

BRUNO HENRIQUE OLIVEIRA MULINA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
ELETRÔNICO PARA MONITORAMENTO TÉRMICO
DE FORNOS INDUSTRIAIS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2011**

BRUNO HENRIQUE OLIVEIRA MULINA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO
PARA MONITORAMENTO TÉRMICO DE FORNOS
INDUSTRIAIS**

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

2011

*À minha esposa Élida,
meus pais Cesar Roberto e Regina
família e amigos,
pelo apoio e ajuda oferecidos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, César Roberto e Regina, por terem investido no meu futuro desde o começo, me apoiando e colocando no caminho certo.

Ao meu irmão Gustavo e minha irmã Cristiana, que mesmo de longe, deram apoio e ajudaram nas horas necessárias.

A minha esposa Élida, pelos dias e noites em que teve a compreensão e carinho para não permitir que desistisse.

Ao Prof. Solidônio, por ter guiado meus estudos e ter aguentado tantas vezes minha inexperiência.

Ao meu amigo e professor Valério, por ter me ajudado nos momentos de dúvida.

À turma da Empresa envolvida neste trabalho por me conceder a possibilidade de trabalho.

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

Aos colegas do LTCM, Rogério, Edson, José, por todo companheirismo.

À empresa *Renesas Electronics America*, por disponibilizar amostras de seus produtos para desenvolvimento dos protótipos, além do suporte técnico oferecido por seu representante.

A todos meus amigos e companheiros.

Para vocês, meu muito obrigado...

SUMÁRIO

Lista de figuras	xi
Lista de tabelas.....	xv
Lista de símbolos	xvii
Resumo	xix
Abstract	xxi
CAPÍTULO I – Introdução	01
CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica	05
2.1. Introdução.....	05
2.2. Instrumentação e controle aplicados a sistemas térmicos.....	09
2.3. Principais sensores térmicos para uso industrial	16
2.4. Equipamentos destinados à aquisição de dados de temperatura	19
2.5. Objetivo deste trabalho.....	20
CAPÍTULO III - Desenvolvimento de um Sistema Eletrônico Destinado ao	
Monitoramento Térmico de Fornos Industriais.....	23
3.1. Introdução.....	23
3.2. Estrutura do sistema para monitoramento térmico	24
3.3. Sensores térmicos.....	25
3.3.1. Calibração dos sensores térmicos	29

3.3.2. Análise da temperatura no interior de um forno a partir de sensores do tipo Pt-100	36
3.4. Central de controle	42
3.5. Servidor	48
CAPÍTULO IV - Aplicação do Sistema Eletrônico em Fornos Destinados à Produção de Carvão Vegetal	59
4.1. Introdução	59
4.2. Instrumentação térmica de fornos RAC220	61
4.3. Análise térmica de ciclos de carbonização a partir do sistema de monitoramento térmico proposto neste trabalho	64
CAPÍTULO V – Conclusões	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esboço da curva de calibração para termopar e cabo de compensação	18
Figura 3.1 – Estrutura do sistema de monitoramento térmico.....	23
Figura 3.2 – Diagrama de blocos do sensor térmico.....	25
Figura 3.3 – Placa desenvolvida para os sensores	25
Figura 3.4 – Fluxograma da comunicação entre a central e o sensor.....	28
Figura 3.5 – Equipamentos para calibração do Pt-100.....	29
Figura 3.6 – Características do sensor Pt-100	30
Figura 3.7 – Valores de resistência versus temperatura medida e calculada pelo modelo proposto	32
Figura 3.8 – Curva de calibração para o Pt-100	33
Figura 3.9 – Valores de temperatura e seu valor obtido pelo micro-controlador.....	35
Figura 3.10 – Bancada experimental	36
Figura 3.11 – Disposição dos sensores	37
Figura 3.12 – Evolução da temperatura com o tempo.....	38
Figura 3.13 – Trocas térmicas no interior da mufla.....	39
Figura 3.14 – Erros relativos entre as temperaturas obtidas com os Pt-100 e com o termopar usado como referência.....	40
Figura 3.15 – Diagrama de blocos da placa mãe da central	41
Figura 3.16 – Fluxograma da central.....	43
Figura 3.17 – Foto do circuito eletrônico da central.....	44

Figura 3.18 – Destaque da antena com o modulo de comunicação <i>wireless</i>	45
Figura 3.19 – Circuito elevador de tensão para recarga da bateria de <i>nobreak</i>	46
Figura 3.20 – Diagrama de blocos do servidor	47
Figura 3.21 – Placa de interface com o modulo wireless presente no servidor.....	48
Figura 3.22 – Módulo <i>wireless</i> do servidor.....	49
Figura 3.23 – Tela de execução do <i>software</i> “Receptora” com as informações de cada sensor	50
Figura 3.24 – Plano de cálculo e perfil térmico obtido utilizando o <i>software</i> “Análise”	52
Figura 3.25 – Janelas da segunda versão do <i>software</i> “Análise”.....	54
Figura 3.26 – Janelas do <i>software</i> Análise para inserção de dados sobre a produção	56
Figura 4.1 – Montagem do sistema em campo.....	60
Figura 4.2 – Forno RAC220 típico.....	61
Figura 4.3 – Forno RAC 220	63
Figura 4.4 – Curvas de carbonização de um forno RAC 220 monitoradas em cada zona térmica do fornoRAC220.....	65
Figura 4.5 – Temperaturas obtidas nas chaminés de um forno RAC 220	65
Figura 4.6 – Evolução dos campos térmicos no interior de um forno RAC 220	66
Figura 4.7 – Bocas de fogo: entradas de ar para controle da carbonização	67
Figura 4.8 – Fissuras apresentadas no revestimento externo do forno RAC 220.....	67
Figura 4.9 – Perfil térmico apresentando um ponto de incêndio na zona 2 resultante de uma fissura na parede do forno	68
Figura 4.10 – Análise de tempo de produção no forno	69
Figura 4.11 – Perfil térmico irregular do instante final da pirólise.....	71
Figura 4.12 – Análise dos fornos	72

Figura 4.13 – Perfil térmico na fase final de carbonização em um forno convencional	73
Figura 4.14 – Perfil térmico na fase final de carbonização em um forno instrumentado	
com o sistema de monitoramento térmico proposto neste trabalho	74
Figura 4.14 – Perfil térmico na fase final de carbonização em um forno com	
gaseificador	74
Figura 4.15 – Falhas na manutenção do sistema.....	77
Figura 4.16 – Sensor PT100.....	78

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1 – Valores de temperatura ajustados no banho termostático e os obtidos no termopar soldado a extremidade do Pt-100.....	30
Tabela 3.2 – Valores de resistência (em ohms) obtidos para as temperaturas ajustadas no banho termostático	31
Tabela 3.3 – Valores de resistência para cada faixa de temperatura ajustada na célula quente.....	31
Tabela 4.1 – Tempo de produção e faturamento em carvão vegetal	70

LISTA DE SÍMBOLOS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CRC	<i>Cyclic redundancy check</i>
DLL	<i>Dynamic-link library</i>
EIA	<i>Electronic Industries Alliance</i>
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INPM	Instituto Nacional de Pesos e Medidas
ISA	<i>Industry Standard Architecture</i>
ITS	<i>Internation Temperature Scale</i>
LTCM	Laboratório de Transferência de Calor e Massa
mA	miliAmperes
NBR	Norma Brasileira
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
NTC	Negative Temperature Coefficient
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PRT	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
PTC	<i>Platinun Resistance Thermometers</i>
RAC	Retangular ACESITA
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface Bus</i>
Km	Quilômetros
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

MULINA, B. H. O. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA MONITORAMENTO TÉRMICO DE FORNOS INDUSTRIAIS. 2011. 115 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A medição e análise da temperatura permitem controlar a produção industrial, o que reflete em melhorias na qualidade do produto final, redução no consumo de matéria-prima, combustível e quantidade de resíduos gerados. Tal prática permite ainda aumentar os ganhos na produção. Nesse sentido, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema eletrônico para monitoramento da temperatura em fornos industriais. Basicamente, o objetivo é desenvolver um conjunto de hardwares e softwares de fácil instalação/manutenção, que permita ainda a instalação de um número quase ilimitado de sensores. Para simplificar a instalação e reduzir custos de manutenção, o sistema é dividido em três partes - sensores, central de controle e servidor - estruturadas de acordo com o número de componentes e a complexidade das funções realizadas. O sistema de monitoramento proposto é a base para uma automação, permitindo o controle autônomo do processo no qual está instalado. Finalmente, para testar o sistema, este foi instalado em fornos de alvenaria do tipo RAC 220 para monitorar os perfis de temperatura durante a produção de carvão vegetal. Os testes realizados em campo confirmaram a eficácia do sistema e permitiram realizar ajustes no mesmo a fim de garantir o perfeito funcionamento em um forno industrial.

MULINA, B. H. O. DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC SYSTEM TO MEASURE AND CONTROL THE TEMPERATURE IN INDUSTRIAL KILNS. 2011. 115 f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia.

Abstract

The measurement and analysis of the temperature allow controlling the industrial production and provides improvements in the final product, reduction in the consumption of raw materials, fuel and amount of generated residues. Such practice still allows increasing the gain in production. In that sense, this work proposes the development of an electronic system to measure the temperature in industrial ovens. Basically, the objective is to develop some hardwares and softwares of easy installation and maintenance that works with a limitless number of sensors. To simplify the installation and to reduce maintenance costs, the system was divided in three parts - sensor, central control and server - structured in agreement with the number of components and the complexity of the developed functions. Finally, to test and analyze the system, it was tested at laboratory and installed in industrial brick kilns type RAC 220 to measure the temperature profiles during charcoal production. The accomplished tests confirmed the effectiveness of the system and allowed to fit it in order to guarantee the perfect operation in an industrial kiln.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Segundo Cassano (2003), a temperatura é a segunda grandeza mais medida no mundo, perdendo apenas para o tempo, o que reflete sua importância, uma vez que esta tem influência em praticamente todos os processos industriais. Por isso, estudar e controlar a temperatura são práticas primordiais no setor industrial.

Mesmo sendo de suma importância, algumas empresas ignoram a medição da temperatura o que reflete em gastos desnecessários, não-uniformidade na produção, grande quantidade refugos, produto final de baixa qualidade e principalmente aumento dos custos de produção.

Vários são os processos nos quais a temperatura afeta diretamente na qualidade do produto final. Na indústria alimentícia, por exemplo, o controle da temperatura preserva os alimentos, impedindo a proliferação de agentes patogênicos. Para o transporte em containers, o controle da temperatura é necessário para manter as propriedades dos produtos transportados. Equipamentos eletrônicos, como circuitos integrados e transformadores, necessitam operar em faixas de temperaturas seguras para evitar danos por superaquecimento. Na siderurgia, o controle de temperatura é primordial no processo de recozimento dos materiais e, além disso, contribui para o aumento da vida útil dos altos-fornos. No caso da produção de carvão vegetal, em que os métodos de produção ainda se baseiam no empirismo, diversos trabalhos propõem o uso de termopares nos fornos para auxiliar no controle do processo produtivo.

Desde que surgiu o interesse em produzir, o homem se viu obrigado a desenvolver técnicas para medição e controle, com o intuito de otimizar a produção, aumentar a qualidade dos produtos e os lucros obtidos.

Com o objetivo de medir as variáveis de processo, as empresas fazem uso da instrumentação, que é definida como a ciência que estuda, desenvolve e aplica instrumentos de medição e controle de variáveis. O termo instrumentação é utilizado para definir o trabalho de técnicos e engenheiros que lidam com processos, podendo também se referir a métodos e técnicas relacionadas ao uso de instrumentos.

Nos primórdios da produção industrial, a medição da temperatura era realizada de forma empírica, por meio da visão ou tato. Com a evolução dos processos, tornou-se necessário o uso de ferramentas que permitissem quantificar de forma precisa os valores de temperatura. Com isso surgiram os primeiros termômetros que mediam a temperatura a partir da variação de volume de um líquido ou dilatação e variação da resistência elétrica em metais. Esses equipamentos ainda são utilizados nos dias de hoje, nos quais a temperatura é indicada por meio de uma coluna de fluido ou um mostrador analógico, normalmente na forma de ponteiros, instalados juntamente com o elemento sensor.

Com o tempo, os sensores evoluíram, aumentando a precisão, robustez e velocidade de resposta. Surgiram ainda diversos tipos de sensores, adequados a cada necessidade. Atualmente, a medição da temperatura é realizada principalmente por sensores que possam ter suas saídas mensuradas por equipamentos eletrônicos, cada um com suas vantagens e desvantagens. Os tipos mais usados são os termopares e as termo-resistências. Os termopares, que abrangem praticamente todas as faixas de temperatura, permitem a medição precisa da temperatura, com baixo atraso na resposta, sendo sua saída uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura na qual é submetido. Nas termo-resistências, como o Pt-100, a medição da temperatura é feita medindo-se a resistência de um metal, normalmente platina. A temperatura obtida é absoluta, sem necessidade de compensação. Tais sensores são usados como referência por apresentarem alta repetitividade e precisão nas medições. Outros sensores, como as câmeras infravermelhas ou *infrared's*, permitem a medição da temperatura sem o contato direto entre o sensor e o elemento, o que também têm grande aplicação no setor industrial.

A forma de coleta das temperaturas também evoluiu com o tempo. No início era necessário que o operador percorresse toda a planta industrial fazendo a leitura dos equipamentos presentes no processo, operação que consumia tempo e provocava um controle

lento frente às falhas ocorridas na produção. Com o passar do tempo e crescente complexidade dos novos processos industriais, tal prática se tornou inviável e o problema foi resolvido com o desenvolvimento das centrais de controle. Tais equipamentos eletrônicos foram desenvolvidos para gerenciar o trabalho dos sensores, coletando e concentrando todas as informações continuamente, o que auxiliava na análise e detecção de possíveis falhas.

Para interligar o sensor e a central de controle, foram desenvolvidas técnicas que ao longo dos anos ganharam em segurança, velocidade e volume de dados transferidos. No início a transmissão dos dados era realizada de forma mecânica e pneumática. No entanto, com a evolução da eletrônica na década de 50, as linhas de transmissão pneumáticas foram sendo substituídas pelas elétricas, mais robustas, de instalação barata, apresentando menor tempo de propagação dos dados e menor tempo de resposta.

No inicio não havia uma norma para comunicação de dados. Uma das primeiras tentativas de padronização foi a transmissão de dados em redes de corrente de 4 a 20mA. A padronização permitiu a redução nos custos da instalação das redes devido ao aumento de fabricantes de componentes eletrônicos. No entanto, assim como nas linhas pneumáticas, a comunicação era realizada ponto a ponto, necessitando de uma linha de transmissão para cada sensor instalado.

Com os avanços tecnológicos, tem-se o início da transmissão de dados digital que permitiu o uso de uma maior quantidade de sensores e um aumento no tráfego de informações. Por meio de tal tecnologia, as informações dos sensores passaram a ser enviadas de forma binária à sala de controle e as linhas de transmissão se transformaram em verdadeiras redes, interligando diversos equipamentos como, por exemplo, sensor com sensor, central com central e sensor com central. Tal inovação era totalmente diferente da ligação pareada das linhas pneumáticas e de corrente. Um exemplo deste padrão de ligação em rede é o EIA-485, que transmite os dados de forma balanceada entre vários dispositivos, permitindo o uso em ambientes ruidosos e a longas distâncias. Neste caso existem diversos protocolos disponíveis para a comunicação dos dados, tais como: Modbus, Profibus, DIN-Measurement-Bus entre outros.

Assim, baseando em tais avanços tecnológicos e nas diversas necessidades industriais, este trabalho propõe o desenvolvimento de um conjunto de *hardwares* e *softwares* específicos para serem aplicados na análise térmica de fornos industriais. Nesse sentido, o Capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica envolvendo trabalhos científicos relacionados ao tema e a

importância da análise térmica no setor industrial. Além disso, apresenta-se um estudo envolvendo os vários sensores e equipamentos de medição disponíveis para compra.

A apresentação dos *hardwares* e *softwares* é realizada no Capítulo III, no qual são especificadas cada uma das partes do sistema, sua concepção, construção e testes. Os sensores, responsáveis pela aquisição da temperatura, têm sua estrutura apresentada juntamente com os testes de calibração. Apresenta-se ainda o desenvolvimento da central de controle que tem a função de concentrar as informações obtidas pelos sensores e enviar os dados, por uma rede *wireless*, a um servidor/computador. Neste último, foi desenvolvido e instalado um pacote de aplicativos responsáveis pelo controle e apresentação das temperaturas adquiridas.

Após o desenvolvimento do sistema de monitoramento térmico, o Capítulo IV apresenta uma aplicação industrial, na qual os *hardwares* e *softwares* foram instalados em fornos destinados à produção de carvão vegetal. Neste capítulo são disponibilizados detalhes envolvendo a instrumentação dos fornos e análise de diferentes ciclos de carbonização da madeira com práticas operacionais variadas. Por meio desta aplicação prática, tornou-se possível identificar as principais vantagens e desvantagens do uso do sistema de monitoramento térmico quando submetido ao processo de produção de carvão vegetal.

Por fim, no Capítulo V apresentam-se as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Desde o inicio do período industrial, o controle e monitoramento de variáveis envolvidas no processo industrial se fazem necessários, tanto para economia na produção, quanto para melhora na qualidade final do produto, ou mesmo por segurança. A definição de processo, segundo a norma ANSI/ISA-S 5.1-1984-R-1992, descrita pela organização americana *Instrument Society of America - ISA*, é qualquer operação ou sequência de operações que envolvam variações de energia, estado, composição, dimensão ou outra propriedade que possa ser definida com relação a um referencial. Os processos são amplamente diversificados e podem ser identificados nas indústrias destinadas à geração de energia, metalurgia, petroquímica, produção de papel, celulose, carvão, alimentícia, entre outras. Cada processo envolve tipos diferentes de variáveis, e muitas delas devem ser medidas e controladas a fim de reduzir custos, aumentar o lucro e otimizar os processos.

O controle do processo industrial evoluiu com o tempo, desde o momento em que o operário devia percorrer a indústria abrindo ou fechando válvulas manualmente, muitas vezes contando apenas com a experiência, outras observando diretamente os medidores das unidades de interesse, até os sistemas atuais que praticamente realizam as tomadas de decisões e atuam sobre os processos sem intervenção humana.

Segundo a mesma norma ANSI/ISA-S 5.1-1984-R-1992, um instrumento é todo dispositivo usado para medir e/ou controlar uma variável industrial, de forma direta ou indireta. Isso inclui os sensores, os sistemas computacionais, e os dispositivos finais de interface, como sinais luminosos e sonoros, botões, chaves entre outros. Não valendo para as partes funcionais de cada instrumento, como os circuitos eletrônicos. Ainda, segundo essa norma, os instrumentos podem ser divididos entre instrumentos de medição, como os termômetros e medidores de vazão, os atuadores, como válvulas e motores, e os que são a combinação dos dois, como os termostatos e pressostatos.

Por normalização, sensor é um instrumento, ou parte dele, que é responsável por mensurar uma variável de processo e convertê-la em outra saída pré-determinada. Pode estar integrado ou não a outras partes do sistema de instrumentação, sendo também chamado de detector ou elemento primário. Além do detector, um sensor pode contar com um transmissor, necessário para converter o sinal medido em uma saída, elétrica ou pneumática, que é função do sinal de entrada. Para os sistemas de instrumentação mais usados atualmente, essa saída é digital, criando redes interligando os sensores, os controladores, e os atuadores.

O controlador, como o próprio nome já diz, é a parte responsável pelo controle de processos. Além disso, toma decisões e aciona os atuadores com a intenção de manter as variáveis de processo dentro de limites pré-estabelecidos. Outro termo usado para referenciar os controladores industriais é controlador lógico programável, ou CLP. Controlador lógico programável, segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), é um equipamento eletrônico digital com hardware e software compatíveis com aplicações industriais. Segundo a NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*), é um aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e para programar funções específicas, tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando, por meio de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos.

O CLP teve sua origem no ano de 1968, desenvolvido por Richard Morley, para a indústria automobilística. Sua evolução passa por várias etapas, desde a relação íntima com o hardware desenvolvido, até a presença de computadores e redes de interligação entre as partes do sistema. Estas gerações são determinadas conforme a evolução da programação nos controladores, se tornando cada vez menos dependentes do hardware.

No atual estágio da evolução podemos perceber a presença de algumas frentes de desenvolvimento de controladores, que podem ser desde um hardware desenvolvido

especificadamente para a aplicação, uma junção de hardwares desenvolvidos cada um com uma função necessária à instrumentação, ou até mesmo computadores interligados por rede. O desenvolvimento de um controlador com um propósito específico consome um tempo maior de desenvolvimento e testes, e um custo inicial maior. Esse tipo de controlador possui menor flexibilidade, isto é, sua utilização em outros processos, ou mesmo a inserção de novas funcionalidades não previstas inicialmente, podem ser de difícil realização. Em contrapartida, são mais rápidos e baratos, por serem específicos para uma determinada aplicação.

Outros controladores são desenvolvidos a partir da junção de blocos funcionais desenvolvidos por empresas especializadas. Cada um destes blocos realiza um conjunto limitado de funções, e não funcionam isoladamente. Necessitam de um bloco de entrada, onde se ligam os sensores, um de controle propriamente dito, que recebe uma programação específica para a aplicação, e um de saída, onde se ligam os atuadores. Exemplo desse modelo de controladores são os baseados na tecnologia CompactRIO®, da *National Instruments*. Essa tecnologia permite flexibilidade no período de desenvolvimento do sistema de instrumentação e controle do processo com a troca de módulos a serem encaixados em um chassi que possui conexões com o controlador. As vantagens desse sistema são a flexibilidade e o uso de módulos que já estão calibrados e testados. Como desvantagens citam-se: o custo elevado e o fato do sistema ficar dedicado à equipamentos de um único fabricante/fornecedor.

O uso de computadores como controladores de processos veio de modo a dar maior flexibilidade ao sistema, permitindo a adequação do sistema de supervisão no momento necessário. Com o uso de linguagens próprias, como o LabView, da *National Instruments*, o desenvolvimento de sistemas de supervisão se tornou simples e mais acessível aos interessados. O computador também agrupa velocidade ao controle, e permite uma interface mais amigável ao operador do sistema. Outra vantagem do uso de computadores é permitir o uso de técnicas matemáticas e computacionais para predizer variáveis, onde a medição por meio de sensores é de difícil realização, o que pode contribuir para otimizar o processo e reduzir custos de produção.

Para o controle da produção, após a leitura das variáveis e escolha da decisão a ser tomada, os atuadores devem realizar uma determinada ação sobre o processo. Atuador é um elemento final, ou seja, um dispositivo capaz de controlar diretamente o valor de uma variável usada na malha de controle. Existe uma grande variedade de atuadores, distinguindo desde qual variável a ser controlada, quanto à forma na qual recebe o comando para atuar. Para controlar variáveis como a temperatura, por exemplo, existem diversas formas, dentre as

quais, cita-se o uso de resistências e cabos de compensação. Assim, a escolha do atuador depende da aplicação.

Para a ligação entre as partes dos sistemas de instrumentação e controle, foram desenvolvidas redes de comunicação de diversos modelos. Algumas realizam ligação ponto a ponto, necessitando de uma ligação por sensor com o controlador, e do controlador com os atuadores, como as redes que utilizam pressão (3 a 15psi) ou as de corrente (4 a 20mA) e suas variações, citando como exemplo a comunicação HART.

Dependendo da aplicação, os fabricantes podem escolher por outros padrões próprios, aliando características de interesse. Um padrão elétrico usado é o EIA-485, que permite a interligação de vários dispositivos, com o uso de dois ou quatro fios. Esse padrão apresenta robustez em ambientes com poluição eletromagnética, como em indústrias. Ele permite comunicação half-duplex (leitura e escrita em momentos diferentes) com o uso de dois fios, e full-duplex (nos dois sentidos simultaneamente) com o uso de quatro fios.

Com a evolução dos sensores e atuadores, as redes digitais evoluíram e se adequaram as necessidades dos processos. Existem protocolos como o Profibus e o ModBus que permitem a ligação entre dispositivos inteligentes, que conseguem comunicar entre si, separando e facilitando a comunicação entre eles. Existem outros padrões, como a Ethernet ou USB (Universal Serial Bus), populares fora da indústria, interligando computadores. No meio industrial, elas estão em um processo de adequação, reduzindo os tempos de atraso na comunicação, e aumentando a robustez em ambientes com poluição eletromagnética.

Além das redes citadas, as redes wireless também podem ser utilizadas. O uso delas se limita à ambientes com baixa interferência eletromagnéticas e obstáculos excessivos. As redes sem fio são muito sensíveis a esses itens, e no caso de tentar superar tais problemas, o consumo de energia pode tornar seu uso inviável. Podem ser usados os padrões Wireless HART, ou mesmo a IEEE 802.11, mais conhecida por ser usada nas redes sem fio entre computadores. Para menores distâncias, pode-se usar o Bluetooth, ou o Zigbee, protocolo inicialmente usado para automação residencial. A comunicação Bluetooth permite uma comunicação mestre escravo, enquanto o padrão ZigBee permite vários mestres e vários escravos, além de adequar a transmissão dos dados procurando as rotas mais rápidas e mais confiáveis.

Baseado nos diversos conceitos e componentes definidos anteriormente, este trabalho tem como objetivo desenvolver um conjunto de *hardwares* e *softwares* específicos para serem aplicados ao processo de instrumentação térmica de fornos industriais, com aplicação prática

em fornos destinados à produção de carvão vegetal. Nesse sentido, este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica envolvendo a análise e estudo de diversos trabalhos científicos relacionados à instrumentação de sistemas térmicos.

2.2 Instrumentação e controle aplicados a sistemas térmicos

Diversos são os estudos que demonstram a relação entre o controle da temperatura e a produção industrial. Na indústria alimentícia, Ruocco, Almeida e Lopes (2006) afirmam que o controle da relação entre o tempo e a temperatura é essencial para evitar doenças transmitidas por agentes patogênicos existentes em alimentos. Tal afirmação motivou diversos estudos com relação às condições térmicas em que os alimentos são submetidos. Alimentos como leite e vegetais devem ser armazenados em temperatura próxima ao do congelamento, não podendo ser menor por, no caso do leite, ocorrem alterações na qualidade, no caso de vegetais, ocorre queima das folhas. As refeições já prontas normalmente devem ser mantidas quentes, pois em temperaturas baixas a proliferação de agentes patogênicos ocorre de forma acelerada.

Pelos motivos citados anteriormente, Lasso *et al.* (2003) desenvolveram um sistema para controlar a temperatura de uma câmara fria para vegetais frescos já embalados, de modo que estes não congelem, afim de aumentar a durabilidade e o tempo de estocagem. O sistema foi desenvolvido baseado em um ciclo de refrigeração, constituído de um compressor, condensador, evaporador e uma câmara de resfriamento. O sistema de controle é constituído de um computador, responsável pela aquisição da temperatura obtida por meio de um Pt-100, e execução de um programa de controle desenvolvido em *LabView*. O controle é realizado de forma *ON-OFF* (liga e desliga) do compressor, comparando a temperatura do Pt-100 com uma referência. A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o sistema conferiu maior estabilidade térmica e controle da câmara fria, permitindo o armazenamento dos vegetais em temperaturas pouco superiores à de congelamento.

Trabalho semelhante foi realizado por Filho, Silva e Araújo (2007), com o intuito de preservar os alimentos quentes. O projeto consistiu no desenvolvimento de um sistema eletrônico micro-controlado de aquecimento e controle da temperatura, com a apresentação da temperatura por meio de um display. O sensor usado para obtenção da temperatura foi o LM35DZ, um circuito integrado que fornece um valor de tensão proporcional ao da temperatura. O sensor é conectado a um micro-controlador PIC16F877A, programado em linguagem C, que realiza o atua de forma *ON-OFF* ou controlador *PI* (Proporcional-

Integral), acionando uma resistência conectada a rede elétrica. Os resultados foram considerados satisfatórios pelos autores e a pesquisa vislumbra a adição de outras funcionalidades ao sistema no futuro.

Para transporte internacional em containers, o controle da temperatura é importante para manutenção das condições dos produtos transportados. As diversas condições em que estão submetidos os *containers* (quantidade de carga, temperatura externa e temperatura interna controlada) resultam em variações de até 30% entre as temperaturas medidas e aquela definida como referência no interior do equipamento. Rodríguez-Bermejo *et al.*(2006), por exemplo, apresentam um estudo para analisar o comportamento térmico no interior de um *container* de dimensões 6058x2438x2591 mm, dividido em dois compartimentos de tamanho diferentes, separados por um isolamento térmico. O módulo de controle térmico desenvolvido pelos autores permite o controle tipo *ON-OFF* ou *PID* (Proporcional-Integral-Derivativo). A instrumentação térmica foi realizada com 69 sensores Pt-100, dispostos interna e externamente, conectados em dois sistemas de aquisição e a um computador. Por meio de uma rede local, os dados são armazenados na forma de texto e são gerados gráficos em tempo real. Após a instrumentação foram realizados experimentos, nos quais variou-se a carga e o tipo de controle. Para cada teste os autores apresentam o perfil térmico do *container*. Conforme esperado por eles, ficou comprovado que o controle *ON-OFF* resulta em maiores oscilações da temperatura interna do container quando comparado ao controle *PID*.

Para secagem de plantas aromáticas e medicinais, Jesuz *et al.* (2001) desenvolveram um sistema automatizado para o controle e monitoramento da temperatura do ar durante a secagem das plantas. O sistema - constituído de queimadores de gás, painel eletrônico, ventilador e acionadores - deve operar de forma autônoma, sem a presença do operador, com o intuito de otimizar a secagem. O painel eletrônico, responsável pelo controle, é constituído por um temporizador, alarme e controlador analógico, conectados entre si. A medição da temperatura é realizada pelo sistema por meio de um controlador, não especificado no trabalho. Os resultados obtidos mostram que o controle da temperatura do ar nas câmaras confere melhor qualidade às plantas aromáticas e medicinais.

O controle da temperatura é importante também na destilação e armazenamento de hidrocarbonetos. O volume ocupado pelo petróleo e os seus derivados no interior dos tanques sofre forte influência da temperatura, uma vez que seu coeficiente de dilatação térmica varia de 0,06% a 0,30% para cada grau Celsius. Isto significa que uma variação de 10°C na temperatura pode provocar variações de até 3% no volume ocupado pelo produto no interior

do tanque. Além disso, a distribuição da temperatura nos tanques não é uniforme, por esse motivo, o INPE (Instituto Nacional de Pesos e Medidas) estipulou procedimentos para determinação da temperatura em tanques de armazenamento. O procedimento estipulado varia no caso de tanques aquecidos ou não, sendo realizadas medições de temperatura em diversas alturas do tanque, até que a média entre as temperaturas obtidas não exceda 0,5°C.

