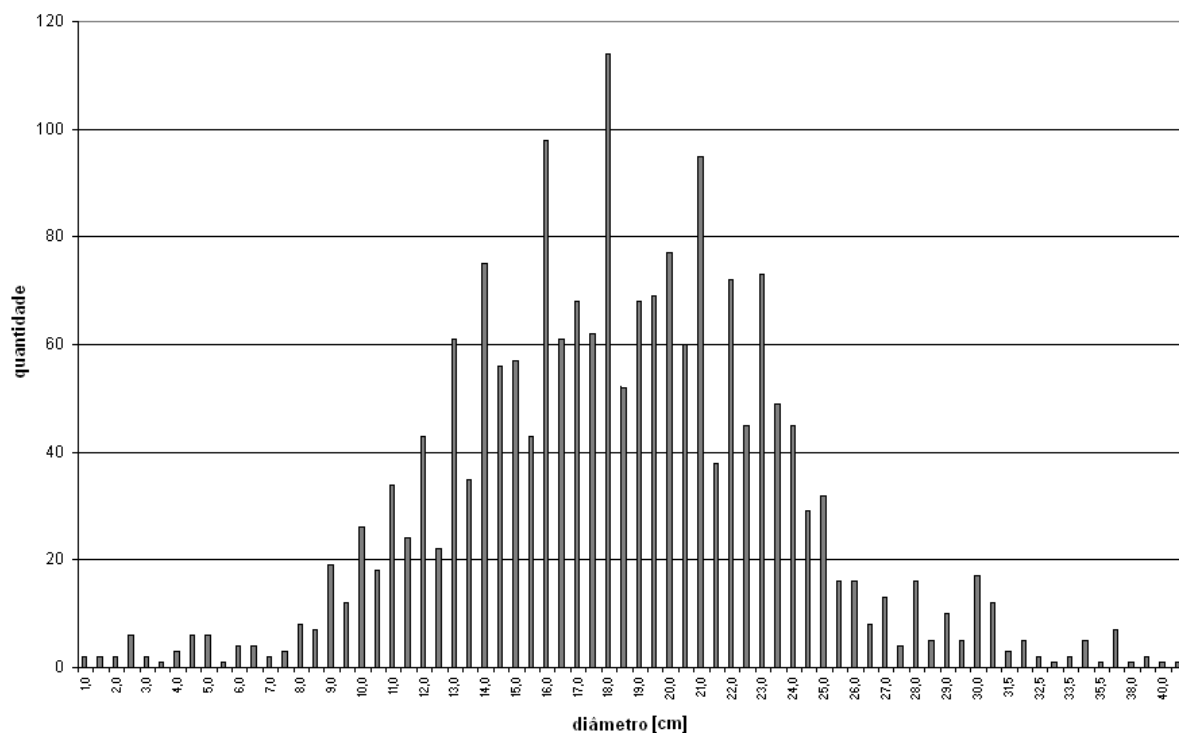


Figura 5.4 – Distribuição dos diâmetros das toras de madeira destinada a pesquisa

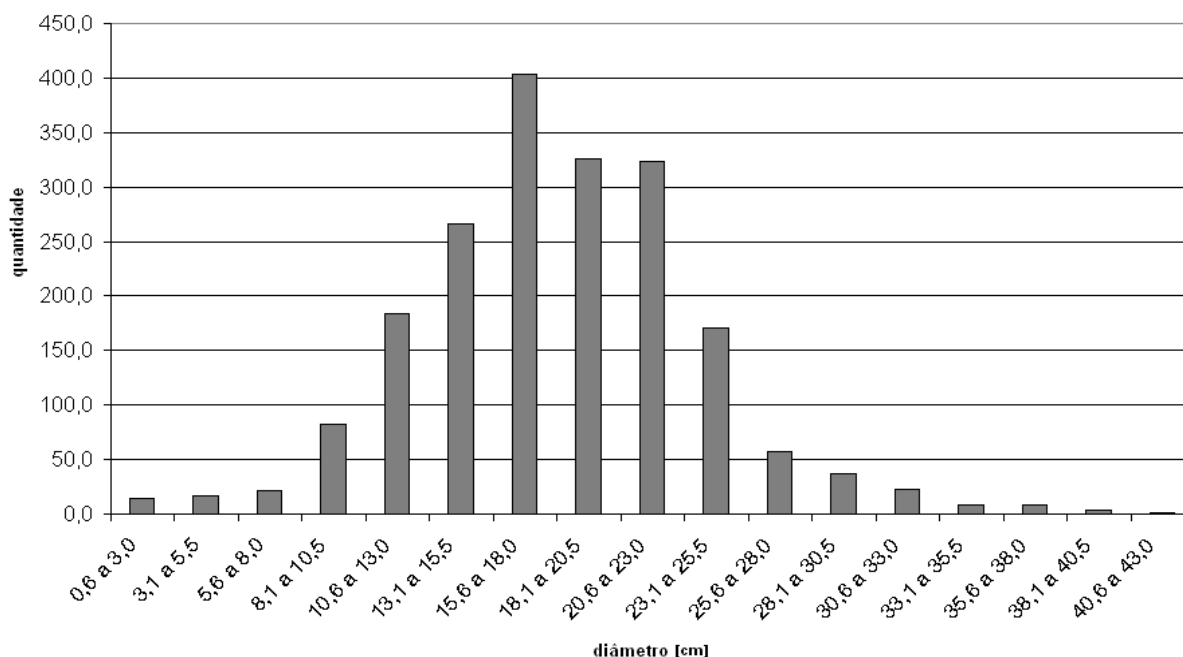


Figura 5.5 - Distribuição por classes dos diâmetros das toras de madeira destinadas a pesquisa

Como as toras ficam estocadas em uma área mais afastada dos fornos, alguns procedimentos foram tomados para o transporte das mesmas até os fornos. Primeiramente, os caminhões foram limpos, pois normalmente possuem muitos galhos e terra, em seguida foram tarados e pesados. A Fig. 5.6 apresenta as toras de madeira alocadas ao lado dos fornos adaptados com o sistema de gaseificador.



Figura 5.6 – Toras de madeira alocadas ao lado dos fornos adaptados

No dia 16 de abril de 2009, iniciou-se um teste no forno 1 envolvendo um ciclo de carbonização completo. As Figs. 5.7 a 5.10 apresentam os valores de temperatura no interior do forno adaptado, durante um ciclo de produção, conforme as zonas de carbonização definidas na Fig. 5.2.

