

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FLÁVIO CÉSAR BRITO NUNES

**PROTÓTIPO DE INSTRUMENTO PARA ANÁLISE TÉRMICA
DIFERENCIAL**

**Dissertação apresentada à Coordenação de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica -
COPELE - da Universidade Federal da
Paraíba - UFPB - em cumprimento às
exigências para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.**

**Área de Concentração:
Processamento da Informação**

**Orientador:
Prof: José Sérgio da Rocha Neto**

**Campina Grande - Paraíba
Março - 1997**



N972p Nunes, Flavio Cesar Brito
Prototipo de instrumento para analise termica
diferencial / Flavio Cesar Brito Nunes. - Campina Grande,
1997.
174 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

1. Instrumento por Analise Termica Diferencial -
Prototipo 2. Analise Termica Diferencial 3.
Microcontrolador MC68HC11 - Motorola 4. Dissertacao I.
Rocha Neto, Jose Sergio da, Dr. II. Universidade Federal da
Paraiba - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 620.181.4(043)

PROTÓTIPO DE INSTRUMENTO PARA ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL

FLÁVIO CÉSAR BRITO NUNES

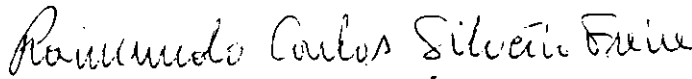
Dissertação Aprovada em 12.03.1997



PROF. JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.Sc., UFPB
Orientador



PROF. ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFPB
Componente da Banca



PROF. RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFPB
Componente da Banca



PROF. HEBER CARLOS FERREIRA, Dr., UFPB
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Março - 1997

Por maior que sejam os problemas, as dificuldades e as realizações não representam nada diante da imensidão do cosmos. A "Ele".

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Miguel e Nanetes, meus irmãos Sérgio e Ana Paula e a Gorethe.

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Sérgio da Rocha Neto, pela orientação e apoio dedicados ao longo deste trabalho.

Aos professores Gurdip Singh Deep e Raimundo Carlos Silvério Freire pelo apoio.

Ao professor Amauri Oliveira, pelas conversas esclarecedoras, apoio e incentivo.

Aos colegas Evilacy César Andrade Vieira e José Esivaldo dos Santos e a todos os colegas do Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC) que de uma forma ou de outra contribuíram na realização deste trabalho.

Ao CNPq pela oportunidade e auxílio concedidos para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão (CEFET - MA), pela liberação para realização deste trabalho.

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho, o projeto e a implementação de um protótipo de instrumento para análise térmica diferencial (ATD), baseado na utilização do microcontrolador **MC68HC11** da Motorola.

Considerações de projeto para o controle da taxa de variação da temperatura da unidade de aquecimento são apresentadas, bem como a implementação de uma interface amigável para o instrumento. O projeto dos controladores foi validado com dados obtidos por simulação, e com dados experimentais adquiridos com auxílio de uma *interface GPIB*.

Finalmente, apresenta-se insaios de **ATD** com o instrumento implementado, utilizando-se amostras de argilominerais, cujos termogramas são conhecidos na literatura especializada, comparando-os aos obtidos através do instrumento desenvolvido para avaliação de desempenho do sistema.

ABSTRACT

This dissertation deals with design and implementation of the prototype of differential thermal analysis instrument. This analysis is used in identification and characterization of natural or artificial materials. The instrument has been implemented around a **MC68HC11** microcontroller.

The design considerations for control of temperature variation of a heating unit, at a constant programmable rate, as well as friendly used interface for the instrument are presented. The simulation results to validate the controller design have been included.

The experimental analysis results with different materials with known characteristics and use of GPIB compatible instruments, for validating the instrument operation, are presented.

SUMÁRIO

RESUMO	IV
ABSTRACT	V
SUMÁRIO	VI
LISTA DE FIGURAS E TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS	XV
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO I - ORIGENS E DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS TERMOANALÍTICOS	
1.1 - Introdução	8
1.2 - Principais Métodos Termoanalíticos	11
1.2.1 - Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	11
1.2.2 - Análise Termogravimétrica (ATG)	14
1.2.3 - Análise Termogravimétrica Diferencial (DTG)	15
1.2.4 - Análise Termomecânica (ATM)	17
1.2.5 - Análise Térmica Diferencial (ATD)	17
1.3 - Aplicações da Análise Térmica Diferencial	20
1.4 - Terminologia na Análise Térmica Diferencial	23
1.5 - Fatores que afetam as curvas térmicas diferenciais	25

1.5.1 - Influência da taxa de aquecimento	26
1.5.2 - Escolha da substância inerte	27
1.5.3 - Efeito da compactação da amostra e referência	28
1.5.4 - Tamanho das partículas da amostra	29
1.6 - Conclusão	29
CAPÍTULO II - INSTRUMENTO PARA ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL	
2.1 - Introdução	30
2.2 - Instrumento para Análise Térmica Diferencial	30
2.3 - Proposta de Instrumento para ATD	31
2.4 - Tarefas Executadas por um Instrumento ATD	33
2.5 - Descrição Física do Sistema de Aquecimento Utilizado	34
2.5.1 - Forno de Aquecimento	34
2.5.2 - Porta-Amostras	36
2.5.3 - Tubo Pirométrico	37
2.5.4 - Braço de Sustentação	38
2.6 - Modelo Matemático para o Forno	39
2.7 - Sensor e Transdutor de Temperatura	42
2.7.1 - Sensor de Temperatura - Termopares	42
2.8 - Descrição dos Circuitos Implementados	45

2.8.1 - Transdutor de Temperatura	45
2.8.2 - Circuito de Acionamento	47
2.8.3 - O Circuito de Sincronismo	49
2.9 - Conclusão	51
CAPÍTULO III - FUNDAMENTOS PARA O CONTROLADOR	
3.1- Introdução	52
3.2- Unidade de Aquecimento em Sistema Realimentado com Controlador Proporcional	54
3.3- Determinação do Ganho Direto e do Ganho de Realimentação	56
3.3.1 - Caso Subamortecido	56
3.3.2 - Caso Criticamente Amortecido	59
3.4 - Análise das Simulações para o Controlador Proporcional	60
3.5 - Acionamento e Controle com Microcontrolador	62
3.5.1 - Ganho de Acionamento	63
3.5.2 - Controlador, Conversor A/D e Gerador de Rampa Discreta	64
3.5.3 - Descrição Sucinta do Programa Principal	67
3.5.4 - Frequência de Amostragem para o Sistema Realimentado com Microcontrolador	69
3.6 - O Controlador PI	70
3.6.1 - Implementação do Controlador PI com o Microcontrolador	72
3.6.2 - Cálculo do passo de atualização da rampa (INCC)	73

3.6.3 - Cálculo do Valor Final da Rampa de Entrada	74
3.7 - O Controlador PID	75
3.7.1 - Implementação do Controlador PID com Microcontrolador	79
3.7.2 - Cálculo do passo de incremento da rampa de entrada	80
3.8 - Conclusão	82
CAPÍTULO IV - AQUISIÇÃO DE DADOS PARA ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL	
4.1 - Introdução	83
4.2 - Circuito para Condicionamento de Sinais	83
4.3 - Circuitos para a compensação automática de temperatura	88
4.3.1 - Circuito de termômetro	88
4.4 - Programa de Aquisição e Análise de Dados	93
4.4.1 - Ensaio	98
4.4.2 - Serial	103
4.4.3 - Dos	105
4.4.4 - Sai	106
4.5 - Conclusão	106

CAPÍTULO V - TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 - Introdução	106
5.2 - Resultados Experimentais Obtidos com a Utilização do Controlador Proporcional	106
5.3 - Resultados Experimentais Obtidos com a Utilização do Controlador PI	108
5.4 - Resultados Experimentais obtidos com a Utilização do Controlador PID	110
5.5 - Ensaio Experimentais de ATD	114
5.6 - Conclusão	121
CONCLUSÕES	122
APÊNDICE A - MICROCONTROLADOR MC68HC11	125
APÊNDICE B - FLUXOGRAMA DOS CONTROLADORES	140
APÊNDICE C - LISTAGEM DE PROGRAMAS DOS CONTROLADORES	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	173

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 - Diagrama de blocos genérico de um analisador térmico	10
Figura 1.2 - Mudanças reversíveis e irreversíveis	14
Figura 1.3 - Termograma de uma reação de decomposição	15
Figura 1.4 - Termograma de ATD	24

CAPÍTULO II

Figura 2.1 - Configuração básica de um instrumento para ATD	30
Figura 2.2 - Configuração básica de instrumento para ATD, baseado no MC68HC11	33
Figura 2.3 - Representação esquemática do forno elétrico	36
Figura 2.4 - Porta - amostras	37
Figura 2.5 - Tubo pirométrico	37
Figura 2.6- Suporte mecânico	38
Figura 2.7- Unidade de aquecimento (forno)	39
Figura 2.8- Curvas características dos principais termopares	44
Figura 2.9- Circuito transdutor de temperatura	46
Figura 2.10- Diagrama de blocos do circuito de acionamento do forno	48
Figura 2.11- Circuito de acionamento do forno	49
Figura 2.12 - Circuito de <i>buffer</i>	49
Figura 2.13 - Circuito de sincronismo	50
Figura 2.14 - Sinal de sincronismo para o sistema	51

CAPÍTULO III

Figura 3.1 - Sistema de controle em malha - fechada	52
Figura 3.2 - Unidade de aquecimento realimentada	53
Figura 3.3 - Diagrama esquemático para o sistema realimentado com controlador proporcional	54
Figura 3.4 - Raízes no plano-s complexo de um sistema subamortecido	57
Figura 3.5 - Raízes no plano-s complexo de um sistema criticamente amortecido	60
Figura 3.6 - Temperatura do forno versus tempo	61
Figura 3.7 - Taxa de variação da temperatura do forno versus tempo	61
Figura 3.8 - Diagrama de blocos do sistema de controle, acionamento e condicionamento de sinal, utilizando o microcontrolador MC68HC11	62
Figura 3.9 - Sinal de controle gerado pelo microcontrolador	63
Figura 3.10 - Representação gráfica do incremento para a rampa de entrada	67
Figura 3.11 - Diagrama de blocos do controlador PI	70
Figura 3.12 - Representação gráfica do passo de incremento da rampa de entrada	74
Figura 3.13 - Diagrama de blocos do controlador PID	76
Figura 3.14 - Representação gráfica do passo de incremento da rampa de entrada	82

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 - Circuito para aquisição da temperatura diferencial ($T_a - T_r$)	84
Figura 4.2 - Circuito para condicionamento de sinal	86
Figura 4.3 - Representação gráfica da faixa de variação da tensão de saída no circuito da Figura 4.2 em função de sua tensão de entrada	87
Figura 4.4 - Circuito de termômetro	89
Figura 4.5 - Gráfico da tensão de saída do circuito de termômetro em função da temperatura do sensor	90
Figura 4.6 - Circuito somador não-inversor	91