Sistemas de aquecimento solar também podem ser otimizados a partir do monitoramento térmico. Murthy e Nagaraju (1999) desenvolveram um estudo sobre a redução do consumo de energia em bombas de sistemas de aquecimento solar. Com o uso de sensores Pt-100 instalados em vários pontos do sistema foi possível calcular a quantidade de calor envolvida no aquecimento. O desenvolvimento de um controlador digital para gestão do sistema permitiu a redução em até 30% no consumo de energia, valor atingido em dias nublados.

A medição da temperatura é interessante também para determinar o desgaste de componentes elétricos e eletrônicos. Barros (2007) desenvolveu um estudo sobre o comportamento térmico de um transformador eletromagnético, com o intuito de analisar o aquecimento do transformador e desenvolver um modelo para previsão da elevação da temperatura sobre várias condições de trabalho. O estudo procedeu com a instrumentação do transformador, com o uso de termopares tipo J, conectados ao circuito integrado AD594AQ para amplificar o sinal dos termopares. Os dados foram adquiridos por um equipamento desenvolvido pela *National Instruments*, interligado a um computador com o *software MATLAB*. Os termopares foram posicionados em vários pontos do transformador com o intuito de monitorar as temperaturas em diversas condições de operação e gerar dados para um modelo computacional. A partir da aferição do modelo térmico do transformador, o autor simulou diversas condições de trabalho, sem a necessidade de realizar outros testes experimentais. O estudo contribuiu para analisar regiões críticas e aumentar a dissipação de calor no equipamento, resultando em uma maior vida útil do mesmo.

Na siderurgia é comum o uso de fornos de recozimento para conferir propriedades mecânicas e metalúrgicas às chapas metálicas. Teixeira, Jota e Teixeira (2007), por exemplo, apresentam em seu trabalho melhorias em um sistema de controle de um forno de recozimento de chapas, como reconfiguração dos controladores com base em modelos experimentais do processo. O forno é dividido em seis regiões nas quais são instalados termopares do tipo S. Os valores de referência para os controladores são obtidos por meio de técnicas de otimização e informações experimentais. Os resultados obtidos permitiram a

implementação de melhorias nos controladores o que aumentou a velocidade de tratamento das variáveis envolvidas, reduziu a necessidade de ação dos atuadores e reduziu o consumo de combustível em aproximadamente 3,7%.

Ainda no setor siderúrgico, em um alto-forno, por exemplo, o controle térmico evita a concentração de minérios fundidos na base do forno, de forma a ter maior homogeneidade da mistura (Amorim et al., 2010). Por esse motivo, o controle térmico de um alto-forno é essencial para conferir qualidade ao produto final (Angstenberger, 1996). Para otimizar a produção e entender melhor as reações ocorridas no interior do forno, o autor propõe o uso de modelos térmicos e inteligência artificial para determinar relações entre os parâmetros de entrada (carvão e minério), temperatura medida na superfície do alto forno e qualidade do aço produzido. O trabalho teve como objetivo reduzir a subjetividade ainda muito comum neste tipo de equipamento. Baseados nesta mesma linha de pesquisa, Magnago e Catabriga (2010), Vitorino e Bastos (2007) e Dias (2007), apresentam um estudo que tem como objetivo controlar a temperatura do ferro-gusa na parede de proteção interna do forno constituída de refratários. Nesse sentido, os autores utilizam as temperaturas obtidas na base do alto-forno para alimentar modelos matemáticos. Dias (2007) propõe balanço de energia, com aproximação unidimensional, para calcular a vazão de água do sistema de refrigeração da parede do forno. No intuito de agilizar a manutenção dos *staves*, peças importantes na refrigeração do alto-forno, Vitorino et al. (2007) calcula as temperaturas na parte interna, a partir de dados experimentais medidos na parte externa do forno. Matsuzaki et al. (2006) desenvolveu um modelo térmico para fornos da *Nippon Steel Corp.*, que permite calcular as isotermas e o comportamento dos gases e sólidos dentro do forno, baseando-se nas características dos combustíveis e matérias primas inseridas. Na sala de controle, o operador tem acesso aos resultados a partir do mapeamento térmico do alto-forno.

O monitoramento e controle da temperatura tem ainda grande aplicação nas indústrias de cerâmicas. Na fabricação de tijolos e telhas, por exemplo, exige-se a secagem prévia e controlada do produto final. Se a secagem não for uniforme, aparecerão distorções nas peças, mas, se for muito lenta, a produção se torna antieconômica. Para uma secagem uniforme (gradientes de temperatura e umidade minimizados) é importante controlar adequadamente a intensidade da secagem (Cadé, Nascimento e Lima, 2005).

Kawaguti (2004) estuda o comportamento térmico em fornos intermitentes tipo paulistinha para queima de cerâmica. Para análise ele realizou simulações em programa desenvolvido na linguagem Fortran, e no pacote CFX 5, para análise do comportamento dos

gases no interior do forno. Para confirmação dos resultados, 20 termopares tipo K foram instalados, devidamente protegidos contra danos, interna e externamente ao forno, além do uso de pirômetro ótico para medição da temperatura das fornalhas. O gasto com combustíveis (gás natural, lenha e óleo) foi medido a fim de permitir uma relação entre o melhor controle do processo de queima e a redução no consumo de combustível. As simulações variaram tipo de combustível, tempo de operação de cada fase do processo de queima da cerâmica, permitindo otimizar a produção.

Os estudos realizados por Dadan (2005) procura entender o comportamento térmico de um forno túnel usado para queima de tijolos, de modo a permitir uma redução nos gastos com energia. Neste caso foram posicionados termopares tipo K através da carga e da vagonete de transporte dos tijolos ao longo do forno, com comprimento próximo a 100 metros. O autor relata que teve dificuldades quanto a instalação dos sensores, devido ao comprimento do forno e as temperaturas envolvidas (aproximadamente 300°C). A solução encontrada foi o uso de cabos de cobre com comprimento de 120 metros, passados abaixo das vagonetas, onde as temperaturas são menores. As temperaturas foram adquiridas por um sistema de aquisição que representa um ponto preocupante no trabalho, pois é sensível a quedas de energia. Como resultado, foi notado que a disposição dos tijolos poderia ser feita de melhor forma, pois grande quantidade de calor atingia as vagonetas. Outro detalhe percebido é a presença desnecessária de uma seção de pré-aquecimento, resultando em maior tempo de produção e maior consumo de energia.

Um setor siderúrgico ainda carente de tecnologias e novas práticas é o da produção de carvão vegetal. No Brasil, o carvão vegetal é produzido principalmente em fornos de superfície, conhecidos como “rabo-quente”. Esse tipo de forno possui baixo custo, o que o torna viável para pequenos produtores. Em maior escala, as empresas fazem uso de fornos modelo RAC (Retangular ACESITA), construídos de alvenaria, com portas metálicas, nos quais a produção se torna mecanizada (Oliveira, 2009).

Os fornos de alvenaria possuem baixo custo de construção com rendimentos significativos, mesmo sendo ineficientes energeticamente e não apresentando nenhum tipo de controle. De acordo com Moreira (1964), Mendes et al. (1982), Coutinho e Ferraz (1988), Vella et al. (1989), Trugilho e Silva (2001), Sèye (2005) e Oliveira et al. (2010) o controle térmico do processo de carbonização é de grande relevância pois influencia diretamente nas características físicas e químicas do carvão vegetal. O controle da temperatura é importante, pois está diretamente relacionado ao rendimento gravimétrico (relação entre a quantidade de

carvão produzido e quantidade de madeira enfornada). Autores como Trugilho e Silva (2001), Sèye (2005), Costa et al. (2008) e Oliveira et al. (2010), concluíram em seu trabalhos que o rendimento de um forno é dependente da temperatura de carbonização.

O sistema de produção de carvão vegetal ainda é o mesmo de um século atrás. A pressão pela produção ecologicamente correta e auto-sustentável tem dirigido a busca por tecnologias que atendam estes desígnios e sejam economicamente viáveis (Colombo, Pimenta e Hatakeyama, 2006). Com o objetivo de entender e controlar melhor o processo de produção de carvão, diversos trabalhos visam à medição da temperatura no forno.

Raad (2008) apresenta o desenvolvimento de um forno balança, com o intuito de instrumentar e controlar o processo de produção do carvão vegetal. A instrumentação do forno conta ainda com tubulações para a recirculação dos gases e a instalação de termopares. Por meio de tais práticas, o autor consegue avaliar de forma simultânea os campos térmicos no interior do forno e a variação da massa de madeira. Além do histórico da produção, o autor tem interesse também em novas tecnologias para melhor o rendimento na produção do carvão vegetal.

Barcelos (2002) estuda a relação entre temperatura e a qualidade do carvão vegetal produzido em fornos container. Termopares tipo K foram posicionados ao longo do forno, chaminés e nos queimadores de gases. Os dados são adquiridos por um sistema de aquisição comercial a cada 15 minutos. Os autores apresentam os perfis térmicos dos ciclos de produção a partir do *software* SURFER 7.0. Além disso, definem relações entre temperatura, tempo de produção, qualidade do carvão e da madeira enfornada.

Assis (2007) apresenta um estudo para testar, avaliar e ajustar um sistema alternativo de carbonização da madeira em escala piloto, incluindo a construção e teste de um protótipo. Seis sensores foram instalados para verificar o perfil térmico no interior do forno. Um método estatístico, baseado em regressão, foi utilizado para estudar a relação entre a temperatura média interna do sistema e temperatura média dos gases eliminados pela chaminé. Com base na temperatura, três modelos foram ajustados: linear, cúbico e logarítmico. A partir dos resultados, o autor identifica que o tempo de resfriamento do carvão pode ser reduzido.

França e Campos (2002) apresentam uma análise numérica e experimental de um forno RAC 220, testando várias condições, baseadas em variações na temperatura interna, espessura das paredes e velocidade dos gases no interior do forno. Para validar os resultados os autores compararam as temperaturas calculadas com dados experimentais monitorados no forno.

Bricarbras (2006) apresenta uma inovação para o processo de produção de carvão vegetal que consiste no monitoramento contínuo da temperatura em fornos metálicos de pequeno porte. Neste caso, a temperatura em cada forno é monitorada por meio de três termopares, que são conectados a um transdutor que envia os dados a um computador em tempo real a cada 5 segundos. *Hardwares* e *softwares* comerciais são utilizados pelos autores. Alarmes sonoros são acionados para indicar o término do processo de carbonização da madeira e início do resfriamento do carvão. A proposta apesar de inovadora é limitada à fornos de pequeno porte (até 4 ton de carvão/ciclo) devido aos custos envolvidos. A central de monitoramento deve ser próxima aos fornos (menos de 40 metros), os autores utilizaram cabos e fios para interligar as partes do sistema e, apesar da medição da temperatura, a produção de carvão ainda é bastante dependente da habilidade e destreza do técnico em carbonização.

A partir da análise dos trabalhos apresentados anteriormente, verifica-se que a instrumentação e controle térmico são essenciais em diversas aplicações industriais. Nesse sentido, esse trabalho propõe o desenvolvimento de *hardwares* e *softwares* específicos para a análise térmica de fornos retangulares de grande porte, com capacidade individual para produzir 30 toneladas de carvão por ciclo de carbonização. O objetivo é medir a temperatura com sensores Pt-100 localizados em vários pontos dentro dos fornos e estabelecer uma relação entre temperatura e qualidade do carvão vegetal. A instrumentação térmica prevê a instalação de 22 sensores Pt-100 em cada forno. Estes sensores serão conectados a uma placa-mãe que transmite os sinais para um computador por um circuito eletrônico e uma rede sem fio. As temperaturas serão armazenadas em um banco de dados, e podem ser acessadas por meio de um *software*, definido como sistema supervisório, que apresenta os dados medidos em forma de gráficos, tabelas e mapas térmicos. Por meio de tais informações, o técnico em carbonização poderá controlar o forno efetivamente durante todas as fases da produção de carvão. A partir do monitoramento e correção da prática padrão, e da análise estatística de diversos ciclos, novas práticas podem ser incorporadas ao processo afim de reduzir o tempo de secagem, pirólise e resfriamento nos fornos. Além disso, tais práticas podem ainda contribuir na minimização das perdas e aumento da eficiência dos fornos.

A construção de *hardwares* e *softwares* específicos proposta neste trabalho, é baseada na redução de custos com equipamentos e montagem, necessidade de uma rede sem fio com alcance de até 10km e o desenvolvimento de um software com interface amigável, que possa ser facilmente assimilado pelos técnicos em carbonização.

Nesse sentido, apresenta-se na sequência uma análise dos principais sensores térmicos aplicados à indústria e algumas informações a respeito de sistemas comerciais para a aquisição de dados de temperatura.

2.3. Principais sensores térmicos para uso industrial

Segundo McGHEE et al. (1999), os sensores de temperatura permitem quantificar as transferências de calor entre os corpos de interesse e o ambiente circundante. A temperatura é uma unidade que não pode ser medida diretamente. A medida da temperatura é feita pela variação em alguma propriedade de um material: pode ser a variação de comprimento de uma barra, ou o volume de um líquido/gás, ou a resistividade elétrica, ou mesmo a diferença de potencial entre dois metais distintos. O primeiro termômetro data de 50 A.C, criado por Philo, Filósofo judeu helenista, que estudou o efeito da expansão do ar com o aumento da temperatura.

Com a medição da temperatura, houve a necessidade de padronizar os valores obtidos. No ano de 1990, foi criada uma norma, a *Internation Temperature Scale of 1990*, a ITS-90, padronizando as faixas de temperatura, os erros de medição e os sensores padrões para medição da temperatura. A primeira versão da ITS foi sugerida em 1927, e desde então é atualizada para melhorar sua precisão. Vale ressaltar que a ITS-90 não define as escalas de temperatura, mas o valor ser medido com termômetros padrões, para cada faixa de temperatura.

Existem atualmente diversos tipos de sensores térmicos conforme a variedade de aplicações práticas. Os mais comuns são os termômetros de bulbo, que contém internamente um gás ou um líquido cujo volume varia conforme a variação da temperatura. Em aplicações industriais é comum o uso de termo-resistências, ou RTD, e os termopares.

As termo-resistências são sensores que utilizam o princípio da variação da resistividade elétrica dos metais conforme determinada faixa de temperatura. Os metais mais usados são o cobre, níquel e a platina. O estudo dessa tecnologia se iniciou em 1835, porém seu uso se tornou viável em processos industriais em 1925 (Gonçalves, 2003). Os RTD's mais usados são os de platina, sendo denominados PRT's (*Platinun Resistance Thermometers*).

As normas DIN 43760, IEC 751-1983, e a JIS C1604 determinam as características dos RTD's, como os coeficientes usados no modelo matemático de Callendar-Van Dusen, as classes de tolerância, a resistência a 0°C e o *alfa* (coeficiente de variação resistência por

temperatura na faixa de temperatura entre 0 e 100°C). O modelo de Callendar-Van Dusen é uma equação que define a relação resistência versus temperatura para toda a faixa de operação. É um polinômio de quarto grau, no caso de temperaturas entre -200 a 0°C, e de segundo grau, no caso de temperaturas positivas (EM-60751).

Mesmo sendo mais caro que a maioria dos metais, a platina é o metal mais usado como termo-resistência. Na prática, a platina com alta pureza possui resistência de 100Ω a 0°C. Convencionalmente, essa termo-resistência é chamada de Pt-100. A montagem da platina em bainhas é mais usada, suprindo grande parte das necessidades industriais, tanto pela qualidade do sinal medido, quanto pela robustez apresentada, e pelo custo na instalação, pois não necessita de cabos especiais. Como inconveniente, a velocidade de resposta é lenta, o custo do sensor é alto se comparado com outros tipos, e se mantido operando perto da faixa limite, pode se deteriorar rapidamente.

Hashemiana e Jiangb (2009) detalha sobre a instrumentação em uma planta de uma usina nuclear, relatando sobre as vantagens e problemas mais comuns com os sensores RTD's e termopares, comparando os sensores montados em bainhas e os de imersão direta, detalhando problemas como relação aos cabos de conexão, resistência de isolação baixa, calibração de forma incorreta, efeito de ruídos eletromagnéticos ou de produtos químicos.

Os Pt-100 também são usados também para medir os efeitos do sol sobre equipamentos térmicos. Bohórquez, Enrique Gómez e Andújar Márquez (2008) estudaram o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para medição de temperatura em painéis solares, e compararam os resultados obtidos com medidores do tipo DS18B20, desenvolvido pela Maxim Integrated Produts, atingindo resultados semelhantes entre ambos os sensores. Murthy e Nagaraju (2007) utilizaram sensores Pt-100 para quantificar a energia em um sistema de aquecimento solar. Para o estudo do comportamento térmico em contêiner refrigerados, Rodríguez-Bermejo et al. (2006) posicionaram sensores pelo contêiner, permitindo a modelagem térmica em situações com ou sem carga, e sob o efeito do sol, e ajustes do controlador de temperatura do contêiner, reduzindo o consumo.

Outros sensores muito utilizados são os termopares e os cabos de compensação. Esses sensores de temperatura são baseados no efeito Seebeck ou termelétrico. O efeito Seebeck foi descoberto em 1821 por Thomas Johann Seebeck, e se baseia na diferença de tensão gerada entre metais quando submetidos a uma variação de temperatura. A diferença de tensão varia conforme os metais usados, sendo na ordem de microvolts ou milivolts. A principal diferença entre os termopares e os cabos de compensação reside no grau de pureza do metal, que pode

acabar interferindo na leitura da temperatura. Iope (2011) apresenta como exemplo um esboço das curvas de calibração para termopares S ou R e cabo de compensação de cobre/cobre-níquel. Analisando a Fig. 2.1, verifica-se que as curvas são as mesmas até um limite de temperatura, na qual se for ultrapassado, a curva do cabo de compensação se perde.

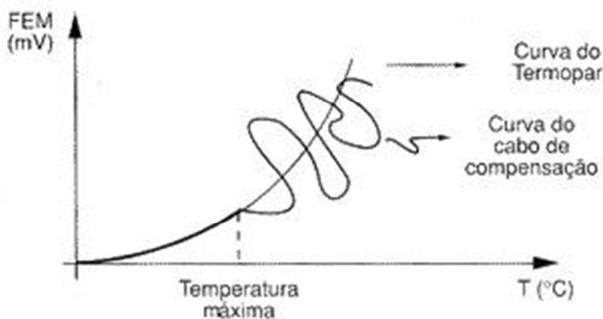


Figura 2.1 – Esboço da curva de calibração para termopar e cabo de compensação.

Fonte: Iope (2011)

Os termopares possuem uma faixa de operação muito grande, dependendo do tipo podem chegar a 2300°C, e apresentam grande precisão. São usados onde a resposta do sensor deve ser rápida, uma vez que o termopar apresenta pouca massa. Os termopares são constituídos de uma variada gama de combinações de metais, com suas curvas padronizadas pela ITS-90. Existem normas além da ITS-90 desenvolvidas por alguns países, como a ANSI, (Estados Unidos), a DIN (alemã), a JIS (japonesa) e a EM (inglesa). Para equiparar duas curvas de normas diferentes, deve-se ter com base a ITS-90, para evitar erros. Com relação às cores usadas nas isolações dos fios do termopar ou dos cabos de compensação, a maioria dos países adotou a norma ANSI, mas podendo ter algumas variações.

Os termopares, assim como as termo-resistências, são encapsulados de modo a assegurar sua durabilidade no ambiente industrial. Para a medição dos sinais gerados pelo termopar, o sistema de aquisição deve ser capaz de medir variações de microvolts ou menores. Como exemplo, um termopar tipo T apresenta variação de 50 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (Norma EN-60584), o que o torna extremamente sensível a qualquer ruído elétrico. Neste caso, deve-se evitar interligar os sensores em redes elétricas sem aterramento, ou próximo a algum campo eletromagnético, ou ainda distanciar em demasia o termopar do equipamento de medição. Em algumas aplicações, recomenda-se um transmissor instalado junto ao termopar e o envio dos dados ao controlador do processo, por meio de um nível de tensão amplificado ou de forma digital, baseado em algum protocolo de transmissão de dados.

Outro sensor muito comum nas indústrias é o pirômetro que é uma câmera que enxerga a radiação infravermelha e, por isso, não precisa estar em contato com o objeto. Este sensor tem como vantagem não interagir com o corpo, reduzindo o perigo de acidentes com o operador. Além disso, o objeto pode estar em movimento ou em lugares inacessíveis. Um pirômetro tem vida útil relativamente alta, pois não sofre desgaste com o uso, necessitando apenas de calibração. Como desvantagem o pirômetro possui custo elevado, além disso, a precisão na leitura da temperatura está diretamente relacionada ao posicionamento do equipamento (distância entre o pirômetro e o objeto), conhecimento da emissividade da superfície e ao uso correto de filtros na lente.

Além dos sensores descritos anteriormente, citam-se ainda os NTC's (*Negative Temperature Coefficient*) e os PTC's (*Positive Temperature Coefficient*) que são semicondutores sensíveis à temperatura. Tais sensores têm grande aplicação na proteção de circuitos eletrônicos, por serem de baixo custo e menor massa, resultando em uma resposta relativamente rápida. Entretanto, não há uma norma que os padroniza, além disso, eles possuem comportamento não-linear e sofrem auto-aquecimento. Por isso, a aplicação preferencial em equipamentos que possuem pequenas variações de temperatura.

A partir da identificação dos sensores térmicos mais comuns na indústria, apresentam-se na sequência algumas informações a respeito de sistemas comerciais para a aquisição de dados de temperatura.

2.4. Equipamentos destinados à aquisição de dados de temperatura

Destinados à medição e controle da temperatura, existem no mercado diversos modelos de medidores e controladores. Para a medição de temperaturas e registro, várias empresas fornecem equipamentos do tipo *data logger*, que permitem adquirir e armazenar informações de diversos tipos de sensores. Os dados podem ser transferidos para um computador, em tempo real ou não, e apresentados por meio de *softwares* específicos para cada equipamento.

Um exemplo de *data logger* é o *Agilent 34970a* que consiste em um equipamento que permite a conexão de três *slots* (gavetas) de entradas, com um multímetro integrado. Cada um dos canais de leitura pode ser configurado de forma independente, podendo medir 11 funções diferentes, incluído dados de termopares e termo-resistências. O *Agilent 34970a* permite a conexão com o computador por meio de uma porta serial e uso do software *Agilent Benchlink Data Logger*, fornecido juntamente com o sistema de aquisição. O *software* salva os dados em

um banco de dados, além de apresentá-los sob a forma de gráficos em tempo real. O uso desse equipamento é interessante pela flexibilidade na leitura de vários tipos de sinais elétricos, e pelo *software* que o acompanha.

Outro exemplo de equipamento para registro da temperatura é o OM-320, da *OMEGA ENGINEERING INC*, que consiste em um *data logger* portátil, capaz de receber 24 sensores de temperaturas ao mesmo tempo, armazenando até 330.000 pontos internamente. A configuração e leitura dos dados armazenados são realizadas por meio de um *software* fornecido juntamente com o equipamento. O interessante desse equipamento é a portabilidade, já que funciona com bateria ou conectado a rede elétrica.

Além dos modelos citados anteriormente, existem diversos outros, cada um com a sua particularidade e aplicação. Além dos equipamentos comerciais, encontram-se na literatura trabalhos científicos nos quais o objetivo consiste em desenvolver circuitos eletrônicos voltados para aplicações térmicas. Normalmente, os trabalhos acadêmicos visam suprir algum interesse específico, relativo a alguma pesquisa. Em alguns casos não há a preocupação com custos financeiros, ou robustez e flexibilidade do sistema final. Já em outros, o equipamento é desenvolvido para um determinado fim, visando reduzir custos quando comparados aos disponíveis no mercado.

2.5. Objetivo deste trabalho

Nesse sentido, com o objetivo de desenvolver um sistema para medição de temperaturas de baixo custo, flexível e resistente à intempéries, este trabalho propõe projetar, construir e testar em campo, um sistema eletrônico composto de *softwares* e *hardwares* destinados à análise térmica de fornos industriais.

Basicamente, a idéia é adquirir as temperaturas no interior de um forno por meio de sensores comerciais do tipo Pt-100, localmente integrados a um circuito eletrônico micro-controlado, desenvolvido ao longo deste trabalho. Os dados são transmitidos por meio de cabos a uma central, que os retransmite de forma *wireless* a um terminal operacional. Neste caso, optou-se pelo uso de redes digitais para transmissão de dados, para minimizar problemas relacionados à distância entre os sensores e o terminal final onde são apresentados os perfis térmicos. A central de controle trabalha de forma similar ao modelo comercial OM-320 citado anteriormente, ou seja, pode operar conectada diretamente a rede elétrica ou a uma bateria.

As informações obtidas podem ser transmitidas em tempo real ao servidor, quando operando em modo *on-line*, ou armazenadas localmente, por meio de um *pendrive* ou cartão *SDCard*, no caso de modo *off-line*. Além disso, a central desenvolvida neste trabalho pode trabalhar com um número maior de sensores que OM-320, e por ter uma aplicação específica, ou seja, monitorar a temperatura, o custo final é bem inferior ao modelo comercial.

O terminal ou servidor, conta com diversos *softwares* que gerenciam em tempo real a comunicação com uma ou mais centrais, armazenam as informações em um banco de dados e os apresenta ao operador por meio de relatórios, gráficos e perfis térmicos em tempo real. O sistema permite ainda a inserção de informações por parte do operador e a análise do banco de dados, por meio de uma busca de históricos, a fim de otimizar a operação do forno industrial. Detalhes a respeito do sistema são apresentados na sequência no Capítulo III.

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO DESTINADO AO MONITORAMENTO TÉRMICO DE FORNOS INDUSTRIAIS

3.1. Introdução

O objetivo deste trabalho é desenvolver um conjunto de *hardwares* e *softwares* que possam ser utilizados no monitoramento térmico de fornos industriais com aplicação em fornos destinados à produção de carvão vegetal. Nesse sentido, optou-se pela divisão do sistema eletrônico em três partes: sensores térmicos, central e servidor. Essa divisão é baseada no custo, complexidade e número de componentes de cada parte. Por meio desta divisão, torna-se possível adequar ou modificar o sistema de forma simplificada a cada especificidade de forno.

Os sensores térmicos são os elementos responsáveis pela aquisição da temperatura e dependendo do tipo de forno e monitoramento podem ser utilizados diversos elementos. A escolha do tipo de sensor é baseada na simplicidade de montagem, substituição em caso de defeitos e custo. Além disso, a aplicação leva em conta a faixa de temperatura de interesse e o circuito eletrônico necessário para o condicionamento do sinal.

A central de controle, por sua vez, coordena o trabalho de todos os sensores. Este equipamento é posicionado próximo a um determinado grupo de sensores e é responsável pela coleta periódica do sinal eletrônico de temperatura, armazenamento local de tais informações em uma memória eletrônica e envio dos dados ao servidor. Nesse caso, por meio de uma bateria, a central trabalha de forma contínua, mesmo na ausência de energia elétrica. Para o aumento da autonomia do sistema, a central gerencia ainda o gasto de energia dos sensores.

Por fim, o servidor é responsável pelo monitoramento, armazenamento, organização e apresentação das temperaturas. Este equipamento pode se comunicar com uma ou mais centrais de controle por meio de uma rede sem fio, recebendo informações contínuas de temperatura. Além disso, reporta ao usuário possíveis problemas no funcionamento do sistema como, por exemplo, sensores com defeito, falhas no fornecimento de energia elétrica, entre outros. As temperaturas são armazenadas em um banco de dados local e, se necessário, podem ser enviadas por rede a outros computadores. Os perfis térmicos são apresentados de diversas formas conforme a necessidade de cada empresa.

Assim, o objetivo deste capítulo é detalhar e definir cada parte do sistema de monitoramento térmico.

3.2. Estrutura do sistema para monitoramento térmico

O sistema de instrumentação térmica desenvolvido é basicamente composto de um servidor, que se conecta a várias centrais de controle, cada uma gerenciando a leitura de um conjunto de sensores térmicos, conforme apresentado na Fig. 3.1. A comunicação entre o servidor e a(s) central(is) é realizada por uma rede *wireless*, enquanto que a comunicação entre a(s) central(is) e os sensores é realizada por meio de fios e cabos. Optou-se pela comunicação de dados na forma digital, uma vez que a transmissão dos dados de forma binária é menos sensível a ruídos, reduzida dependência do tipo do cabo usado nas ligações e permite a ligação de forma a criar uma rede de sensores. Além disso, com a leitura do valor da resistência diretamente no sensor, os cabos usados na ligação não interferem no valor lido.

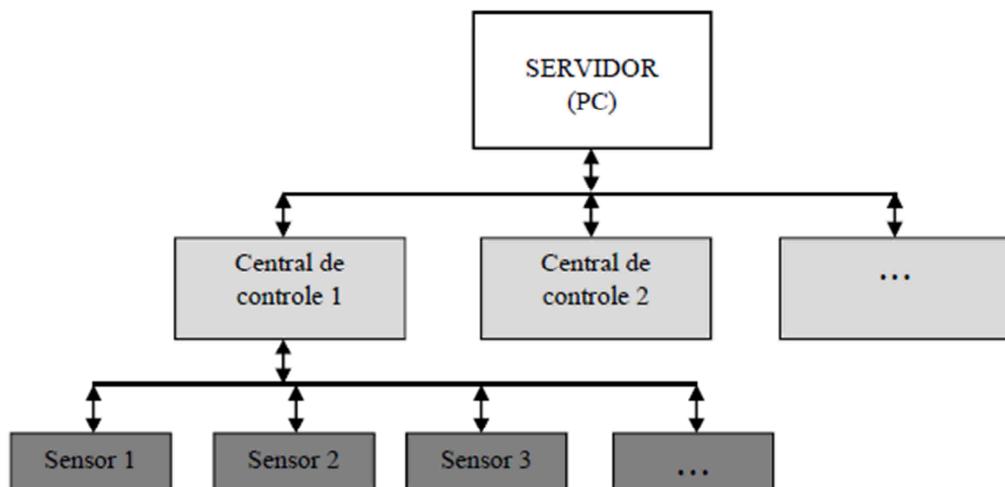


Figura 3.1 – Estrutura do sistema de monitoramento térmico.

O sistema é baseado na coleta de dados de temperatura em tempo real, mesmo na ausência de energia elétrica por um tempo superior a 200 horas. Optou-se neste caso pelo uso de uma bateria recarregável uma vez que determinados fornos industriais usam como fonte de energia combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos. Ou seja, em tais fornos a produção independe do uso de energia elétrica e, em caso de interrupções no fornecimento, o sistema deve continuar funcionando.