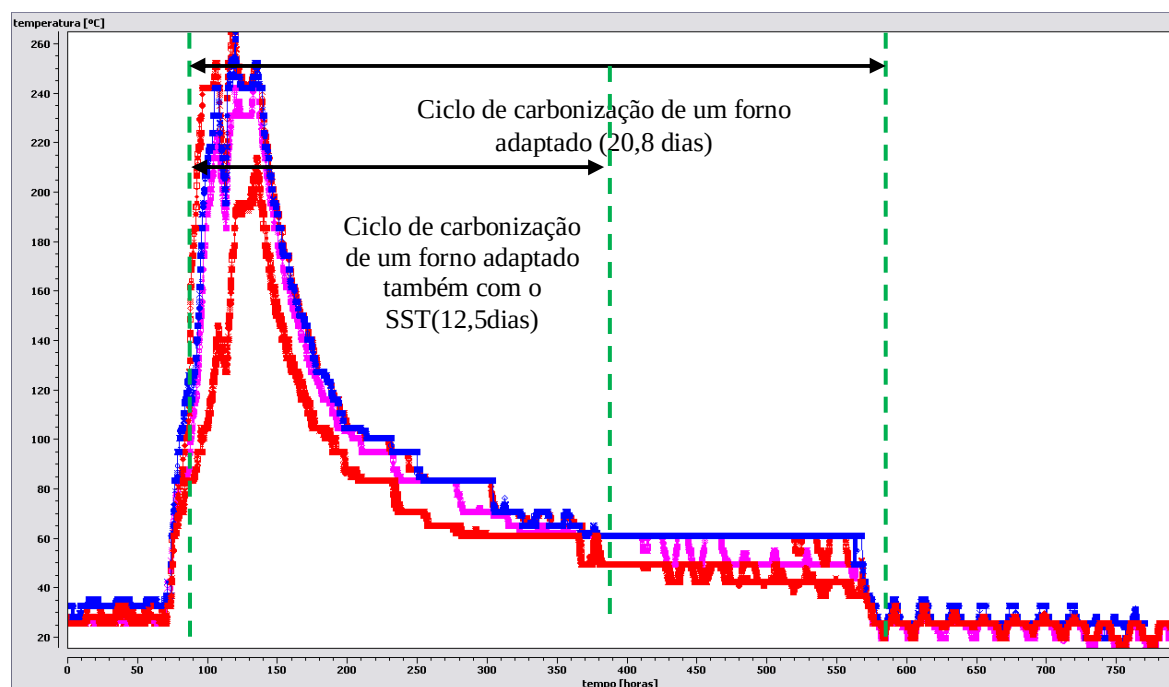


Figura 5.7 – Zona 1: porta esquerda

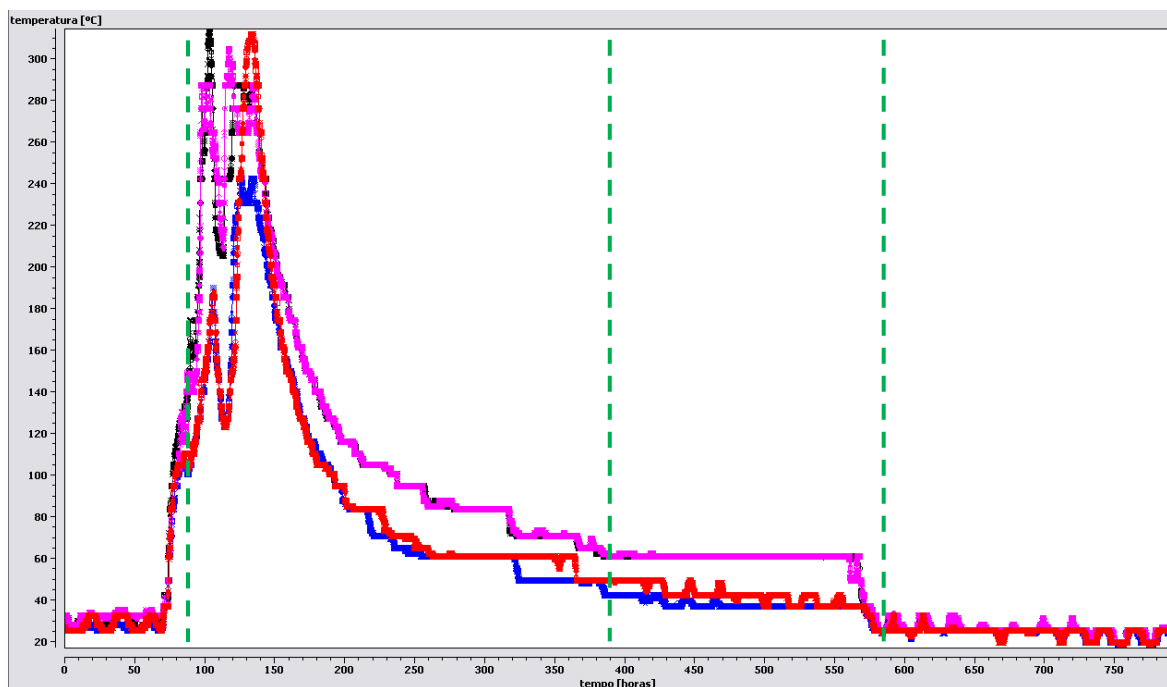


Figura 5.8 – Zona 2: região central próxima à porta esquerda

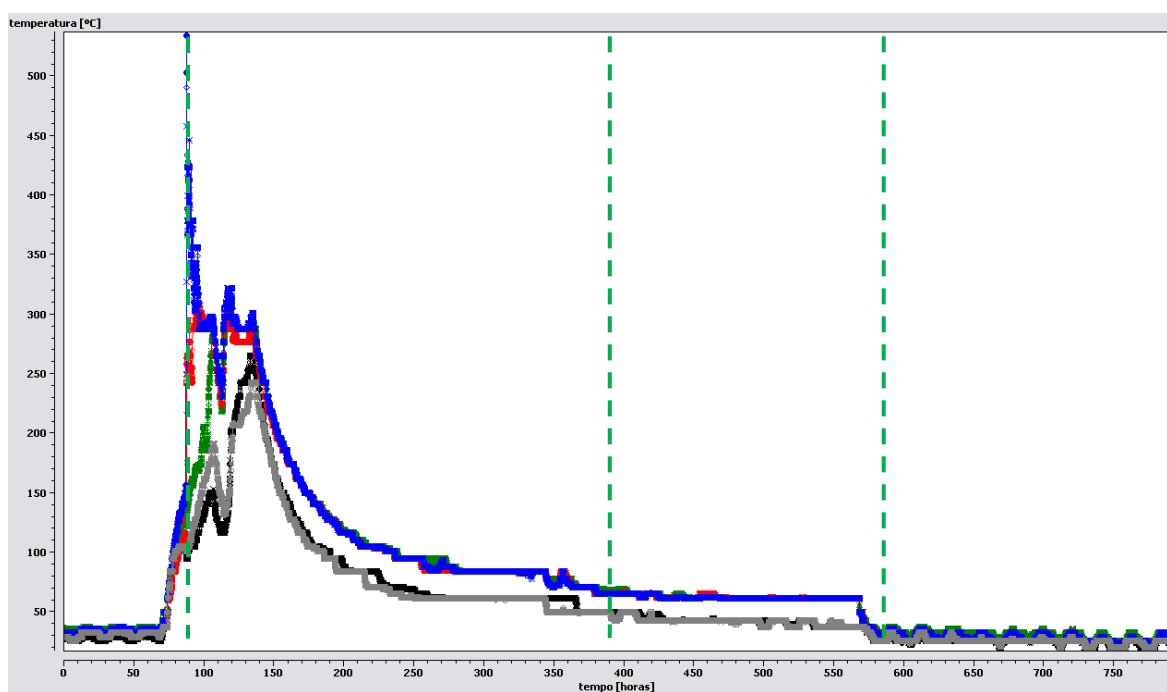


Figura 5.9 – Zona 3: região central próxima à porta direita

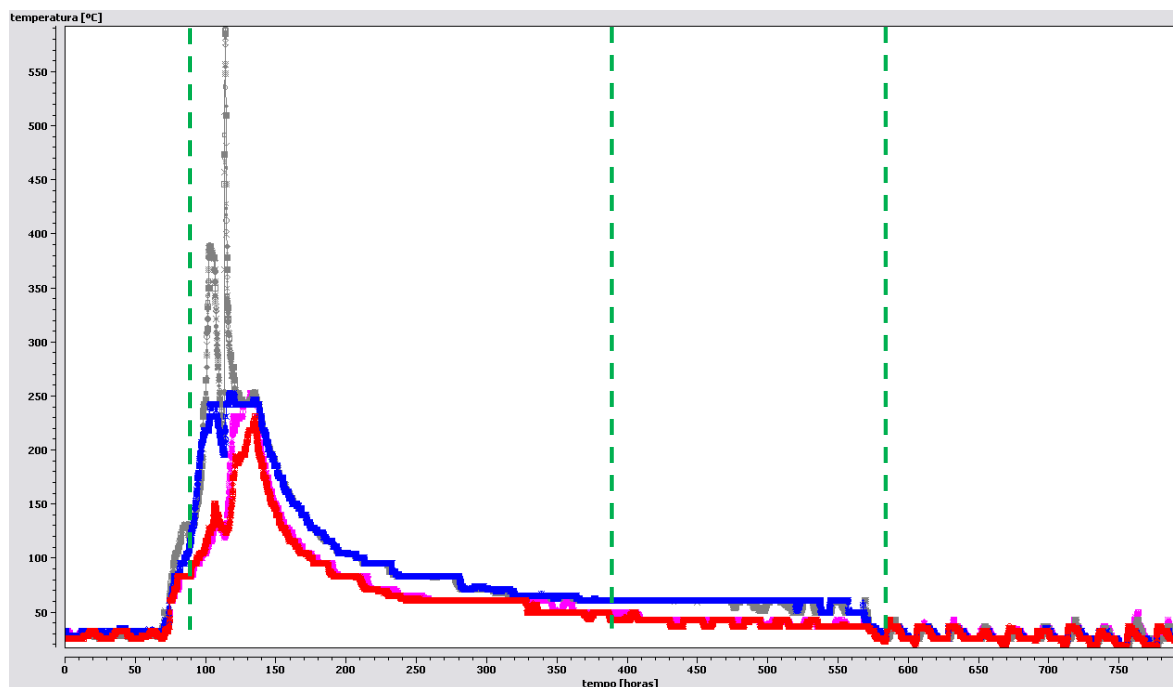


Figura 5.10 – Zona 4: porta direita

A Fig. 5.7 mostra que o ciclo de produção dos fornos adaptados com o sistema de gaseificação ocorreu em aproximadamente 20 dias. Este tempo de produção se encontra fora da faixa padrão da empresa e é justificado devido ao período de testes no sistema e ao baixo preço do carvão no mercado em função da crise financeira mundial. O Sistema Supervisório de Temperatura mostrou que o carvão poderia ter sido retirado após 12 dias de produção.

Analisando as temperaturas apresentadas nas Figs. 5.7 a 5.10 verificam-se que os fornos adaptados promovem uma maior homogeneidade da carbonização da madeira no interior do forno. Este fato é comprovado analisando-se a similaridade entre as temperaturas medidas em cada zona do forno, devido à circulação forçada dos gases no seu interior.

No entanto, qualquer falha na circulação dos gases pode provocar superaquecimentos, o que gera algumas complicações durante o processo. As Figs. 5.9 e 5.10, por exemplo, mostram picos de temperatura durante a carbonização. Nota-se em tais figuras que as temperaturas em algumas regiões ultrapassaram 500°C. Este fato aconteceu devido a um superaquecimento nas manilhas que conduzem os gases para dentro ou para fora dos fornos adaptados, o que provocou rachaduras, através das quais houve entrada de ar no interior do forno, proporcionando a queima do carvão. Tal falha ocorreu pois os dutos que interligam o

gaseificador e o gerador de atmosfera aos fornos foram construídos com manilhas de barro, que não resistiram às altas temperaturas durante a carbonização. A Fig. 5.11 apresenta a região de superaquecimento no interior do forno.



Figura 5.11 – Focos de fogo dentro de um dos fornos adaptados com o sistema de gaseificador

Com as quebras dos dutos de gases, a fase de pirólise do processo estudado foi interrompida, fazendo com que o forno passasse a ser operado conforme a prática padrão da Empresa. No estágio de resfriamento do forno, utilizaram-se dos recursos de borrifamento de água disponíveis, fazendo com que houvesse um ganho na velocidade de resfriamento do forno adaptado em relação a um forno RAC convencional.

No estágio de resfriamento, ligam-se os sistemas de pulverização de água com uma temperatura média do forno de aproximadamente 260°C. Este procedimento é encerrado quando a temperatura média atinge 100°C. Durante este período algumas falhas foram visíveis, grandes quantidades de água saíram pelas portas do forno, umedecendo uma grande parte do carvão, conforme apresentado pela Fig 5.12.



Figura 5.12 - Abertura de um dos fornos adaptados – nuvem de vapor d'água

Uma falha operacional identificada pelas curvas térmicas das Figs. 5.7 a 5.10, foi a precipitação da abertura do forno. Este foi aberto quando a temperatura apresentava valores médios de aproximadamente 75°C. Assim, quando o carvão foi remanejado para a “praça” da Empresa (local onde o carvão é estocado), houve a combustão espontânea de praticamente todo o produto que foi combatido pelos operadores através de jateamento de água. Na Figura 5.13 é possível observar o carvão na “praça” entrando em combustão espontânea.