Figura 4.7 - Temperatura do forno versus tempo	91
Figura 4.8 - Taxa de aquecimento do forno versus tempo	92
Figura 4.9 - Diagrama de fluxo do programa monitor	94
Figura 4.10 - Diagrama de fluxo do bloco de inicialização	95
Figura 4.11 - Serviços e subserviços disponíveis no programa ATD	96
Figura 4.12 - Exemplo de uma tela do programa ATD	97
Figura 4.13 - Exemplo de tela para o serviço ENSAIO	98
Figura 4.14 - Exemplo de tela para o subserviço PARÂMETROS	99
Figura 4.15 - Exemplo de tela para o subserviço ARQUIVO	100
Figura 4.16 - Exemplo de tela para o subserviço CONTROLADOR	101
Figura 4.17 - Exemplo de tela para o subserviço INICIO	102
Figura 4.18 - Exemplo de tela para o subserviço LINHA BASE	103
Figura 4.19 - Exemplo de tela para o subserviço SERIAL	104
Figura 4.20 - Exemplo de tela para o subserviço DOS	105

CAPÍTULO V

Figura 5.1 - Temperatura do forno versus tempo (controlador P)	108
Figura 5.2 - Taxa de aquecimento do forno versus tempo(controlador P)	108
Figura 5.3 - Temperatura do forno versus tempo (controlador PI)	110
Figura 5.4 - Taxa de aquecimento do forno versus tempo(controlador PI)	110
Figura 5.5 - Temperatura de aquecimento do forno versus tempo(controlador PID)	112
Figura 5.6 - Taxa de aquecimento do forno versus tempo(controlador PID)	112
Figura 5.7 - Taxa de aquecimento do forno versus tempo (controlador PID - 8 bits)	114
Figura 5.8 - Taxa de aquecimento do forno versus tempo(controlador PID - 10 bits)	114
Figura 5.9 - Linha de base ou referência	116

Figura 5.10 - ATD 1 - material: caulim natural	117
Figura 5.11 - ATD 2 - material: argila Mamuaba	118
Figura 5.12 - ATD 3 - material: argila Mataraca	119
Figura 5.13 - ATD 4 - material: esmectita	120
Figura 5.14 - ATD 5 - material: argila plástica para cerâmica vermelha	121
Figura C1 - Configuração básica de um instrumento para análise térmica diferencial	125
Figura A.1 - Subsistemas do microcontrolador MC68HC11	127
Figura A.2 - Registradores da CPU do MC68HC11	128
Figura A.3 - Mapeamento de memórias internas do MC68HC11	130
CAPÍTULO I	
Tabela 1.1 - Origem física ou química dos picos em análise térmica diferencial	22
Tabela 1.2 - Aplicações da análise térmica diferencial em química	23
CAPÍTULO II	
Tabela 2.1 - Termopares mais comuns e suas características	43
Tabela 2.2 - Tensões de saída de uma junção do tipo K	45
APÊNDICE A	
Tabela A.1- Modo de operação em função dos pinos MODA e MODB	129

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

- A/D** - Analógico digital;
- ATD** - Análise Térmica Diferencial;
- ATG** - Análise Termogravimétrica;
- ATM** - Análise Termomecânica;
- ADCTL** - Registrador de Controle/Status do A/D;
- ADR** - Registrador de Resultado do A/D;
- ASCII** - Código americano padrão para intercâmbio de informação;
- CCR** - Registrador de Código de Condições;
- ci** - Calor específico do meio i;
- CI** - Circuito Integrado;
- CMOS** - Semicondutor de óxido de metal na Configuração Complementar;
- CMRR** - Razão de rejeição de modo comum;
- CPU** - Unidade Central de Processamento;
- CT** - Controlador de temperatura;
- DSC** - Calorimetria Diferencial de Varredura;
- DTG** - Análise Termogravimétrica Diferencial;
- EEPROM** - Memória de leitura eletricamente apagável;
- EVB** - Placa de desenvolvimento;
- GND** - Referência de Sinal;
- HCMOS** - Semicondutor de óxido de metal na configuração complementar em alta densidade de integração;
- INCC** - Passo de atualização da rampa de entrada;
- I/O** - Entrada /Saída;
- Kd** - Ganho derivativo;
- Ki** - Ganho integral;
- Kij** - Condutância térmica entre os meios i e j;
- Kp** - Ganho Proporcional;

LSB - Bit menos significativo;

mi - Massa do meio i;

min. - Minutos;

Ni-Cr - Níquel - Cromo;

P - Proporcional;

PA - Porta- amostras;

PC - Microcomputador Pessoal;

PACTL - Registrador de Controle do Acumulador de Pulsos;

PI - Proporcional integral;

PID - Proporcional integral derivativo;

P(t) - Potência elétrica entregue ao forno;

PWM - Modulação por largura de pulso;

RAM - Memória de acesso aleatório;

ROM - Memória de leitura;

SCI - Interface para Comunicação Serial;

SPI - Interface Serial Periférica;

t - Tempo;

Ta - Temperatura da amostra;

TIMER - Temporizador Principal;

T₀ - Temperatura ambiente;

Tr - Temperatura do material de referência;

TTL - Lógica Transistor - Transistor - padrão de circuitos integrados;

UA - Unidade de aquecimento;

Vamost - Tensão correspondente a temperatura da amostra;

VCC - Tensão de alimentação;

Vcomp - Tensão correspondente à temperatura ambiente;

V₀ - Tensão de saída;

Vref - Tensão correspondente à temperatura do material de referência.

INTRODUÇÃO

O campo da ciência dos materiais vem se desenvolvendo rapidamente devido ao reconhecimento de que princípios científicos idênticos se aplicam às propriedades dos metais, dos materiais inorgânicos não-metálicos e dos materiais orgânicos e compostos. No passado, tecnologias individuais foram desenvolvidas para materiais diferentes, porque esses princípios amplos e sua aplicabilidade geral não haviam sido reconhecidos. Recentemente, os desenvolvimentos em metalurgia, cerâmica, física e química tornaram possível estabelecer uma tentativa para os fundamentos gerais da ciência dos materiais, transcendendo os detalhes da tecnologia corrente nesses campos. Em particular, o notável sucesso que a metalurgia tem tido, correlacionando as propriedades dos metais e ligas com as respectivas propriedades estruturais, levou à adoção dessa metodologia para materiais cerâmicos, semicondutores, materiais plásticos e outros tipos polimerizados [1].

É quase impossível imaginar-se um sistema físico ou químico, em relação ao qual a temperatura não seja uma variável independente importante, tendo influência direta sobre suas características físicas e químicas [2].

Propriedades físicas tais como: o ponto de fusão, ebulição, o calor específico, o coeficiente de dilatação e a condutividade térmica, são exemplos de propriedades físicas dos materiais que são afetadas diretamente pela variação da temperatura. Pois são exemplos de processos que envolvem mudanças nas características internas de um material, que passa de um arranjo atômico para outro, correspondendo à transição entre diferentes arranjos estruturais nas moléculas do material [1].

Assim, com base no anteriormente exposto, concluímos que a temperatura representa um papel preponderante no comportamento dos materiais; ressaltando-se então a importância em se observar o comportamento térmico dos mesmos, quando submetidos a variações de temperatura.

Em resposta a esta necessidade foi desenvolvido um conjunto elaborado de técnicas, denominadas análises térmicas, para a detecção e observação de mudanças no comportamento das propriedades físicas e químicas de uma substância sob teste ou análise, nestas condições denominada amostra, em função da temperatura.

Segundo Giolito [2]; “Ao se estudar o desenvolvimento dos métodos termoanalíticos (ou seja, métodos que utilizam as propriedades térmicas da matéria), chama a atenção o fato dessa evolução ter sido lenta, embora os fundamentos teóricos necessários já se encontrassem solidamente estabelecidos desde fins do século passado (termodinâmica clássica)”.

As técnicas termoanalíticas começaram a ser desenvolvidas e estudadas desde o início deste século; os trabalhos iniciais foram o resultado do esforço isolado de alguns grupos de pesquisadores, que empregavam instrumentação rudimentar idealizada e construída em seus próprios laboratórios; porém, a instrumentação termoanalítica disponível atualmente evoluiu extraordinariamente em virtude de vários fatores, dentre os quais se destacam como mais importantes, de um lado, os progressos globais da ciência e da tecnologia, que vem permitindo o aperfeiçoamento contínuo da instrumentação básica e, de outro, a redescoberta das potencialidades de aplicação destes métodos nos mais variados setores científicos, tecnológicos e de produção de bens de consumo.

Nos dias atuais, a instrumentação termoanalítica atingiu um grau elevadíssimo de sofisticação, popularizou-se em função de uma aplicação prática crescente e vem sendo encarada como ferramenta de trabalho importante em todos os setores de vanguarda, que se dedicam à pesquisa, no desenvolvimento de novos produtos e ao controle de qualidade da produção.

Dentre as diversas técnicas termoanalíticas existentes destaca-se a análise térmica diferencial, como o método térmico mais amplamente utilizado. Os resultados de outros métodos têm sido incorporados apenas, onde eles são necessários, para suplementar os dados térmicos diferenciais [3].

Com a utilização cada vez mais crescente e diversificada dos materiais, na produção de bens de consumo e produção, eles ficaram submetidos as mais diversas condições térmicas. Assim as suas características térmicas, ou seja a identificação de temperaturas que provocam transformações de ordem física ou química nestes materiais, passou a ser um fator cada vez mais observado e avaliado, tornando-se condicionante para a sua utilização nas mais diversas aplicações.

Podemos citar como exemplos: Condutores elétricos que devem suportar temperaturas elevadas, a característica “corrente/tensão” de um semicondutor que deve permanecer constante por um longo período de tempo, pistons utilizados para propulsão em motores a diesel, gasolina, etc., que devem ser capazes de operar sob temperaturas elevadas em condições normais de operação, etc. Assim, como muitos projetos avançados em engenharia dependem do desenvolvimento de materiais completamente novos, o transistor nunca poderia ter sido construído com os materiais disponíveis há 60 anos atrás, o desenvolvimento da bateria solar requereu um novo

tipo de semicondutor; e, embora os projetos de turbinas a gás estejam muito avançados, ainda se necessita de um material barato e que resista a altas temperaturas, para as pás da turbina [1].

Levantar então o perfil do comportamento térmico de um material (análise térmica), consiste em realizar análises experimentais e ensaios térmicos para observar o comportamento do material sob determinadas condições de temperatura. Objetivando-se com isso prever o seu comportamento sob determinadas condições de ordem prática.

Neste contexto, apresenta-se o projeto, o desenvolvimento e a implementação de um instrumento para a análise térmica diferencial, denominado analisador termodiferencial, que é o instrumento responsável pela análise térmica diferencial de materiais, tendo como principal objetivo levantar o comportamento térmico dos materiais.

Com esse procedimento é possível a identificação adequada do material para seu uso apropriado, como também a seleção de condições adequadas para a sua fabricação. Outra aplicação importante para este instrumento consiste na identificação do grau de pureza de uma substância em uma determinada amostra sob teste [4].

MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO

Existem atualmente no mercado um grande número de instrumentos comerciais capazes de registrar curvas de análise térmica diferencial (ATD). Muitos fabricantes produzem sistemas termoanalíticos modulares, com os quais podem ser feitas análises

térmicas diferenciais, termogravimétricas, calorimetria de varredura diferencial, análises termomecânicas (dilatométricas), etc. Os módulos **ATD** variam bastante quanto às faixas de temperatura em que são capazes de operar, quanto ao formato dos suportes de amostra, tipo de controle da temperatura e da atmosfera do forno, o tipo de sistema utilizado para registrar as análises, etc. Por esta razão, tal como acontece com as curvas termogravimétricas, as curvas térmicas diferenciais de uma dada amostra apresenta certas diferenças entre si, quando são obtidas em aparelhos diferentes. Por outro lado, os progressos alcançados na construção destes equipamentos trouxeram consigo alguma padronização, de modo que, atualmente, pode-se obter em condições idênticas de aquecimento, resultados bastante reproduzíveis, empregando-se um certo modelo de instrumento.

No entanto, estes equipamentos são relativamente caros. As instituições de ensino superior para as quais estes equipamentos são de grande importância, sofrem com a escassez de recursos financeiros, que associada à dificuldades de importação, manutenção e reparos eventuais que, quando necessário, acarreta na maioria dos casos a desativação do aparelho, ocasionando assim enormes prejuízos e inviabilizando a condução de pesquisas e prestação de serviços. Um aparelho para **ATD** (análise térmica diferencial) é um instrumento notadamente útil a estas instituições. Na **UFPB**, o Departamento de Engenharia de Materiais, Engenharia Química, e Eng. Civil, realizam ensaios térmicos corriqueiramente.

O protótipo do instrumento para **ATD** desenvolvido e apresentado neste trabalho, é uma evolução (em termos de interface homem/máquina) de um projeto anterior de tal instrumento apresentado em disciplina de doutoramento, por Oliveira [5], no qual foi utilizado o microcontrolador 80C196. Neste, o instrumento é baseado

na utilização do microcontrolador MC68HC11 da Motorola, para aquisição e tratamento dos dados (condicionamento), controle de temperatura, acionamento da unidade de aquecimento (forno), alarme e proteção com interface com microcomputador pessoal para análise, armazenamento e apresentação de dados.

A configuração descrita no parágrafo anterior, apresenta as seguintes vantagens operacionais:

- a) Uma maior compactação, uma vez que o sistema responsável pelo funcionamento do instrumento, será basicamente o microcontrolador, necessitando apenas de alguns circuitos eletrônicos extras, notadamente no que se refere ao condicionamento de sinais e ao acionamento da unidade de aquecimento.
- b) Portabilidade, uma vez que o sistema pode ser facilmente adaptado a qualquer computador pessoal (**PC**) compatível com o padrão **IBM**, apresentando grande independência com relação a este para o seu funcionamento.
- c) Facilidade para sua reprodução e manutenção, uma vez que o instrumento constitui-se em um equipamento relativamente simples e totalmente implementado com dispositivos facilmente encontrados no mercado nacional.

ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Após esta introdução, no Capítulo 1 apresenta-se os fundamentos teóricos sobre análise térmica, dando-se ênfase no entanto a análise térmica diferencial de forma a situar este trabalho no seu âmbito. Um protótipo do instrumento para **ATD** proposto

neste trabalho é apresentado no Capítulo 2, com o objetivo de descrever sua arquitetura e suas características como um todo.

No Capítulo 3 é apresentada considerações de projeto e implementação de três estratégias de controle para aquecimento do forno com uma taxa constante de variação de temperatura.

Os circuitos de aquisição das tensões correspondentes as temperaturas da amostra (T_a) e do material de referência (T_r), necessárias para a realização dos ensaios de **ATD** de uma substância são apresentados no Capítulo 4, seguindo-se do projeto de uma *interface* amigável para o instrumento.

São apresentados no Capítulo 5, simulações e resultados experimentais de acionamento para análise da performance de resposta do sistema, para cada controlador implementado, assim como ensaios de **ATD** com o instrumento proposto para argilominerais cujos termogramas são conhecidos na literatura.

Por fim, são apresentadas as conclusões seguidas pelos apêndices A, B e C, onde são apresentados, respectivamente o microcontrolador **MC68HC11**, os fluxogramas dos controladores implementados e a listagem do programa básico de controle, acionamento e aquisição de dados do sistema.

ORIGENS E DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS TERMOANALÍTICOS

1.1 - Introdução

Análise térmica ou termoanálise consiste em um conjunto elaborado de técnicas para a detecção e observação de mudanças no comportamento das propriedades físicas ou químicas de uma substância (material) sob teste ou análise, nestas condições denominada amostra, em função da temperatura. Na prática, entretanto, o termo análise térmica é usado somente para certas propriedades, específicas, quais sejam: entalpia, capacidade calorífica, coeficiente de expansão térmica e de massa [6].

Quando um material é submetido a uma variação contínua de temperatura, ele sofre transformações e, estas envolvem mudanças nas propriedades físicas ou químicas da amostra. Este é o princípio fundamental em que se baseiam tais análises.

“Ao cientista francês H. Le Chatelier é creditada a criação do método para análise térmica em 1887, quando estudou a decomposição de argilas utilizando-se de aquecimento. Le Chatelier fotografou o calor emitido pela argila durante um processo de aquecimento e concluiu que a mesma poderia ser classificada de acordo com o seu padrão de aquecimento”[7].

A análise térmica é utilizada como uma ferramenta analítica para identificar as propriedades físicas e reações químicas de materiais, baseando-se no exame de temperatura; utilizando-se dela para identificação de polímeros, substâncias químicas inorgânicas ou orgânicas, metais, minerais, argilas e ligas metálicas; como também no controle de qualidade de materiais, monitoração de produção e no desenvolvimento de novos materiais. Sendo sua classificação baseada em três propriedades fundamentais da matéria: a) a alteração de peso; b) a alteração de energia e, c) a alteração de dimensões [4].

A simples observação visual da fusão de um composto, tão comum em qualquer laboratório de química e a medição do coeficiente de expansão térmica de

barras de metais são alguns exemplos de técnicas termoanalíticas. Evidentemente, a instrumentação moderna, pelo fato de ser muito mais complexa, é capaz de fornecer as informações necessárias para se atingir objetivos muito mais profundos e variados.

Com equipamentos modernos, uma grande faixa de materiais pode ser estudada, a utilização da análise térmica na ciência do estado sólido são muitas e variadas e incluem o estudo de reações e transições de fase e a determinação de diagramas de fase. Todavia, o princípio fundamental mantém-se inalterado, ou seja, a observação de uma mudança sofrida pelo material que dependa diretamente da temperatura [6].

Em um sistema termoanalítico genérico a amostra é colocada em um ambiente de temperatura controlada, e suas alterações são detectadas e diretamente monitoradas através da utilização de transdutores os quais as convertem em um sinal elétrico de saída, que após amplificação adequada é aplicado a um instrumento de leitura.

O programador de temperatura (Figura 1.1) pode ser ajustado para manter constante a temperatura da amostra (operação isotérmica), ou pode ser ajustado para fazer com que sua temperatura varie linearmente com o tempo; a razão de aquecimento pode e deve ser ajustada de acordo com as peculiaridades próprias das transições que a amostra deverá sofrer.

O transdutor é colocado na vizinhança imediata da amostra e, via de regra, é específico para o tipo de propriedade física ou química que se deseja monitorar. O dispositivo de saída é, usualmente, um registrador do tipo XY; onde a variável dependente (perda ou ganho de massa, perda ou ganho de calor, condutividade elétrica, comprimento ou volume, etc.) é colocada no eixo Y das ordenadas e a variável independente, ou seja, a temperatura da amostra, no eixo X das abcissas. No caso de operação isotérmica, costuma-se utilizar o tempo como variável independente. Na Figura 1.1 apresenta-se um diagrama genérico de um analisador térmico.

O campo da análise térmica compreende, atualmente, vários métodos dos quais destacam-se [2]:

- (1) Análise Térmica diferencial (ATD)
- (2) Análise Termogravimétrica (ATG)
- (3) Análise Termogravimétrica Diferencial (DTG)
- (4) Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)
- (5) Análise Termomecânica (ATM).

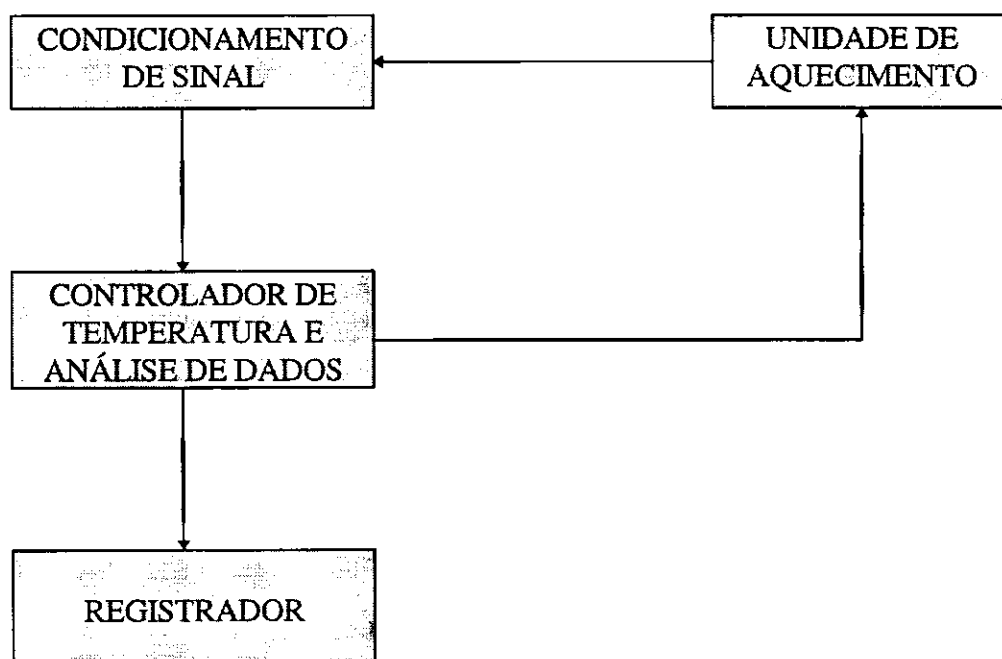


Figura 1.1 - Diagrama de blocos genérico de um analisador térmico

Como bem assinala Garn no prefácio de seu livro, "Investigações Termoanalíticas" a análise térmica é eminentemente interdisciplinar sendo útil em vários setores científicos e tecnológicos, dentre os quais se destacam:

- Ciências naturais: química, metalurgia, cerâmica;
- Geociências: geologia, mineralogia e oceanografia;

- Ciências biológicas: botânica, agronomia, ecologia, tecnologia química e tecnologia de alimentos;

- Ciências forenses : medicina legal e criminologia.

1.2 - Principais Métodos Termoanalíticos

A seguir apresenta-se um resumo sobre os principais métodos termoanalíticos, de modo a permitir que, se tenha-se uma visão geral de seus fundamentos teóricos, das técnicas fundamentais que utilizam e de suas principais aplicações.

1.2.1 - Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

Este método vem ganhando popularidade crescente nos últimos anos; pode ser definido como sendo um método termoanalítico diferencial, no qual os valores das ordenadas em qualquer temperatura (ou tempo) é diretamente proporcional ao fluxo diferencial de calor entre a amostra e um material termicamente inerte de referência. Segue-se que a área integrada sob a curva registrada é diretamente proporcional à entrada calórica diferencial total. O termo varredura (scanning) significa ou implica que tanto a temperatura da amostra como a temperatura do material de referência são variadas durante o registro da análise como função do tempo.