A gravação ou registro dos dados pode ser tanto local quanto no servidor, permitindo a leitura e análise dos dados imediatamente e em tempo real. Atualmente o sistema gera o perfil térmico do forno e emite sinais de alerta em caso de diferenças bruscas entre as temperaturas adquiridas e as definidas como padrão. No futuro, tem-se como objetivo fazer com que o sistema controle efetivamente um forno industrial, ou seja, gerencie a produção e seja responsável pela abertura e fechamento de válvulas e chaminés. Nesse sentido, um software foi desenvolvido para gerar informações sobre o processo instrumentado de forma simples e rápida. Com ele, os dados são apresentados na forma de mapas térmicos e/ou gráficos da evolução da temperatura em função do tempo de produção. Além disso, o software pode ser utilizado como ferramenta para analisar e comparar diversos ciclos térmicos, o que permite otimizar a produção, reduzir custos e melhorar a qualidade do produto final.

3.3.Sensores Térmicos

Os sensores térmicos são os elementos do sistema responsáveis pela aquisição das temperaturas do processo, sendo os elementos em maior quantidade no sistema supervisório desenvolvido. Com isso a preocupação com a simplicidade e custo no desenvolvimento deste componente é maior que com as outras partes. O sensor deve também ser preciso e robusto, garantindo confiabilidade nas medições.

O diagrama de blocos do sensor é apresentado na Fig. 3.2. Nele é possível identificar a presença de um micro-controlador (4), que concentra as funções necessárias para a comunicação com a central e leitura de sinais analógicos providos do bloco de condicionamento. O bloco de condicionamento (3), é responsável por adequar os sinais recebidos do elemento sensor ao micro-controlador, permitindo a adequação do sensor a cada aplicação. A fonte de tensão (1) garante a alimentação fornecida pela central em valores necessários ao circuito. A interface de comunicação entre a central e o sensor é responsabilidade do bloco (2). O sensor possui também um conjunto de *jumpers* (5) responsáveis pela configuração de cada sensor na central.

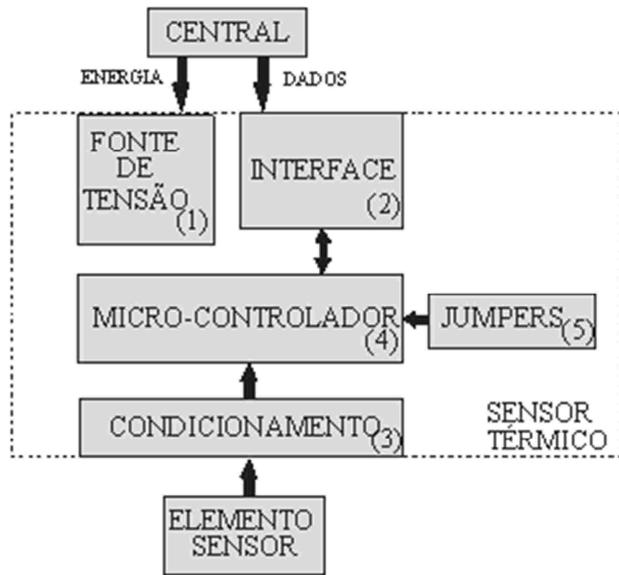


Figura 3.2 – Diagrama de blocos do sensor térmico.

A Fig. 3.3 apresenta a placa desenvolvida para os sensores térmicos. Tais placas foram concebidas e montadas no Laboratório de Transferência de Calor da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Na Fig. 3.3.c estão destacados os blocos do sensor: 1) Fonte de tensão; 2) Interface de comunicação; 3) Circuito de condicionamento; 4) Micro-controlador PIC16F.

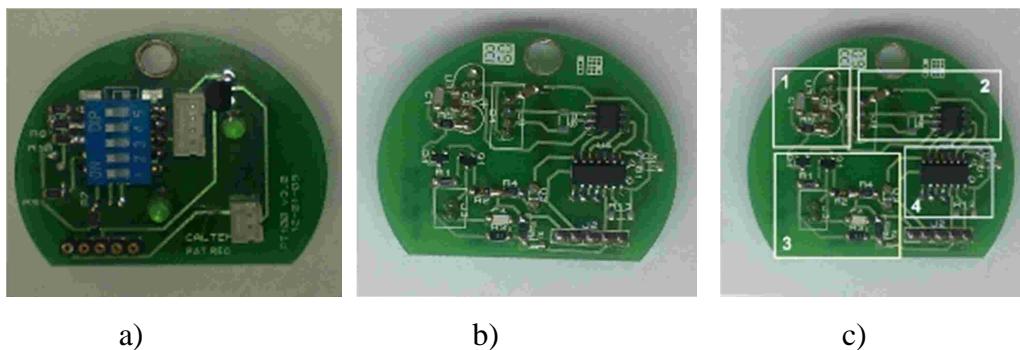


Figura 3.3 – Placa desenvolvida para os sensores: a) Parte superior do circuito; b) Parte inferior; c) Blocos envolvidos no circuito.

O desenho da placa permite que a mesma seja instalada em um Pt-100 encapsulado com cabeçote KNC, de diâmetro de 80 mm ou maior. Na instalação do circuito dentro do cabeçote, os conectores e os jumpers de configuração dos endereços ficam na parte superior, permitindo a instalação e configuração dos sensores em campo, o que agrega maior flexibilidade ao sistema.

Para a medição da temperatura, foi realizado um estudo prévio sobre os elementos sensores compatível com a faixa de temperatura desejada, e que apresentassem robustez de operação. Após estudo, foram identificados que os RTD e os termopares são utilizados em uma ampla gama de aplicações, cada um com suas particularidades. Os RTD's do tipo Pt-100 foram escolhidos como sensor padrão para o sistema de medição, devido sua simplicidade na aquisição da temperatura e imunidade a ruídos externos, além de sua robustez mecânica.

Os sensores RTD são resistências que variam seu valor conforme a temperatura. Para a medição de valores de resistência elétrica é necessário que se converta os valores para unidades mensuráveis. Uma solução apresentada na literatura para medição de resistências é o uso de um circuito RC (resistor-capacitor), que permite gerar frequências diferentes para os valores de temperatura. Outra forma de leitura da resistência com um circuito RC é pelo tempo de carga do capacitor. O problema dessa solução é a não linearidade da resposta do circuito RC, gerando assim a necessidade de 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 a corrente elétrica que passa pelo circuito assume valor constante. Assim, o circuito de condicionamento do sensor térmico é baseado em uma fonte de corrente constante, baseada em um transistor, alimentando o RTD. Medindo-se a queda de tensão do mesmo, tem-se um valor proporcional à temperatura que o Pt-100 está submetido. O uso de uma fonte de corrente com transistor resultou em redução no tamanho do circuito, e no custo do mesmo. Conforme a norma DIN-IEC 751/85, a potência máxima desenvolvida em uma termo resistência não pode ultrapassar 0,1mW, o que na faixa de atuação do sensor equivale a uma corrente máxima de 3mA. Esse valor resulta em uma elevação da temperatura equivalente, resultante do calor dissipado, inferior a 0,3°C.

O bloco de condicionamento também conta com uma fonte de tensão de referência para o conversor ADC do micro-controlador, necessária para melhorar a precisão na leitura do RTD. Vale lembrar que esse módulo pode ser adequado para cada aplicação, podendo ser alterado apenas o valor da referência, com caso de medições com outros tipos de RTD's ou mudanças na faixa de temperatura desejada, ou a troca da fonte de corrente por um amplificador em caso de uso de termopares.

Para a leitura dos valores de tensão apresentados pela resistência, um micro-controlador com conversor analógico-digital (ADC) 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. Da mesma forma, caso necessário maior

resolução na leitura, pode-se substituir por um micro-controlador com conversor ADC de mais bits, ou o uso de um conversor externo enviando os dados de forma digital para o micro-controlador.

A medição da resistência do RTD é feita com o micro-controlador coletando uma quantidade de dados e aplica a eles um filtro para determinar o valor médio da resistência, que posteriormente, é convertida em temperatura por meio de uma curva de calibração. Caso o circuito detecte alguma falha na leitura da resistência do sensor, um código de erro é enviado ao operador informando qual sensor apresenta problema.

A definição de endereços para cada sensor é feita por um conjunto de *jumpers*. O endereço de cada sensor deve ser único para cada central, podendo causar erros na comunicação e danos aos demais sensores em caso de desrespeito a esse detalhe.

Cabos de cobre tetrapolares foram utilizados para conectar os sensores à central de controle. Por meio deles são transmitidos os dados e a energia necessária aos sensores. Esse modelo de cabo é facilmente encontrado no mercado, resultando em um custo menor se comparado com os modelos determinados pela norma EIA-485. Os cabos de ligação utilizados pela norma possuem uma malha de blindagem externa, o que reduz a interferência de ruídos nos dados transmitidos, permitindo aumento na velocidade na comunicação e maior distância. Como resultado, o custo das ligações baseadas nesse tipo de cabo é muito maior. A mudança no tipo dos cabos de ligação gerou a necessidade da redução no volume de informações transmitidas, permitindo ainda a transmissão a longas distâncias, e ainda provocou o estudo de novos tipos de terminadores na linha, para redução do problema de ondas refletidas na transmissão dos dados.

O recebimento dos dados enviados pela central e posterior envio dos dados pelo sensor é realizado pelo bloco de comunicação. A comunicação entre o sensor e a central de controle é realizada de modo *half-duplex*, baseada em uma interface EIA-485. A escolha deste padrão se deu pela robustez apresentada em aplicações em ambientes com altos níveis de ruídos eletromagnéticos, pois a transmissão dos *bits* é feita de forma diferencial entre duas linhas de transmissão, e o ruído interfere nas linhas de modo comum. A interface EIA-485 é desenvolvida com base nos circuitos integrados da família MAX-485, desenvolvidos pela *Maxim Integrated Circuits Inc.*, e o SN75176, fornecidos pela *Texas Instruments*. Tais circuitos integrados são compatíveis pino a pino, variando em características como velocidade de transmissão dos dados ou número máximo de interligações entre sensores.

A troca de informações entre os sensores e a central é baseada em um protocolo de perguntas e respostas, como apresentada na Fig. 3.4, tendo a central como elemento mestre da comunicação. Resultado desta estrutura é que o sensor só fornece as temperaturas quando é requisitado pela central. Dependendo da aplicação prática, os sensores podem ficar ociosos e, neste caso, é interessante reduzir o consumo de energia durante o tempo de espera. Para solução desse problema, além de maior segurança ao sistema, a central fornece energia aos sensores por meio do barramento somente quando necessário, desligando-os durante os momentos de espera.

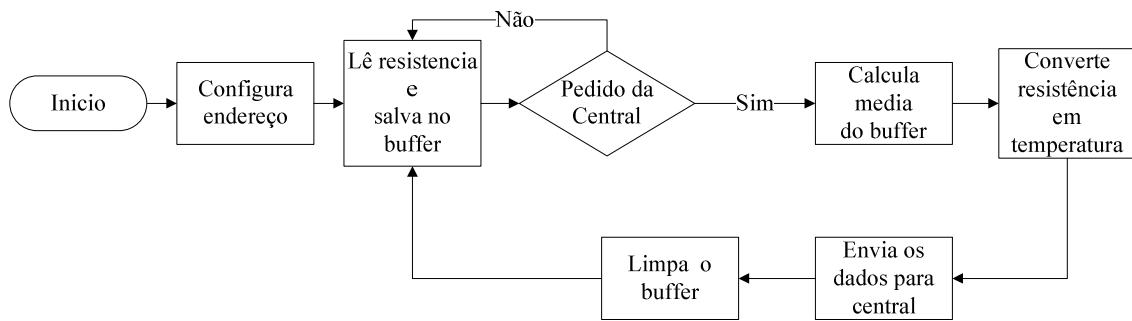


Figura 3.4 – Fluxograma da comunicação entre a central e o sensor.

O sensor, após ser energizado, realiza a leitura de seu endereço, configurado pelo conjunto de *jumpers*, e inicia a leitura por meio do conversor ADC interno dos valores da tensão fornecida pelo circuito de condicionamento. Esses valores são armazenados em um *buffer* circular, sendo os valores antigos substituídos por novas aquisições. Quando o sensor recebe o pedido de temperatura enviado pela central, ele calcula o valor médio das leituras salvas no *buffer*, e converte o valor digital para temperatura conforme uma curva de calibração. O sensor envia à central o valor da temperatura calculada, juntamente com um código CRC (*Cyclic redundancy check*, ou verificação de redundância cíclica) para garantir que o dado recebido pela central não esteja corrompido. O código CRC garante que o dado esteja correto, mas não permite a correção em caso de erro. Após o envio da temperatura, ele limpa os dados presentes no buffer e reinicia o processo de leitura dos valores analógicos pelo conversor ADC.

3.3.1. Calibração dos sensores térmicos

Para testar e avaliar os sensores Pt-100 e determinar a curva de calibração foram utilizados um banho termostático, para as temperaturas entre -10°C e 90°C, e uma célula quente, para a faixa entre 50°C e 450°C. Optou-se pelo uso de dois equipamentos distintos

devido aos seguintes fatores: faixas de temperatura de interesse, aplicação de cada equipamento e disponibilidade dos mesmos no LTCM-UFU. Os experimentos foram realizados com sensores de diâmetros de bainha de 8mm e comprimento de 250 mm. A calibração foi realizada com esse tipo específico de sensor uma vez que o mesmo será aplicado em um determinado forno industrial conforme será apresentado no Capítulo IV. Os equipamentos aplicados na etapa de calibração são apresentados na Fig.3.5.

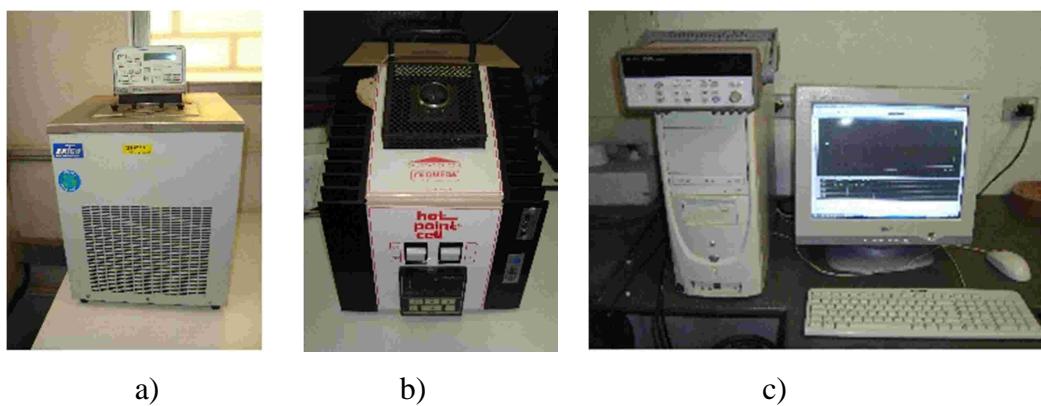


Figura 3.5 – Equipamentos para calibração do Pt-100: a) Banho termostático; b) Célula quente; c) Sistema de aquisição de dados conectado a PC.

A bancada experimental é composta por um banho termostático modelo TCS 200-35, fabricado pela Ertco PRECISION, e uma célula quente modelo L950, da *Omega Engineering Inc.* Para medir as temperaturas envolvidas e a resistência do Pt-100 foi utilizado um sistema de aquisição *Agilent 34970a* e o software *Agilent Benchlink Data Logger*, fornecido juntamente com o sistema de aquisição.

Os Pt-100 foram comprados na Ecil Temperatura Industrial. Neste trabalho, optou-se pela série TS, com bainha de diâmetro 8mm e comprimento de 25cm. A temperatura de referência foi obtida de duas maneiras: usando o *display* dos próprios equipamentos e um termopar tipo T soldado na extremidade da bainha do Pt-100 conforme apresentado na Fig. 3.6.

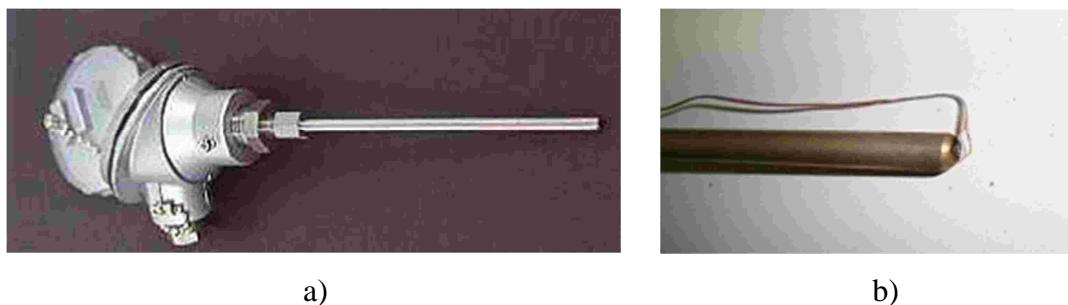


Figura 3.6 – Características do sensor Pt-100: a) Modelo escolhido; b) Bainha do Pt-100 com o termopar de referência soldado com descarga capacitiva.

No processo de calibração do Pt-100, para cada nível de temperatura, aguardou-se um intervalo de tempo próximo a 2 horas, com o intuito que o sistema atingisse regime permanente. Após aquisição dos dados foram selecionados 100 pontos dentro da faixa de temperatura de interesse e, a partir deles, foi definida a média e os desvios máximo e mínimo.

Na Tab. 3.1 são apresentados os valores de temperatura obtidos no experimento com o banho termostático e as variações apresentadas nas leituras. A primeira linha da tabela define os valores lidos no *display* do banho e as demais linhas mostram o desvio máximo, a média e o desvio mínimo da temperatura obtidos por meio do termopar instalado na ponta do Pt-100 imerso no banho.

A Tab. 3.2, por sua vez, apresenta na primeira linha as temperaturas médias e na sequência são definidos o desvio máximo, a média e o desvio mínimo conforme valores de resistência medidos. De acordo com o previsto, a 0°C a resistência definida pelo Pt-100 foi de 100,3 Ohms.

Tabela 3.1 – Valores de temperatura ajustados no banho termostático e os obtidos no termopar soldado a extremidade do Pt-100.

Temp (°C)	-10	-5	0	10	20	30	40	50	70	80	90
Máximo(°C)	-10,03	-5,06	-0,16	9,81	19,77	29,70	39,67	49,64	69,51	79,44	89,39
Média(°C)	-10,07	-5,11	-0,19	9,78	19,71	29,66	39,62	49,60	69,48	79,41	89,37
Mínimo(°C)	-10,11	-5,16	-0,34	9,72	19,66	29,62	39,58	49,56	69,44	79,37	89,34

Tabela 3.2 – Valores de resistência (em ohms) obtidos para as temperaturas ajustadas no banho termostático.

Temp (°C)	-10,00	-5,00	0,00	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	70,00	80,00	90,00
Máximo (Ω)	96,42	98,35	100,31	104,21	108,11	112,00	115,88	119,74	127,45	131,28	135,10
Média (Ω)	96,41	98,35	100,30	104,21	108,11	112,00	115,87	119,74	127,44	131,28	135,09
Mínimo (Ω)	96,41	98,34	100,30	104,20	108,11	111,99	115,87	119,74	127,44	131,27	135,09

Já no processo de calibração na célula quente, devido às dimensões do orifício onde foi inserida a bainha do Pt-100, não foi utilizado o termopar de referência fixado à ponta do Pt-100. Nesse caso, cabe salientar que a célula quente é específica para a calibração de sensores e que as temperaturas de referência consideradas foram aquelas disponibilizadas no display do equipamento. Novamente, foram realizadas medições contínuas de forma a obter o regime permanente para cada nível de temperatura de interesse.

Após aquisição dos dados, foram selecionados novamente 100 pontos durante o regime permanente e calculados os desvios e média. A Tab. 3.3 apresenta na primeira linha as temperaturas médias e na sequência são definidos o desvio máximo, a média e o desvio mínimo conforme valores de resistência medidos.

Tabela 3.3 – Valores de resistência para cada faixa de temperatura ajustada na célula quente

Temp (°C)	100,00	150,00	200,00	250,00	300,00	350,00	400,00	450,00
Máximo (Ω)	138,62	157,41	175,95	194,18	212,15	230,03	247,19	264,13
Média (Ω)	138,57	157,39	175,92	194,15	212,10	229,83	247,16	264,08
Mínimo (Ω)	138,53	157,36	175,88	194,10	212,08	229,77	247,13	264,04

Como informação adicional as medições em ambos os equipamentos (banho e célula quente) foram repetidas para que fosse possível analisar e minimizar as incertezas relacionadas.

Baseado na faixa de temperatura de interesse, conforme a norma IEC 60751, torna-se possível relacionar resistência e temperatura usando um polinômio de segunda ordem. Para determinar a curva de calibração os valores medidos nos experimentos com o banho e a célula quente foram unidos de forma a obter a curva de calibração para a faixa de -20°C a 450°C. A Eq.3.1 apresenta o polinômio obtido por meio dos dados experimentais cuja correlação foi de 99,99%.

$$T(R) = 243,00 \cdot (4,8484 \cdot 10^{-6} \cdot R_{\text{pt100}}^2 + 9,5362 \cdot 10^{-3} \cdot R_{\text{pt100}} - 1) \quad (3.1)$$

A Figura 3.7 apresenta a comparação entre os valores experimentais e calculados a partir da Eq. 3.1.

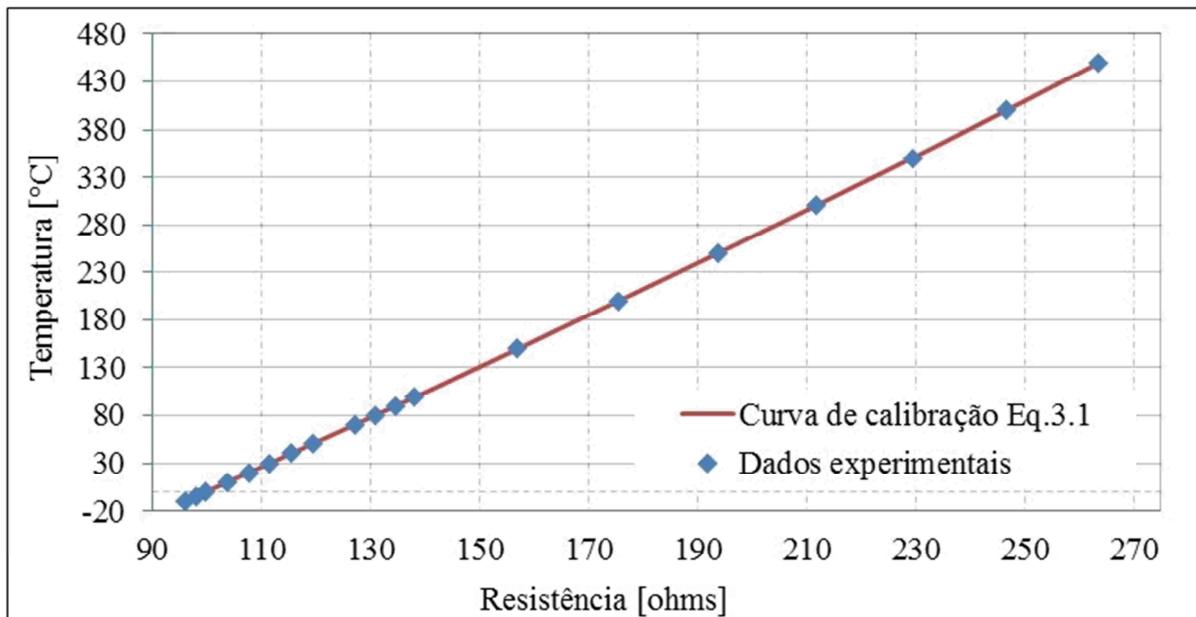


Figura 3.7 – Valores de resistência versus temperatura medida e calculada pelo modelo proposto.

Segundo a literatura, a curva de calibração do Pt-100 é definida pelo modelo de Callendar-Van Dusen (Fluke, 2011), com os coeficientes previstos pela norma IEC 60751. A Fig. 3.8a apresenta uma comparação entre a curva de calibração disponível na literatura e aquela definida neste trabalho a partir da Eq. 3.1. A Fig. 3.8b, por sua vez, define o erro percentual entre as curvas.

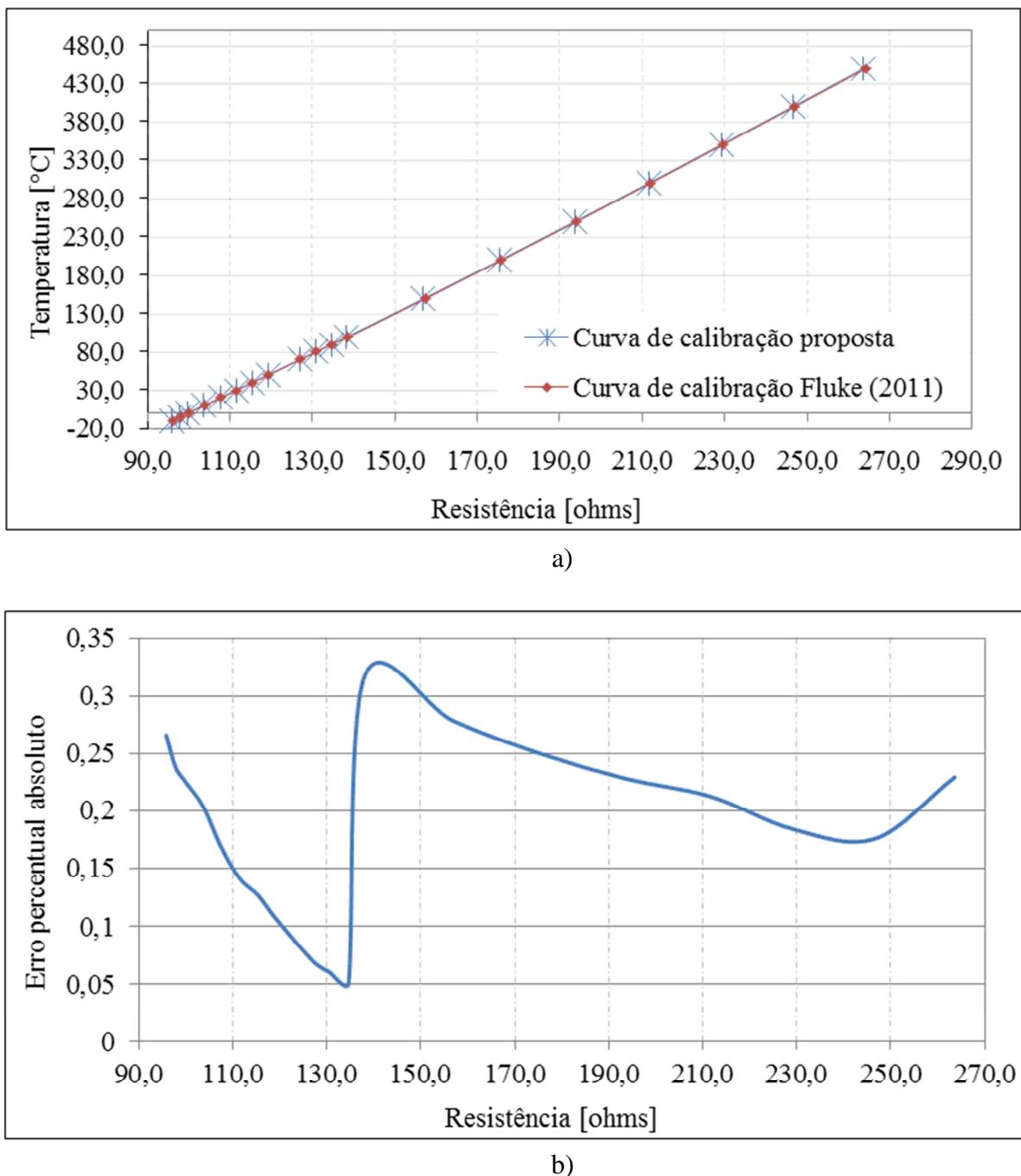


Figura 3.8 – Curva de calibração para o Pt-100: a) Comparaçao entre o modelo de Callendar-Van Dussen (Fluke, 2011) e a curva de calibração proposta neste trabalho; b) Erro percentual absoluto entre as curvas.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que a curva de calibração obtida neste trabalho está em conformidade com aquela prevista na literatura, portanto, ambas podem ser utilizadas para a análise térmica de fornos industriais.