Figura 5.13 - Carvão produzido em um forno adaptado em combustão espontânea

Durante a operação do ciclo de carbonização dos fornos adaptados com o sistema de gaseificador, foram observados alguns fatos relevantes. No estágio inicial - secagem - as temperaturas se mantiveram homogêneas em praticamente todos os pontos do forno. Isto se deve à recirculação forçada dos gases em seu interior. Apesar disso, foi visível que as temperaturas na região das portas foram inferiores quando comparadas às demais regiões do forno, mostrando a ineficiência do isolamento das portas.

No estágio de pirólise, foi observado que os gases provenientes da carbonização da madeira não foram totalmente queimados no gaseificador, e liberados para a atmosfera. Este fato ocorreu devido à grande quantidade de gases de pirólise gerado durante o processo.

Foram realizados outros ciclos de carbonização que antecederam ao ciclo apresentado neste trabalho, porém não chegaram a ser concluídos, devido às falhas nos equipamentos e na operação.

Esse sistema de adaptações de gaseificadores em fornos de alvenaria atualmente ainda se encontra em fase de testes. Assim, a principal dificuldade encontrada em fornos de alvenaria adaptados com gaseificadores são os constantes vazamentos nas tubulações, flanges, nas paredes e portas do forno, não garantindo a estanqueidade do forno, possibilitando a entrada de ar no processo.

Dessa forma, verificou-se que algumas juntas das tubulações do sistema necessitavam de reformas e outras deviam ser modificadas. Nesse sentido, trabalhos futuros serão desenvolvidos à medida que o sistema apresentado voltar a operar na Empresa.

CAPÍTULO VI

ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DA VIABILIDADE DA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO DE TEMPERATURAS

6.1 Introdução

Nos Capítulos IV e V foram apresentados e analisados diferentes ciclos de carbonização da Empresa. Analisou-se inicialmente um ciclo convencional de produção de carvão vegetal conforme a prática padrão dos carbonizadores da Empresa, que fazem uso de um sensor infravermelho para medir as temperaturas em regiões externas dos fornos e tomar decisões sobre o processo de produção.

Em seguida, foram analisados ciclos de produção nos quais as temperaturas no interior dos fornos foram medidas e confrontadas com a prática padrão dos carbonizadores. A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o controle da temperatura interna dos fornos pode evitar, dentre outros fatores, altas elevações de temperatura não pertinentes, que são ocasionados por entrada indesejada de ar em rachaduras repentinas nas paredes dos fornos e imperícia do carbonizador no controle de abertura e fechamento das câmaras de combustão e chaminés dos fornos.

Neste capítulo, apresenta-se um estudo de ciclos de carbonização e uma análise da viabilidade de implantação do Sistema Supervisório de Temperaturas (SST) proposto neste trabalho.

6.2 Prática Padrão dos Carbonizadores e os Perfis de Temperatura Medidos a partir do SST

6.2.1 Estudo de caso 1: temperaturas medidas em 12/2008

A Fig. 6.1 apresenta uma análise do tempo de produção considerando a prática padrão dos carbonizadores e as temperaturas registradas no interior do forno durante um ciclo de carbonização. Neste caso, foram adotadas como referência as temperaturas medidas pelos sensores 02 e 04 localizados na zona 1 do forno conforme apresentado na Fig. 6.1.

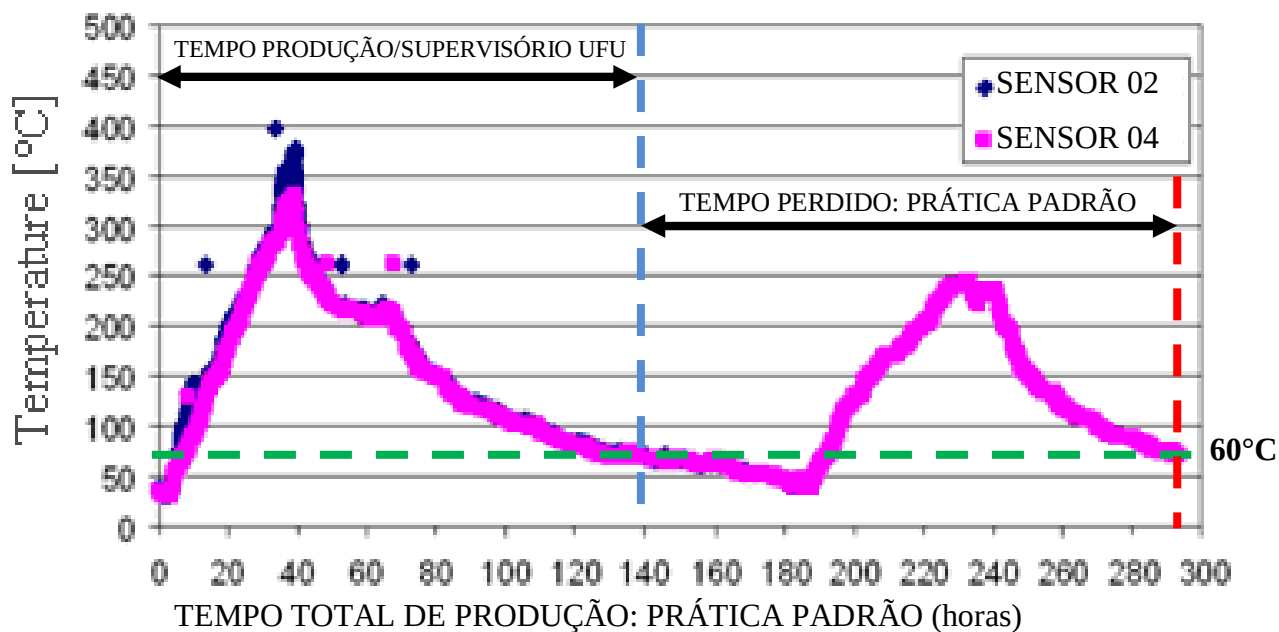


Figura 6.1 – Análise do tempo de produção no forno

A partir da análise da Fig. 6.1, verificam-se dois momentos de aquecimento do forno durante um único ciclo de carbonização. Neste caso, devido a uma reentrada de ar após 185 horas

de resfriamento do forno, houve o reinício do processo de carbonização o que acarretou no aumento do tempo de produção.

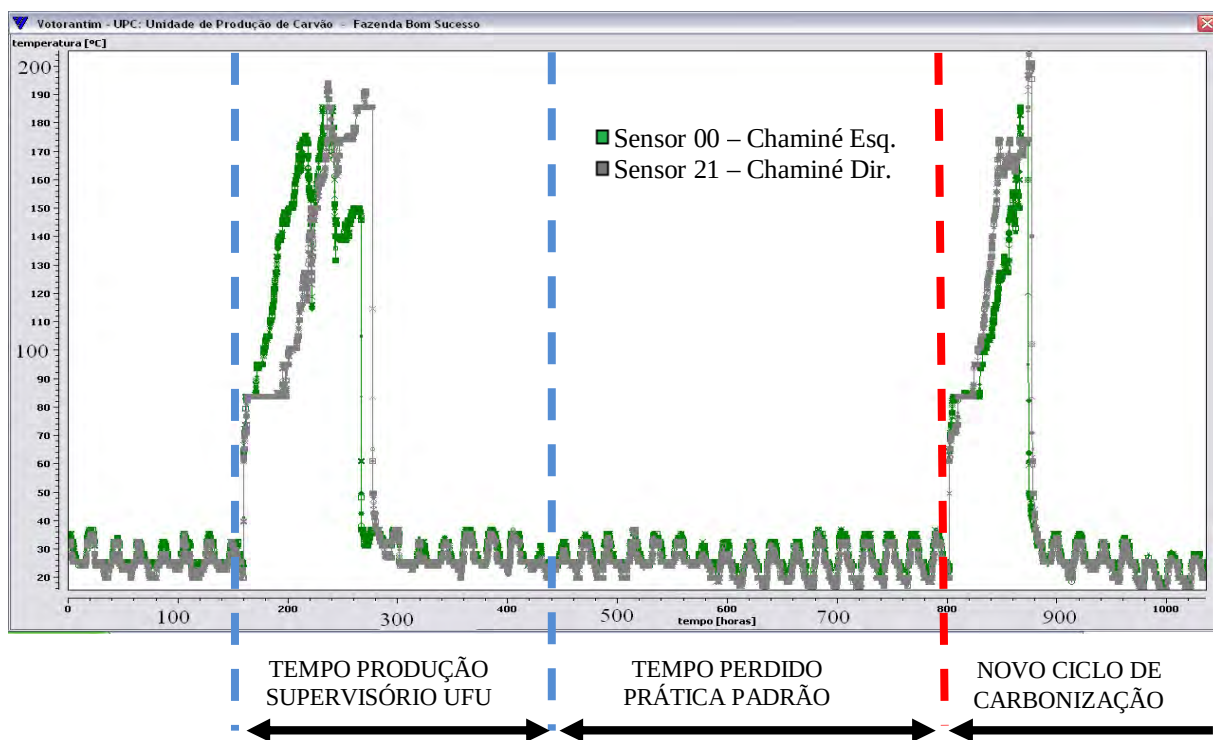
Por meio da análise da prática padrão dos carbonizadores e das temperaturas medidas no interior dos fornos via SST, verificou-se que os fornos são abertos quando a temperatura externa das portas atinge 30°C (temperatura medida com pirômetro conforme a prática padrão dos carbonizadores) e a temperatura interna média do forno é aproximadamente 60°C (temperatura medida via SST).

Nesse sentido, na Fig. 6.1, a linha verde tracejada indica a temperatura correta para a abertura dos fornos (60°C). As linhas tracejadas em azul e vermelho indicam, por sua vez, dois instantes distintos: 1º linha azul: instante que o forno deveria ser aberto conforme o SST e, 2º linha vermelha: instante no qual o forno foi realmente aberto conforme a prática padrão da Empresa.