A calorimetria diferencial de varredura (DSC) é usada para investigar as propriedades térmicas de materiais orgânicos e inorgânicos. Ela fornece informações quantitativas sobre estas mudanças térmicas incluindo a taxa de transferência de calor [6].

As propriedades térmicas básicas de um material são descritas pela dependência de sua entalpia com a temperatura.

Quando uma transição térmica ocorre na amostra, a energia térmica é adicionada, à amostra ou à referência, de modo a manter a amostra e a referência à mesma temperatura. Como a energia transferida é exatamente equivalente à energia absorvida ou desprendida na transição, o balanceamento final de energia nos fornece uma medida calorimétrica direta da energia de transição na temperatura da transição.

Por exemplo, se ocorresse um processo endotérmico na amostra a tendência seria de que a temperatura da amostra diminuisse em relação à da referência. Assim para se manter a amostra e a referência à mesma temperatura é preciso fornecer energia à amostra a uma taxa que balanceie o consumo de energia interna.

Aparelhos de **DSC** utilizam cadinhos selados e separados, um contendo o material de interesse e o outro contendo uma referência apropriada. Esses cadinhos são aquecidos (ou resfriados) uniformemente. A diferença entálpica entre os dois é monitorada a temperatura constante (isotérmica) ou aumentando-se (ou diminuindo-se) linearmente a temperatura, capazes de operar sob pressão ou a pressões reduzidas, o que permite ampliar as potencialidades deste método no sentido de elucidar o comportamento térmico dos materiais.

Geralmente, para aumentar a precisão do aparelho faz-se uma medida utilizando a referência apropriada num cadinho e o cadinho da amostra vazio e depois uma medida normal, ou seja, com a referência e a amostra em cadinhos diferentes. O resultado obtido na primeira medida é subtraído da segunda.

O gradiente de temperatura do experimento pode ser aumentado vagarosamente ($0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min.}$) ou rapidamente ($300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min.}$). Um circuito eletrônico detecta qualquer mudança no fluxo de calor na amostra e na referência. Este evento em curso é transformado em um sinal analógico, o qual é enviado a um dispositivo de saída tal como um registrador gráfico de barras, ou um computador.

Informações qualitativas podem ser obtidas com amostras tão pequenas quanto $0,1\text{ mg}$. Entretanto, estudos quantitativos usualmente requerem pelo menos 1 mg de amostra. Os tamanhos das amostras estão na faixa de $0,1$ a 100 mg .

Acima de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ os efeitos convectivos do aquecimento são muito maiores e, portanto, bastante desastrosos em termos de precisão.

O compartimento da amostra pode ser hermeticamente fechado o que permite operação em atmosfera controlada (até 67 atm) ou vácuo.

A distribuição da amostra numa área grande (do porta amostra) e com camada delgada minimiza gradientes térmicos e maximiza a precisão da temperatura e resolução.

Uma das aplicações do **DSC** é acompanhar as mudanças térmicas tanto no aquecimento quanto no resfriamento. Deste modo é possível separar as mudanças reversíveis, tais como fusão e solidificação, das mudanças irreversíveis, tais como a maioria das reações de decomposição. Um diagrama esquemático ilustrando este fato pode ser visto na Figura 1.2. Partindo de um material hidratado, a desidratação é o primeiro evento a ocorrer no aquecimento e aparece como uma reação endotérmica. O material desidratado sofre, em seguida, uma modificação em sua estrutura cristalina, que também é endotérmica. Finalmente, a amostra se funde produzindo um terceiro pico endotérmico. Na curva de resfriamento observa-se uma seqüência inversa de processos: solidificação e mudança na estrutura cristalina. Já a reidratação não ocorre. Deste modo, observa-se a ocorrência de dois processos reversíveis e um irreversível. É lógico que se um processo é endotérmico no aquecimento, no processo inverso, ou seja, no resfriamento, será exotérmico [6].

No estudo de processos reversíveis é comum observar o que se denomina de histerese. Por exemplo, um pico que aparece num resfriamento pode ser deslocado para temperaturas mais baixas que o seu correspondente que aparece no aquecimento. Idealmente os dois processos deveriam ocorrer à mesma temperatura, mas histereses são comuns, desde poucos graus até a supressão completa do pico.

Histereses dependem não somente da natureza do material e da variação da estrutura envolvida - as transições difíceis envolvendo por exemplo a quebra de ligações exibem comumente muita histerese - mas também das condições experimentais, tais como as taxas de aquecimento e resfriamento. A histerese ocorre particularmente no resfriamento a taxas relativamente rápidas. Em alguns casos, em que a taxa de resfriamento é muito rápida, a mudança pode ser completamente suprimida sendo efetivamente irreversível. Um exemplo deste fato, que é de grande importância industrial, está associado a fabricação do vidro.

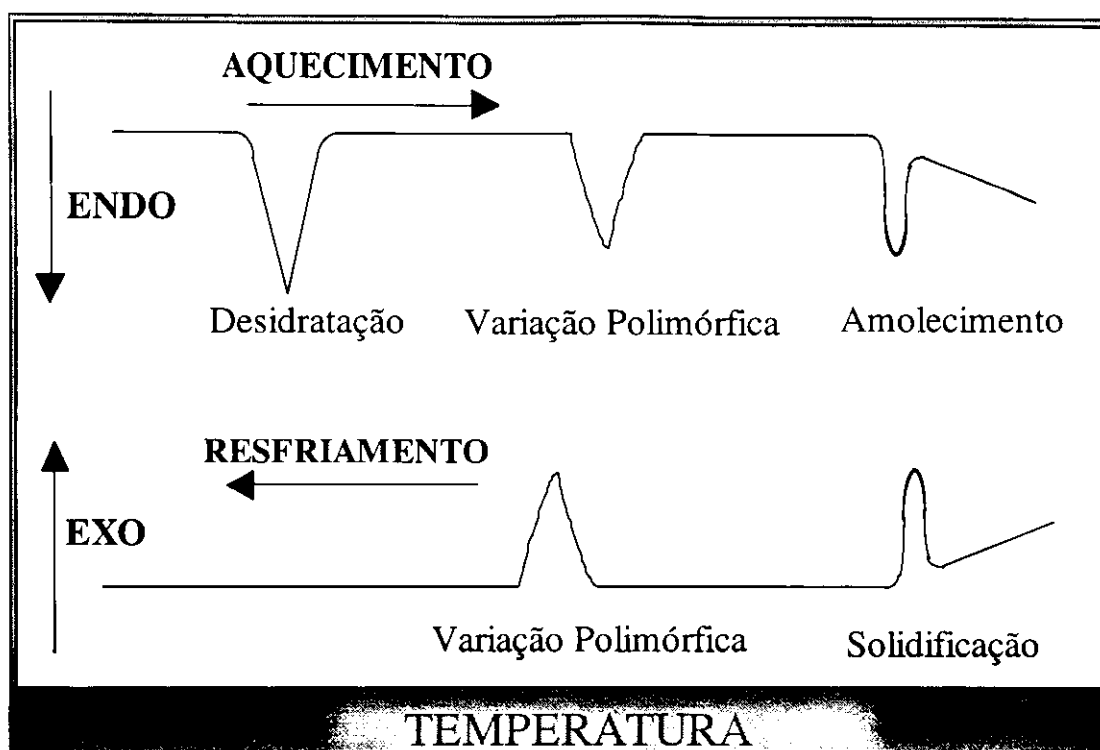


Figura 1.2 - Mudanças reversíveis e irreversíveis

1.2.2 - Análise Termogravimétrica (ATG)

A termogravimetria é uma técnica que mede a variação de massa de uma substância como uma função da temperatura ou do tempo [6].

A termogravimetria é utilizada em um grande número de aplicações de teste. As mais importantes incluem a análise de decomposição e perfis de decomposição em temperaturas variadas.

Os resultados usualmente aparecem registrados em um diagrama contínuo, como o mostrado na Figura 1.3, em que uma reação típica de decomposição de uma etapa simples ocorre. A amostra, usualmente poucos miligramas em peso, é aquecida a uma taxa constante, tipicamente na faixa de 1 a $50^{\circ}\text{C}/\text{min.}$, tendo um peso constante, W_i , até ela começar a se decompor à temperatura T_i . Sob condições de aquecimento dinâmico, a decomposição usualmente muda a temperatura, de T_i para

Tf, e um segundo peso constante (patamar) é então observado acima de Tf, que corresponde ao peso do resíduo Wf. Os pesos Wf, Wi e a diferença em peso ΔW são propriedades fundamentais da amostra e podem ser usadas para cálculos quantitativos da variação composicional. As temperaturas Ti e Tf dependem de variáveis tais como taxa de aquecimento, natureza dos sólidos (e portanto, tamanho das partículas) e atmosfera acima da amostra. O efeito da atmosfera pode ser dramático. Cita-se como exemplo, a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3). No vácuo, a decomposição ocorre aproximadamente por volta de 500°C , enquanto que, em CO_2 , à pressão atmosférica, ela não se inicia antes de 900°C [6].

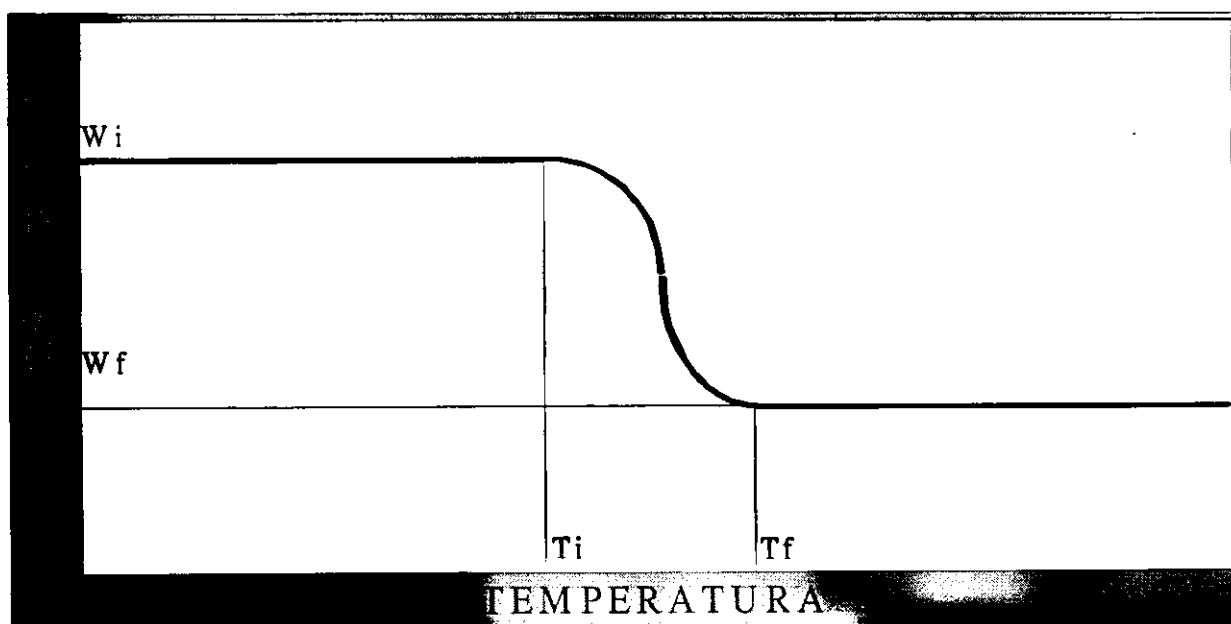


Figura 1.3 - Termograma de uma reação de decomposição

1.2.3 - Análise Termogravimétrica Diferencial (DTG)

No método termogravimétrico convencional são registradas curvas de peso da amostra, p , em função da temperatura, T , ou do tempo, t , ou seja:

$$p = f(T \text{ ou } t) \quad (1.1)$$

Portanto, nessas curvas, os desníveis em relação ao eixo de ordenadas correspondem às variações de peso sofridas pela amostra e permitem obter dados que podem ser utilizados com finalidades quantitativas.