A equação que relaciona a temperatura com a resistência pode ser reescrita relacionando a valor da temperatura com os valores das relações de corrente, tensão e resistência, e da relação de conversão do circuito ADC, resultando na equação apresentada na Eq. 3.4.

$$U_{pt100} = R_{pt100} * i_{cte}$$

$$V_{ADC} = \frac{U_{pt100}}{V_{ref}} * 1023 \rightarrow V_{ADC} = R_{pt100} * i_{cte} * \frac{1023}{V_{ref}} \rightarrow R_{pt100} = \frac{V_{ADC}}{i_{cte} * \frac{1023}{V_{ref}}} \quad (3.2)$$

$$T(R_{pt100}) = A * R_{pt100}^2 + B * R_{pt100} + C \quad (3.3)$$

Substituindo a Eq. 3.2 na Eq. 3.3, tem-se:

$$T(R_{pt100}) = A * \left(\frac{V_{ADC}}{i_{cte} * \frac{1023}{V_{ref}}} \right)^2 + B * \left(\frac{V_{ADC}}{i_{cte} * \frac{1023}{V_{ref}}} \right) + C \quad (3.4)$$

A curva apresentada na Fig. 3.9 mostra a relação do valor digital (V_{ADC}) obtido pelo conversor ADC e a temperatura (T) medida experimentalmente. A Eq. 3.3 foi obtida a partir do ajuste dos pontos experimentais. Tal equação foi implementada no micro-controlador presente no sensor, de forma que as temperaturas já calculadas sejam enviadas para o servidor, e salvas no banco de dados também instalado no servidor. A diferença apresentada entre os valores calculados na Eq. 3.1 e Eq. 3.4 pode ser explicada pela tolerância dos componentes usados, apresentando uma variação menor que 1%.

$$T(V_{ADC}) = 0,0004 * D^2 + 1,2213 * D - 242,69 \quad (3.5)$$

onde,

$$D = \frac{V_{ADC}}{i_{cte} * \frac{1023}{V_{ref}}} \quad (3.6)$$

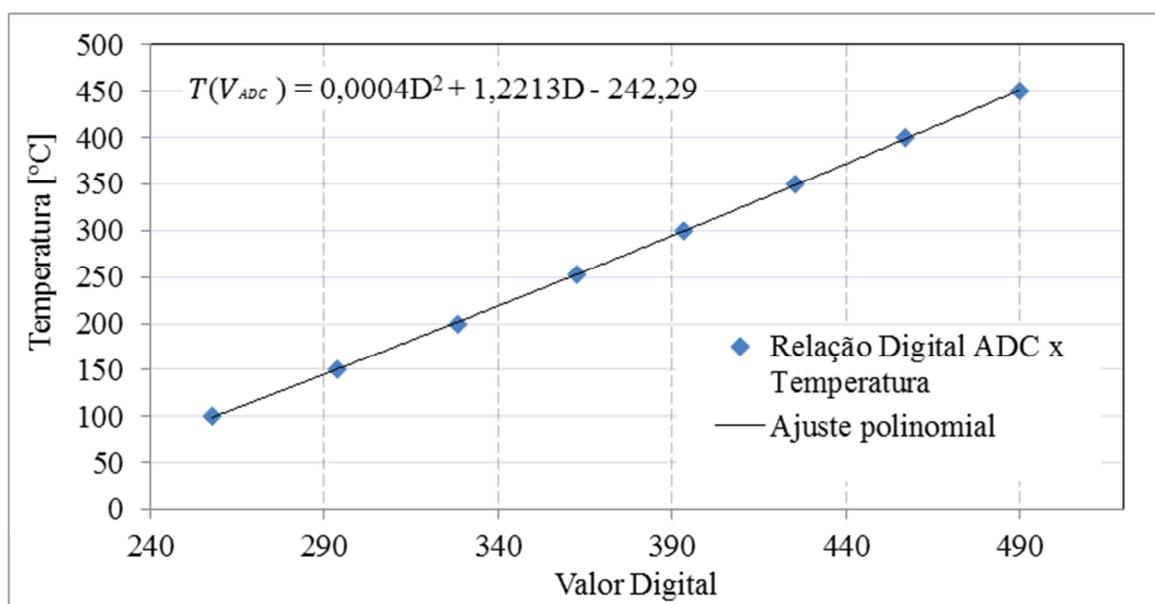


Figura 3.9 – Valores de temperatura e seu valor obtido pelo micro-controlador.

O cálculo da temperatura é realizado no sensor para permitir que, em caso de modificações nos sensores, não seja necessária a atualização do programa e substituição de todos os outros sensores de temperatura presentes no sistema.

Cabe salientar que nos experimentos realizados anteriormente, o bainha do Pt-100 foi totalmente inserida no banho termostático e no interior da célula quente. No entanto, em diversos casos práticos talvez não seja possível inserir toda a bainha na região onde se deseja medir a temperatura. Em um forno industrial como, por exemplo, o destinado a produção de carvão vegetal, este problema ocorreu. Neste tipo de forno, inserindo apenas a ponta da bainha (região da platina) em seu interior, preserva-se a integridade física do restante do sensor evitando que o mesmo seja danificado pelo deslocamento das toras de madeira ou pelo maquinário que faz o carregamento e limpeza dos fornos. Portanto, apresenta-se na sequência um estudo para identificar as incertezas relacionadas a tal prática experimental.

3.3.2. Análise da temperatura no interior de um forno a partir de sensores do tipo Pt-100

Com o intuito de analisar as temperaturas monitoradas por sensores Pt-100 dispostos aleatoriamente em um forno, montou-se o experimento apresentado na Fig. 3.10.

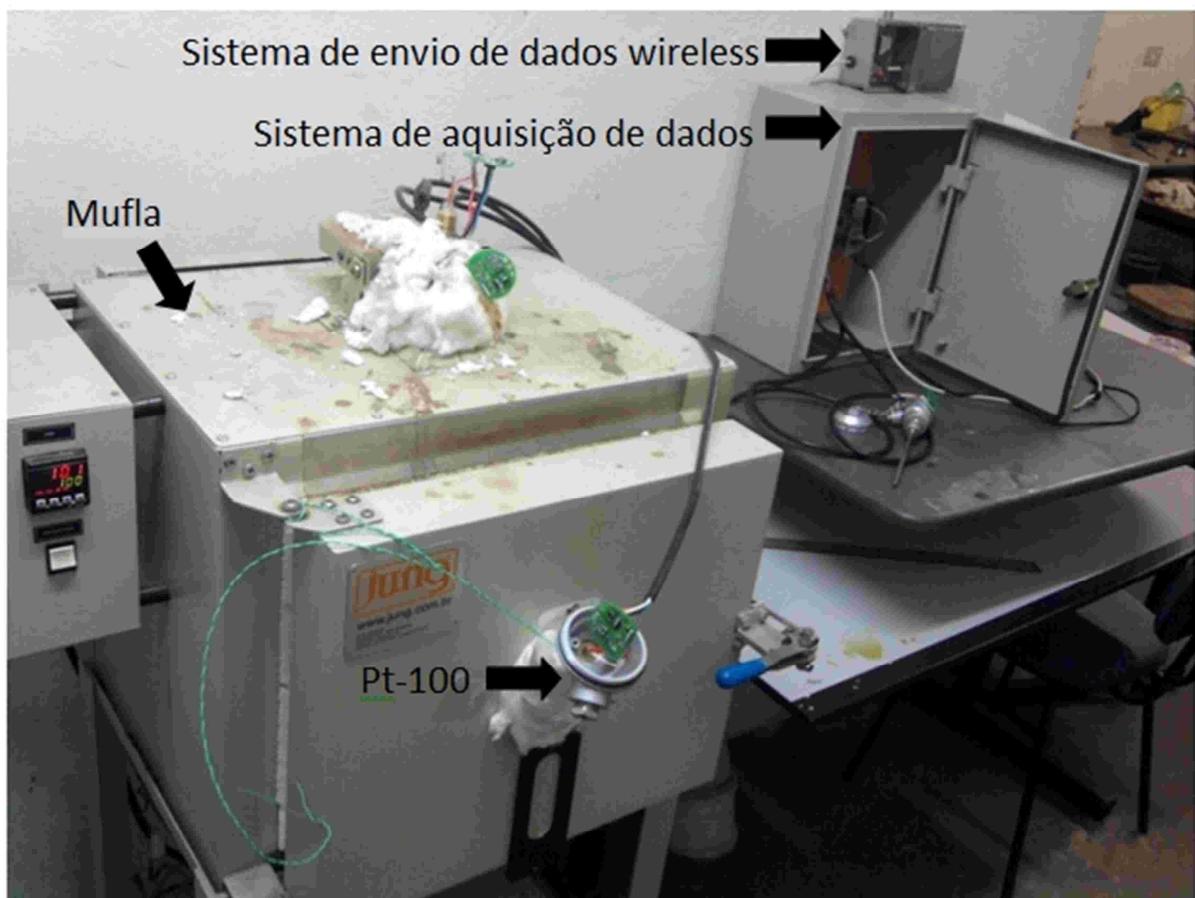


Figura 3.10 – Bancada experimental.

A montagem experimental é composta por um forno ou mufla modelo LF2310, desenvolvido pela Fornos Jung Ltda. A medição das temperaturas e das resistências dos Pt-100 foi realizada com o uso do sistema de aquisição desenvolvido no LTCM-UFU, e as temperaturas foram adquiridas e armazenadas em um computador. A comunicação entre o sistema de aquisição e o computador é realizada de modo *wireless*. No interior do forno, quatro sensores Pt-100, nomeados Pt1, Pt2, Pt3, Pt4 e um termopar de referência, T1, foram dispostos aleatoriamente. O objetivo deste experimento é verificar/analisar a diferença entre as temperaturas medidas aleatoriamente no forno a partir dos Pt-100 e compará-las com uma referência medida a partir de um termopar tipo K fixado em uma amostra metálica. Optou-se neste caso por usar um corpo de prova metálico de volume inferior a 1% da câmara quente. Neste tipo de montagem, configura-se uma condição extrema de trabalho para os sensores, na qual os mesmos ficam a mercê basicamente dos efeitos convectivos e radiativos no interior do forno. Cabe salientar que a mufla não possui recirculadores de ar em seu interior.

A disposição dos sensores Pt1, Pt2, Pt3 e Pt4 são apresentadas na Fig. 3.11.

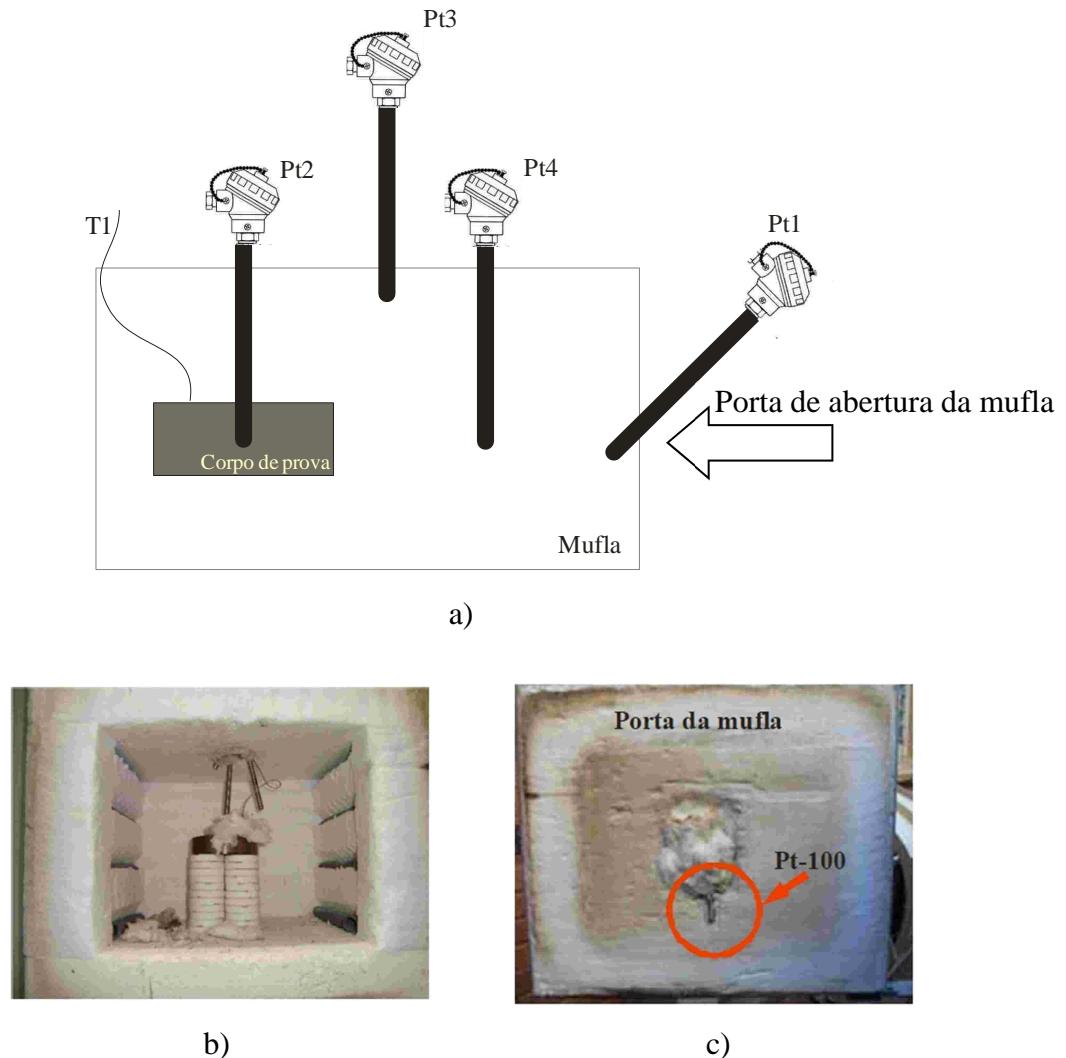


Figura 3.11 – Disposição dos sensores: a) Esquema do posicionamento dos sensores; b) Disposição do termopar e dos Pt-100: Pt1, Pt2 e Pt3 dentro do forno mufla. c) Sensor Pt4 posicionado na porta do forno mufla.

Na montagem experimental, a extremidade do sensor Pt2 foi posicionada dentro do corpo de prova metálico, onde também foi soldado o termopar tipo K, nomeado T1, usado como referência na aquisição da temperatura. Lã de rocha foi aplicada sob o termopar T1 para minimizar a incidência direta de radiação térmica sob o termopar e, consequentemente, garantir que T1 monitore especificamente a variação de temperatura na peça metálica.

O sensor Pt4 foi posicionado de forma que a bainha ficasse totalmente inserida no interior da mufla. O terceiro sensor, Pt3, tem somente a extremidade da bainha inserida na parte superior do forno, com o restante da bainha fora do forno, isolada por lã de rocha. O

sensor Pt1 foi montado de forma semelhante ao Pt3 em uma altura intermediária. Neste caso, a parte externa do sensor também foi isolada termicamente com lã de rocha.

O experimento foi realizado variando a temperatura em passos de 100°C, mantendo cada faixa de temperatura por 12 horas a fim de obter o regime permanente. A evolução da temperatura é apresentada na Fig. 3.12.

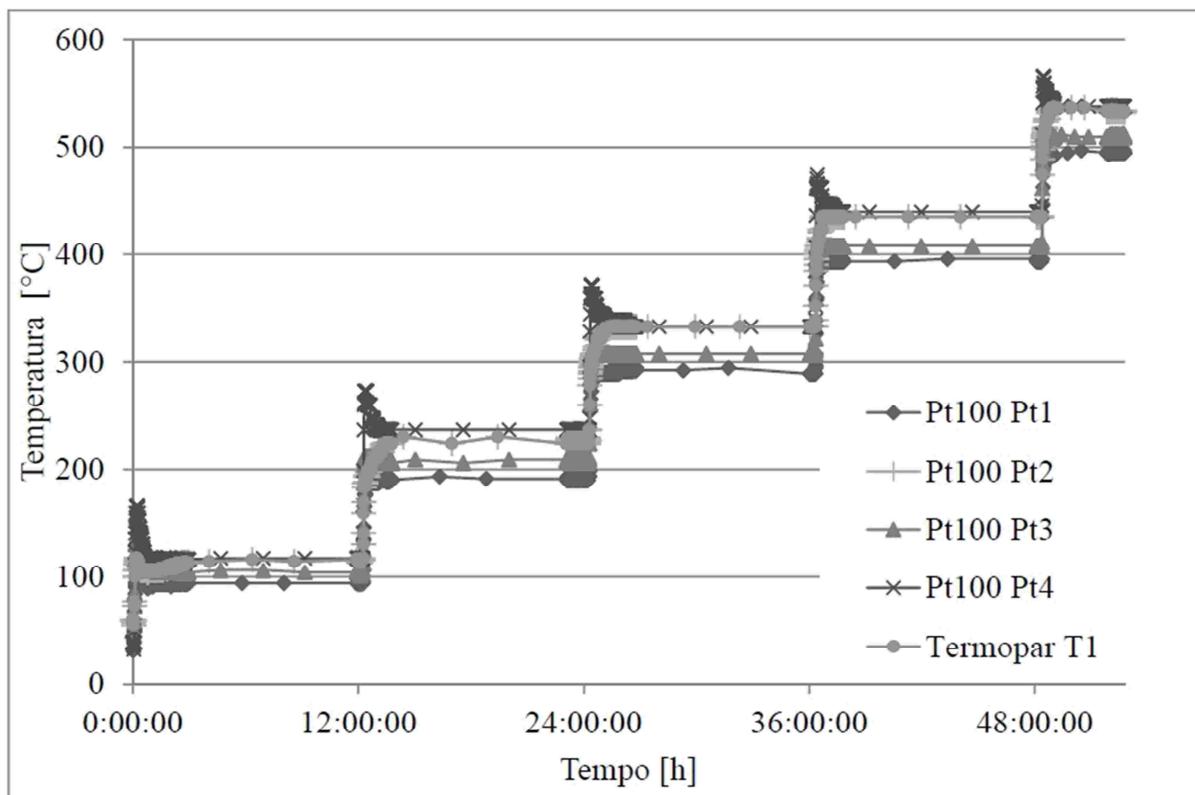


Figura 3.12 – Evolução da temperatura com o tempo.

A mufla utilizada nos testes é micro-controlada e possui oito resistências elétricas, igualmente espaçadas, posicionadas nas laterais internas, contabilizando 4 resistências em cada lado do equipamento. Cada temperatura foi mantida constante por 12 horas, de forma a identificar o erro entre a temperatura da amostra e aquelas obtidas por meio dos Pt-100.

A Fig.3.13 apresenta de forma simplificada os efeitos térmicos no interior da mufla.

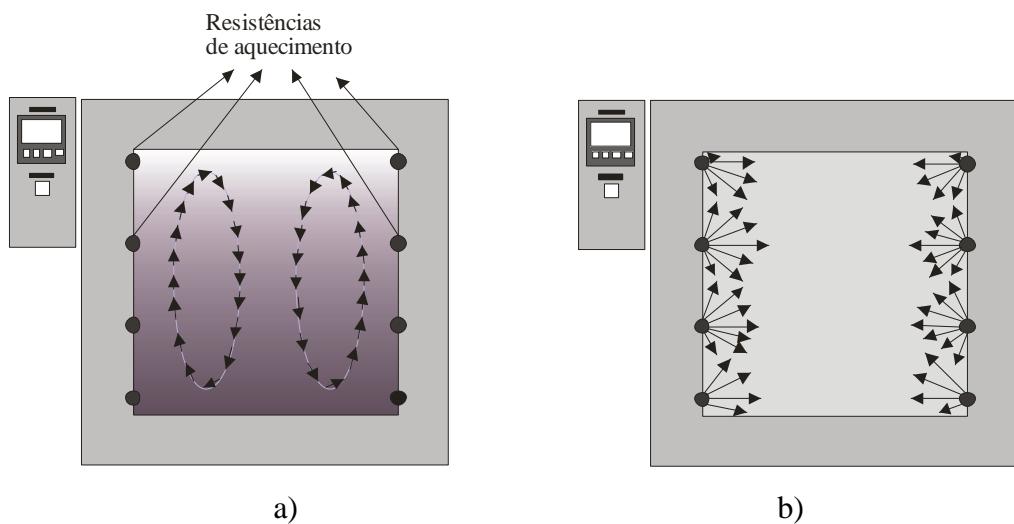


Figura 3.13 – Trocas térmicas no interior da mufla: a) Convecção térmica prevalece em baixas temperaturas; b) Radiação térmica prevalece em altas temperaturas.

Basicamente, em baixas temperaturas, a convecção térmica prevalece no interior da mufla, o que faz com a temperatura na parte superior do forno seja maior do que aquela medida na base. No entanto, com o aumento da temperatura, a radiação térmica passa a ter maior influência, o que torna a distribuição de temperatura mais homogênea no interior do forno.

Voltando o foco para os Pt-100 (Fig.3.12), o sensor Pt2, por exemplo, com a bainha posicionada dentro do forno e extremidade no interior do bloco metálico, apresentou, temperaturas semelhantes àquelas disponibilizadas pelo termopar T1 também fixado à peça metálica.

O sensor Pt4, com a bainha totalmente imersa no forno, também apresentou temperaturas próximas àquelas monitoradas pelo termopar T1. No entanto, o sensor se mostrou mais sensível aos efeitos térmicos, respondendo de forma mais rápida as variações da energia fornecida pelas resistências, resultando nos picos apresentados na Fig.3.12 durante as transições de temperatura.

Os sensores Pt3 e Pt1, que tem apenas suas extremidades no interior da mufla, atingiram temperaturas menores quando comparado aos demais. De fato, tal comportamento também era esperado, uma vez que o efeito aleta se faz presente neste tipo de montagem. Ou seja, o calor fornecido na ponta do sensor se propaga para o restante da bainha, resultado em um menor valor médio para a temperatura medida.

Considerando a temperatura do termopar T1 como referência, apresentam-se na Fig. 3.14 os erros relativos entre os valores monitorados por cada Pt-100. Verifica-se que quanto maior a temperatura, menor o erro entre as temperaturas medidas. Ressalta-se que as temperaturas apresentadas na Fig. 3.14 foram obtidas a partir da média calculada na etapa de regime permanente.

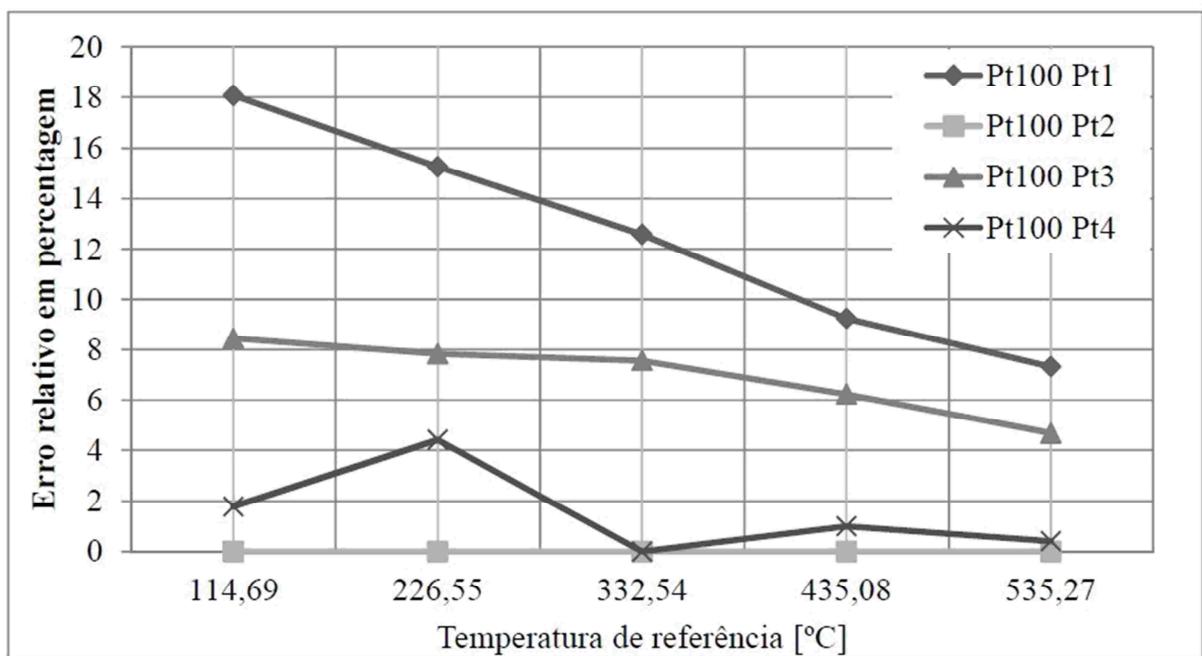


Figura 3.14 – Erros relativos entre as temperaturas obtidas com os Pt-100 e com o termopar usado como referência.

Por meio deste experimento, conclui-se que a precisão na medição da temperatura está diretamente relacionada ao correto posicionamento do sensor no forno. Considerando a temperatura da amostra metálica como referência, notam-se que os erros de medição aumentam quando a bainha do Pt-100 não se encontra totalmente posicionada dentro do forno. Por outro lado, os erros diminuem quando o Pt-100 está com a bainha totalmente imersa no forno ou preferencialmente fixada a um bloco metálico. Diversas Normas Brasileiras, por exemplo a NBR5628, 6479 ou 10636, orientam a fixação de uma placa metálica na ponta do sensor, pois termicamente aumenta-se a área exposta ao calor e que reduz o erro/incerteza no processo de medição da temperatura.

Assim, após a etapa de caracterização e análise dos sensores, apresenta-se na sequência o desenvolvimento da central de controle.

3.4. Central de controle

Para controlar as ações realizadas pelo sistema de aquisição, como a comunicação entre os sensores e enviar os dados obtidos ao servidor e/ou armazená-los localmente, desenvolveu-se uma central de controle.

Para melhor entendimento, a Fig. 3.15 apresenta o diagrama de blocos das funções da central. Alguns desses blocos são implementados no micro-controlador, outros são circuitos próprios responsáveis, por exemplo, pela gravação dos dados. O circuito concebido prima pela maior integração de funções ao micro-controlador. A seguir, apresentam-se as funções de cada bloco da central.

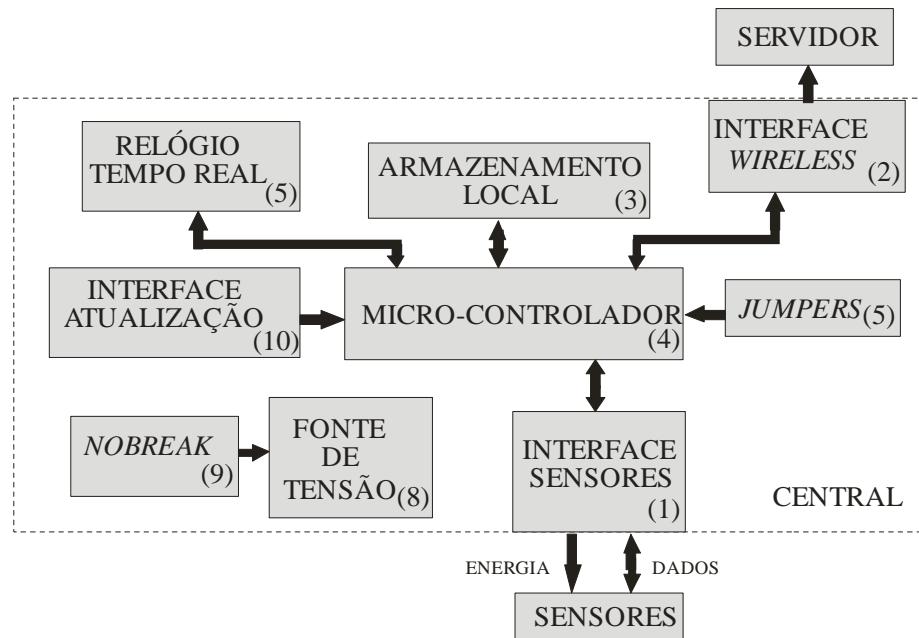


Figura 3.15 – Diagrama de blocos da placa mãe da central.

O micro-controlador (4) é a parte mais importante da central, responsável por diversas tarefas, tais como: gerenciar a leitura dos comandos enviados pelo servidor, envio de dados ao mesmo, controlar a comunicação com os sensores, realizar a gestão da energia consumida pelo sistema de instrumentação e gravação dos dados localmente em caso de falha na comunicação com o servidor. O *firmware*, presente no micro-controlador, é desenvolvido em linguagem C, facilitando a programação e atualização do sistema. Para gravação do *firmware* no micro-controlador, a placa possui uma interface de atualização (10), permitindo adequar de forma fácil as rotinas implementadas no micro-controlador conforme a necessidade.

O relógio de tempo real (5) é o bloco responsável em garantir que os intervalos de tempo para a execução das rotinas sejam corretos e que a leitura das temperaturas sejam

realizadas mesmo com o servidor em modo *off-line*. Com isso, as informações gravadas localmente são acompanhadas do tempo real de leitura o que permite ordená-las corretamente.

A comunicação da central com o servidor e com os sensores é responsabilidade dos blocos de interface. A interface *wireless* (2) é responsável pela comunicação entre a central e o servidor. Ela é composta basicamente pelo módulo de radiofrequência e outros componentes necessários para seu funcionamento. O bloco de interface com os sensores (1) é composto pelo circuito integrado MAX-485, desenvolvido pela *Maxim Integrated Circuits Inc.*, conversor dos padrões de comunicação presentes no micro-controlador para o padrão RS-485, e um circuito responsável pela gestão da energia fornecida aos sensores. Para a comunicação entre o servidor e as centrais, assim como ocorre com os sensores, é necessário que cada central possua um número único de endereço, configurado por um conjunto de *jumpers* (5).

De acordo com a comunicação com o servidor, ou a ausência dela, a central é capaz de operar em modo “ligado” (*on-line*), enviando os dados em tempo real ao servidor via *wireless*, quanto no modo “desligado” (*off-line*), onde a central controla a leitura das temperaturas e as armazena localmente, esperando o reestabelecimento da comunicação com o servidor. Para ambos os casos, a mudança entre os modos é realizada automaticamente pela central. O armazenamento local dos dados (3), é realizado com uma memória *flash*, sendo um *pen-drive* ou um cartão de memória *SDCard*. O registro local dos dados é interessante pois permite que estes sejam recuperados no caso da central estar operando em modo *off-line*.

O fornecimento da energia ao conjunto sensores-central é responsabilidade da fonte de tensão (8). Este bloco está conectado a rede elétrica, convertendo-a para níveis de tensão adequados para o funcionamento do sistema. Para permitir que o sistema continue adquirindo temperaturas mesmo na ausência de energia externa a central conta com um *nobreak* (9). O circuito do *nobreak* é integrado à fonte de tensão, sendo esta também responsável pela manutenção da carga da bateria. O bloco da fonte de tensão também fornece informações referentes à rede elétrica e sobre o nível de carga da bateria.

O funcionamento da placa mãe é exemplificado pela Fig.3.16. A partir do instante em que a central é ligada, o micro-controlador confere a execução de suas funções internas, e realiza a leitura do endereço a partir do conjunto de *jumpers*. É iniciado também o contador de tempo para determinação do modo de operação da central. A central trabalha mesmo na ausência de energia elétrica. Assim, caso a energia esteja disponível a central responde como “conectada” (*online*) e, caso contrário, “desconectada” (*off-line*). A execução de um ou outro

modo de trabalho depende do tempo de resposta do servidor. Caso este ultrapasse um valor pré-estabelecido a central entende que deve trabalhar “desconectada”.

Operando no modo *online*, a central, ao receber um pedido de leitura das temperaturas, energiza o barramento, fornecendo energia aos sensores. Após um tempo de espera para garantir a estabilidade da energia, a central dispara perguntas endereçadas a cada sensor de forma sequencial, espaçadas com o tempo necessário para que o sensor responda com o valor da temperatura. No caso de não receber a resposta, a central reconhece como “sensor com problema”, designando um código de erro para ele. Após a leitura de todos os sensores, a central lê o nível da bateria, e confere a existência de energia na rede elétrica. Após a leitura de todas as informações desejadas, a central reporta os dados ao servidor.

Em operação *off-line*, a central realiza a leitura dos sensores da mesma forma que em operação *online*, com a diferença que, após o término da aquisição dos dados, os dados são armazenados localmente, para que sejam recuperados no instante em que a comunicação seja restabelecida.