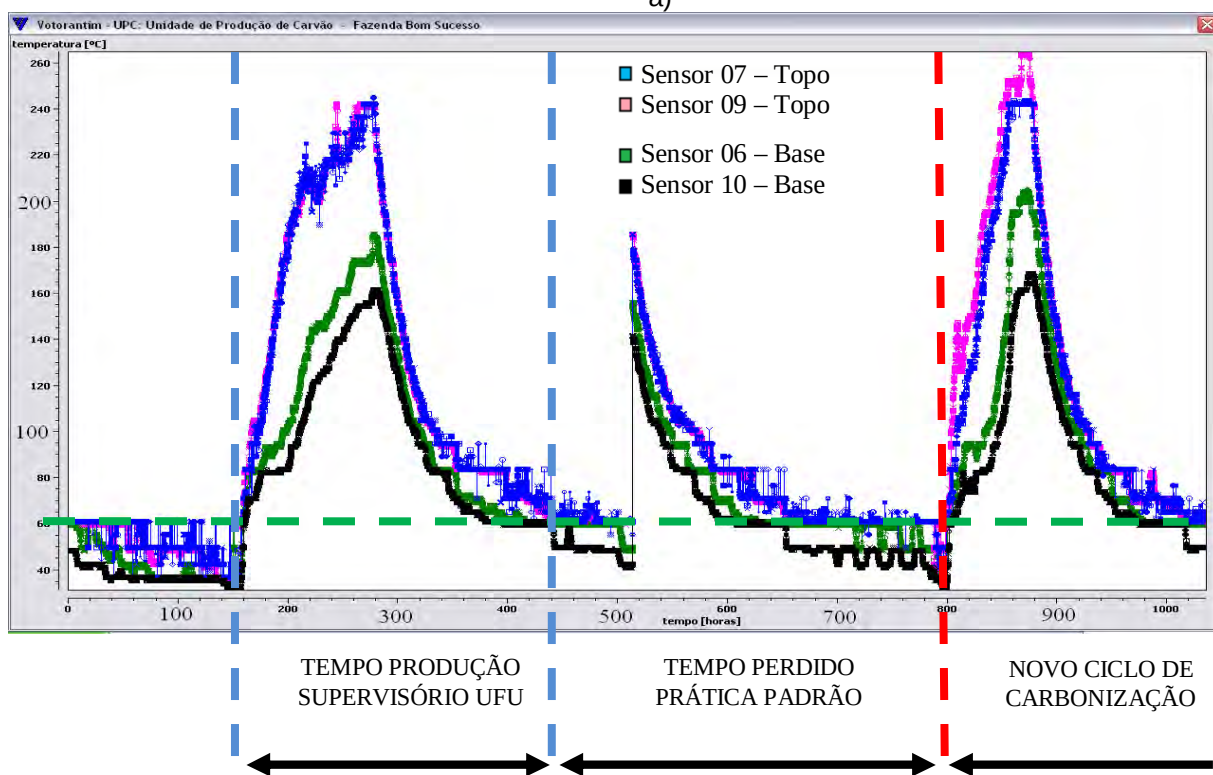
Segundo informações práticas dos carbonizadores, normalmente um forno de carbonização modelo RAC 220 é aberto após doze dias de carbonização, quando utilizado lenha fina, e quatorze dias para lenha grossa. Conforme comentado nos capítulos anteriores, a referência para a abertura de um forno RAC 220 é através da temperatura externa da porta, indicada por sensores infravermelho. Com o SST instalado é possível obter a temperatura interna do forno, corrigir irregularidades térmicas durante o ciclo e definir o momento correto de abertura do mesmo evitando o reinício do processo de carbonização (Fig. 6.1) ou mesmo focos de incêndio no momento da abertura. Tais características práticas e operacionais advindas da instalação do SST podem proporcionar ainda a redução do tempo de produção, aumentar o rendimento gravimétrico e melhorar a qualidade do produto final.

6.2.2 Estudo de caso 2: temperaturas medidas no período de 04/2009 a 05/2009

A Fig. 6.2 apresenta outra análise do tempo de produção considerando a prática padrão dos carbonizadores e as temperaturas medidas no interior do forno.



a)



b)

Figura 6.2 – Prática padrão: a) Temperatura nas chaminés b) Temperatura na Zona 2 do forno

Neste caso, adotaram-se como referência as temperaturas medidas nas chaminés (Fig. 6.2a) e na zona 2 do forno (Fig. 6.2b). Na figura verificam-se dois ciclos distintos de carbonização. Tais ciclos são claramente definidos a partir do monitoramento das temperaturas nas chaminés do forno. No entanto, no primeiro ciclo de carbonização, nota-se novamente o reaquecimento do forno. Neste caso, ocorreu uma reentrada de ar após o instante de tempo 500 horas acarretando novamente em um aumento no tempo de produção. Ressalta-se que a Fig. (6.2) é obtida a partir do software de monitoramento térmico apresentado no Capítulo III, desenvolvido no Laboratório da Transferência de Calor e Massa da FEMEC/UFU.

Na Fig. (6.2) nota-se ainda um tempo de produção muito superior àquele apresentado no primeiro estudo de caso. Tal tempo, no entanto, é justificado, visto que no período de medição das temperaturas a Empresa reduziu a produção tendo em vista a crise econômica mundial e o baixo preço do carvão vegetal no mercado

A partir dos resultados obtidos nos dois estudos de caso, verifica-se que é possível obter vantagens significativas em um processo de carbonização apenas com o controle da temperatura e o tempo de produção. No entanto, outros estudos devem ser realizados para comprovar que a instalação do SST pode proporcionar melhorias no rendimento gravimétrico e nas características físicas e químicas do carvão vegetal produzido.

Com o objetivo de avaliar as características do carvão produzido a partir da prática padrão dos carbonizadores da Empresa, apresenta-se no próximo capítulo a chamada “Análise Imediata do carvão vegetal”. Para efeitos comparativos, será realizada ainda a análise de amostras de carvão produzido a partir de fornos adaptados com gaseificadores. Essas análises devem estabelecer parâmetros que, em trabalhos futuros, serão comparados a resultados obtidos a partir do sistema de monitoramento de temperatura proposto neste trabalho.

CAPÍTULO VII

ANÁLISE IMEDIATA DO CARVÃO VEGETAL

7.1 Introdução

O carvão vegetal é utilizado em quase sua totalidade na siderurgia, constituindo assim, uma matéria-prima nacional de grande importância (MENDES et. al., 1982). No entanto, empresas consumidoras de óleo combustível, atualmente, visam à substituição desse insumo energético pelo carvão vegetal, ampliando desta forma, a aplicação desse termoreductor. Essa diversificação na utilização do carvão vegetal exige, sem dúvida, métodos de controle de qualidade que permitam caracterizar as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal. A própria evolução dos equipamentos de redução vem exigindo um controle mais apurado da matéria-prima e, como consequência, novos estudos estão direcionados para a otimização do uso do reductor, além da maximização da produção e melhoria na qualidade do produto final.

Para avaliar a qualidade do carvão vegetal destinado a indústria siderúrgica, são analisados alguns parâmetros como porosidade, resistências físico-mecânicas, poder calorífico entre outros. Porém, de imediato, quando o carvão chega à siderurgia, são analisados alguns parâmetros básicos, como teores de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo. A análise destes parâmetros citados é chamada de “análise imediata”.

Assim, devido à necessidade de se conhecer as características do carvão vegetal utilizado na siderurgia, propõe-se neste capítulo a realização da análise imediata e comparar os resultados obtidos com a exigência geral das siderurgias nacionais. Ressalta-se que os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM – Fig. 7.1) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e financiados pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).



Figura 7.1 – Vista geral do Laboratório de Transferência de Calor e Massa – LTCM

No Capítulo IV, verifica-se que um ciclo de carbonização do carvão vegetal é finalizado após a descarga do carvão na praça. Porém, incertezas quanto à temperatura interna do forno podem acarretar em focos de incêndio (combustão instantânea do carvão) durante a abertura das portas onde acontece a reentrada de ar no forno. Para suprir este problema, conforme a prática padrão dos carbonizadores, utiliza-se jato d'água para combater os focos de fogo existentes dentro do forno Fig. 7.2.



Figura 7.2 – Combate de focos de fogo dentro de um forno recém aberto

Porém, essa prática de combate manual aos focos de fogo pode ser desfavorável as condições de segurança e pode colocar o funcionário em risco. Como não há controle da entrada de ar no forno, podem existir localidades com quantidade significativas de cinzas, que formam buracos em regiões inferiores, que muitas vezes ficam escondidos pelo próprio carvão, sendo uma armadilha para o funcionário. Além disso, o uso de máscaras é inevitável devido à grande quantidade de particulados existentes na atmosfera interna do forno e também devido à possibilidade de intoxicação por monóxido de carbono, CO. O operador deve trajar roupas especiais anti-chamas, pois conforme citado, pode haver focos de fogo.

A Fig. 7.3 apresenta o aspecto do carvão molhado, que possui uma aparência diferenciada e se torna mais friável (quebradiço, esfarela com mais facilidade).



Figura 7.3 – Diferença entre um carvão que recebeu água dentro do forno e um carvão produzido de forma adequada

Nos capítulos anteriores deste trabalho, verificou-se que a temperatura interna do forno pode variar conforme a largura e altura do forno RAC 220. Segundo BRITO (1977), a temperatura é responsável por variações nos parâmetros químicos do carvão vegetal. Por esse motivo, conforme a diferença de temperatura entre as zonas e a copa e a base do forno, o carvão vegetal produzido em um único ciclo pode apresentar características distintas.