No método termogravimétrico diferencial são registradas as curvas da derivada do peso em relação ao tempo, dp/dt , em função da temperatura ou do tempo:

$$dp/dt = f(T \text{ ou } t). \quad (1.2)$$

Logo, neste método são obtidas curvas que correspondem à derivada primeira da curva termogravimétrica e nos quais os degraus são substituídos por picos que delimitam áreas proporcionais às alterações de peso sofridas pela amostra.

Esta técnica foi inicialmente sugerida por De Keyser. No sistema idealizado por De Keyser, a balança suspende duas amostras idênticas sobre dois fornos idênticos, aquecidos linearmente, mas, um deles, sendo mantido cerca de 5°C mais quente que o outro. Estabelecendo-se, desta forma, uma diferencial de peso que é proporcional à velocidade de aquecimento dos fornos. Este princípio foi aproveitado na construção da termobalança diferencial Sartorius-De Keyser.

Posteriormente, Campbell, Gordon e Smith idealizaram um circuito RC para diferenciação do sinal de saída de termobalanças comerciais. Atualmente, este sistema eletrônico de diferenciação é o mais utilizado para se obter as curvas DTG.

As curvas diferenciais de perda de peso assemelham-se às curvas térmicas diferenciais, e permitem a obtenção de informações adicionais [2].

1.2.4 - Análise Termomecânica

Grande número de propriedades características dos materiais (temperatura de amolecimento, módulo elástico, temperatura de contração, transição vítrea, coeficiente de expansão) podem ser facilmente determinadas empregando-se analisadores termomecânicos. Trata-se, também, de uma técnica particularmente útil, pois permite confirmar as transições reveladas por outras técnicas termoanalíticas.

Em geral, os analisadores termomecânicos utilizam como transdutor um transformador diferencial de tensão linear com núcleo móvel (LVDT), que fornece uma saída de corrente alternada proporcional ao deslocamento do seu núcleo. Essa tensão é aplicada ao eixo y do registrador; a este eixo pode-se, também, aplicar essa tensão derivada em relação ao tempo. Um termopar é colocado em contato direto ou nas vizinhanças da amostra permitindo assim, a medição direta da sua temperatura. A saída do termopar compensada por uma função de referência é aplicada ao eixo x do registrador. A amostra e a sonda ficam rodeadas por um forno cilíndrico. As curvas obtidas registram deslocamentos da sonda (da ordem de $4 \times 10^{-3} \text{ mm}$) e a correspondente derivada em função da temperatura ou do tempo [6].

1.2.5 - Análise Térmica Diferencial (ATD)

Na análise térmica diferencial uma amostra (material em teste) e um material termicamente inerte de referência (material que não sofre transformação dentro da faixa de temperatura em que se processa a análise), são inseridos em um ambiente

termicamente isolado (forno) e gradativamente aquecidos a uma taxa específica de aquecimento [3].

A variação de temperatura no ambiente, onde a amostra se encontra provoca transformações nesta e, associadas a essas transformações, existe a liberação ou absorção de calor (transformações exotérmicas ou endotérmicas, respectivamente).

A diferença de temperatura entre a amostra e o material de referência ($\Delta T = T_a - T_r$) é registrada em função da temperatura do material de referência (T_r). Quando não há transformação na amostra não há diferença entre esta e o material de referência, mas logo que uma transformação tem início a amostra se torna mais quente ou mais fria que o material de referência. Estas transformações endo ou exotérmicas, aparecem como desvio em sentidos opostos na curva de diferença de temperatura em função da temperatura de referência (curva diferencial térmica ou termograma).

Pela posição, forma e intensidade dos picos endo ou exotérmicos dos termogramas é possível a identificação bastante precisa de argilominerais puros, através de comparações com termogramas referenciais, que identificam os diversos materiais conhecidos e assim as amostras são identificadas [4].

Segundo Welcher [8], através desta técnica, pode-se acompanhar os efeitos térmicos causados por fenômenos físicos tais como: fusão, inversão da estrutura cristalina, vaporização, ebulição, sublimação, congelamento e outros. Como também, efeitos entálpicos causados por reações químicas tais como: dissociação ou decomposição, desidratação, oxidação e outros.

Em geral, transições de fase, desidratações, reduções e certas reações de decomposição produzem efeitos endotérmicos, enquanto que cristalizações, oxidações, algumas reações de decomposição produzem efeitos exotérmicos..

Quanto as suas origens, a análise térmica diferencial está ligada ao nome de Le Chatelier, que, em 1887, publicou um trabalho, hoje clássico, intitulado: “De l’action de la chaleur sur les argiles”, no qual descreveu um método aplicável ao estudo de argilas e minerais. Este método, com o decorrer do tempo, permitiu desenvolver a técnica hoje conhecida com o nome de análise térmica diferencial [3].

Le Chatelier e mais tarde outros autores estudaram as modificações que ocorriam com as substâncias, a medida que iam sendo aquecidas. As sucessivas temperaturas atingidas pelas amostras eram medidas através de um termopar e, em seguidas, lançadas em um gráfico cartesiano em função do tempo. Estas “curvas de aquecimento”, como eram então chamadas, apresentavam descontinuidade sempre que o aquecimento provocava transições de fase ou reações de desidratação, de decomposição, etc. Este método, como é fácil perceber, era pouco sensível a pequenos efeitos térmicos e, além disso, muito afetado pelas eventuais variações na velocidade linear de aquecimento e pelo processo utilizado na medição de temperatura.

Giolito [2] informa que em 1899, Roberts-Austen já havia sugerido o emprego de dois termopares ao invés de apenas um: Um termopar colocado no interior da amostra e o outro no interior do bloco de referência do forno. Por este processo eram feitas leituras de temperaturas diferenciais muito mais sensíveis às pequenas variações, que, a seguir, eram medidas em função do tempo ou da temperatura com o auxílio de galvanômetros sensíveis.

Em 1909, G.K. Burgess, também discutiu as vantagens de se utilizar dois termopares para se obter curvas de aquecimento ou de resfriamento. Este trabalho, ao qual não se tem dado a devida importância, deve, no entender de Wendlandt [9], ser considerado como um marco muito importante no desenvolvimento da análise térmica diferencial, pois os princípios fundamentais que nele são discutidos continuam válidos até hoje.

A primeira aplicação do método térmico diferencial, empregando dois pares termoelétricos, no estudo de problemas químicos foi realizada, em 1923, por Houldsworth e Cobb; após este trabalho, muitos outros autores passaram a se ocupar do estudo da decomposição térmica de argilas e minerais, através da análise térmica diferencial. Todavia, só nos últimos 25 anos é que este método passou a ser amplamente utilizado na resolução de problemas químicos [2].

1.3 - Aplicações da Análise Térmica Diferencial

O método de análise térmica diferencial tem tido larga aplicação no estudo de argilas desde os trabalhos de Grim e Rowland (1942) [10] que mostraram sua aplicabilidade como método de identificação de argilominerais e suas misturas, naturais ou artificiais. O método de análise térmica diferencial tem aplicação na química e petroquímica, na cerâmica e indústria de cimento, na determinação do ponto de temperatura de transformações e reações de materiais (plásticos, polímeros, cerâmicos e cimento) [11].

Todas as aplicações da análise térmica diferencial se baseiam na interpretação adequada dos picos endotérmicos e exotérmicos que aparecem nas curvas térmicas diferenciais. A posição, forma e intensidade (em relação ao eixo das temperaturas) destes picos permitem interpretações qualitativas e as áreas dos picos, após medições adequadas permitem determinações quantitativas; os dados experimentais, após tratamentos matemáticos, permitem, também, chegar-se a importantes conclusões sobre a cinética das transformações [8]. Qualquer fenômeno, físico ou químico que por ocasião de sua ocorrência provoque variações de entalpia (mudanças na composição química, no estado físico, etc) em um material pode ser detectado através destas curvas.

Pode-se afirmar que a forma dos picos é determinada pela cinética da reação, embora possa sofrer, simultaneamente, as influências de vários parâmetros experimentais. Fato idêntico ocorre com as áreas dos picos que embora dependam fundamentalmente das variações de entalpia, podem ser modificadas pela ação de vários fatores instrumentais [2]. A origem dos picos endotérmicos e exotérmicos para alguns tipos de fenômenos físicos e químicos é apresentada na Tabela 1.1 [9].

TABELA 1.1- Origem física ou química dos picos em análise térmica

diferencial

FENÔMENO	Variação de Entalpia	
	Endotérmica	Exotérmica
Físico : Transição cristalina	X	X
Fusão	X	-
Vaporização	X	-
Sublimação	X	-
Absorção	X	-
Químico: Desidratação	X	-
Degradação oxidativa	X	-
Reações no estado sólido	X	X
Reações de oxidação	X	X
Oxidação em atmosfera gasosa	-	X

Nas primeiras décadas que sucederam a invenção da análise térmica diferencial, as suas aplicações praticamente se restringiram a solução de problemas relacionados com cerâmica, metalurgia, edafologia (estudo dos solos com vistas ao cultivo) e geologia. Só recentemente é que esta técnica passou a ser cada vez mais utilizadas na resolução de problemas químicos; nas últimas décadas a lista de aplicações cresceu rapidamente, de modo que hoje pode-se afirmar que a análise térmica diferencial constitui valiosa fonte de informações em todos os setores da química [9]. Suas áreas específicas de investigação encontram-se na Tabela 1.2.

TABELA 1.2 - Aplicações da análise térmica diferencial em química.

SUBSTÂNCIAS	TIPOS DE ESTUDO
Catalisadores	Reações de decomposição
Polímeros	Diagramas de fases
Graxas lubrificantes	Cinética de reações
Óleos e gorduras	Reações em estado sólido
Compostos de coordenação	Catálise
Carboidratos	Calores de adsorção
Amino ácidos e proteínas	Calores de reação
Sais hidratados	Calores de polimerização
Óxidos de metais e não metais	Calores de sublimação
Carvão e petróleo	Calores de transição
Fibras têxteis naturais e artificiais	Reações de desolvatação
Produtos naturais	Reações gás - sólido
Substâncias orgânicas	Danos provocados por radiação

1.4 - Terminologia na Análise Térmica Diferencial

Os instrumentos para a análise térmica diferencial registram a diferença de temperatura entre a amostra e o material de referência, através de uma curva diferencial térmica ou termograma. Um exemplo de semelhante gráfico é indicado na Figura 1.4.