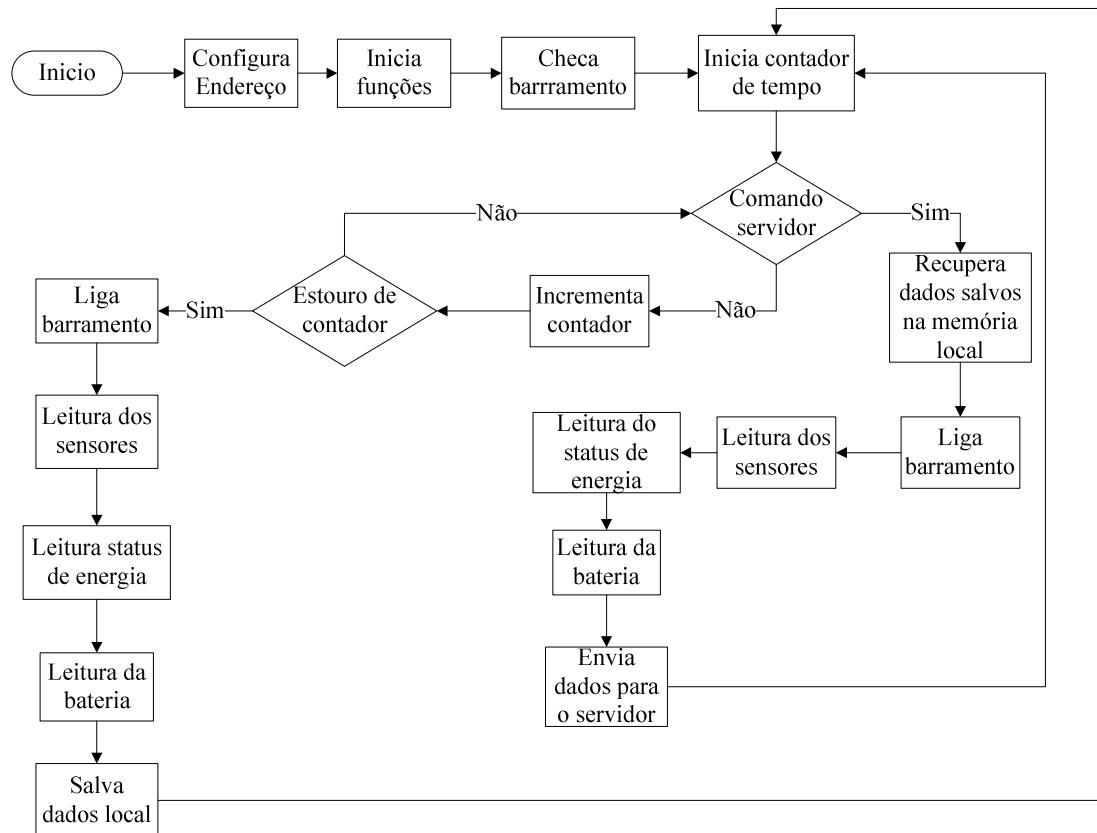


Figura 3.16 – Fluxograma da central.

Para o desenvolvimento do circuito eletrônico da central de controle utilizou-se o micro-controlador R8C/2B, desenvolvido pela *Renesas Technology*, e gentilmente fornecido pelo fabricante. O R8C/2B é um micro-controlador de 16 bits, com três portas de comunicação serial, quantidade suficiente para a comunicação com as outras partes da placa-mãe. O R8C/2B apresenta um circuito de relógio em tempo real interno, o que simplifica e reduz o custo no desenvolvimento.

O registro local dos dados é realizado por meio de um cartão *SDCard*, permitindo o registro de um volume grande de informações com um custo reduzido. O acesso ao cartão é realizado pelo micro-controlador, por meio de uma interface SPI (*Serial Peripheral Interface Bus*). Os arquivos são salvos de forma binária, sendo acessíveis apenas ao micro-controlador, não permitindo a cópia dos dados por meio de um computador. O circuito eletrônico desenvolvido para a central é apresentado na Fig. 3.17. O circuito ainda está na fase de testes, justificando os fios soldados na placa.

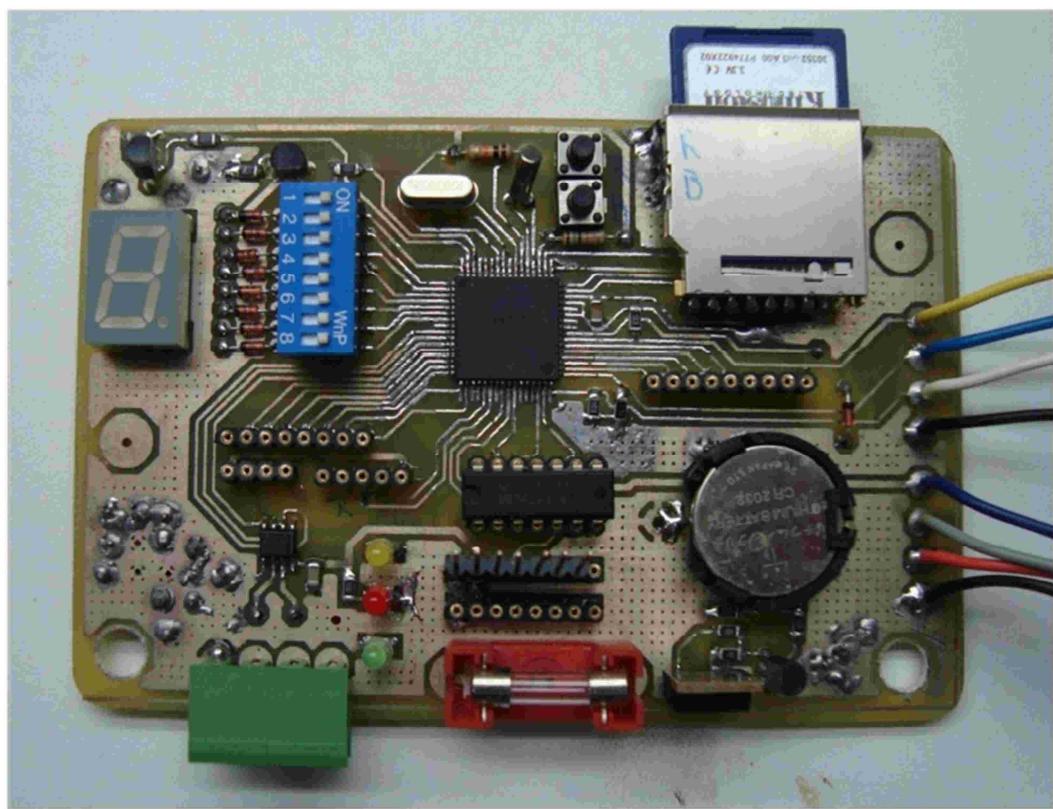


Figura 3.17 – Foto do circuito eletrônico da central.

A comunicação da central com os sensores é realizada por meio de cabos, com os dados enviados conforme a norma EIA-485. Também é responsabilidade da central a gestão da energia enviada aos sensores, ligando e desligando tais equipamentos quando necessário.

A transmissão dos dados entre a central e o servidor é realizada de modo *wireless*, evitando o uso de cabeamento, simplificando a instalação do sistema, reduzindo gastos referentes à instalação e manutenção. A comunicação foi realizada com o uso do módulo de radio frequência modelo BIM-1H, desenvolvido pela *Radiometrix*. A escolha deste módulo foi motivada pela presença do mesmo no laboratório, reduzindo o tempo de desenvolvimento e custo de aquisição dos componentes. O BIM-1H transmite os dados em modo *half-duplex*, possuindo um único canal de transmissão. Com isso, a troca de informações entre o servidor e a central é dividida em intervalos de tempo, determinados pelo servidor e pelo endereço de cada central.

Um problema apresentado no projeto da comunicação *wireless* foi com relação à conexão entre o módulo e a antena. Neste caso, o tipo e o comprimento do cabo de conexão devem ser bem definidos a fim de evitar problemas que reduzam a qualidade do sinal enviado, podendo resultar na queima do módulo transmissor. A solução encontrada foi dividir o bloco de interface *wireless* em duas partes: um na placa mãe, responsável por amplificar os sinais emitidos pelo micro-controlador, possibilitando o envio dos dados a uma determinada distância, e outro no circuito transmissor, contendo o módulo BIM-1H, para ser instalado diretamente na antena, como visto na Fig. 3.18. A interligação entre o circuito transmissor e o circuito eletrônico da central é realizada com fios que possuem custo inferior àquele indicado pelo fabricante.



Figura 3.18 – Destaque da antena com o modulo de comunicação *wireless*.

Além da comunicação entre servidor e a(s) central(is), a interface *wireless* permite comunicação a curta distância, para dispositivos como *notebooks*, *tablets* e *smartphones*,

realizada por meio de protocolo *Bluetooth*, interface popular entre dispositivos móveis, reduzindo gastos com o desenvolvimento. Tais modos de comunicação permitem a instalação do sistema em grandes e pequenas instalações industriais. A comunicação via *Bluetooth* foi possível com o uso de um módulo GP-GC021, fornecido pela *Sure Electronics Inc.*, que possui interface com o micro-controlador por meio de uma porta serial.

A fonte de tensão (8) é a mesma utilizada em computadores, o que reduz custos e simplifica a troca no caso defeito. Para efetuar a recarga da bateria do nobreak é necessária uma tensão de 13.8V, o que para a fonte utilizada é um problema, uma vez que esta não fornece tensões superiores a 12V. A solução encontrada foi o desenvolvimento de um circuito *boost* (elevador de tensão), apresentado na Fig. 3.19, baseado no MC34063C, seguido de um limitador de corrente, o circuito integrado L200C. O circuito do nobreak é capaz de elevar a tensão de 12V, fornecida pela fonte, para 13.8V, com uma corrente limitada a 2A. Mesmo com o uso do MC34063C e do L200C, juntamente com componentes necessários, a escolha da fonte de tensão baseada em uma fonte de computador apresentou custos inferiores aos de uma fonte com transformador para esta aplicação específica.



Figura 3.19 – Circuito elevador de tensão para recarga da bateria de *nobreak*.

Uma característica interessante apresentada pelo R8C/2B é a de não necessitar de um *hardware* dedicado para gravação do *firmware* na memória do micro-controlador. Essa característica simplifica a manutenção e atualização das centrais, por meio de um computador portátil. O acesso à memória interna do R8C/2B é controlada por meio de senhas, impedindo que pessoas não autorizadas modifiquem as informações em seu interior.

A central permite que as temperaturas obtidas sejam salvas localmente e/ou enviadas a longas distâncias por meio de uma rede *wireless* a um terminal. Tal prática se mostrou

interessante devido à simplicidade na montagem do sistema e redução de custos com instalação e manutenção. Por essas características, ressalta-se a importância e o contínuo desenvolvimento deste componente. Trabalhos anteriores, como Mulina (2009), confirmam a preocupação em otimizar o circuito eletrônico e a inserção de novas funções de modo a reduzir custos e aumentar sua capacidade operacional.

3.5. Servidor

O servidor é a parte responsável pelo controle e gestão do funcionamento da(s) central(is), e pelo armazenamento, tratamento e apresentação das informações obtidas pelo sistema supervisório.

O servidor é composto de um computador, com módulo de comunicação *wireless*, no qual estão instalados *softwares* responsáveis pela gestão do sistema e apresentação dos dados obtidos. Para melhor entendimento, a Fig. 3.20 mostra o diagrama de blocos do servidor, distinguindo as partes referentes ao *software* e ao *hardware*.

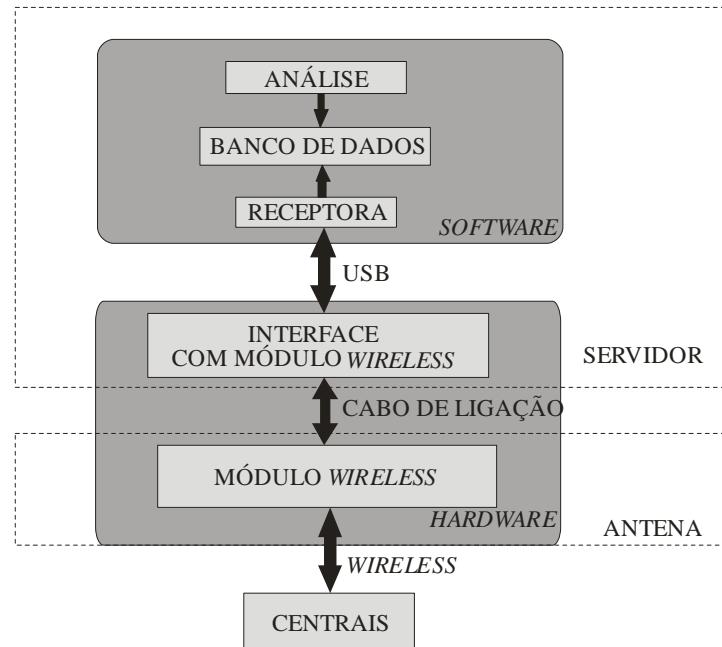


Figura 3.20 – Diagrama de blocos do servidor.

O *hardware* do servidor é composto por uma interface de conexão com o módulo *wireless*, que permite converter os sinais recebidos do computador para o módulo e vice-versa.

A placa da interface de conexão foi planejada com o desenho de uma placa PCI, com mostrada na Fig. 3.21, permitindo o encaixe na placa-mãe do computador. Porém esse circuito

é uma falsa-PCI, sendo a comunicação com o computador via USB, utilizando os conectores internos da placa-mãe. A energia é fornecida pela fonte do computador, aproveitando as alimentações de 5 e 12V. A Fig.3.21 mostra a placa instalada no servidor, e destaca seus blocos funcionais.

A interface de conexão recebe os dados via conexão com uma porta USB interna do computador, com o uso de um micro-controlador PIC18F, da *MICROCHIP*. Esse micro-controlador possui uma interface USB, e permite o desenvolvimento de qualquer tipo de classe de comunicação USB. Uma classe USB é uma distinção entre os vários tipos de periféricos possíveis, distinguindo conforme necessidade de velocidade ou integridade de dados. Por exemplo, um *pendrive* necessita de velocidade e garantia de integridade dos dados, uma impressora necessita de integridade, e um sistema de som de velocidade. Existem classes como a HID (*Human Interface Device*), Áudio, CDC (*Communications Device Class*) e *Mass Storage*. A classe escolhida para a interface entre o micro-controlador e o computador foi a HID, por ser uma classe que permite velocidade e integridade durante a troca de dados.

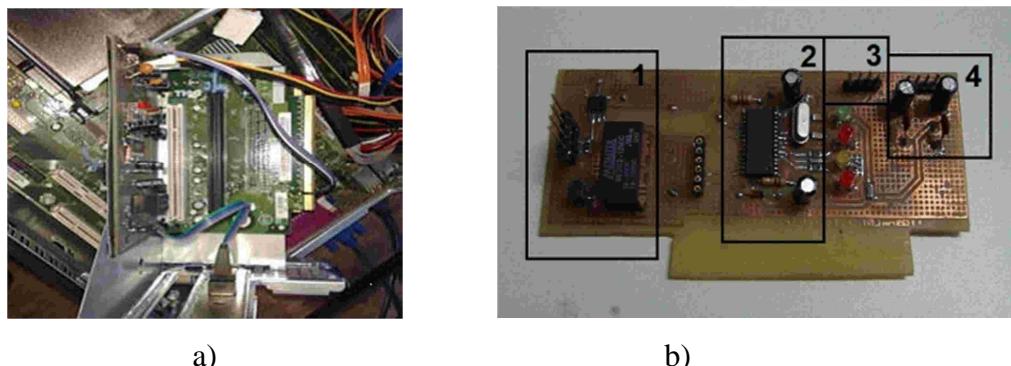


Figura 3.21 – Placa de interface com o módulo wireless presente no servidor: a) Placa instalada no servidor. b) Blocos funcionais da interface – 1) Interface com o módulo wireless; 2) Micro-controlador PIC18F; 3) Conector USB; 4) Conector com a fonte do computador.

No servidor, assim como nas centrais de controle, o módulo *wireless* foi instalado próximo à antena de transmissão, pelos motivos de custo e simplicidade na instalação. Em instalações industriais o servidor e a antena podem estar distanciados em demasia. Neste caso, adotou-se uma comunicação baseada na norma EIA-485, de forma semelhante àquela usada na comunicação entre as centrais e os sensores. Entretanto, no servidor há um fluxo contínuo de dados o que tornou necessário desenvolver um novo modo de seleção entre a leitura e escrita do barramento. Uma das soluções estudadas foi o uso de um micro-controlador no módulo *wireless*, selecionando o sentido de troca das informações entre as partes. Porém as

duras condições de trabalho do módulo *wireless* podem interferir no funcionamento do micro-controlador. A solução adotada foi a seleção do sentido da troca dos dados por meio da inversão da polaridade da tensão nos fios de alimentação. A inversão é realizada por meio de um relé no circuito da interface de conexão presente no servidor. A Fig. 3.22a apresenta a placa do módulo *wireless* com a caixa de proteção enquanto que a Fig. 3.22b apresenta a antena instalada em uma unidade produtora de carvão vegetal.

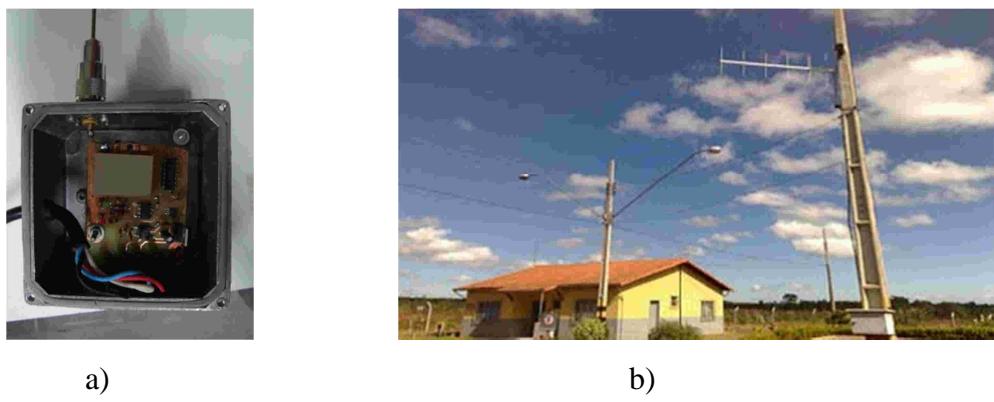


Figura 3.22 – Módulo *wireless* do servidor: a) Placa do módulo *wireless* do servidor; b) Antena instalada responsável pela comunicação entre o servidor e as centrais.

O servidor conta com um pacote de *softwares* responsáveis por gerir a comunicação com as centrais e apresentar as temperaturas adquiridas. Todos os *softwares* foram desenvolvidos em linguagem C++ *Builder*. A escolha da linguagem se deu pelo conhecimento prévio e o acesso às ferramentas e suporte necessários. As ferramentas de desenvolvimento do C++ *Builder* atualmente são integradas ao RAD Studio IDE, desenvolvido pela *Embarcadero*, mesma empresa detentora da linguagem de programação Delphi, linguagem bastante difundida e com grande número de bibliotecas escritas. Essa integração das ferramentas permite a utilização de rotinas já desenvolvidas para o Delphi nos programas em C++ *Builder*, acelerando o desenvolvimento dos *softwares*.

Para armazenar as informações obtidas do processo, um sistema de banco de dados MySQL foi instalado no servidor. O uso de um banco de dados, frente a outras formas de registro, oferece velocidade e segurança no armazenamento dos dados, já que é acompanhado um conjunto de ferramentas próprias destinadas a otimizar a operação. É possível a inserção de um grande volume de informações, e que sejam realizadas consultas de forma simples. A escolha do sistema MySQL se deu por ser gratuito, e atender bem a maioria das aplicações. No banco de dados são armazenadas as temperaturas de cada sensor, e informações referentes ao

funcionamento do sistema, como data e hora de falhas de energia no processo instrumentado, além da qualidade da matéria prima ou do produto final, início e fim de um ciclo de produção, práticas realizadas frente a uma falha na operação, entre outras informações. Pode-se também realizar cópias do banco de dados gerando *backups* de segurança.

A gestão da comunicação do servidor com a(s) central(is) é feita por um *software* dedicado, denominado “Receptora”, que tem as funções de comunicação com a placa de interface com o módulo *wireless*, e a leitura e registro das informações relativas ao funcionamento do sistema supervisório no banco de dados. Para facilitar a detecção de falhas no sistema e permitir a visualização das temperaturas instantâneas, o “Receptora” possui uma tela na qual são disponibilizadas informações de cada sensor conforme apresentado na Fig.3.23.



Figura 3.23 – Tela de execução do *software* “Receptora” com as informações de cada sensor.

Na tela do *software* é possível visualizar as últimas mensagens relativas ao funcionamento do sistema supervisório, como falhas no funcionamento da interface com o módulo *wireless* e na leitura de alguma central. Além disso, o *software* disponibiliza o número da central referente à última leitura, o intervalo de tempo entre as aquisições de temperatura e indica se há problema em algum Pt-100 ou no circuito de leitura dos mesmos.

O *software* “Receptora” possui dois arquivos de configuração, o primeiro determina a sequência e o endereço das centrais a serem lidas, quantidade de sensores e o tempo de espera entre a leitura de cada central. O uso de um arquivo para definição do comportamento do sistema aumenta sua flexibilidade, permitindo adequá-lo para cada aplicação. O segundo arquivo possui as configurações do banco de dados no qual são armazenados as informações referentes a operação do sistema. Ressalta-se que os arquivos de configuração estão em formato de texto, evitando assim a necessidade de *softwares* especiais para a edição destes.

Para a comunicação entre o *software* “Receptora” e o *hardware* de interface com o módulo *wireless* foi utilizada uma DLL (*Dynamic-link library*) desenvolvida pela *MICROCHIP*. Essa biblioteca permite o rápido desenvolvimento da comunicação, fornecendo rotinas de alto nível para o uso do micro-controlador USB. No entanto, a mesma só pode ser instalada no sistema *Win 32bits*.

Para a apresentação dos resultados, outro *software* foi desenvolvido, denominado “Análise”. Ele permite o acesso às informações sobre o processo de produção no qual as centrais estão instaladas. As funções presentes neste *software* resultam em um histórico da produção, permitindo assim o posterior estudo do forno industrial. Como são diversos os processos no qual o sistema desenvolvido pode ser instalado, os dados a serem salvos também mudam, gerando a necessidade da adequação do *software* e do banco de dados ao processo instrumentado. No caso do forno apresentado no Capítulo IV, informações como tipo e qualidade de madeira usada como matéria prima, início e fim do ciclo de produção, quantidade de carvão e tijô produzidos, além de informações referentes às falhas do processo, como fissuras detectadas nas paredes dos fornos, podem ser inseridas de forma rápida e intuitiva, através de menus de acesso rápido. O desenvolvimento do *software* foi acompanhado pelos próprios funcionários que utilizariam o sistema, gerando uma interface amigável aos operadores.

A apresentação das temperaturas pelo *software* “Análise” pode ser realizada de duas formas: por meio de gráficos de evolução da temperatura com o tempo, e por meio de perfis térmicos. O uso de perfis térmicos se torna interessante uma vez que é possível a identificação de problemas de forma rápida, apenas visualizando o padrão das cores. No software, o perfil térmico é gerado a partir de um plano transversal no interior do forno estudado, conforme a linha tracejada apresentada na Fig. 3.24. Conforme a posição real dos sensores no forno, tem-se o posicionamento no plano transversal, o que gerar o perfil térmico por meio de renderização gráfica. Detalhes sobre o forno instrumentado serão apresentados no Capítulo IV.

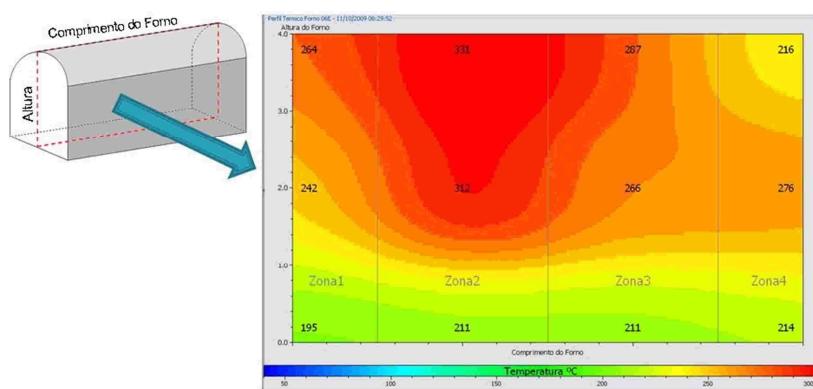
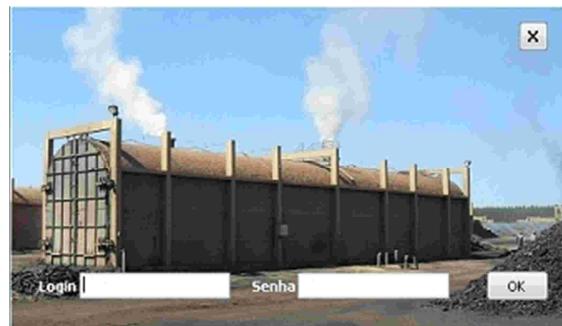


Figura 3.24 – Plano de cálculo e perfil térmico obtido utilizando o *software* Análise.

O *software* permite desde uma simples consulta rápida ao perfil térmico, por meio da seleção dos dados de interesse, ou mesmo a geração de animações gráficas indicando a evolução da temperatura conforme o tempo de produção.

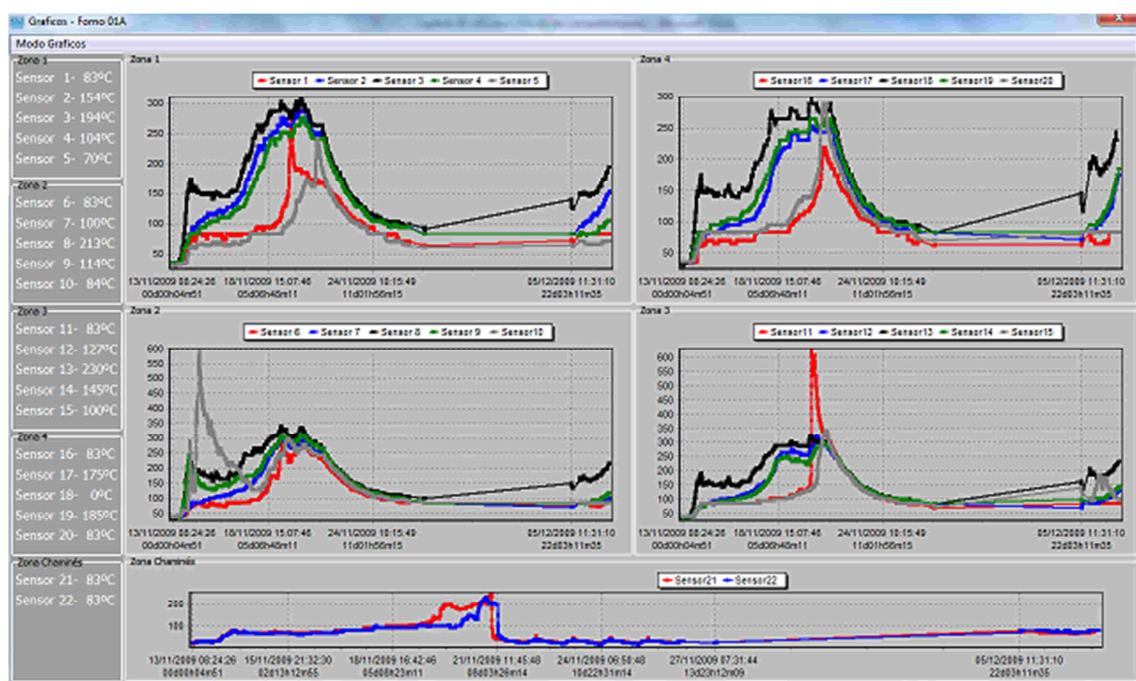
Com o intuito de ser uma ferramenta de análise, o *software* permite a consulta do histórico das temperaturas obtidas pelos sensores. Como ferramenta de controle do forno, a apresentação dos dados em tempo real possibilita a ação rápida frente a uma falha na produção. A Fig. 3.25 mostra algumas janelas do *software* “Análise” personalizado para o processo de produção de carvão vegetal apresentado no Cap. IV.