Segundo LICKS (2008), o carvão possui grande capacidade de absorver gases, líquidos ou até mesmo impurezas sólidas. Dessa forma, um carvão exposto ao tempo, pode ficar sujeito a ações de intempéries, ou até mesmo a alta umidade relativa do ar, absorvendo quantidades significativas de água e se tornando impróprio para algumas aplicações.

Outra característica importante é que a madeira também pode apresentar diferentes características, como densidade, valores variados de lignina, celulose, hemicelulose, e outros (STURION, 1987). Dessa forma, o carvão proveniente de madeiras diferentes também apresenta características diferenciadas (BRITO, 1977). É importante ressaltar que o

posicionamento da madeira dentro do forno tem influência na qualidade do carvão produzido (MOREIRA, 1964).

Assim, com base nas informações anteriores, para realizar a Análise Imediata primeiramente foram coletadas amostras de carvão vegetal no momento da abertura do forno RAC 220. As amostras foram retiradas da superfície do monte de carvão das quatro zonas do forno, conforme representado na Fig. 7.4.



Figura 7.4 – Metodologia de coleta de amostras de carvão de um monte no interior do forno

Também foram coletadas amostras de um monte de carvão com sete dias de fabricação. A madeira de ambos os ciclos eram pertencentes ao mesmo lote. As amostras foram retiradas de acordo com a NBR 6923, conforme exemplificado pela Fig. 7.5.

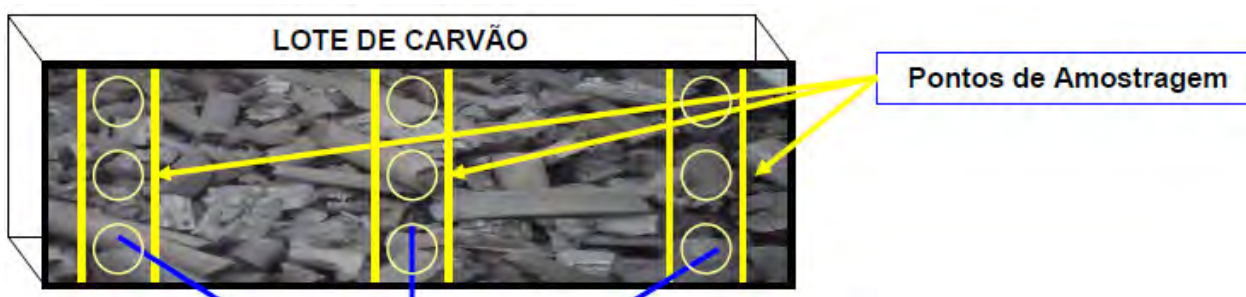


Figura 7.5 – Metodologia de coleta de amostras de um monte de carvão estocado no pátio

No pátio da Empresa, encontrou-se ainda um monte de carvão com um tempo de estocagem de aproximadamente seis meses. O carvão estava coberto com uma lona para evitar o contato direto com a água da chuva. Houve então o interesse de coletar amostras desse monte para a realização da Análise Imediata. As amostras também foram retiradas conforme mostrado na Fig. 7.5.

Foram coletadas ainda amostras do carvão produzido nos fornos RAC 220 adaptados com gaseificadores. Para uma comparação mais precisa, foram coletadas amostras de um forno RAC 220 convencional, que foi carbonizado utilizando os mesmos parâmetros e a mesma madeira do forno adaptado com um gaseificador, sendo este chamado de “forno Testemunha”.

Ressalta-se que o carvão produzido na Empresa é destinado exclusivamente para a produção de ferro-gusa. Para finalizar, foram comprados sacos de carvão existentes no mercado, destinados a utilizações residenciais. Optou-se por um fabricante de carvão vegetal que também utiliza eucalipto como matéria prima (denominado: Empresa 1) e outro que produz carvão a partir de pés de café (denominado: comercial café). O objetivo é comparar as amostras de carvão vegetal produzidas por diferentes tecnologias e também oriundas de diferentes empresas.

7.2 Preparação das amostras

Depois que as amostras foram coletadas, estas foram embaladas em sacos plásticos para que não ficassem submetidas à perda ou ganho de umidade do ar, e levadas para o LTCM, onde foram realizadas todas as análises.

Já no laboratório, as amostras foram preparadas seguindo os procedimentos da NBR 6923 para as seguintes análises: umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

Os equipamentos utilizados na preparação das amostras foram: chapa de aço com diâmetro de 1 m; base para a trituração da amostra; pilão de aço para triturar a amostra; e uma pá para quartejamento e recolhimento da amostra e peneiras com malhas de 0,190 ; 0,210 e 0,150 mm, conforme apresentado na Fig. 7.6.



Figura 7.6 – Equipamentos necessários para a preparação das amostras

7.3 Procedimentos Para a Determinação da Análise Imediata

Os equipamentos necessários para a realização da Análise Imediata do carvão vegetal seguem a NBR 8112: balança com capacidade para 1,0kg e precisão de 1%; balança analítica com precisão de 0,1 mg; cadinho com tampa, com capacidade para volume de 25 cm³; estufa com capacidade para atingir a temperatura de 110° C; mufla com capacidade para atingir a temperatura de 1000° C; dessecador para armazenar as amostras e evitar umidade.

Após a aquisição e instalação dos equipamentos iniciaram-se os testes experimentais no Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

7.3.1 Umidade

De acordo com a NBR 8112, para determinar o teor de umidade, deve-se realizar o seguinte procedimento: com a balança pesa-se a amostra de carvão, em seguida coloca a amostra em um recipiente de aço inoxidável, previamente seco e tarado. Coloca-se o prato juntamente com a amostra na estufa previamente aquecida à 105° C, deixando o recipiente

mais a amostra na estufa até que a massa da amostra permaneça constante. Em seguida, retirar a amostra da estufa, esfriar em um dessecador e anotar a massa final.



Figura 7.7 – Estufa à esquerda utilizada para determinar o teor de umidade. Mufla à direita para testes de voláteis e cinzas

7.3.2 Materiais voláteis

De acordo com a NBR 8112, com a balança analítica deve-se pesar 1,0 g de amostra de carvão vegetal, isenta de umidade e com granulometria entre 0,150 e 0,210; colocar a amostra no cadinho previamente seco e tarado; colocar em um cadinho com tampa com a amostra de carvão vegetal e assim o cadinho sobre a porta da mufla previamente aquecida a $(900 \pm 10)^\circ\text{C}$, permanecendo nessa posição durante 3 minutos; colocar o cadinho, após 3 min, no interior da mufla e deixá-lo por 7 min com a porta fechada; finalmente, retirar a amostra da mufla e deixá-la resfriar em um dessecador e anotar a massa final.



Figura 7.8 - Equipamentos necessários para a manipulação das amostras

7.3.3 Cinzas

De acordo com a NBR 8112, para determinar o teor de cinzas, deve-se realizar o seguinte procedimento: com a balança analítica, pesar 1,0 g de amostra de carvão vegetal, isenta de umidade e com granulometria inferior a 0,210 mm; colocar a amostra em um cadinho sem tampa, previamente seco e tarado; colocar o cadinho com a amostra de carvão em uma mufla previamente aquecida a $(700 \pm 10)^\circ\text{C}$ até que o carvão se queime totalmente. Finalmente, retira-se a amostra da mufla e deixa-se esfriar em um dessecador. A massa final deverá ser anotada.



Figura 7.9 – Amostras de carvão no forno a 900°C para a determinação do teor de cinzas

7.4 Cálculo dos parâmetros da análise imediata do carvão vegetal

A partir dos procedimentos descritos anteriormente e dos valores anotados separadamente, pode-se calcular os parâmetros que compõe a análise imediata. É importante ressaltar que todos os parâmetros da Análise Imediata obedecem à NBR 8112.

7.4.1 Cálculo do teor de umidade

O teor de umidade (bs) é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$TU = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

onde TU é o teor de umidade [%], m_0 é a massa inicial da amostra [g] e m_1 a massa final [g].

Portanto, conforme estabelecido pela norma vigente, para a determinação dos teores de umidade é necessário que sejam realizados testes duplos, chamando de teste em duplicata. Os valores apresentados entre os testes não podem se diferenciar de 5%. O aceitável para o teor de umidade do carvão vegetal é que seja inferior a 8%. Este parâmetro foi definido por uma determinada siderúrgica que compra grande parte do carvão produzido na Empresa onde foram realizados os estudos.

7.4.2 Cálculo do teor de materiais voláteis

O teor de materiais voláteis é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m} \times 100 \quad (2)$$

onde MV é o teor de matérias voláteis [%], m_2 é massa inicial do cadinho somada à massa da amostra [g], m_3 é massa final do cadinho somada à da amostra [g] e m é massa da amostra [g].

Conforme estabelecido pela norma vigente, para a determinação dos teores de materiais voláteis também é necessário que sejam realizados testes em duplicata. Os valores apresentados entre os testes não podem se diferenciar de valores acima de 2%. O aceitável para o teste de teor de materiais voláteis é que seja correspondente a valores entre 23 a 25%. Este parâmetro também foi definido pela siderúrgica que compra grande parte do carvão produzido na Empresa onde foram realizados os estudos.

7.4.3 Cálculo do teor de cinzas

O teor de cinzas é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$CZ = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100 \quad (3)$$

onde CZ é o teor de cinzas [%], m_0 a massa do cadinho [g], m_1 é a massa do cadinho somada aos resíduos [g], m é a massa da amostra [g].

Conforme estabelecido pela norma vigente, para a determinação dos teores de cinzas, é necessário que sejam realizados testes em duplicata. Os valores apresentados entre os testes não podem se diferenciar de valores acima de 10%. O nível aceitável para o teor de cinzas é que seja inferior a 2%.

7.4.4 Cálculo do teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (4)$$

onde CF é o teor de carbono fixo [%], CZ é o teor de cinzas [%], e MV é o teor de matérias voláteis [%].