- Linha de base ou referência

No gráfico da Figura 1.4 ao longo da linha **AB** a diferença de temperatura entre a amostra e o material de referência é zero, indicando que nenhuma reação está ocorrendo, a esta região da curva térmica, compreendida entre os pontos **A** e **B** dá-se o nome de linha de base ou referência.

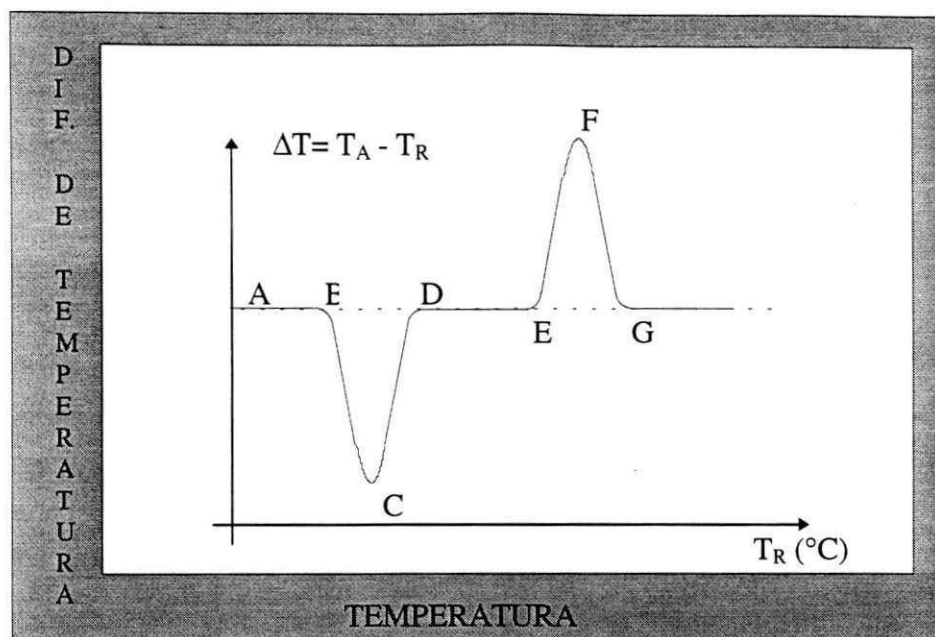


Figura 1.4 - Termograma de ATD

- Pico Endotérmico

No ponto **B**, uma reação começa a ocorrer e dá origem ao pico descrito pelos pontos **BCD**, atingindo o seu valor mínimo ou sua crista no ponto **C**, onde a taxa de absorção de calor pela reação é dada pela diferença entre as temperaturas da amostra e o material de referência ou material inerte. A reação não está completa em **C** mas em algum ponto indeterminado, sobre a linha **CD**.

Quando o ponto **D** é atingido a amostra está novamente na mesma temperatura do material de referência e a diferença de temperatura permanece igual a zero até que outra reação ocorra.

A distância entre a linha de referência e a crista do pico correspondente ao ponto **C** é denominada a amplitude do pico. O pico é denominado endotérmico, pois a temperatura da amostra tornou-se menor que a temperatura do material de referência, indicando que uma mudança química ou física ocorreu. O pico é endotérmico porque a amostra está absorvendo calor.

- Pico Exotérmico

O pico descrito pelos pontos EFG, é do tipo exotérmico, pois neste ponto a temperatura da amostra torna-se maior do que a temperatura do material de referência indicando que uma mudança física ou química ocorreu. O pico é exotérmico porque a amostra está cedendo calor.

A utilidade do método de análise térmica diferencial consiste no fato que o pico de temperatura, é normalmente característica do mineral presente na amostra e a área sob o pico é proporcional a quantidade de material reagente.

1. 5 - Fatores que afetam as curvas térmicas diferenciais

Existe um consenso geral entre os estudiosos da área, no fato de que o método térmico diferencial ser, essencialmente, um método empírico que depende de inúmeros parâmetros experimentais relacionados com a instrumentação utilizada e com determinadas características da amostra, as curvas de uma mesma amostra obtidas em aparelhos diferentes, podem apresentar entre si diferenças mais ou menos acentuadas. Todavia as curvas obtidas através de um instrumento moderno são perfeitamente reprodutíveis.

Mackenzie [3], apresenta uma amplo e minucioso estudo sobre estes aspectos empíricos da análise térmica diferencial, como também em [2] é apresentado um resumo das observações realizadas por Arens um dos pioneiros no estudo do tema, que permitirão formar as bases de discussões mais detalhadas sobre a influência que os parâmetros experimentais podem exercer sobre o aspecto das curvas térmicas diferenciais.

A forma das curvas térmicas diferenciais pode ser modificada principalmente pela ação dos seguintes fatores: taxa de aquecimento do forno; escolha da substância inerte utilizada como referência; compactação da amostra e da referência nos orifícios do porta-amostra e o tamanho das partículas da amostra e seu grau de cristalinidade [3].

1.5.1 -Influência da taxa de aquecimento

A maior ou menor influência da taxa de aquecimento sobre as temperaturas em que podem aparecer os picos depende da natureza da amostra e do suporte utilizado. Nos casos em que a amostra sofre apenas uma transição de estado, a menos dos problemas de transferência de calor, a natureza do suporte é irrelevante. Arens utilizou taxas de aquecimento de 6,12,18 e 21 °C/min., não tendo observado deslocamentos, nas temperaturas de transição do quartzo (endotérmica) e do caulín (exotérmica).

Já as reações que envolvem perdas de peso tem comportamento bem diferente. Nestes casos, a medida que se vai aumentando a taxa de aquecimento, podem ocorrer deslocamentos dos picos de até 75 °C. Estes grandes deslocamentos das temperaturas dos picos podem ser explicados pela presença dos gases provenientes da reação que inibem a reação de decomposição.

Em certos casos, estes deslocamentos dos picos podem ocorrer de maneira desigual com relação a dois picos adjacentes, de modo a mascarar um deles. É o caso do gesso, para o qual os dois picos de desidratação, situados ao redor de 200 °C , só podem ser evidenciados quando se utilizam taxas de aquecimento compreendidas entre os limites de 2 a 8 °C/min.

Via de regra, não se pode determinar, a priori, a taxa de aquecimento ideal para uma dada amostra ; costuma-se por isso, utilizar na prática a taxa de aquecimento de 10°C/min. para exames iniciais, pois a experiência tem demonstrado ser esta a taxa de aquecimento mais adequada para a maioria das reações térmicas estudadas pelo método térmico diferencial [2].

1.5.2 - Escolha da substância inerte

Em condições idênticas de aquecimento e em ausência de transições ou de reações a diferença de temperatura entre a amostra e a referência depende da condutividade térmica (facilidade de transferência de calor), da capacidade térmica (quantidade de calor necessária para elevar a temperatura) e a densidade de ambos os materiais. Consequentemente, há, também, uma dependência indireta de ΔT em relação ao tamanho das partículas e ao empacotamento. Como já foi assinalado, em análise térmica diferencial o ideal é conseguir-se baixos valores de ΔT , ou seja, uma linha base praticamente zero em toda a faixa de temperatura estudada. Como esta igualdade entre a difusibilidade térmica da amostra e da referência é praticamente impossível de ser obtida, pois frequentemente as propriedades térmicas da amostra mudam subitamente no decorrer das reações ou transições térmicas, sempre ocorrem desvios mais ou menos acentuados da linha base. Este é um dos efeitos que dificultam o estabelecimento de equações exatas com finalidades quantitativas.

A experiência tem demonstrado que a alumina previamente calcinada a 1500°C é a substância mais conveniente para ser utilizada como material de referência

e como diluente. Em casos especiais pode-se utilizar, também, óxido de magnésio, quartzo fundido em pó, ferrite, silício-em pó e mesmo substâncias orgânicas caso as amostras estudadas sejam de materiais orgânicos.

A escolha de um material de referência especial é mais ou menos empírica e deve ser especialmente cuidadosa, quando se pretende medir a área do pico, pois, neste caso, só podem ser tolerados pequenos desvios da linha base [2].

1.5.3 - Efeito da compactação da amostra e referência

A maior ou menor compactação da amostra e da referência pode afetar o aspecto da curva **ATD**, pois modifica não apenas a transferência de calor da parede das cavidades para as junções dos termopares, mas, também, no caso de reações de decomposição, interfere sobre o fluxo de gases de dentro para fora da amostra e vice-versa.

Em geral, prefere-se fazer uma compactação firme, porque, de um lado diminui o gradiente térmico, pois aumenta a condutividade térmica, e, de outro, por ser mais reprodutível. Deve-se, porém tomar muito cuidado, a fim de que a compactação da amostra seja o tanto quanto possível igual a compactação da referência, caso contrário aparecerão acentuados desvios.

Outra técnica de preenchimento das cavidades, que, segundo vários autores permite obter boa reprodutibilidade, consiste, simplesmente, em bater lateralmente no suporte, a fim de conseguir uma acomodação homogênea da amostra e da referência nos orifícios [2].

1.5.4 - Tamanho das partículas da amostra

Arens já havia observado que a trituração prévia da amostra provoca decréscimo na intensidade das reações, tendo relacionado este decréscimo de intensidade com o menor grau de cristalinidade da amostra. Realmente, ao se triturar a amostra provoca-se um aumento de sua energia de superfície, de modo que as reações passam a ocorrer a temperaturas consideravelmente mais baixas. Em outras palavras, superfícies recentemente formadas, seja por trituração, seja por precipitação, tem maior grau de desordem e, como nestes casos ainda não houve tempo para a destruição das superfícies ativas, evidencia-se seu comportamento que é diferente do comportamento das superfícies já submetidas a envelhecimento [2].

1.6 - Conclusão

Neste capítulo apresentou-se uma visão geral acerca de análise térmica, destacando-se alguns de seus principais métodos, dando-se ênfase no entanto aos conceitos, fundamentos e aplicações da análise térmica diferencial. Assim como foram apresentados e analisados os principais fatores instrumentais que afetam diretamente os resultados experimentais obtidos através desse método.

No próximo capítulo será apresentada a proposta de projeto e desenvolvimento de um instrumento para ATD, que é o objetivo deste trabalho, a configuração básica e tarefas executadas por um instrumento deste tipo, serão descritos os seus elementos constituintes, como também apresentado um modelo matemático para a unidade de aquecimento utilizada, e os circuitos para condicionamento do sinal correspondente a temperatura do material de referência (T_r).

CAPÍTULO II

INSTRUMENTO PARA ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL

2.1 - Introdução

O presente trabalho tem como objetivo o projeto, o desenvolvimento e a implementação de um protótipo de instrumento para a análise térmica diferencial de argilominerais, baseado na utilização do microcontrolador **MC68HC11** da Motorola. Sendo este responsável pela aquisição de dados, controle da temperatura, acionamento da unidade de aquecimento (forno), alarme e proteção com interface para microcomputador pessoal (**PC**), para análise, armazenamento e apresentação dos dados. Uma breve análise das características do microcontrolador, dando-se ênfase aos aspectos de maior importância para este trabalho é apresentada no anexo A.