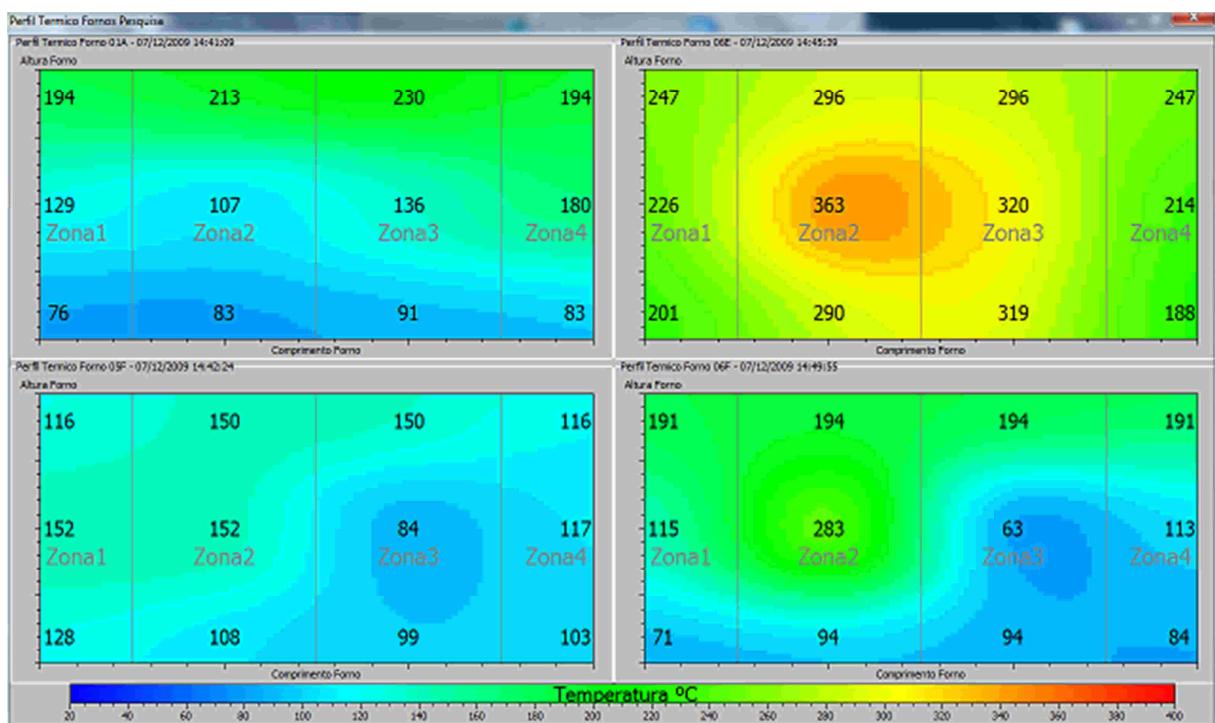
a)



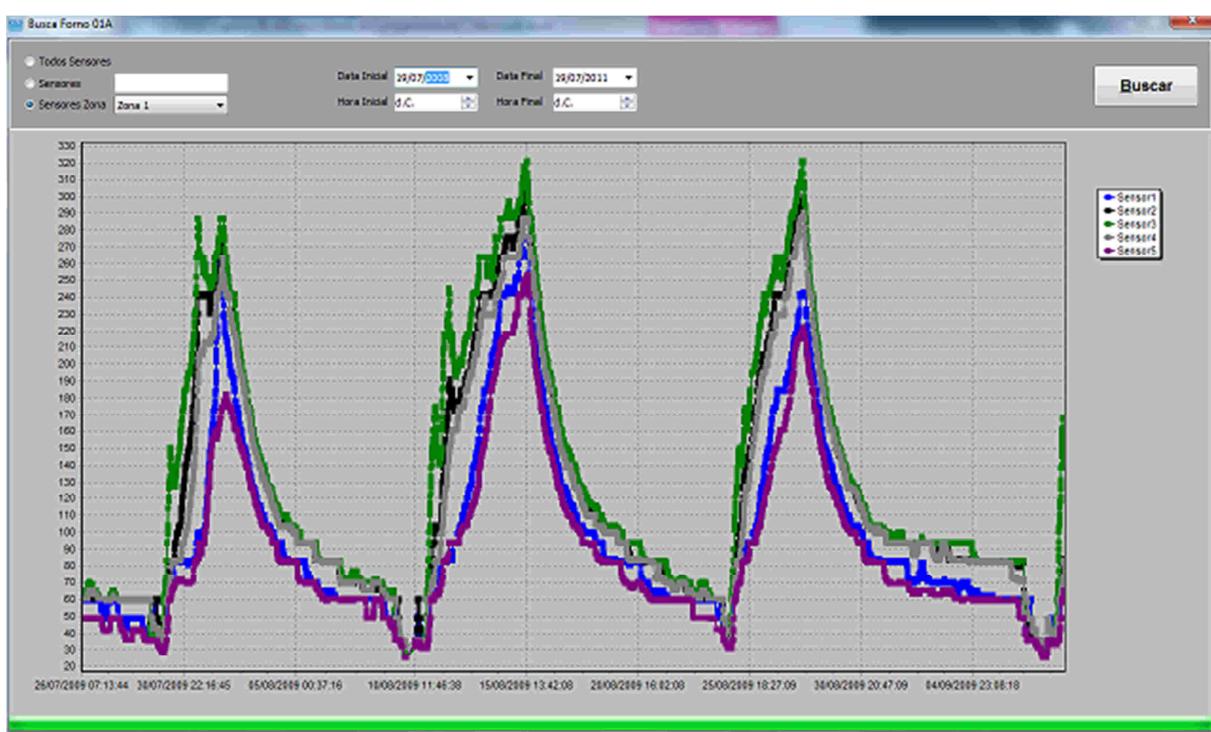
b)



c)



d)



e)

Figura 3.25 – Janelas da segunda versão do *software* “Análise”: a) Janela inicial de *login*; b) Seleção da central (forno) de interesse e da função desejada; c) Apresentação das curvas de temperatura obtidas durante o ciclo de produção em execução; d) Perfis térmicos obtidos; e) Histórico de produção: busca por data e sensor.

Ao iniciar o *software*, é realizada uma busca com relação aos arquivos necessários para a execução. Caso algum arquivo não seja encontrado, a inicialização é cancelada e o erro é informado. Com o aplicativo inicializado, a tela inicial requer um usuário e senha, permitindo o controle do acesso às informações. Os usuários podem ser considerados visitantes, com acesso apenas a temperatura momentânea, operadores, com acesso ao histórico de temperatura, e permissão de inserção de informações sobre o processo, e administradores, com acesso completo ao *software*, com possibilidade de gerar relatórios, cópias do banco de dados, animações por meio dos perfis térmicos e configurar o posicionamento dos sensores no forno.

Uma vez acessado o programa, é apresentada a tela com as centrais instaladas. Nos fornos destinados a produção de carvão vegetal (Capítulo IV) foram instaladas quatro centrais, o que corresponde a instrumentação de quatro fornos. Selecionando o forno de interesse, é possível acessar as funções do aplicativo por meio de um *menu*, no qual o usuário pode optar por visualizar as temperaturas em tempo real em cada zona do forno (Fig.3.25c),

ou ainda, analisar os mapas térmicos dos quatros fornos simultaneamente, conforme apresentado na Fig. 3.25d.

Para a análise e estudo dos ciclos de produção, o *software* “Análise” permite que sejam feitas consultas das temperaturas conforme a data, intervalo de tempo de interesse, sensores, assim como apresentado na Fig. 3.25e. Neste caso, o usuário pode comparar diversos ciclos de produção, analisar os valores médios, máximos e mínimos de temperatura, além de confrontar tais dados com informações da produção, tais como: qualidade do produto final, falhas durante a produção, entre outros. No menu, as informações de produção devem ser inseridas pelo usuário durante cada ciclo conforme indicado na Fig. 3.26. Informações como quantidade de matéria prima inserida no forno, qualidade do produto final, falhas e imprevistos no ciclo devem ser informadas. Para que não seja um trabalho cansativo, algumas informações podem ser inseridas com apenas um clique, acelerando a aprendizagem.

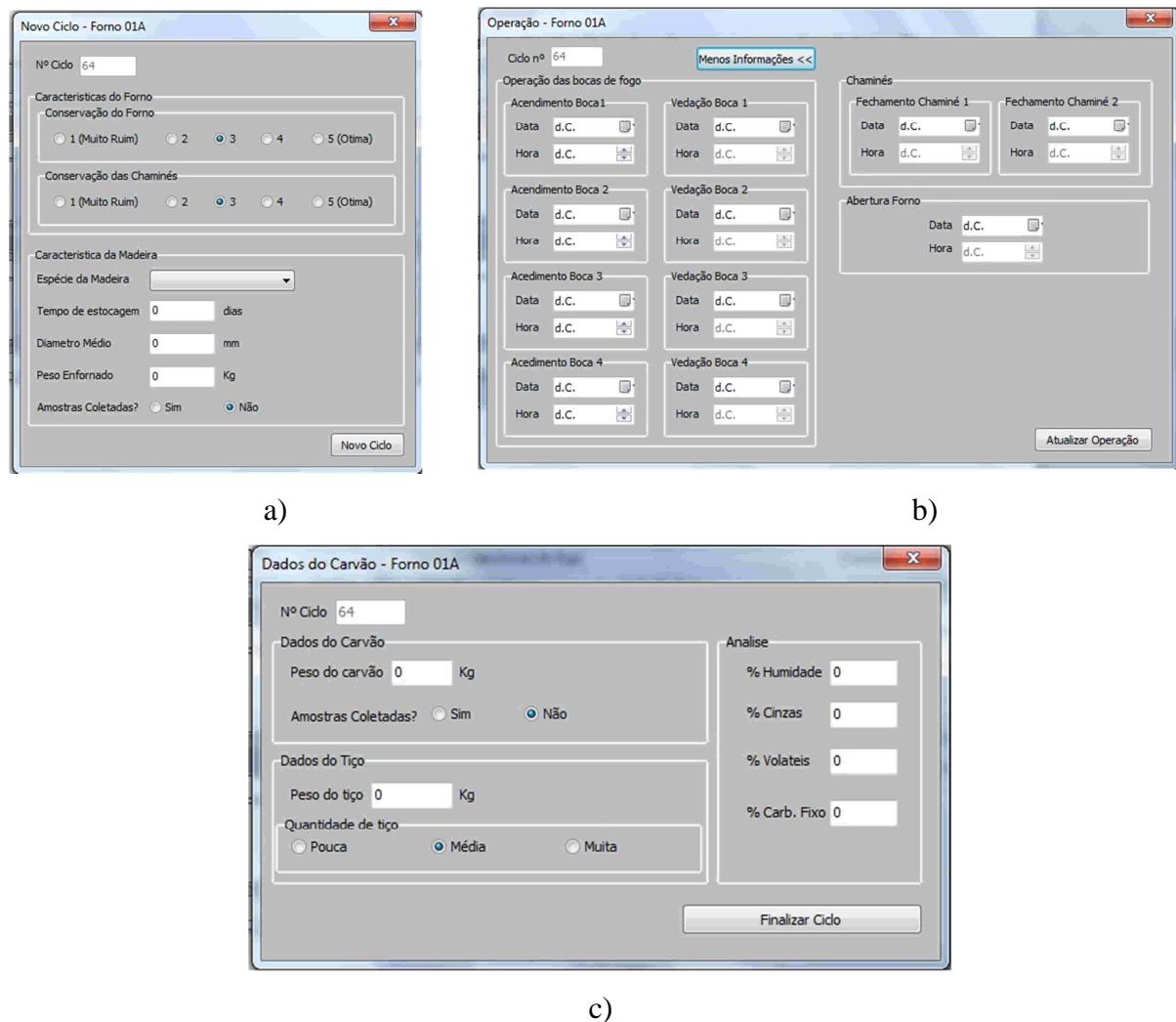


Figura 3.26 – Janelas do *software* Análise para inserção de dados sobre a produção.

As ferramentas administrativas do aplicativo permitem gerar um *backup* do banco de dados. Além disso, os arquivos podem ser exportados também em formato de texto, permitindo o uso em outros aplicativos de preferência, como o Excel, participante do pacote de ferramentas Microsoft Office.

Uma função interessante do *software* “Análise” é a geração de animações baseadas em uma consulta realizada pelo usuário. Essa animação apresenta a evolução da temperatura no intervalo consultado, de forma a possibilitar a visualização contínua dos perfis térmicos.

A versão atual do *software* “Análise” ainda não permite o acesso aos dados via *internet*. Para análise e estudo dos dados de produção é necessário que o interessado esteja operando o servidor fisicamente, ou por acesso remoto, ou tenha uma cópia do banco de dados. Neste caso, o *software* perde em interatividade, impedindo que o diretor da empresa, por exemplo, possa ter acesso às informações em tempo real em qualquer lugar (no aeroporto, por exemplo). Essa funcionalidade está em estudo, devendo ser inserida em futuras versões do *software*.

Assim, para analisar o desempenho do sistema de monitoramento térmico desenvolvido, apresentam-se no Capítulo IV detalhes envolvendo a montagem e uso do mesmo em fornos destinados à produção de carvão vegetal.

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DO SISTEMA ELETRÔNICO EM FORNOS DESTINADOS À PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

4.1 Introdução

Para testar e verificar as vantagens e desvantagens do sistema eletrônico proposto neste trabalho, os equipamentos foram instalados em fornos industriais destinados a produção de carvão vegetal.

Por meio de uma parceria/projeto de pesquisa firmado entre a Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da UFU, Votorantim Siderurgia Unidade Aço-Florestal e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), tornou-se possível desenvolver, montar, instalar e testar o sistema eletrônico. Nesta pesquisa o CNPq contribui com R\$122.000,00 e a Empresa forneceu um auxílio de aproximadamente R\$417.000,00.

O projeto teve início no ano de 2007, quando o autor deste trabalho ainda era aluno em iniciação científica no Laboratório de Transferência de Calor (LTCM-FEMEC-UFU). A tarefa de conceber e projetar o sistema eletrônico de monitoramento térmico de fornos industriais, apesar de complexa e trabalhosa, se tornou extremamente prazerosa por envolver a aplicação prática de diversos conceitos acadêmicos, o desenvolvimento em laboratório e a montagem em campo em uma grande empresa nacional. O projeto na época era coordenado por um professor da FEMEC, que contava com a colaboração de um pós-doutor, um aluno de mestrado e três estudantes de graduação. Foram várias as viagens até a unidade produtora de carvão vegetal (UPC), que se encontra situada a 400 quilômetros da cidade de Uberlândia.

Diversos foram os problemas identificados e que por várias vezes estes foram resolvidos em campo, por meio de escritórios improvisados sob sol ou chuva, durante o dia ou noite, como apresentado na Fig. (4.1).



Figura 4.1 – Montagem do sistema em campo.

Ressalta-se que diversas idéias concebidas em laboratório foram modificadas e até mesmo aprimoradas para funcionar de forma efetiva na prática. Como exemplo, citam-se os ajustes no suprimento de energia elétrica para os circuitos eletrônicos. Basicamente, o sistema fora concebido para aceitar pequenas flutuações na rede elétrica, conforme dados medidos em laboratório. No entanto, durante a montagem e testes dos equipamentos em campo, verificou-se que o suprimento de energia elétrica na UPC era muito instável, além disso, hora havia energia hora não, chegando até mesmo a faltar durante dez dias consecutivos. Nesse sentido, como o processo de produção de carvão independe do uso de energia elétrica, o sistema eletrônico teve que ser aperfeiçoado para corrigir as oscilações elétricas e economizar energia quando estivesse em modo *stand-by*. Foram realizados diversos testes até encontrar um conjunto bateria e recarregador adequado para o perfeito funcionamento do sistema mesmo na ausência de energia.

O sistema de comunicação entre sensores térmicos, centrais de controle e servidor também passou por diversos ajustes. No projeto inicial, todas as partes do sistema seriam interligadas por fios e cabos. No entanto, devido às grandes distâncias entre o servidor e as centrais, que no caso extremo chegou a mais de um quilômetro, tal prática se tornou inviável. Por meio de uma análise de custos, contatou-se que a comunicação *wireless* seria financeiramente mais viável com maior facilidade de instalação.

Após a concepção e montagem industrial do sistema eletrônico nos anos de 2007 e 2008, o conjunto de *hardwares* e *softwares* se mostrou confiável e seu funcionamento estável. Assim, os dados medidos por meio da análise de diversos ciclos de produção de carvão foram usados na empresa para aprimorar o processo produtivo e, do ponto de vista acadêmico, deram origem a alguns trabalhos, dentre os quais, citam-se: uma dissertação de mestrado - Oliveira (2009); quatro trabalhos científicos completos publicados em eventos nacionais e internacionais - MULINA et al. (2009), OLIVEIRA et al. (2010), MAIA et al. (2010), MULINA et al. (2010); quatro trabalhos de conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da UFU - Mulina (2009), Figueira Júnior e Pessoa (2009), Cunha (2009) e Pereira e Cardoso (2010). São previstas ainda ao menos duas publicações em revistas científicas para o próximo ano além de uma tese de doutorado.

Na sequência, apresentam-se os fornos industriais nos quais foram instalados os equipamentos. Além disso, são apresentados resultados obtidos por meio do sistema eletrônico de monitoramento térmico.

4.2 Instrumentação térmica de fornos RAC220

A Fig. 4.2 apresenta o forno retangular destinado à produção de carvão vegetal denominado RAC 220 (R = retangular, AC = Acesita, 220m³ de madeira enfornada).



Figura 4.2 – Forno RAC220 típico.

As dimensões do forno são de 26m x 4,0m x 3,6m (comprimento, altura e largura respectivamente) e 1,2 m de raio no teto. O forno, em suas extremidades, possui duas portas de aço revestidas com materiais refratários, por onde são inseridas as toras de madeira e retirado o carvão vegetal. A escolha da instalação do sistema eletrônico em fornos destinados

à produção de carvão vegetal foi motivada pelos recursos financeiros disponíveis e ausência de tecnologias direcionadas ao processo, como apresentado por Oliveira (2009).

O processo de produção de carvão vegetal na Empresa ocorre mediante uma prática padrão que é, por sua vez, baseada na experiência prévia dos técnicos em carbonização. Determinados parâmetros, tais como a cor da parede do forno, aspecto das fumaças e temperatura nas portas, são analisados visualmente e por meio de pirômetros no intuito de controlar o processo produtivo. Os técnicos fazem uso de sensores infravermelho para medirem a temperatura nas portas do forno e definirem o momento adequado para a abertura e retirada do carvão. Assim, a qualidade do carvão produzido é reflexo da experiência do operador que, ao observar o forno, determina a ação a ser tomada. Cabe salientar que durante a produção os técnicos em carbonização percorrem toda a linha de produção, que corresponde a uma área superior a 3km², tentando identificar e sanar falhas operacionais. Outros detalhes sobre o processo de produção de carvão vegetal podem ser identificados nos diversos trabalhos citados no item 4.1.

Assim, neste trabalho, optou-se pelo uso de 22 sensores Pt-100, posicionados conforme a Fig. 4.3. Para o monitoramento do forno RAC, os sensores foram distribuídos longitudinalmente em quatro zonas térmicas, contabilizando cinco Pt-100 por zona. A quantidade de sensores é justificada pelas dimensões do forno e a disposição destes segue a seguinte sequência: quatro sensores nas paredes (dois próximos a base e outros dois logo acima em uma região intermediária) e um no teto do forno. Foi ainda alocado um sensor em cada chaminé do forno.

No decorrer do desenvolvimento e pesquisa, optou-se por remover os sensores do teto e alocá-los na parede, acima dos demais. A mudança diminuiu os riscos de instalação dos equipamentos, uma vez que o teto é construído apenas com alvenaria e pode ceder mediante a qualquer tipo de carga excedente. Tal procedimento reduziu custos quanto a instalação dos cabos e permitiu realizar reparos nos sensores mesmo durante o processo de produção de carvão vegetal.

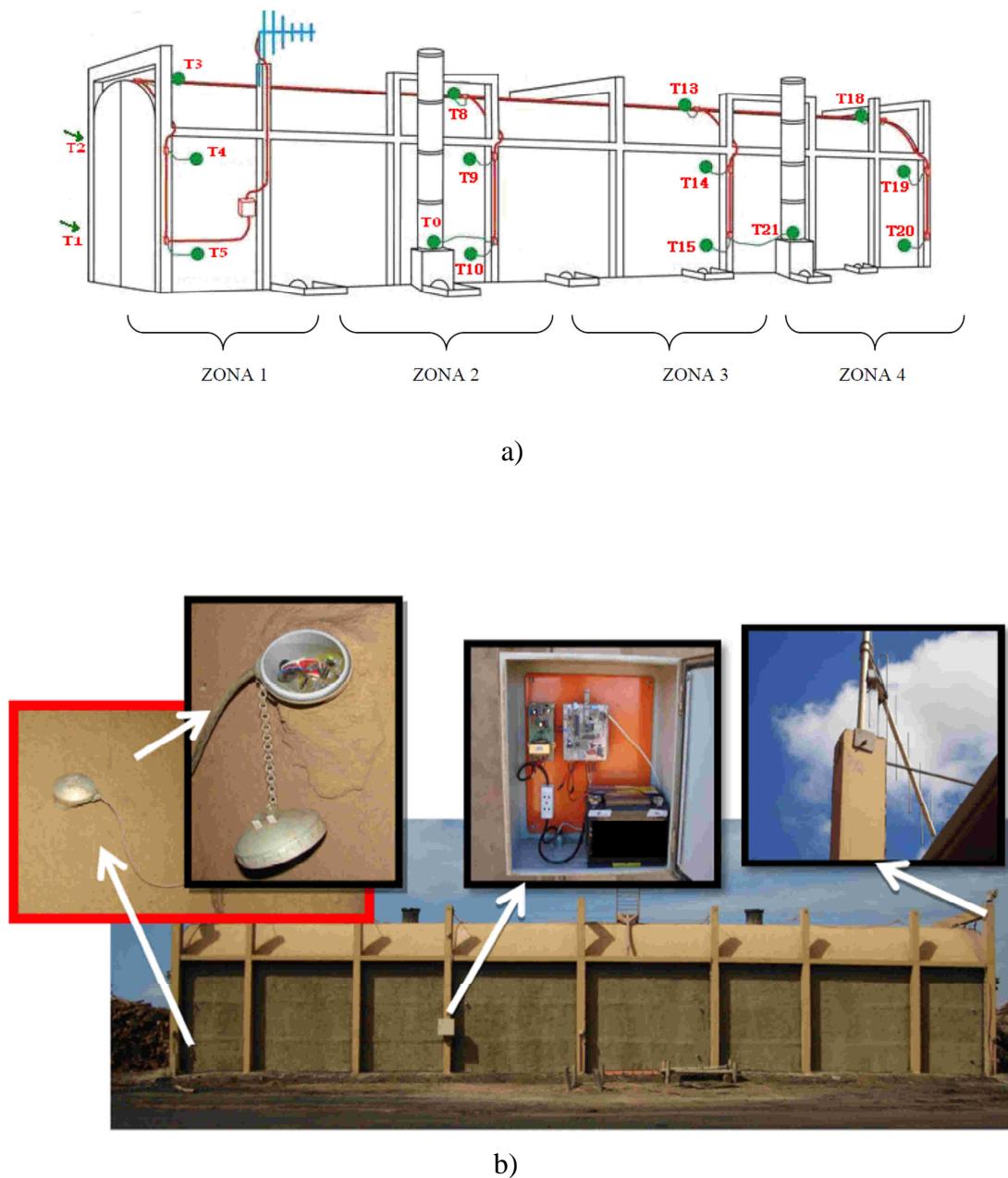


Figura 4.3 – Forno RAC 220: a) Esquema da instrumentação térmica de um forno RAC220 e a divisão em zonas térmicas; b) Forno real instrumentado.

Nesse capítulo serão apresentados detalhes a respeito das vantagens e desvantagens decorrentes da instalação do sistema eletrônico nos fornos destinados à produção de carvão vegetal. Propõe-se ainda realizar comparações entre os resultados obtidos a partir dos fornos instrumentados e aqueles submetidos à prática padrão da Empresa.

4.3 Análise térmica de ciclos de carbonização a partir do sistema de monitoramento térmico proposto neste trabalho

A partir da montagem do sistema nos fornos RAC e dos diversos resultados obtidos e publicados nos trabalhos científicos citados previamente, apresenta-se neste capítulo um estudo envolvendo o comportamento térmico dos fornos durante diversos ciclos de produção de carvão vegetal.

Oliveira (2009) verifica que o processo de carbonização da madeira é dividido em três partes: secagem, onde a madeira enforrada desprende grandes quantidades de vapor d'água. Nesta etapa a temperatura interna do forno permanece próxima à 100°C. Na sequência tem início o processo de pirólise, ou seja, a madeira começa a ser carbonizada e acontece a transformação da madeira em carvão vegetal. Nessa etapa o controle da temperatura é de extrema importância devido às dimensões do forno e carga térmica em cada zona.

Durante a pirólise a temperatura influencia diretamente na qualidade e propriedades químicas do carvão vegetal. Por meio da análise de diversos trabalhos científicos, verifica-se que o teor de carbono fixo no carvão vegetal é inversamente proporcional à temperatura de carbonização. Segundo Oliveira *et al.* (2009), para produzir carvão com carbono fixo superior a 75%, padrão exigido pela siderurgia nacional, a temperatura final de carbonização do forno RAC220 deve ser de aproximadamente 340°C.

Após a pirólise tem início o processo de resfriamento do carvão. Nesta etapa, o carvão permanece dentro do forno, que é mantido totalmente lacrado, para que não haja entrada de ar. Conforme a prática padrão da Empresa e experiência dos carbonizadores o ciclo de produção é finalizado quando a temperatura na parte externa das portas permanece próxima à 60°C. Normalmente esta última etapa tem duração média de oito dias, enquanto que um ciclo completo de produção em um forno RAC220 varia de 12 a 14 dias conforme a quantidade e diâmetro das toras de madeira enforradas.

A Fig. 4.4 apresenta a relação entre temperatura e tempo de produção em um forno RAC 220. A partir das temperaturas monitoradas por meio do sistema supervisório proposto neste trabalho, verificam-se claramente picos de temperatura na zona 3, após 20 horas de ciclo. Além disso, analisando as temperaturas de uma forma geral, nota-se uma grande variação entre as temperaturas monitoradas na base do forno e aquelas medidas na parte superior, próxima ao teto. Em alguns casos a diferença de temperatura é próxima à 100°C.

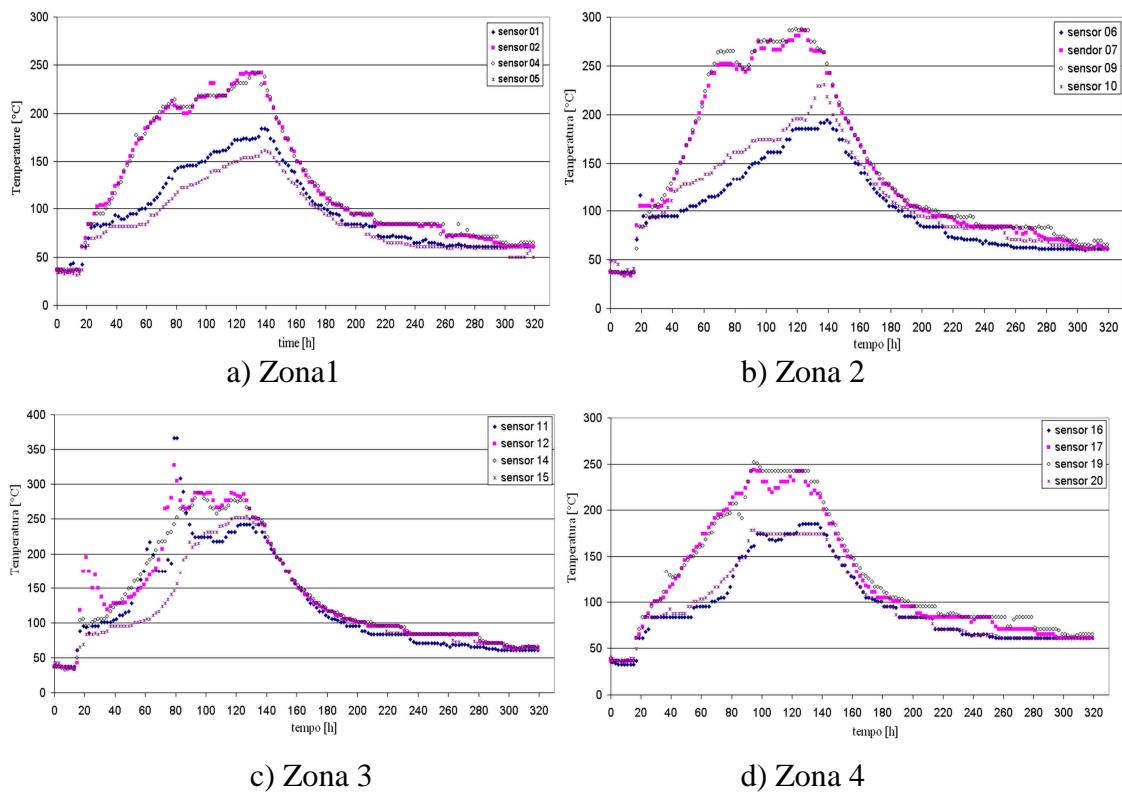


Figura 4.4 – Curvas de carbonização de um forno RAC 220 monitoradas em cada zona térmica do forno RAC220.

Adaptado de Oliveira (2009)

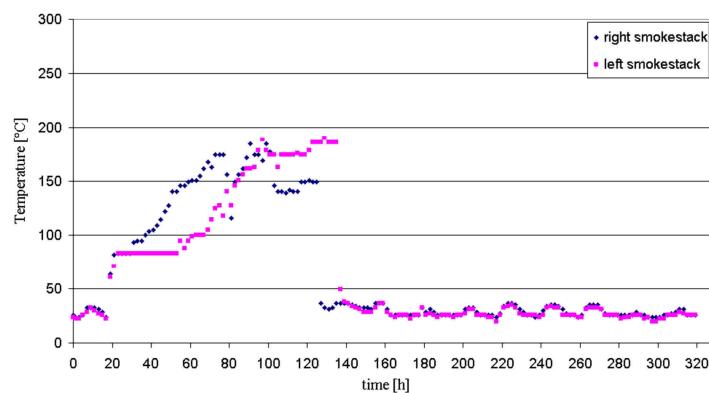


Figura 4.5 – Temperaturas obtidas nas chaminés de um forno RAC 220

Fonte: Oliveira (2009)

Analisando as temperaturas nas chaminés é possível identificar a transição da fase de pirólise (20h até 130h) para a fase de resfriamento (depois de 130h). A Fig. 4.5 apresenta o início do resfriamento quando os canais de fumaça são lacrados e a temperatura reduz bruscamente para valores próximos à temperatura ambiente.

A partir do software apresentado no Capítulo III, Oliveira (2009) propõe uma análise do ciclo a partir da exibição dos mapas térmicos no interior do forno conforme apresentado na Fig. 4.6. Neste caso, 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. O eixo das ordenadas (y) representa a altura, 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. 4.3a. Neste caso, segundo Oliveira (2009), verificam-se que os picos de temperatura identificados na zona 3, após 20 horas de ciclo, tiveram grande influência na carbonização, pois o perfil interno de temperatura do forno se tornou bastante irregular. Analisando a Fig. 4.6j, verifica-se que a simetria térmica entre as zonas térmicas só foi recuperada após 170h de ciclo na fase de resfriamento do forno.