O carbono fixo é uma grandeza, que é calculada de forma indireta, que representa a quantidade de carbono que não participa da volatilização do hidrogênio e do oxigênio

presente no carvão. É importante ressaltar que tal parâmetro é calculado em base seca, ou seja, não se considera a quantidade de água inicialmente contida no carvão. O valor ideal de carbono fixo para o bom funcionamento de um alto-forno é que seja maior que 70%.

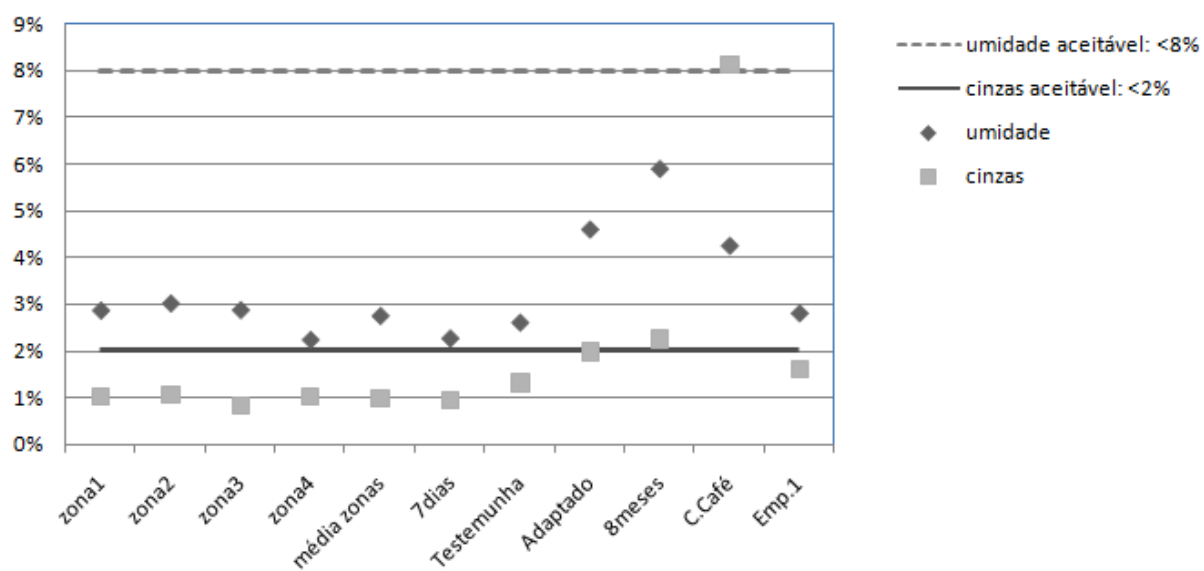
7.5 Resultados da Análise Imediata

A Tabela 7.1 apresenta os valores obtidos do teor de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo. Além disso, apresenta o padrão exigido por uma determinada siderurgia nacional.

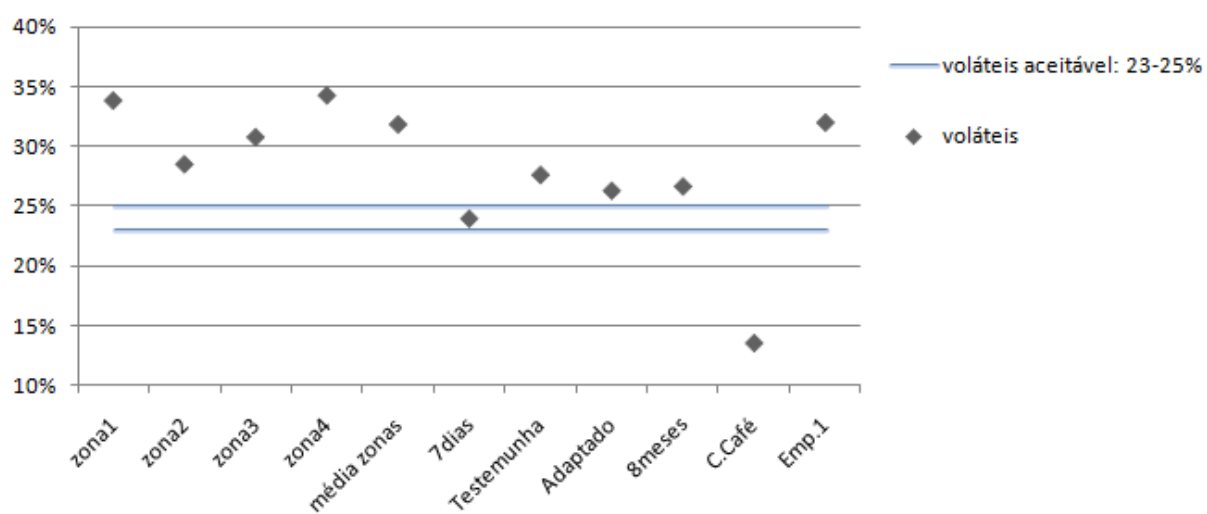
Tabela 7.1 – Resultados da análise imediata do carvão vegetal

Empresa	Teor de umidade - período de seca (%)	Teor de cinzas (%)	Materiais voláteis (%)	Carbono fixo (%)
Padrão siderurgia	< 8	< 2	23 a 25	> 70
Forno RAC - zona1	2,86	1,00	33,85	65,15
Forno RAC - zona2	3,01	1,06	28,5	70,44
Forno RAC - zona3	2,87	0,82	30,78	68,4
Forno RAC - zona4	2,23	1,02	34,28	64,70
Forno RAC – média das quatro zonas	2,74	0,98	31,85	67,17
Forno RAC – carvão estocado há 7 dias	2,26	0,92	23,94	75,14
Forno Testemunha	2,60	1,30	27,61	71,09
Forno adaptado com gaseificador	4,60	1,96	26,28	71,76
Forno RAC – carvão estocado há 8 meses	5,90	2,24	26,64	71,12
Comercial - café	4,25	8,10	13,50	78,40
Empresa 1	2,80	1,60	32,0	66,40

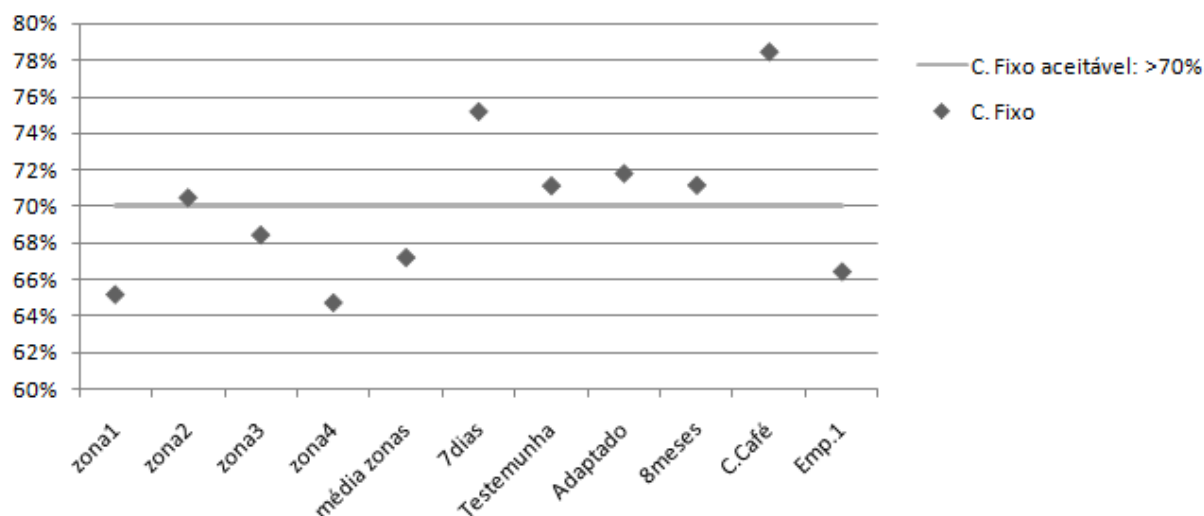
A Fig. 7.10 apresenta os gráficos com os valores das análises imediatas de cada amostra; a) valores de umidade e de cinzas; b) materiais voláteis; c) carbono fixo



a)



b)



c)

Figura 7.10 – Análises imediatas; a) umidade e de cinzas; b) materiais voláteis; c) carbono fixo.

Dentre as amostras analisadas, o carvão destinado à siderurgia apresentou teores de materiais voláteis entre 23,9 e 34,2%, o carbono fixo variou entre 64,7 a 75,1% e as cinzas de 0,8 a 2,2%. Todas essas amostras apresentaram também valores de umidade menor do que 6%. Segundo empresa envolvida neste estudo, o seu padrão aceitável é: menor que 8% para a umidade, menor que 2% o teor de cinzas, de 23 a 25% o teor de materiais voláteis e que o teor de carbono fixo seja superior a 70%.

Conforme descrito nos capítulos anteriores, o processo de carbonização da madeira em fornos de alvenaria convencionais é bastante rústico e o controle da temperatura no interior do forno é de grande dificuldade. Tal fato explica as variações dos parâmetros químicos do carvão fabricado em um mesmo forno ou em fornos do mesmo modelo. Segundo SCHOUT e MECCA (2008), o teor de carbono fixo aumenta com a elevação da temperatura.

Já para o carvão fabricado em um forno RAC 220 adaptado com um gaseificador, é de se esperar que os parâmetros sejam mais homogêneos, já que essa tecnologia dispõe de recursos que controlam a temperatura interna do forno. Neste caso outros testes devem ser realizados no futuro para comprovar tal afirmação.

Ao analisar a Tabela 7.1 é possível observar que as amostras coletadas do carvão que estava estocado há sete 7 dias, fabricado em um forno RAC 220, possuem valores aceitáveis conforme solicita a siderurgia. Já o carvão retirado imediatamente ao abrir o forno RAC 220, não atendeu aos padrões recomendados pela siderurgia. Porém isto não significa que todo o carvão do forno seja qualificado como não aceitável. Suas amostras foram coletadas conforme representado pela Fig. 7.4, que não é a metodologia indicada pela NBR 6923 para a coleta de amostras. Conforme definido anteriormente, os parâmetros químicos do carvão são influenciados pela temperatura que pode variar nas diferentes regiões de um forno (Fig. 4.21). Em trabalhos futuros, outros estudos são necessários para analisar a influência da metodologia de retirada e coleta das amostras de carvão vegetal de um forno.