2.2- Instrumento para Análise Térmica Diferencial

Os instrumentos de análise térmica diferencial apresentados nas referências [3, 4, 5 , 7, 8, e 12] são basicamente constituídos (Figura 2.1) de porta-amostras (**PA**), termopares (transdutores térmicos), uma unidade de aquecimento (**UA**), controlador programável para temperatura (**CT**), amplificadores, condicionadores de sinal e um registrador para mostrar a diferença de temperatura entre a amostra e um material de referência.

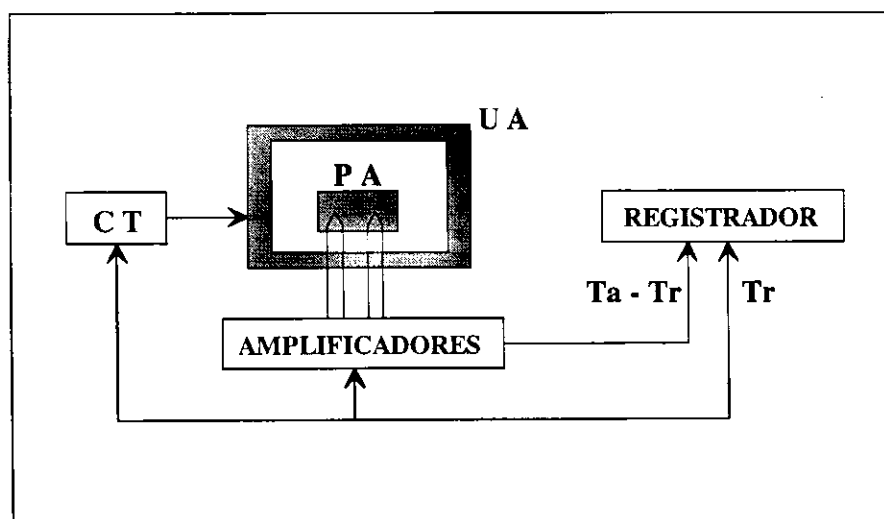


Figura 2.1 - Configuração básica de um instrumento para ATD

Um aspecto crítico e oneroso é o do porta-amostras, que pode variar de tamanho e forma e ser fabricado com diferentes materiais. O mais importante pré-requisito é que o porta-amostras não poderá sofrer qualquer transformação térmica nem reagir com a amostra para a faixa de temperatura utilizada na análise. A diferença de temperatura entre a amostra e o material de referência é medida por termopares e registrada em função da temperatura do material de referência; sendo nula se não ocorrer nenhuma variação ou perturbação térmica [12].

Quando ocorre uma transformação térmica na amostra, pode ocorrer uma absorção ou uma liberação de calor durante algum intervalo de temperatura. Conseqüentemente a temperatura da amostra torna-se menor ou maior do que a temperatura do material de referência, uma tensão é estabelecida nos terminais do termopar, cuja intensidade depende dos fatores mencionados no item 1.5 do capítulo 1 e da quantidade de amostra utilizada em análise. Tais tensões geram os dados necessários a análise térmica diferencial [12].

O forno é o ambiente de temperatura controlada onde são inseridos a amostra e o material de referencia, juntamente com sensores de temperatura (termopares). Os fornos empregados diferem nas dimensões e elementos de aquecimento, em função da aplicação e da faixa de temperatura utilizada na análise [12].

Nos instrumentos descritos na literatura, é entre os controladores de temperatura que se observa a maior diferença. São apresentados desde instrumentos com ajuste manual (autotransformador conectado ao forno) até instrumentos com controlador multicanal microprocessado [4] , [12].

2.3 - Proposta de Instrumento para ATD

O protótipo de instrumento para ATD proposto está representado esquematicamente em diagrama de blocos na Figura 2.2. Ele difere dos instrumentos apresentados na literatura principalmente em relação:

- a) ao acionamento do forno; b) seu sistema de proteção; c) correção automática de linha - base; d) interface amigável para o usuário.

Um sistema de alarme e proteção do forno será implementado por *software*, enviando uma sinalização acompanhada de mensagem ao usuário, indicando a ocorrência de algum distúrbio no circuito de acionamento, protegendo-se assim o forno contra eventuais sobreaquecimentos, que poderiam danificá-lo.

O software implementado para o sistema, consiste basicamente em dois programas. Onde o primeiro, residente no microcontrolador **MC68HC11** têm como tarefas executar o acionamento do forno, fazer o controle de sua temperatura e aquisição de dados correspondentes as análises térmicas (T_r e $T_a - T_r$). O segundo programa denominado **ATD**, consiste em uma interface amigável para o instrumento implementada no **PC**.

O protótipo constará basicamente de microcontrolador, unidade de aquecimento, alguns circuitos discretos para o acionamento do forno e condicionamento de sinais para o microcontrolador.

O protótipo será interligado a um microcomputador pessoal (**PC**) através da porta serial, no qual serão plotados em tela (tempo real), os gráficos correspondentes a análise térmica diferencial, como também serão criados arquivos com estes dados para posteriores processamentos numéricos que se façam necessários (tais como: filtragens, análise numérica, etc.) Será também desenvolvida uma interface homem-máquina para o instrumento facilitando assim a realização de ensaios por parte do usuário.

Os medidores de temperatura são formados por termopares e circuitos condicionadores de sinal. Eles fornecem tensões equivalentes a T_r e a diferença de temperatura $T_a - T_r$ nas saídas do instrumento. A tensão equivalente a T_r , também é entregue ao controlador de temperatura.

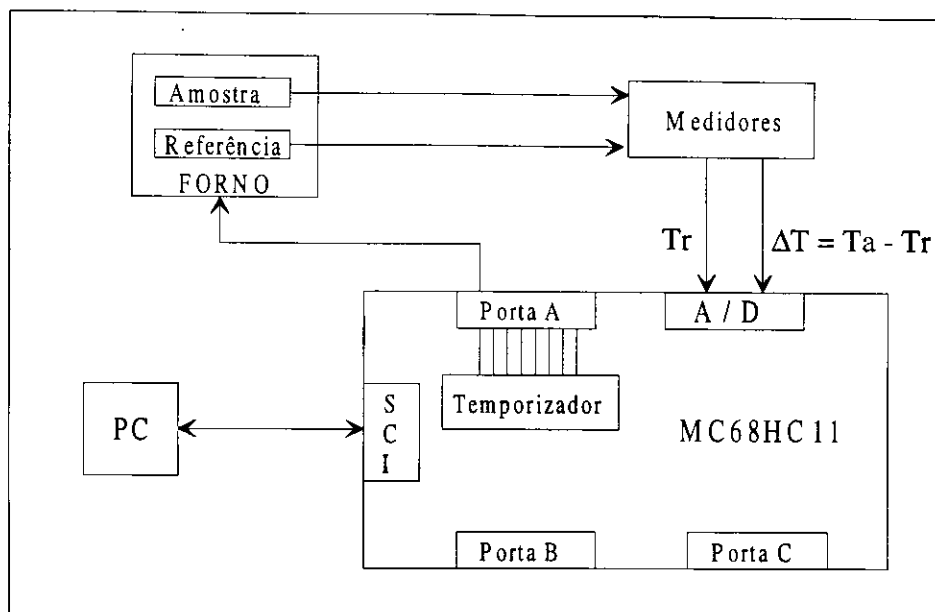


Figura 2.2- Configuração básica de instrumento para ATD, baseado no MC68HC11

2.4 - Tarefas Executadas por um Instrumento ATD

As principais tarefas a serem executadas em um instrumento de análise térmica diferencial são:

1 - Fazer o controle programável de temperatura da unidade de aquecimento (forno), no qual o porta-amostra é residente. Em geral a temperatura deve ser incrementada em uma taxa constante entre $2^{\circ} C/min.$ e $20^{\circ} C/min.$

2 - Monitorar a temperatura de referência (T_r) do material de referência contido em uma das seções do porta-amostras. Sendo isto necessário para o registro da curva de análise e controle da taxa de aquecimento de temperatura da UA.

3 - Geração do sinal de referência para o controle de temperatura.

4 - Monitorar a temperatura da amostra sob teste com relação a temperatura do material de referência ($T_a - T_r$).

5 - Compensar os desvios na linha de base. Idealmente para um instrumento **ATD**, quando as duas secções do porta-amostras, contivessem um material inerte, o termograma deveria apresentar como resultado de análise uma linha reta com declividade igual a zero (denominada linha base ou linha de referência). Entretanto em instrumentos reais, alguns fatores, tais como, diferença de ganho dos termopares, CMRR finito do amplificador diferencial, *drift* térmico dos amplificadores, assimetria no posicionamento dos termopares em relação aos elementos de aquecimento, causam deslocamento da linha de base em função da temperatura T_r .

6 - Mostrar ou apresentar os resultados dos testes na forma de gráficos de ($T_a - T_r$) versus T_r , denominado termograma.

2.5 - Descrição Física do Sistema de Aquecimento Utilizado

A seguir é descrito o sistema de aquecimento utilizado no instrumento, o qual é constituído basicamente de unidade de aquecimento (forno), porta-amostras, tubo pirométrico e braço de sustentação mecânica.

2.5.1 - Forno de Aquecimento

O forno empregado fazia parte de um instrumento para análise térmica diferencial existente no laboratório de cerâmica da UFPB. Ele foi recuperado e adaptado para alimentação em 220V eficaz. Estando este representado na Figura 2.3.

O forno elétrico é tubular com 20 cm de altura e 17 cm de diâmetro externo, constituído de dois hemisférios de aço inox, com fixação lateral por dois grampos; na lateral inferior situa-se o

acoplamento elétrico e no extremo superior do outro hemisfério encontra-se peça adequada de material polimérico de forma a permitir o manuseio do forno mesmo quando aquecido.

O hemisfério inferior do forno é preenchido com argila plástica refratária, a qual é adicionada água em quantidade suficiente para dar plasticidade e permitir a sua moldagem. Não é utilizado isolante térmico entre o refratário e a parede metálica externa. Todo o espaço é preenchido com a mesma argamassa refratária resultando em uma parede cilíndrica de cerca de 5,5 *cm* de espessura, dando ao forno uma estrutura monolítica.

O isolamento térmico não é perfeito, mas é o suficiente para permitir um bom funcionamento do forno. Na parte inferior deste mesmo hemisfério encontra-se um orifício de dimensões adequadas para penetração do tubo pirométrico. No hemisfério superior encontra-se um refratário poroso de baixa condutividade térmica de forma a permitir o manuseio do forno mesmo quando aquecido.

No centro do hemisfério inferior ao redor do orifício destinado a penetração do refratário do tubo pirométrico encontra-se o conjunto destinado ao sistema de aquecimento do forno, constituído de uma resistência de Ni - Cr com diâmetro equivalente a 20 AWG, resistividade de $3\Omega / metro$, resultando em uma resistência total de 34Ω .