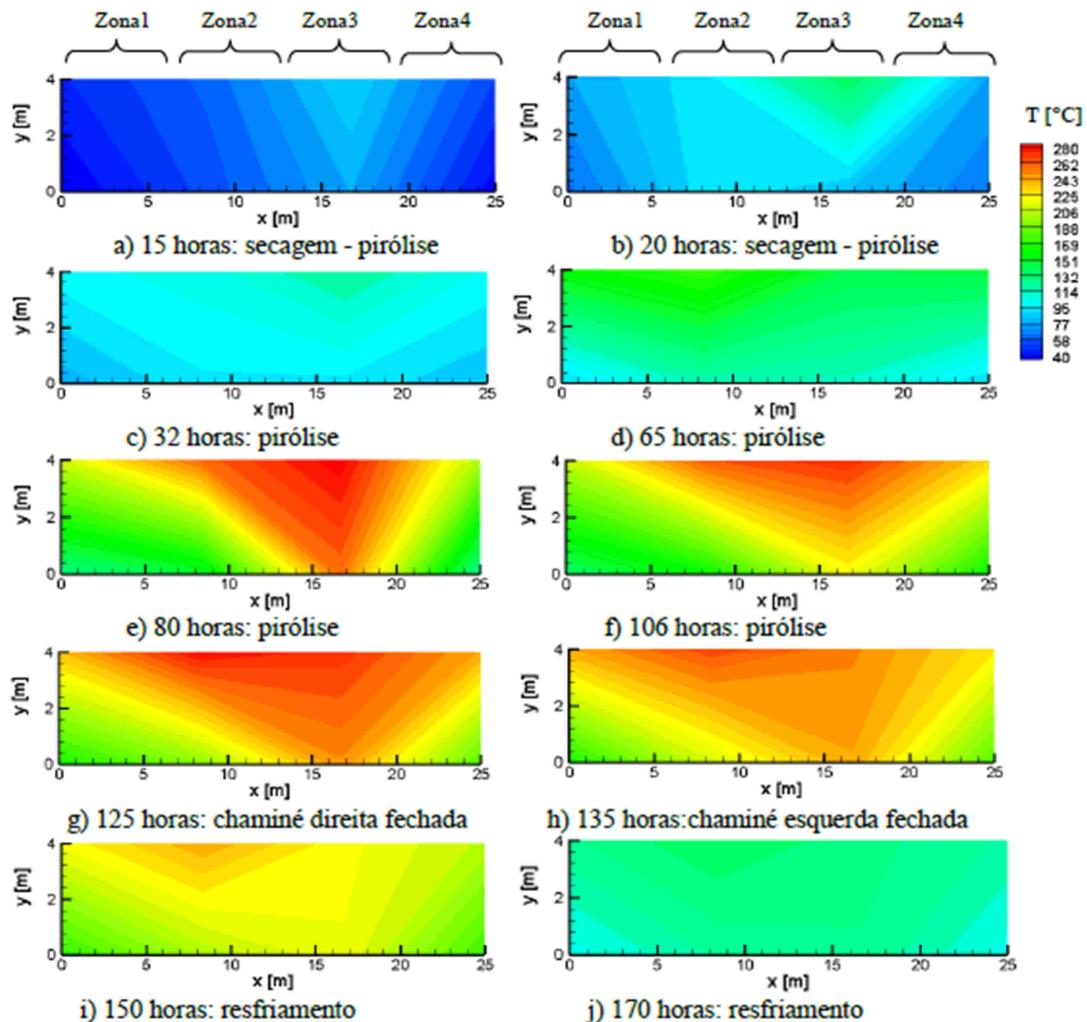


Figura 4.6 – Evolução dos campos térmicos no interior de um forno RAC 220 (Mulina *et al.* (2010)).

Analisando outros ciclos de carbonização, notam-se que irregularidades térmicas são freqüentes na produção e têm interferência direta na qualidade do carvão produzido. Normalmente tais problemas são causados por falhas decorrentes da abertura e fechamento das bocas de fogo (Fig. 4.7) e chaminés, por trincas ou fissuras nas paredes externas do forno (Fig. 4.8), o que permite a entrada de ar em excesso gerando focos de incêndio. Assim, por meio de um monitoramento térmico contínuo, o carbonizador pode ser alertado a partir de sinais sonoros para que tais problemas possam ser corrigidos imediatamente, a fim de reduzir e controlar o tempo de produção e minimizar os impactos no produto final.



Figura 4.7 – Bocas de fogo: entradas de ar para controle da carbonização.



Figura 4.8 – Fissuras apresentadas no revestimento externo do forno RAC 220.

A partir dos campos térmicos apresentados anteriormente, verifica-se que uma das vantagens apresentadas pelo uso do sistema supervisório é a rápida detecção de falhas operacionais no processo e a indicação da zona térmica onde tal falha foi detectada.

No ciclo apresentado na Fig. 4.6, por exemplo, foi solicitado ao carbonizador a confirmação visual e correção da falha no momento em que as irregularidades foram detectadas. Frente ao forno com avarias, o carbonizador foi orientado a avaliar a zona 2 e o mesmo verificou que haviam fissuras na parede. Assim, para corrigir o problema, o carbonizador solicitou o barrelemento externo do forno a fim de vedar novamente a parede com problema.

A Figura 4.9 apresenta resultados de outro ciclo de carbonização onde foi identificado um problema semelhante. Ressalta-se que a figura apresentada foi retirada da tela do software destinado ao monitoramento térmico, na qual são disponibilizadas as seguintes informações: nome do forno, data, hora e perfil térmico.

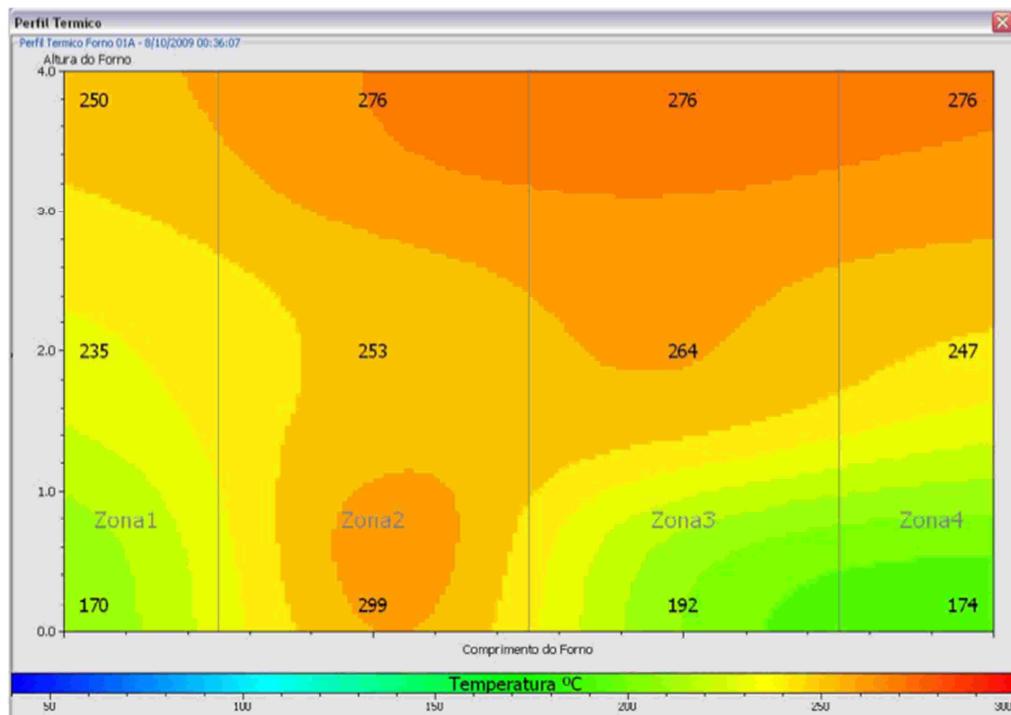


Figura 4.9 – Perfil térmico apresentando um ponto de incêndio na zona 2 resultante de uma fissura na parede do forno.

Assim como no ciclo anterior, verifica-se na Fig. 4.9 uma elevação inesperada na temperatura na zona 2 após 180 horas de produção, ou seja, já na etapa de resfriamento. Neste caso a falha foi novamente traduzida em um problema operacional, possivelmente resultante

de fissuras na parede do forno, o que resulta em queda da produção, geração de cinzas devido à combustão excessiva da madeira e aumento do tempo total do ciclo.

Cabe salientar que as falhas nos fornos de alvenaria são frequentes e fortemente influenciadas por intempéries, ou seja, chuvas, rajadas de vento, além é claro da oscilação de temperatura e pressão inerente ao processo de carbonização. Nesse sentido, muitas das vezes tais falhas são despercebidas pelos agentes carbonizadores, quando esses fazem uso apenas da prática padrão da Empresa.

Outra vantagem do sistema de monitoramento térmico está relacionada ao controle do tempo de produção. Por meio de uma análise detalhada da Fig. 4.10, verifica-se que é possível ganhar em produtividade controlando o tempo de produção. Segundo a prática padrão da empresa, os fornos são abertos quando a temperatura externa nas portas, medida no inicio da manhã por um pirômetro óptico, atinge 30°C. As condições do tempo (chuva e temperatura ambiente) devem ser consideradas pelo agente para determinar se a temperatura indicada pelo pirômetro está correta e indica a abertura do forno. Essa mesma temperatura, medida a partir do sistema supervisório, resulta em um valor médio interno de 60°C, ou seja, quando todas as zonas térmicas atingirem 60°C, tem-se o momento adequado para realizar a abertura do forno.

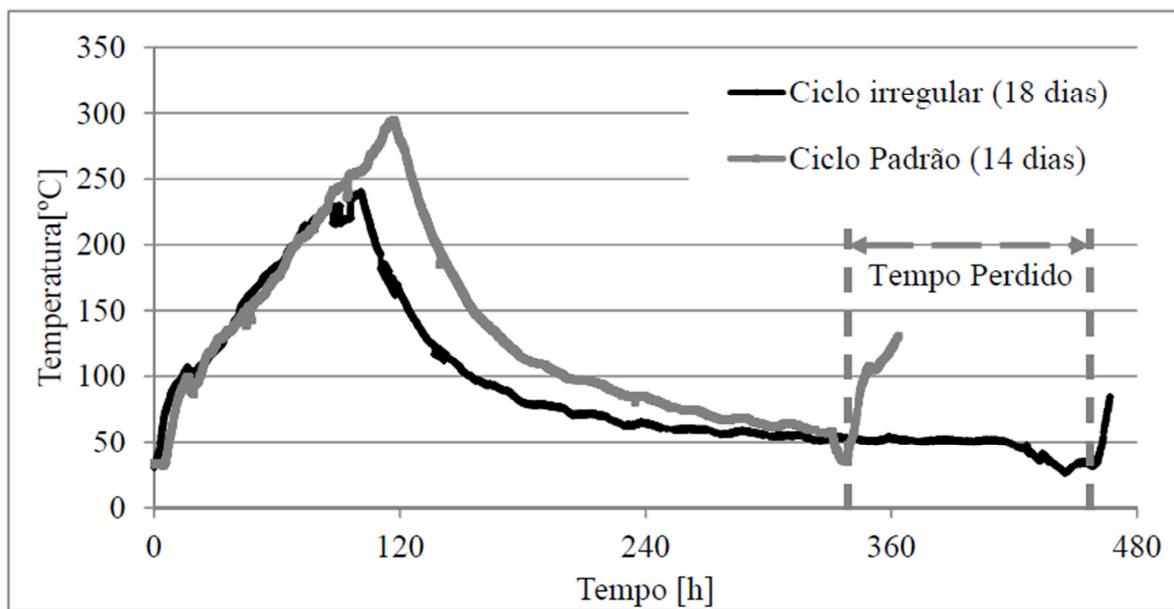


Figura 4.10 – Análise de tempo de produção no forno.

A diferença apresentada entre um ciclo de produção padrão monitorado pelo sistema supervisório e o tempo gasto no ciclo sem intervenção do sistema é superior a 25%. O ganho obtido com o uso do sistema supervisório é apresentado na Tab. 4.1, baseada na cotação do

dólar em 10/01/2011. Neste caso, o metro cúbico do carvão vegetal para uso industrial é cotado em US\$ 80,55. Além disso, considerou-se em torno de 110m³ de carvão vegetal por ciclo de carbonização.

Tabela 4.1 – Tempo de produção e faturamento em carvão vegetal

	Tempo Produção		Nº ciclos/mês	Rendimento/mês (US\$)
	Horas	Dias		
Ciclo sem o suporte do sistema supervisório	427	17,79	1,68	14.876,40
Ciclo monitorado pelo sistema supervisório	314	13,07	2,29	20.277,95
			Diferença mensal [US\$]	5.401,55
			Diferença anual [US\$]	64.818,60

Na tabela, nota-se que o sistema permite controlar/padronizar o tempo de produção o que evita perder cerca de 30% do faturamento com a produção de carvão vegetal. Ressalta-se que tais valores foram calculados considerando apenas um forno RAC. No entanto, normalmente as unidades produtoras possuem inúmeros fornos o que acarreta em maiores perdas na ausência de um controle/monitoramento contínuo.

A análise dos perfis térmicos em tempo real, principalmente na fase de pirólise, também é de suma importância, pois esta é a fase mais importante do processo de carbonização, refletindo diretamente na qualidade do carvão produzido (Oliveira, 2011). Nos fornos RAC, a pirólise é controlada a partir de entradas de ar situadas na base do forno, nas quais é realizado o controle da vazão do ar conforme a inclinação das portinholas (Fig. 4.7). A homogeneidade da temperatura dentro do forno e a temperatura final de carbonização são reflexos da qualidade no controle das entradas de ar. Como os parâmetros de controle são subjetivos, a temperatura é de difícil padronização, refletindo diretamente na qualidade e quantidade do carvão vegetal produzido a cada ciclo. A Fig. 4.11, por exemplo, apresenta o instante final de um ciclo de carbonização (etapa de pirólise) no qual a temperatura do forno é totalmente irregular. Neste caso, a temperatura média na base do forno, ou seja, 154°C, é insuficiente para se produzir carvão, gerando uma grande quantidade de tiços (madeira queimada que não se transformou em carvão vegetal).

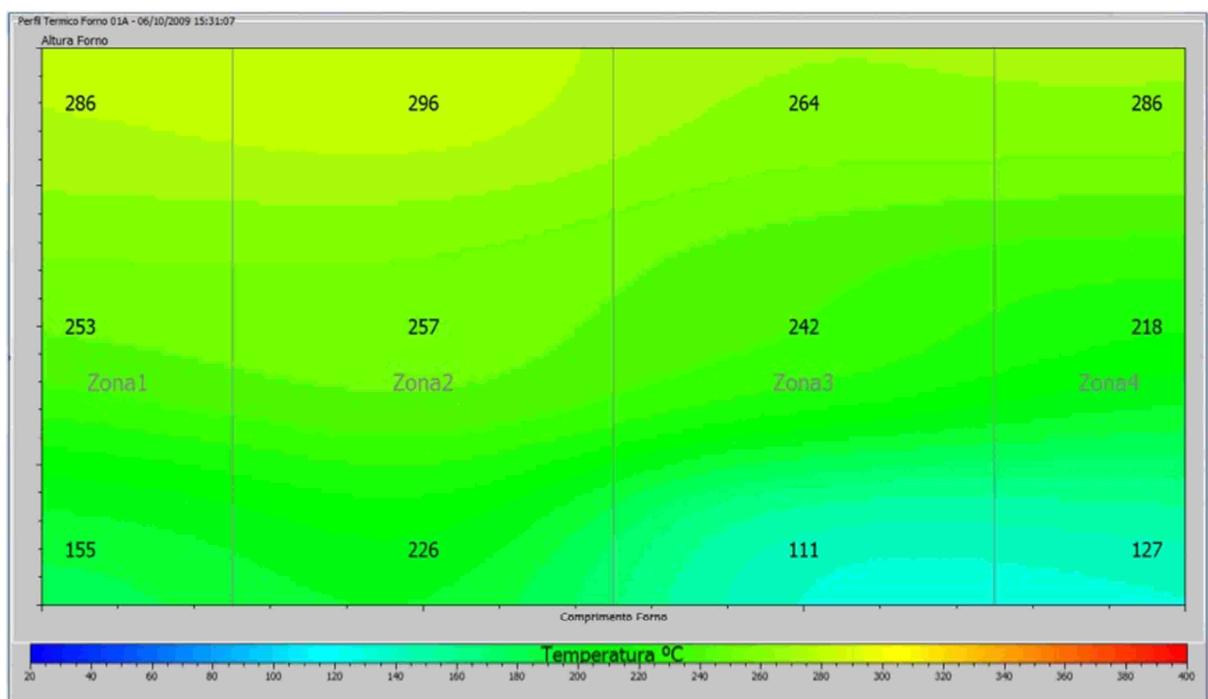


Figura 4.11 – Perfil térmico irregular do instante final da pirólise.

Oliveira (2010) apresenta um estudo no qual o sistema supervisório foi instalado em quatro fornos RAC 220. Foram analisados fornos convencionais e adaptados com gaseificadores. O objetivo do trabalho foi comparar a produção de carvão em fornos RAC a partir de três metodologias: forno convencional com uso apenas da prática padrão; forno convencional com controle térmico e fornos com controle térmico e adaptados com gaseificadores. Ressalta-se que nos testes foram consideradas toras de madeira de mesma origem e diâmetro e, além disso, os fornos foram carregados com cargas similares de madeira.

Cabe salientar que o gaseificador é na verdade uma câmara de combustão que queima a fumaça oriunda da pirólise da madeira. Os produtos da combustão são injetados em fornos para iniciar o ciclo de produção: secagem e carbonização.

A Fig. 4.12a apresenta uma análise do tempo de produção em cada ciclo monitorada a partir do sistema de monitoramento térmico proposto neste trabalho. Neste estudo de caso, verifica-se que o tempo de carbonização nos fornos com sistema supervisório são mais homogêneos, entretanto os fornos adaptados com gaseificadores apresentam tempos de pirólise mais regulares, uma vez que a fase pode ser controlada com o ajuste da vazão dos gases injetados no forno. O tempo de resfriamento em tais fornos também é menor, visto que os gases quentes injetados no forno são praticamente isentos de oxigênio, o que não proporciona a combustão da madeira. Nos demais fornos a carbonização é induzida pela

queima de tiço nas bocas de fogo e entrada de ar, ou seja, trata-se de um processo de combustão totalmente dependente da habilidade e experiência do técnico em carbonização.

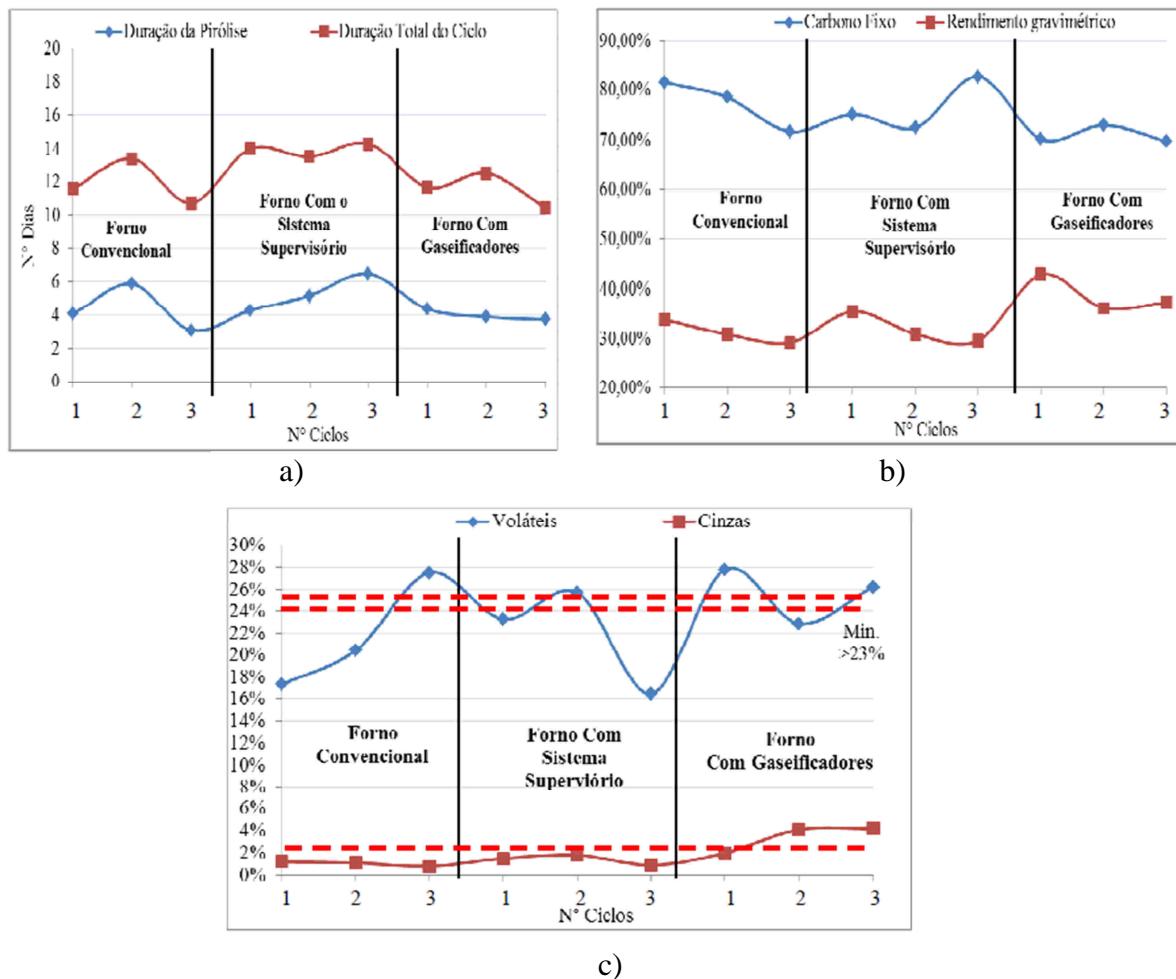


Figura 4.12 – Análise dos fornos: a) tempo de produção; b) Análise do percentual de cinzas e materiais voláteis conforme cada metodologia de produção; c) Análise de carbono fixo e rendimento gravimétrico (relação entre massa de carvão e massa de madeira enfornada em base seca).

A Figura 4.12b apresenta o percentual de carbono fixo e rendimento gravimétrico, na qual é notório que os fornos instrumentados e adaptados com gaseificadores apresentam melhores rendimentos gravimétricos, porém com menores valores de carbono fixo. Para a siderurgia o valor do carbono fixo deve ser superior a 75%, no entanto, quanto maior o rendimento gravimétrico maior o lucro da Empresa fornecedora de carvão vegetal.

Na Fig. 4.12c, verifica-se que o forno convencional e instrumentado com termopares apresentam percentuais de cinzas em conformidade com o padrão definido pela siderurgia nacional, ou seja, os valores apresentados são inferiores a 2%. Já nos fornos adaptados com

gaseificador, o teor de cinzas aumenta consideravelmente. Em relação ao teor de materiais voláteis, todos os processos apresentaram oscilações em torno da média prevista pela siderurgia, ou seja, mínimo de 23% e máximo de 25%.

As Figuras 4.13, 4.14, e 4.15 apresentam os perfis térmicos no instante final de pirólise para cada processo analisado anteriormente.

No caso do forno convencional, Fig. 4.13, verifica-se uma grande diferença de temperatura entre as zonas de carbonização, o que leva à produção de carvão com qualidades diferentes em cada zona do forno. Além disso, devido às baixas temperaturas próximas às portas, ocorre a formação de tiço nessas regiões. Este ciclo apresenta ainda a menor temperatura média de carbonização.

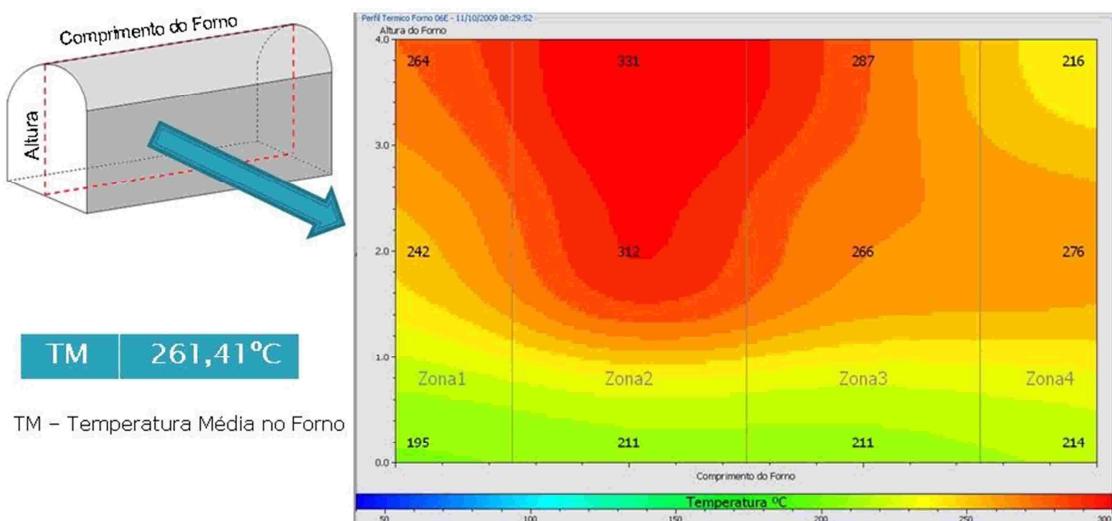


Figura 4.13 – Perfil térmico na fase final de carbonização em um forno convencional (Mulina et al., 2010).

Ressalta-se que a maior temperatura média foi identificada no forno instrumentado, Fig. 4.14. Neste caso, verifica-se que o controle da temperatura gera uma maior homogeneidade da queima da madeira o que consequentemente reduz as perdas e aumenta a produção do forno.

No forno adaptado com gaseificador (Fig. 4.15) é clara a diferença de temperatura nas zonas do forno. Novamente é possível identificar baixas temperaturas nas portas dos fornos. Um fato interessante no forno com gaseificador é o grande acúmulo de energia na região central do forno, o que induz a formação de finos (carvão que se transforma em cinzas devido às temperaturas desenvolvidas durante o ciclo). Ressalta-se que no forno convencional adaptado com gaseificador, realizou-se apenas o monitoramento das temperaturas, ou seja,

não foram feitas intervenções nos ciclos com base nas temperaturas medidas. O objetivo foi conhecer o mapa térmico no interior dos fornos e confrontar os resultados obtidos a partir de cada metodologia de produção.

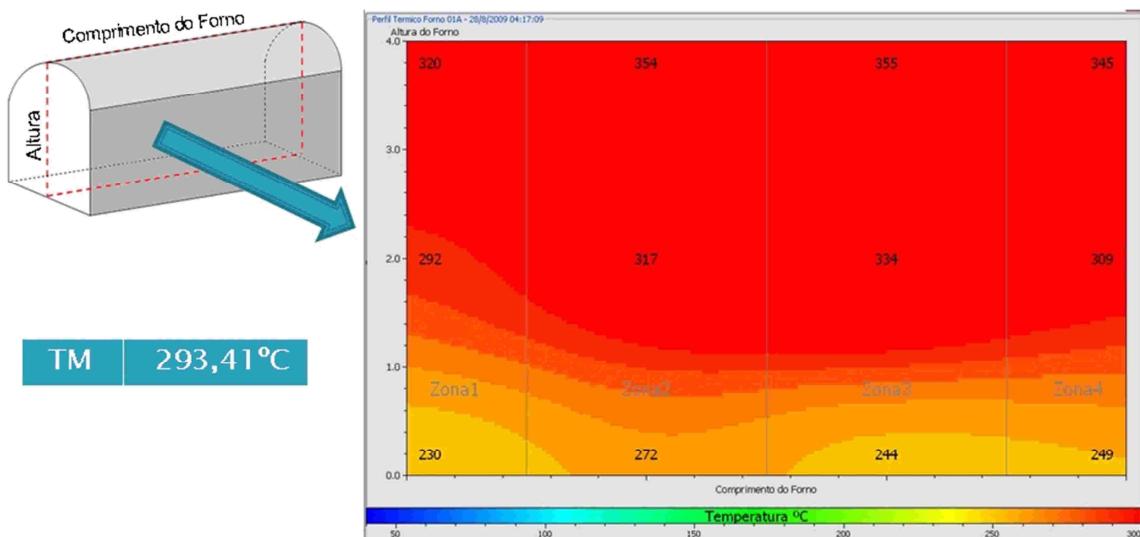


Figura 4.14 – Perfil térmico na fase final de carbonização em um forno instrumentado com o sistema de monitoramento térmico proposto neste trabalho – Temperatura controlada (Mulina et al., 2010).

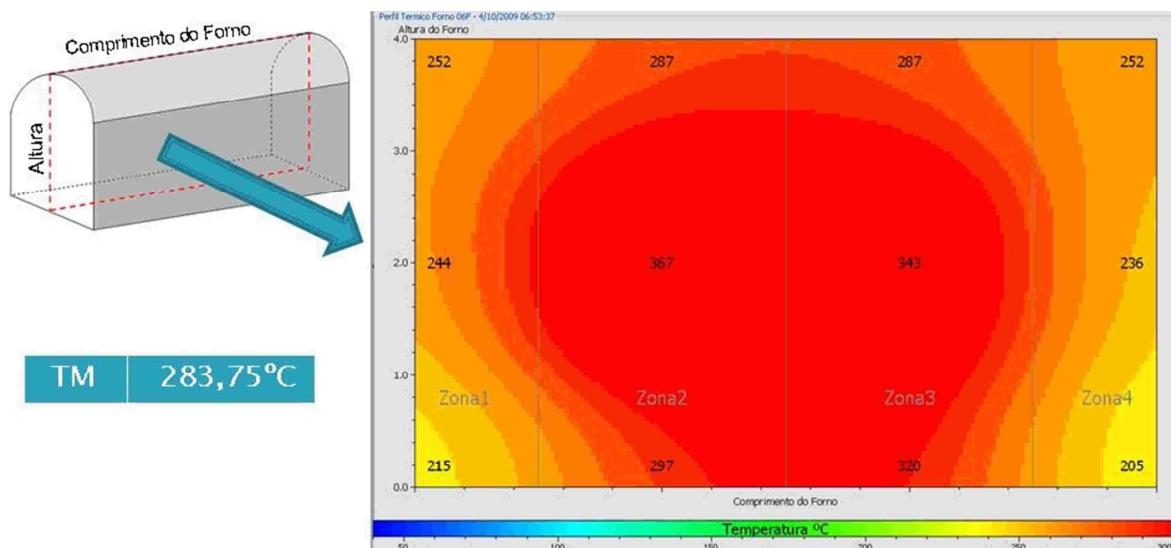


Figura 4.15 – Perfil térmico na fase final de carbonização em um forno com gaseificador (Mulina et al., 2010).

A partir dos resultados apresentados anteriormente, nota-se que a instrumentação e o monitoramento dos dados em computador sob a forma de perfis térmicos, aceleram e

facilitam a interpretação dos dados. Além disso, o software proposto possui uma interface gráfica amigável, o que torna mais fácil a detecção de falhas por parte dos agentes carbonizadores, permitindo melhor controle, resultando em ganhos no tempo e na qualidade do carvão produzido.

O uso de sistemas supervisórios também pode ser dirigido para a gestão dos funcionários na Empresa. Vários autores, como Batista (2004), Dutra (2002) e Ulrich (2000), comentam sobre a relação entre sistemas de gestão de pessoas e o aumento no desempenho dos funcionários. Tais autores apóiam o uso de *softwares* para gerenciar a produtividade dos funcionários. Neste caso, o sistema supervisório atua como um controlador das ações dos funcionários, medindo o tempo entre o problema e a tomada da solução.