Ainda na Tabela 7.1, verifica-se que o carvão de eucalipto oriundo de fornos rabo-quente, de café e da Empresa 1, destinados ao uso domésticos, são inadequados para o uso siderúrgico, pois apresenta valores fora da faixa recomendada. O carvão fabricado com madeira de pés de café também não atendeu as especificações exigidas pela siderurgia, sendo classificado como inadequado para a produção de ferro-gusa.

Por fim, estes resultados mostraram que em um forno retangular de alvenaria modelo RAC 220, há inúmeros parâmetros que interferem na qualidade do carvão vegetal. MOREIRA (1964) mostrou que o formato de um forno influi tanto nas características físicas quanto químicas do carvão. Dessa forma, percebe-se que há uma infinidade de aspectos a serem estudados e investigados, a fim de melhorar o rendimento de um forno juntamente com a qualidade do carvão vegetal.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÃO

Inicialmente este trabalho apresentou a instrumentação térmica de um forno retangular de alvenaria modelo RAC 220 com uma capacidade individual de produzir aproximadamente 110 m³ de carvão vegetal por ciclo de carbonização. O objetivo foi medir a temperatura a partir de sensores do tipo pt100 localizados em vários pontos dentro dos fornos e estabelecer uma relação entre temperatura e qualidade carvão. Neste sentido, um sistema eletrônico foi desenvolvido para analisar e propor melhorias para o processo de produção de carvão. Este sistema se destina a melhorar a carbonização da madeira com um conseqüente aumento da qualidade e produtividade de carvão, além de contribuir para minimizar as emissões de gases efeito estufa.

Neste trabalho, foram apresentados os campos térmicos desenvolvidos durante um ciclo real de carbonização, no qual as temperaturas medidas no interior do forno foram utilizadas para tomar decisões corretivas durante o ciclo de produção. Apesar da montagem e instalação do sistema de supervisão não estar totalmente concluída, os carbonizadores atualmente já podem fazer uso do mesmo para ter acesso às temperaturas no interior dos fornos. Tal procedimento auxilia a identificar e a corrigir desvios do processo de produção em tempo real.

Em outro ciclo, acompanhou-se a carbonização conforme a prática padrão utilizada pela Empresa. Verificou-se neste caso que o processo de produção fica vulnerável às diversas falhas operacionais, pois o controle do forno é realizado por meio de um sensor óptico

infravermelho capaz de ler somente as temperaturas externas das portas do forno. Assim, com o estudo térmico apresentado neste trabalho, pode-se realizar comparações e visualizar as dificuldades dos operadores durante o processo. Basicamente eles controlam o forno pela coloração e volume da fumaça, além de medições externas da temperatura, tais procedimentos tornam o processo de produção dependentes das habilidades dos operadores.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o Sistema Supervisório de Temperatura pode e deve ser utilizado para aprimorar e corrigir o ciclo de carbonização a fim de se aumentar a produtividade e reduzir os custos. Tal fato é comprovado no segundo ciclo de carbonização, no qual as temperaturas medidas pelo SST auxiliaram os carbonizadores a identificar irregularidades no processo e a corrigi-las a tempo.

Também foi apresentada uma análise de viabilidade de um forno instrumentado por meio do SST proposto neste trabalho. Neste caso, dois ciclos de produção foram avaliados. Em ambos, nota-se claramente um grande ganho na produção devido a intervenção do processo por meio o SST que chega. Ressalta-se que tais resultados são preliminares. Testes futuros, baseados em análise estatística, serão a base para se comprovar efetivamente os resultados apresentados neste trabalho. Além disso, deve-se realizar um estudo mais cuidadoso do processo de produção levando em conta o tipo e peso de madeira enforcada, tempo de secagem além do peso e qualidade do carvão produzido em cada região do forno.

O uso da instrumentação nos fornos também foi realizada em conjunto de uma nova tecnologia, o uso de gaseificadores em fornos de produção de carvão vegetal. Neste caso, os resultados obtidos não são conclusivos. Vários testes precisam e serão realizados para avaliar e confrontar os resultados obtidos pelos fornos RAC 220, fornos com gaseificadores e fornos instrumentados com o SST. Ressalta-se que o sucesso da pesquisa está condicionado ao correto preenchimento de um banco de dados para trabalhos futuros, por parte dos técnicos e carbonizadores dos fornos, conforme mostrado pela Fig. 8.1. As informações contidas no banco de dados são essenciais para a pesquisa, nesse sentido, algumas reuniões devem ser realizadas na Empresa para apresentar o SST e a planilha (banco de dados) aos carbonizadores e treiná-los.

Nome do forno -									
Características do forno					Dados do produto				
<u>Conservação forno</u>					peso da madeira				
() boa					peso do carvão				
() média					peso do tiço				
() ruim					<u>Quantidade de tiço</u>				
<u>Conservação chaminé</u>					() muito				
() boa					() normal				
() média					() pouco				
() ruim									
Características da madeira					Dados do processo				
espécie da madeira					acendimento		fechamento chaminé 1		
tempo de estocagem da madeira					data		data		
diâmetro médio da madeira					hora		hora		
() madeira grossa					abertura		fechamento chaminé 2		
() madeira fina					data		data		
() mista					hora		hora		
Amostras da madeira foram coletadas?					Amostras do carvão foram coletadas?				
() sim					() sim				
() não					() não				
Barrelamento do forno com a máquina									
dia		dia		Observações					
hora		hora							
dia		dia							
hora		hora							
Durante o processo houve muitos vazamentos?									
() sim					zona		zona		
() não					hora		hora		
zona		zona		zona		zona		zona	
hora		hora		hora		hora		hora	
Observações Gerais									

Figura 8.1 – Modelo do banco de dados com informações relevantes do processo de produção do carvão vegetal que será agregado ao aplicativo computacional desenvolvido.

Depois de acompanhar diversos ciclos de carbonização, verificou-se a necessidade de analisar quimicamente o produto do processo de carbonização da madeira. Então no capítulo VII foram realizadas análises imediatas a fim de investigar a qualidade do carvão vegetal produzido por diferentes tecnologias e processos. Este estudo mostrou que o carvão coletado em diferentes regiões de um mesmo forno apresenta diferentes parâmetros químicos devido a heterogeneidade da temperatura no interior do forno durante o processo de produção de carvão vegetal. Além disso, comprovou-se a diferença na qualidade de um carvão destinado a siderurgia para um carvão de uso residencial. O carvão destinado a siderurgia segue um forte controle de qualidade. Outro fato relevante mencionado por este trabalho, é que um carvão estocado durante muito tempo pode apresentar valores inadequados, contribuindo para o mau desempenho de altos-fornos.

Este trabalho encerra com a observação de que quando se tratar de comparar diferentes processos e tecnologias, deve-se tomar o cuidado de padronizar as etapas e

metodologias práticas. Tais características, associadas à idoneidade, conduzem ao sucesso da pesquisa.

8.1 Propostas de Trabalhos Futuros

Com este trabalho foi possível visualizar alguns fatos envolvidos na produção de carvão vegetal, como as dificuldades encontradas e as oportunidades de desenvolvimento deste segmento que é extremamente importante para a economia brasileira.

Assim, algumas melhorias de operação no processo ou em sistemas que otimizem o processo da produção de carvão vegetal serão apresentados a seguir.

O Sistema Supervisório de Temperatura está implantado em um computador localizado na Empresa. Porém este sistema é acessado de forma remota dentro dos limites da Empresa. Para isso, deve-se concluir o sistema WEB capaz de enviar dados para o fora dos limites da Empresa, fazendo com que pessoas autorizadas possam monitorar o processo da produção de carvão vegetal de qualquer lugar e em qualquer instante.

Outro ponto a ser verificado é quanto aos ciclos de carbonização. Conforme descrito anteriormente, o processo de produção de carvão vegetal pode ser considerado artesanal, apresentando resultados e rendimentos diferentes a cada ciclo de produção. Assim, devem-se analisar diversos ciclos e através de um banco de dados, monitorar as ações operacionais tomadas ao longo dos ciclos correlacionando os resultados obtidos com as temperaturas medidas pelo SST proposto neste trabalho. Ressalta-se ainda a importância de se realizar um estudo do processo levando em conta o tipo de madeira enfiada, tempo de secagem, pirólise e resfriamento, a correlação entre a quantidade de madeira e o que sai de carvão e a qualidade do carvão produzido em cada região do forno. Tais informações devem ser inseridas em um banco de dados conforme o modelo apresentado na Fig. 8.1. Assim, futuramente por meio de análises estatísticas, o aplicativo computacional de monitoramento irá orientar os carbonizadores durante a produção de carvão vegetal.

No processo de carbonização em fornos tipo RAC 220, consome-se madeira para fornecer energia suficiente para secar e pirólise a madeira enfiada. Além disso, os tijolos, que fazem parte da estrutura do forno, possuem eficiência de isolamento térmico limitada durante os estágios de secagem e pirólise, resultando em uma diminuição do rendimento

gravimétrico (geração de tiços) do forno. Assim, novas melhorias devem ser implementadas como, por exemplo, a recuperação dos gases de combustão e reutilização na etapa de secagem e início da pirólise da madeira.

Como citado anteriormente, as portas do forno RAC 220, construídas de chapas de aço, aumentam a troca de calor com o meio externo, prejudicando o processo no estágio de secagem e pirólise da madeira. Dessa forma, um estudo em aberto é propor melhorias térmicas a fim de aumentar o isolamento das portas visando um aumento do rendimento gravimétrico.