O *software* desenvolvido para o sistema de monitoramento térmico permite que os funcionários entrem com um *login* próprio, registrando hora de inicio e fim do turno de trabalho. Tal prática permite calcular as horas de trabalho real do funcionário. Além disso, em caso de irregularidades na produção, torna-se fácil identificar o responsável e verificar quais as atitudes foram tomadas para corrigir tal falha. Como as temperaturas são monitoradas em tempo real, a demora em tomar atitudes para resolver o problema pode refletir no descaso do funcionário em relação ao processo produtivo e tomada de decisões por parte da gerência da unidade produtora de carvão vegetal.

O *software* desenvolvido conta ainda com um banco de dados que armazena um histórico de todos os ciclos de carbonização. Nele podem ser acessados dados da produção de carvão vegetal, tais como: temperaturas, volume de madeira, qualidade de carvão produzido, falhas operacionais e correções adotadas. Tal prática, permite realizar estudos a fim de flexibilizar a produção na busca de um ciclo otimizado para cada tipo de madeira enforada, permitindo o aumento na produtividade.

Com base nos dados apresentados, é notório que o uso do sistema supervisório desenvolvido pelo LTCM-UFU, juntamente com a apresentação das temperaturas obtidas sob forma de perfis térmicos, permite melhorar os ganhos no processo de carbonização, apenas com o controle da temperatura e tempo de produção. Além disso, resulta em um aumento na produtividade e qualidade do carvão, contribuindo para minimizar as emissões de gases de efeito estufa e as perdas no processo. A apresentação das temperaturas por meio de perfis térmicos auxilia na rápida análise do processo de produção, pois os agentes carbonizadores têm acesso às temperaturas de forma simples, auxiliando na identificação de irregularidades no processo, permitindo correções de forma rápida e eficiente.

Por outro lado, o sistema supervisório acarreta em modificações e custos financeiros frente à prática padrão. Dentre as desvantagens decorrentes do uso do sistema supervisório citam-se a necessidade da instalação dos equipamentos e treinamento dos funcionários. O custo da instalação do sistema varia de acordo com o processo a ser instrumentado. No caso do equipamento instalado no forno RAC 220, proposto neste trabalho, os custos relativos à concepção e montagem do protótipo fica em torno de US\$15.000,00, incluindo a instalação dos 22 sensores, uma central e um servidor. É válido lembrar que uma central concentra informações de um número praticamente irrestrito de sensores, e o servidor concentra as informações de várias centrais. Como consequência, o custo do servidor, juntamente com os softwares, é contabilizado apenas uma vez. É importante ressaltar que um sistema similar disponível no mercado de automação e controle teria um custo inicial de US\$ 30.000,00. Neste caso não foram contabilizados os custos com a montagem e instalação dos sistemas que, em ambos os casos, seriam bastante similares.

Considerando apenas os ganhos apresentados na Tab. 4.1 para um forno RAC220, o *payback* do sistema proposto neste trabalho é inferior a três meses. Ressalta-se que a Empresa na qual foi instalada o sistema de monitoramento possui 72 fornos similares produzindo carvão de forma ininterrupta.

O treinamento dos funcionários também é de suma importância a fim de minimizar danos no sistema eletrônico. A Fig. 4.16 apresenta avarias no sistema devido a ausência de treinamento e cuidado por parte dos funcionários.

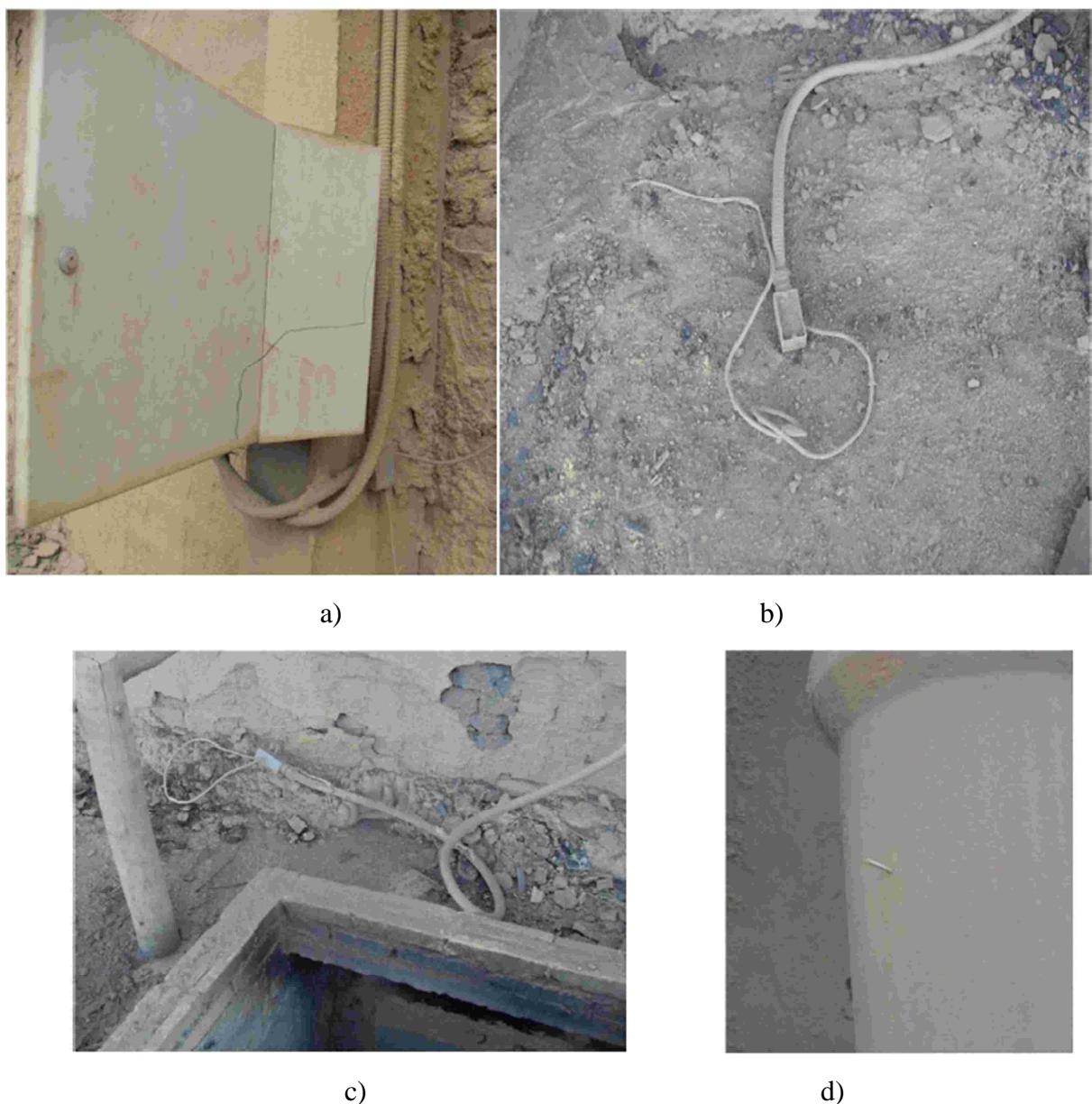


Figura 4.16 – Falhas na manutenção do sistema: a) Sistema violado; b) e c) Cabos de ligação arrancados e rompidos; c) Sensor com o cabeçote arrancado.

As falhas apresentadas na Fig. 4.16 foram ocasionadas durante a reforma do forno. Sem o devido treinamento, pessoas não autorizadas manipularam o sistema, danificando partes do mesmo, o que neste caso o deixou inoperante. Para que o sistema se torne viável, é de suma importância a manutenção dos equipamentos envolvidos. As condições adversas e intempéries, as quais os sensores são submetidos, fazem com que estes mereçam atenção especial e sejam inspecionados a cada ciclo de produção. Preservando a integridade física dos sensores, preserva-se o circuito eletrônico em seu interior, o que aumenta a vida útil e reduz os custos. A Fig. 4.17 apresenta condições adversas de trabalho dos sensores Pt-100.

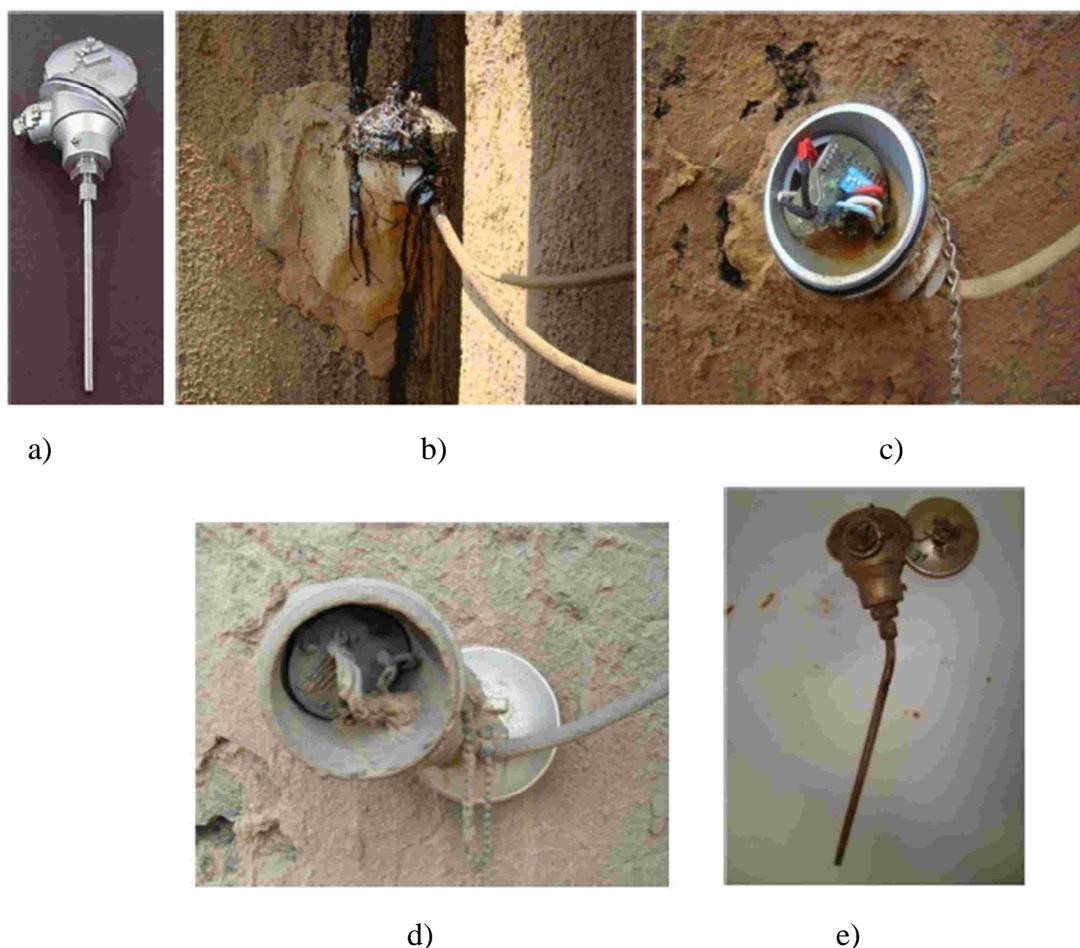


Figura 4.17 – Sensor PT100: a) PT100 novo; b) Sensor instalado na chaminé coberto de alcatrão; c) Água da chuva dentro do cabeçote sensor; d) Lama dentro de um sensor violado; e) Bainha torta devido a choques mecânicos durante a limpeza do forno.

Na Fig. 4.17d é possível perceber a ausência de treinamento dos funcionários, já que o sensor foi aberto por curiosos e não foi lacrado novamente, resultando na degradação do circuito eletrônico em seu interior.

Outro aspecto que pode ser considerado como uma desvantagem do sistema proposto neste trabalho é que se trata de um conjunto de hardwares e softwares recentes, ou seja, passíveis de falhas e modificações. Interrupções no funcionamento podem ocorrer e as causas devem ser estudadas a fim de agregar robustez aos equipamentos.

O custo com contratação de novos funcionários foi desconsiderado, uma vez que com o sistema supervisório minimiza o trabalho do agente carbonizador, que não tem mais a necessidade de percorrer toda a unidade produtora a fim de analisar as condições de produção. Por meio da análise dos perfis térmicos no escritório da unidade produtora e de alertas

sonoros, o agente pode transmitir informações via rádio aos técnicos na linha de produção para que estes façam correções no processo produtivo.

Na sequência são apresentadas as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um sistema de monitoramento térmico robusto para aplicação em fornos industriais. Nesse sentido, apresentou-se nos capítulos anteriores a concepção e o desenvolvimento de cada uma das partes do sistema e seu funcionamento.

Em laboratório o sistema se mostrou satisfatório, no entanto diversos problemas foram identificados quando o mesmo foi implantado no processo industrial. Tais problemas contribuíram para que melhorias fossem inseridas, garantindo maior robustez ao conjunto de *hardwares* e *softwares* desenvolvidos no decorrer da pesquisa. Dentre as falhas operacionais, verificou-se que a primeira versão da central de controle instalada no forno apresentava constante queda de energia elétrica, resultando na perda total dos dados de temperatura. Tal problema foi corrigido agregando novas funções ao sistema, tais como o controle e uso de uma bateria recarregável. A versão atual informa ao micro-controlador sobre a carga da bateria e verifica se há ou não energia externa, permitindo alternar o consumo de energia de acordo com a necessidade.

A forma de armazenamento dos dados também sofreu alterações para permitir maior robustez. A primeira versão do sistema fazia uso de um *pendrive* para gravar os dados localmente na central de controle. No entanto, o registro dos dados era realizado por meio de um módulo terceiro, impedindo grandes adequações às condições de trabalho. Nesse sentido, optou-se pela remoção do *pendrive* e uso de um cartão *SDCard*. Como a substituição, o

sistema se mostrou mais estável, uma vez que a gravação é realizada diretamente pelo micro-controlador, e houve uma redução nos custos de montagem.

A comunicação *wireless* também passou por diversas adaptações. A primeira versão mantinha a rede wireless ligada por longos períodos de tempo, devido ao grande volume de dados transferidos, o que acabou gerando interferência em outros sistemas com frequência de transmissão semelhante. Com a implantação de melhorias, tornou-se possível reduzir o volume de dados e, consequentemente, o tempo de funcionamento da rede, permitindo a coexistência de redes de mesma frequência. Ressalta-se que o uso de canais de frequências para redes wireless é definido pela Anatel, sendo necessária uma licença anual para o sistema funcionar. A antena também foi substituída por uma menor. As dimensões do primeiro equipamento proporcionavam altos ganhos, o que gerou um efeito de “sombra” entre as diversas antenas, acarretando na perda de comunicação. Durante os testes foi detectado que uma antena menor supria as necessidades, o que reduziu bastante o custo final desta parte do sistema. Ressalta-se que o sistema foi testado em condições extremas, nas quais a distância entre a central e o servidor variava de 300m, para o forno mais próximo, até 2km, no caso do forno mais distante.

O cabeamento entre a central e os sensores se mostrou satisfatório no laboratório e em campo. No entanto, oscilações no suprimento de energia elétrica da empresa, acarretavam em oscilações nos níveis de tensão nos sensores, mesmo a central fornecendo um sinal contínuo e estabilizado. Tais oscilações provocavam a queima dos reguladores de tensão, presentes nos sensores, e falhas no funcionamento dos micro-controladores, resultando na perda de comunicação. Tal problema foi então resolvido com a inserção de um circuito RC (resistor-capacitor) na entrada da fonte de tensão dos sensores, minimizando as oscilações.

Para a instalação dos sensores no forno, fez-se o uso de uma broca de diâmetro similar ao da bainha do Pt-100, capaz de furar e atravessar a parede de alvenaria do forno. Neste caso, apenas a ponta da bainha do sensor ficava posicionada no interior do forno. Além disso, para reduzir custos operacionais, não foram instaladas placas metálicas na ponta de cada sensor, conforme previsto no experimento apresentado no Capítulo III e em algumas Normas Brasileiras. Assim, conclui-se que as temperaturas apresentadas no Capítulo IV possuem erros inerentes ao processo de medição e, até o momento, não foram realizados testes com placas metálicas instaladas nas pontas dos sensores da Empresa. Portanto, não é possível afirmar qual a influência desta prática experimental no processo de medição de temperatura em fornos destinados à produção de carvão vegetal.

Em relação ao software, constantemente são identificadas falhas e imediatamente estas são corrigidas. Além disso, por questões de segurança da rede de computadores da Empresa, ainda não é possível acessar os dados de temperatura por meio da *internet*. Internamente, o gerente de produção tem acesso remoto ao computador por meio de *softwares* comerciais como o *TeamViewer*, da *TeamViewer GmbH*. No entanto, o uso desse aplicativo é limitado a um usuário por vez.

Cabe salientar que a manutenção do sistema é simplificada, basta o operador observar as respostas apresentadas no *software*. Detectada alguma falha em algum sensor, é necessária apenas a troca do mesmo. O cabeamento é protegido por eletrodutos de metal, aumentando a robustez do sistema. No entanto, o sistema é suscetível a avarias mecânicas conforme aquelas apresentadas no Capítulo IV, o que pode ser facilmente contornado por meio do treinamento dos funcionários para que estes colaborem com a manutenção dos equipamentos.

Como propostas de trabalhos futuros, visando aprimorar e agregar novas funções ao sistema, citam-se:

- Desenvolvimento da comunicação WEB, capaz de permitir o acesso às informações por meio da rede mundial de computadores, possibilitando o estudo e controle dos fornos à distância;
- No caso dos fornos destinados à produção de carvão vegetal, com o uso do sistema supervisório, será possível definir uma prática padrão para a produção. No futuro, o software poderá auxiliar os carbonizadores emitindo alarmes em caso de discrepância entre as temperaturas medidas e aquelas definidas como padrão no processo de produção;
- Substituição do módulo *wireless*, utilizado atualmente, por outros modelos que operem em frequências livres, evitando a necessidade de licença da Anatel para operação em qualquer localidade;
- Inserir placas de cobre ou alumínio na extremidade dos sensores, conforme as normas NBR5628, 6479 e 10636, para minimizar o erro na leitura da temperatura;
- Desenvolvimento de *softwares* compatíveis com dispositivos portáteis, tais como *Tablets*. Assim, o carbonizador poderá analisar a temperatura dos fornos em campo, reduzindo a dependência do servidor;
- Utilização de protocolos industriais já existentes, como o *Modbus* para a comunicação entre os sensores e a central.

- Utilizar o software para controlar efetivamente a produção, abrindo e fechando as portas de fogo e chaminés, a fim de padronizar a temperatura no interior do forno;
- Testar o sistema em outros fornos ou processos industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001. 12p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6479**: Portas e vedadores - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 1992. 8p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10636**: Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 1989. 7p

ASSIS, C. O. de. **Sistema alternativo para carbonização de madeira**. 2007. 49 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

AMORIM, T.F.; LIMA, J.A.; MATTEDI, A.; **Um estudo de caso de malhas de controle de temperatura do ar quente do alto forno 1 da Arcelor Mittal Tubarão**. In: 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - Induscon 2010, 2010, São Paulo. Anais do 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2010.

ANGSTENBERGER, J. **Blast furnace analysis with neural networks**. In: Artificial Neural Networks – ICANN 96, Springer-Verlag, Berlin, Germany ,1996, p. 203–208.

BARCELLOS, D.C. **Forno Containers para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e eliminação da poluição**. 2002. 75p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BARROS, P. C. P. S. **Estudo do sistema térmico de um transformador.** 2007. 71 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa.

BATISTA, E. de O. **Sistemas de Informação – O Uso Consciente da Tecnologia para o Gerenciamento.** 1^a edição, Saraiva, 2004.

BiM1H, **VHF Narrow Band FM 500mw transceiver.** Disponível em: <<http://www.radiometrix.com/node/351>>. Acessado em 30 mar. 2010.

Bohórquez, M. A. M., Enrique Gómez, J. M., Andújar Márquez J. M. **A new and inexpensive temperature-measuring system: Application to photovoltaic solar facilities.** Solar Energy, 2009, v. 83, n. 6, p. 883–890.

BRICARBRAS. **Inovação Tecnológica para Produção Limpa de Carvão Vegetal: Briquetagem e Carbonização do Brasil Ltda.** Biomassa e Energia, v.3, n.1, p.73-82, mar. 2006.

CADÉ, M. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. de. **Secagem de tijolos cerâmicos vazados: uma aproximação por volumes finitos.** Revista matéria, v. 10, n. 3, 2005, pp. 443-453.

CASSANO, D. **Os limites da Temperatura.** Revista & Instrumentação, São Paulo, v.3, n. 21, p. 18-24, jun. 2003. Disponível em: <<http://www.banasmetrologia.com.br/textos.asp?codigo=865&secao=revista>>. Acessado em: 10 fev. 2011.

COLOMBO, S. de. F. O.; PIMENTA, A. S.; HATAKEYAMA, K. **Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável.** In: Simpósio de Engenharia de Produção da UNESP. 13. Bauru, 2006. Disponível em: <http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/1208.pdf>. Acesso em: 6 jul. 2011.

Controlador lógico programável. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Controlador_l%C3%B3gico_program%C3%A1vel>. Acessado em 30 mar. 2010.

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.

CUNHA, J. D. M.. Metodologias para a produção de carvão vegetal em fornos RAC220. 2009. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DADAM, A. P., Análise térmica de um forno túnel utilizado na indústria cerâmica vermelha. 2005. 107 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina.

DIAS, A. C. Monitoramento térmico do cadinho de alto-forno: predição de desgaste de refratário e identificação de modelo matemático. 2007. 41 f. Monografia de graduação – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

DUTRA, Joel Souza. Gestão de Pessoas: modelo, processos, tendências e Perspectivas, 1^a edição, São Paulo, Atlas, 2002.

FIGUEIRA JÚNIOR, E. A.; PESSOA, J. S.. Análise Imediata de Carvão Vegetal. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

FILHO. A. P. S.; SILVA. F. A. R. D.; ARAÚJO. R. D. B. Desenvolvimento de um Sistema Microcontrolado para Controle da Temperatura em Líquidos. Engenharia de Computação em Revista. 2007

FRANCA, G. A. C.; CAMPOS, M. B. Análise teórica e experimental do resfriamento de carvão vegetal em forno retangular. In: Encontro de energia no meio rural, 4., 2002, Campinas. Anais do AGRENER 2002.

Fluke Corporation, Hart Scientific Division. **How to calibrate an RTD or Platinum Resistance Thermometer (PRT).** Disponível em: http://support.fluke.com/hart-sales/Download/Asset/3498460_6200_ENG_A_W.PDF. Acessado em 20 abr. 2011.

GP-GC021. Bluetooth Serial Converter UART Interface User's Guide. Disponível em: <http://www.sure-electronics.net/rf,audio/GP-GC021_Ver1.0_EN.pdf>. Acessado em 30 nov. 2010.

GONÇALVES, M. G. Monitoramento e controle de processos, 2. Rio de Janeiro, Petrobras, Brasília, SENAI/ DN, 2003, 100 p.

GUIMARÃES NETO, R. M. Avaliação técnica e econômica de um forno container em escala industrial. 2005. 51 f. Dissertação de Mestrado-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

IOPE - Fios e Cabos de Extensão e Compensação. Disponível em: <http://www.iope.com.br/3ic2_fios_e_cabos_de_extensao.htm>. Acessado em 30 mar. 2011.

HASHEMIAN, H.M.; JIANG, J., Nuclear Plant Temperature Instrumentation. Nuclear Engineering and Design, 2009, v. 239, p. 3132-3141.

JESUZ, J. C.; RADÜNZ, L. L.; MELO, E. de C.; ROCHA, R. P.; BERBERT, P. A. Automação Do Controle Da Temperatura Do Ar Em Secador De Plantas Medicinais E Aromáticas. In: XXX Congresso Brasileiro De Engenharia Agrícola, 30, 2001, Foz do Iguaçu. CD-ROM dos Anais do CONBEA2001.

KAWAGUTI, W. M. Estudo do comportamento térmico de fornos intermitentes tipo “paulistinha” utilizados na indústria de cerâmica vermelha. 2004. 87 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

LASSO, P. R. O.; PESSOA, J. D. C.; CALBO, A. G.; CRUVINEL, P. E. **Sistema de controle de temperatura para câmara de armazenamento de alimentos frescos em meio líquido.** Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos, 2003. 12 p.

L200C, **Adjustable voltage and current regulator.** Disponível em <<http://www.st.com/stoneline/products/literature/ds/1318.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2011

MAIA, I. M. O. ; OLIVEIRA, R. L. M. ; FIGUEIRA JUNIOR, E. A. ; CARVALHO, S. R. . **Definição do cenário base e a análise da emissão de ch4 em fornos destinados à produção de carvão vegetal.** In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010, Campina Grande - Pb. Anais do VI CONEM, 2010. v. 1. p. 1-6.

MAGNAGO, L. C. S.; CATABRIGA, L. **Estudo da Distribuição de Temperatura no Cadinho do Alto-Forno 3 da Arcelor Mittal Tubarão.** In: CNMAC2010 XXXIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 2010, Águas de Lindoia. CNMAC2010. XXXIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 2010.

MATSUZAKI, S; NISHIMURA, T.; SHINOTAKE, A.; KUNITOMO, K., NAITO, K.; SUGIYAMA, T. **Development of mathematical model of blast furnace.** Nippon steel technical report, ano 2007, n. 94, p. 87-95, jul. 2006.

MAX-485, **Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers**, Disponível em <<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX1487-MAX491.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2010

Maxim Integrated Products - Guidelines for Proper Wiring of an RS-485 (TIA/EIA-485-A) Network. Disponível em: < <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/763> >. Acessado em 20 mar. 2010.

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.

McGHEE, J.; HENDERSON, I.A.; SYDENHAM, P.H. **Sensor science: essentials for instrumentation and measurement technology. Measurement**, Amsterdam, v.25, n.2, p.89-113, 1999.

MURTHY, C. N.; NAGARAJU, J. **Intelligent thermal energy meter cum controller for solar water heating systems**. Renewable Energy, Vol. 17, pp. 123–127, 1999.

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

MULINA, B. H. O. **Desenvolvimento de um sistema supervisório para medição de temperaturas em fornos de produção de carvão**. 2009. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

MULINA, B. H. O. ; OLIVEIRA, R. L. M. ; BORGES, V. L. ; SILVA, E. P. ; CARVALHO, S. R. . **Development of a supervisory system to measure the temperature inside charcoal kilns**. In: COBEM 2009, 2009, GRAMADO. Anais do COBEM 2009, 15 a 20 de Novembro de 2009. v. 1. p. 1-10

MULINA, B. H. O. ; OLIVEIRA, R. L. M. ; BORGES, V. L. ; CARVALHO, S. R. . **Instrumentação térmica aplicada ao processo de produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria**, Anais do MERCOFRIO 2010, ASBRAV, 20 a 23 de Outubro de 2010, Porto Alegre – RS. p. 10.

MC34063A, 1.5 A, Step-Up/Down/Inverting Switching Regulators. Disponível em: <http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC34063A-D.PDF>. Acessado em 30 mar. 2011

NI CompactRIO. Disponível em: <<http://www.ni.com/compactrio/>>. Acessado em 30 mar. 2010.

OLIVEIRA, R. L. M.. **Instrumentação e Análise Térmica do Processo de Produção de Carvão Vegetal.** 2009. 111f. Dissertação de Mestrado - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

OLIVEIRA, R. L. M. ; PESSOA, J. S. ; FIGUEIRA JUNIOR, E. A. ; MULINA, B. H. O. ; CARVALHO, S. R. . **Analysis of the thermal profiles and the charcoal gravimetric yield in three variations of retangular brick kilns.** In: 13th ENCIT: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2010, Uberlândia - MG. Anais do 13th ENCIT, 2010. v. 1. p. 1-10.

OLIVEIRA, R. L. M.; FIGUEIRA JUNIOR, E. A. ; PESSOA, J. S. ; MULINA, B. H. O. ; CARVALHO, S. R.. **Análise térmica e do rendimento gravimétrico em fornos de produção de carvão vegetal.** In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010, Campina Grande - Pb. Anais do VI CONEM, 2010. v. 1. p. 1-10.

PIC16F688, PIC16F688 Data Sheet 14-Pin Flash-Based, 8-Bit CMOS Microcontrollers with nanoWatt Technology, Disponível em <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41203B.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2010

PIC18F2550, PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet 28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nanoWatt Technology, Disponível em <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2010

R8C/2B, R8C/2B Group. Disponível em <<http://am.renesas.com/products/mpumcu/r8c/r8c2x/r8c2b/Documentation.jsp>>. Acesso em: 1 fev. 2011

RAAD, T. J., WINTER, M., 2007, **Pesquisa e desenvolvimento na produção de carvão vegetal**, V&M Florestal.

RODRÍGUEZ BERMEJO, J.; BARREIRO, P.; ROBLA, J.I.; RUIZ GARCÍA, L. **Thermal study of a transport container.** Journal of Food Engineering, v. 80, n. 2, pp. 517-527.

RUOCCHI, M. A. C; ALMEIDA, F. Q. A. de; LOPES, C. R. M. Monitoramento da temperatura de preparações quentes e frias em um serviço técnico de nutrição e dietética. Revista Nutrição em Pauta, São Paulo, ano 14, n. 76, p. 43-46, jan./fev. 2006.

SEYE, O. Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. 1998. 79 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SN75176A, **DIFFERENTIAL BUS TRANSCEIVER**, Disponível em <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/sn75176a.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2010

TAYLOR, H.R. Data acquisition for sensor systems. London: Chapman & Hall, 1997. 327 p.

TEIXEIRA, B. O. S.; JOTA, F. G.; TEIXEIRA, M. H. Modelagem, controle e otimização do processo dos fornos de reaquecimento de placas. Revista Controle & Automação, Sociedade Brasileira de Automática, Natal, RN, ano 18, no.1, p. 67-93, mar 2007.

TRUGILHO, P. F., SILVA, D. A., 1998, Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá, Revista Árvore, Viçosa, v.21, n.1, pp. 113-130.

ULRICH, David. Recursos Humanos Estratégicos, Tradução Cristina Barzán, Barzán Tecnologia e Linguistica, 1^a edição, São Paulo, Futura, 2000.

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.

VITORINO, T. A. S.; BASTOS, H. G. L., Sistema de visualização gráfica tridimensional de avaliação do desgaste do refratário de cadinho do alto-forno. XI Seminário de Automação de Processos, ABCM, p. 471-483, 2007.

VITORINO, T. A. S., FIGUEIREDO, E. S., ROCHA, D. M., MESQUITA, R. C., CAMINHAS, W. M., **Sistema de visualização gráfica tridimensional da temperatura dos Staves do alto-forno da Gerdau Açominas**. In: Seminário de Automação de Processos, 2006, Belo Horizonte/MG. Anais do X Seminário de Automação de Processos, 2006. v. 1. p. 1-6.