Ressalta-se ainda o monitoramento e a avaliação da emissão de gases efeito estufa. Trabalhos futuros devem ser desenvolvidos a fim de definir a *baseline* da Empresa, tendo em vista um forno padrão e outros instrumentados. A redução da emissão dos gases efeito estufa leva à obtenção de créditos de carbono e torna a empresa mais competitiva em seus negócios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **Construção e operação do forno rabo quente melhorado.** 2006. Betânia, PE.

ALVES, L. **Produção de ferro-gusa.** Disponível em:
<<http://www.brasilecola.com/quimica/producao-ferro-gusa.htm>> Acesso em: 05 de agosto de 2009.

ASOUTI, E. **Charcoal analysis - A short history.** Disponível em:
<<http://pcwww.liv.ac.uk/~easouti/History%20of%20charcoal%20analysis.htm>> Acesso em: 02 de agosto de 2009.

ASSIS, C. O. **Sistema alternativo para carbonização de madeira.** 2007. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NRB 6923: Carvão vegetal - Amostragem e preparação da amostra - Procedimento. Rio de Janeiro, 1981, 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NRB 8112: Análise Imediata. Rio de Janeiro, 1986, 5p.

BORGES, V. L. 2008. **Desenvolvimento do método de aquecimento plano parcial para a determinação simultânea de propriedades térmicas sem o uso de transdutores de fluxo de calor.** Tese (doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

BNDES. **Investimentos na siderurgia deverão alcançar R\$ 46,4 bilhões nos próximos cinco anos.** Disponível em:

<http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Sala_de_Imprensa/Noticias/2006/20060925_not182_06.html> Acesso em: 20 de julho de 2008.

BNDES. BNDES financia com R\$ 30 milhões ampliação da produção de ferro gusa da Usipar. Disponível em:

<http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Sala_de_Imprensa/Noticias/2008/20080820_not136_08.html> Acesso em: 20 de julho de 2009.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide Technique de La Carbonisation: La fabrication du carbon de bois.** 1985. CTFT. 180p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia.** 1981. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Departamento de Silvicultura da ESALQ – USP, Série Técnica, Piracicaba – SP.

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

BRITO, J. O. **Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira.** 1990. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Departamento de Silvicultura da ESALQ – USP, Série Técnica, Piracicaba – SP.

CARNEIRO, A. C. O. **Qualidade da madeira e tecnologias para produção de carvão vegetal.** 2007. Seminário: Florestas Plantadas. Campo Grande, MS.

CARRIER, B. **Projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo.** Disponível em: <http://www.ecolatina.com.br/pdf/anais/Workshop_Mudancas_Climaticas_Siderurgia/Be noitCarrier.pdf> Acesso em: 25 de novembro de 2008.

CAVALCANTI, N. B. **A produção de carvão vegetal na caatinga.** Disponível em: <http://fatosefotosdacaatinga.blogspot.com/2009_01_01_archive.html> Acesso em: 10 de junho de 2009.

Carbonización Industrial. **Comparacion entre los Distintos Sistemas de Carbonizaçãõ.** Disponível em: <http://users.skynet.be/mariela.tadla/carbonizacion/es/carb_es3.html> Acesso em: 04 de agosto de 2009.

COSTA, A. F. **Secagem da Madeira**, 2009. Aula: Secagem da Madeira. Departamento de Engenharia Florestal, UNB, Disponível em: <http://www.efl.unb.br/arq_de_texto/prof_alexandre/als_secagem.pdf> Acesso em: 1 de julho de 2009.

COSTA, L. C.; RAAD, T. J.; WINTER, M. **Estudo da fluidodinâmica dos gases de carbonização em fornos retangulares**. 2008. I Fórum Nacional Sobre Carvão Vegetal. Belo Horizonte, MG.

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. **Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização**. IPEF, n.38, p.33-37, abr. 1988.

DPC Thermal Processing. Disponível em: <<http://www.dpcbiomassa.com.br/conceito.php>> Acesso em: 13 de janeiro de 2008.

FAO - **Modern carbonising retort systems**. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x5555e/x5555e04.htm>> Acesso em: 07 de agosto de 2009.

FILHO, J. G. B. **Sistemas JG de formação de unidades pequenas, médias e grandes de produção de carvão vegetal de qualidade metalúrgica**. 2007. Seminário: Processos de Produção de Carvão Vegetal com Aplicação na Indústria do Aço, Belém, PA.

GUIMARÃES NETO, R. M. **Avaliação técnica e econômica de um forno container em escala industrial**. 2005. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.

Historiar. **A vida na fornalha.** Disponível em:
 <<http://narrativahistorica.blogspot.com/2008/04/pequenos-trabalhadores.html>> Acesso
 em: 03 de agosto de 2009

INFOENER – Sistema de Informações Energéticas. **Carvão vegetal no Brasil.**
 Disponível em: <http://infoner.iee.usp.br/scripts/biomassa/br_carvao.asp> Acesso em 05
 de agosto de 2008.

JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A. de.; RIBEIRO, E. D. L.; LEÃO, M. M. D.;
 SOUZA, C. M.; GOMES, A. M.; ALMEIDA, M. L. B.; LOPES, L. E. F. **Controle
 Ambiental das Indústrias de Produção de Ferro-Gusa em Altos-Fornos a Carvão
 Vegetal.** 2002. Belo Horizonte, MG. 302 p.

LATORRE, F.L., CUNHA, W.L.P. **Evolução da produção e utilização de energia
 renovável na Acesita Energética.** 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.

LICKS, L. A. S. **Avaliação do processo de captura de dióxido de carbono por
 absorção química visando a aplicação em termelétricas a carvão no Brasil.** 2008.
 Dissertação (mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Rio
 Grande do Sul, RS.

LÚCIO, A. **DPC: uma tecnologia inovadora e altamente competitiva em constante
 evolução.** 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.

MARAGUA. **História do ferro.** Disponível em:
 <<http://www.maragusa.com.br/ferro.php>> Acesso em: 10 jun 2009.

MENDES, M. G.; GOMES P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: **Produção e Utilização de Carvão Vegetal/Curso e exposição de fornos de carbonização**. 1982. Série de publicações técnicas, v.8. Belo Horizonte, MG.

MINETTE, L. J. PIMENTA, A. S.; FARIA, M. M.; SOUZA, A. P.; SILVA, E. P. FIEDLER, N. C. **Avaliação da carga de trabalho físico e análise biomecânica de trabalhadores da carbonização em fornos tipo “rabo-quente”**. 2007. Revista Árvore, Viçosa, MG, v.31, n.5, p.853-858.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional**. 2008.

MOREIRA, C. S. **Contribuição ao Estudo da Eficiência de Pequenos Fornos na Produção de carvão Vegetal Destinado a Alto Forno**. 1964. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP.

NASCIMENTO, R. **Produção de ferro-gusa derruba 843 km² de mata/ano**. Disponível em: <http://invertia.terra.com.br/carbono/interna/0,,OI1650330-EI8933,00.html>> Acesso em: 10 de junho de 2009.

Ouka. **Tar and Pitch**. Disponível em http://www.ouka.fi/ppm/turkansaari/tar_and_pitch.htm> Acesso em: 01 de agosto de 2009.

PIERSON, Donald. **Cruz das Almas**. Rio de Janeiro, Livraria José Olímpio Editora, 1966. Coleção documentos Brasileiros, 124, p.183-185.

PIMENTA, A. S.; MINETTE, L. J.; FARIA, M. M.; SOUZA, A. P.; VITAL, B. R.; GOMES, M. G. **Avaliação do perfil de trabalhadores e de condições ergonômicas na atividade de produção de carvão vegetal em bateria de fornos de superfície do tipo “rabo-quente”**. 2006. Revista Árvore, Viçosa, MG, v.30, n.5, p.779-785.

SANTOS, S. F. O. M. **Produção de carvão vegetal em cilindros metálicos verticais: alguns aspectos referentes à sustentabilidade.** 2007. Dissertação (mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR.

SINDIFER. **História.** Disponível em: <<http://www.sindifer.com.br/inst.html>> Acesso em: 04 de junho de 2009.

SCHOUT, C. M.; MECCA, M. **Processo industrial contínuo de carvão vegetal tecnologia CARVONBRÁS/MONTE MOR.** 2008. Fórum Nacional do Carvão Vegetal. Belo Horizonte, MG.

SILVA, D. A.; TRUGILHO, P. F. **Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se a metodologia de análise de imagem submetida a diferentes temperaturas.** 2003. CERNE, V.9, N.1, p.056-065.

SILVA, J. C.; BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **ENDOCARPOS DE BABAÇU E DE MACAÚBA COMPARADOS A MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL.** IPEF, n.34, p.31-34, dez. 1986.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; ALBINO, J. C.; MORITA, M. **Variação da densidade básica da madeira de doze espécies de *Eucalyptus* plantadas em Uberaba, MG.** 1987. 5º Congresso Florestal Brasileiro.

Tabela Periódica. **Ferro.** Disponível em: <http://www.tabela.oxigenio.com/metais_de_transicao/elemento_quimico_ferro.htm> Acesso em: 20 de julho de 2009.

Traditional Charcoal Production. Disponível em: <<http://www.phogle.com/en/photos/1.html>> Acesso em: 02 de agosto de 2009.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. **Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.).** 2001. Scientia Agraria, Vol. 2, Nº. 1-2, p. 45-53.

UK Agriculture. **The history of Charcoal – Worldwide.** Disponível em: <http://www.ukagriculture.com/countryside/charcoal_history.cfm> Acesso em: 02 de agosto de 2009.

VELLA, M. M. C. F.; VALENTE, O. F.; VITAL, B. R.; LELLES, J. G. **Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido.** IPEF, n.41/42, p.64-76, jan./dez.1989.

WALKER, K. **Charcoal in the forest of Dean.** Disponível em <<http://www.fweb.org.uk/Dean/deanhist/charcoal.htm>>. Acesso em: 01 agosto de 2009.

Wikipedia. **Charcoal.** Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Charcoal>> Acesso em: 05 de agosto de 2009.