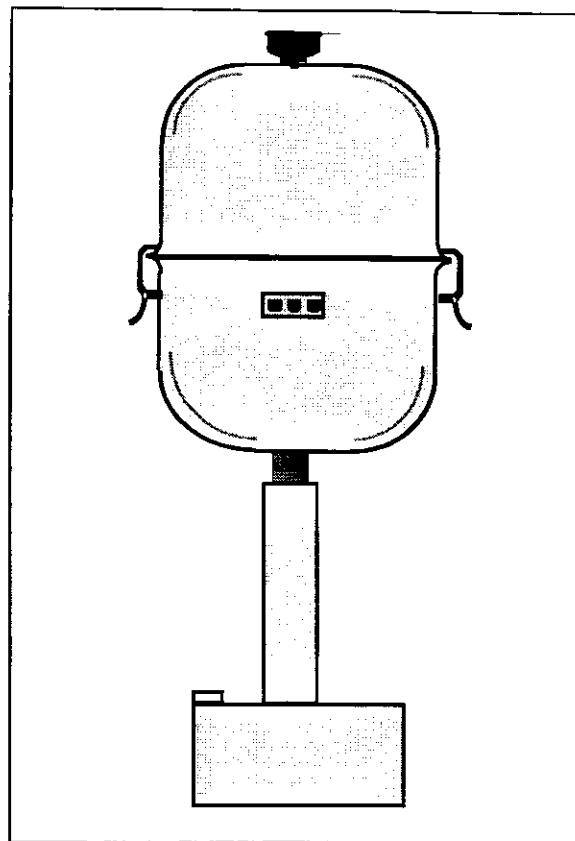


Figura 2.3 - Representação esquemática do forno elétrico

A resistência é enrolada na forma de um espiral com aproximadamente 3 *mm* de diâmetro e disposto na forma de um helicóide com passo de aproximadamente 0,8 *cm*, encontrando-se semi-embutida em canaletas da parede refratária do forno, de modo que o aquecimento se faz por condução e irradiação direta, reduzindo as perdas e permitindo utilizar reduzida potência para o aquecimento.

2.5.2 - Porta-Amostras

O porta - amostras onde são inseridos a amostra e o padrão para a referência é de monel de secção cilíndrica com 32 *mm* de diâmetro e 10 *mm* de altura e dois orifícios (câmara) cilíndricas de 5*mm* de diâmetro, destinados a conter os espécimes em pó utilizados na análise térmica diferencial. A câmara A é destinada à amostra, e a câmara B ao padrão termicamente inerte, onde nestas o par

temodiferencial é introduzido pelo orifício inferior. Na Figura 2.4 é ilustrado o porta - amostras utilizado no aparelho.

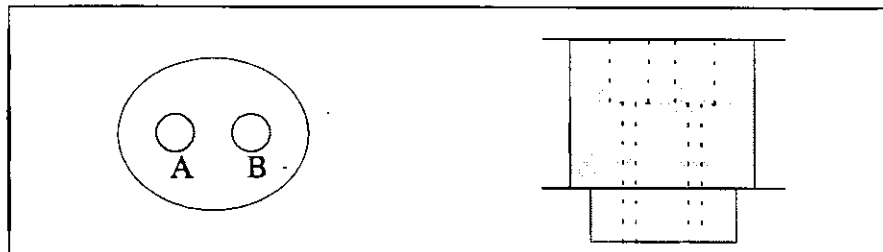


Figura 2.4 - Porta - amostras

2.5.3 - Tubo Pirométrico

O tubo pirométrico é utilizado para proteger os termopares contra eventuais choques mecânicos que poderiam vir a danificá-los, fabricado em mulita que confere aos mesmos resistência à choques térmicos e impermeabilidade, para proteção dos termopares contra gases e subprodutos da combustão de materiais voláteis presentes no forno até a temperatura de $1450^{\circ}C$, como também condicionar atmosferas especiais com gases inertes ou operar no vácuo. Assim como uniformizar a temperatura em seu interior, evitando gradientes térmicos que poderiam vir a afetar o desempenho dos termopares prejudicando os resultados obtidos na análise, com 210 mm de comprimento, 28 mm de diâmetro interno e 32 mm de diâmetro externo. Sua ilustração, como também do porta - amostras com os termopares inseridos no seu interior encontra-se na Figura 2.5.

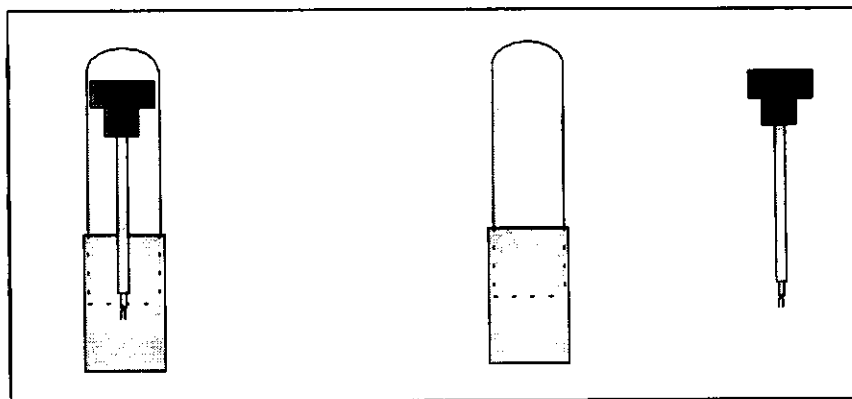


Figura 2.5 - Tubo pirométrico

2.5.4 - Braço de Sustentação

O braço de sustentação mecânica tem como finalidade dar sustentação mecânica ao forno e ao tubo pirométrico, como também promover a vedação entre o segmento do tubo que contém o porta-amostras e termopares diferenciais do segundo segmento que contém a conexão dos mesmos aos circuitos eletrônicos externos para condicionamento de sinal para o microcontrolador e do termopar responsável pela compensação de temperatura das juntas de solda dos termopares diferenciais. Estando o mesmo representado na Figura 2.6.

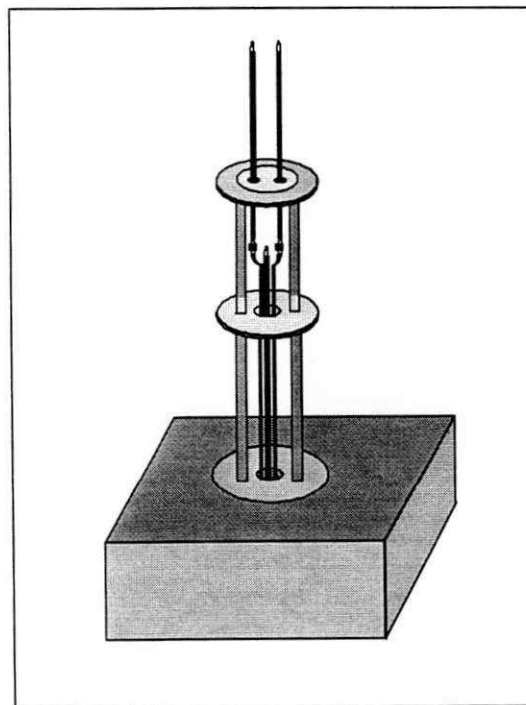


Figura 2.6 - Suporte mecânico

2.6 - Modelo Matemático para o Forno

No projeto de um equipamento para ATD, a obtenção de um modelo matemático para descrição das características dinâmicas do processo é fundamental para o desempenho satisfatório do instrumento. A resistência elétrica (R) de Ni-Cr (Figura 2.7) se encontra no meio 1, com temperatura T_1 . A amostra e o material de referência são colocados no porta amostras, que passaremos a chamar de meio 2, onde se deseja controlar a temperatura T_r . Envolvendo o forno se encontra o meio ambiente com temperatura T_0 .

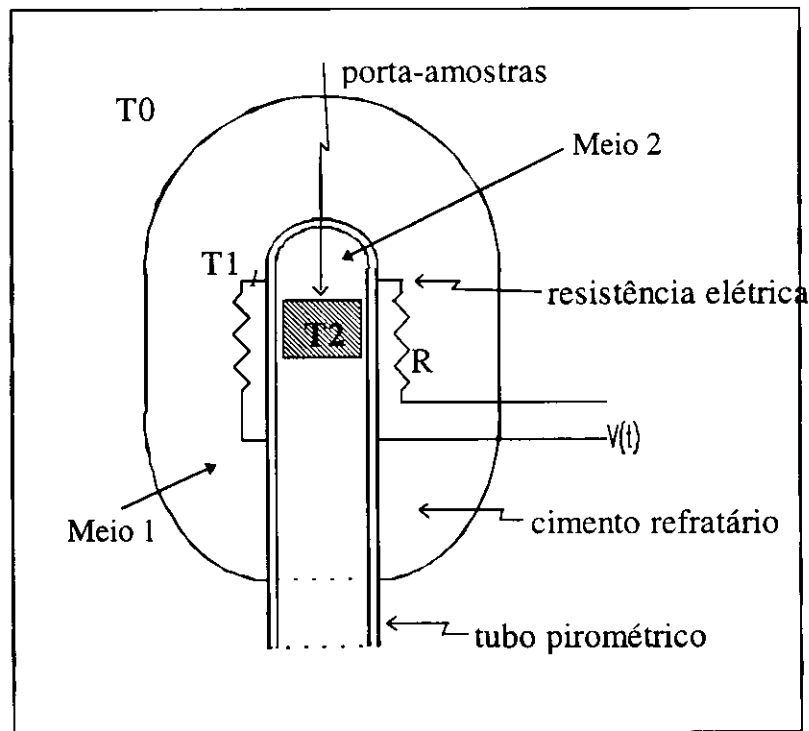


Figura 2.7 - Unidade de aquecimento (forno)

Se aplicarmos o princípio da conservação de energia aos meios 1 e 2, teremos as seguintes equações diferenciais :

$$m_1 c_1 \frac{dT_1}{dt} + K_{12} (T_1 - T_2) + K_{10} (T_1 - T_0) = P(t) \quad (2.1)$$

$$m_2 c_2 \frac{dT_2}{dt} + K_{12} (T_2 - T_1) + K_{20} (T_2 - T_0) = 0 \quad (2.2)$$

Onde: $P(t)$ é a potência elétrica entregue ao forno; m_i é a massa do meio i ; c_i é o calor específico do meio i ; K_{ij} é a condutância térmica entre os meios i e j ; T_0 é a temperatura ambiente; T_1 é a temperatura da resistência elétrica do forno, $T_2 = T_r$ é a temperatura no porta amostra.

Isolando os termos em T_1 e T_2 nas equações (2.1) e (2.2), obtemos :

$$m_1 c_1 \frac{dT_1}{dt} + (K_{12} + K_{10}) T_1 = P(t) + K_{12} T_2 + K_{10} T_0 \quad (2.3)$$

$$K_{12} T_1 = m_2 c_2 \frac{dT_2}{dt} + (K_{12} + K_{20}) T_2 - K_{20} T_0 \quad (2.4)$$

Aplicando a transformada de Laplace as equações (2.3) e (2.4), obtemos as seguintes equações no plano s .

$$m_1 c_1 s T_1(s) + (K_{12} + K_{10}) T_1(s) = P(s) + K_{12} T_2(s) + K_{10} T_0(s) \quad (2.5)$$

$$K_{12} T_1(s) = m_2 c_2 s T_2(s) + (K_{12} + K_{20}) T_2(s) - K_{20} T_0(s) \quad (2.6)$$

Logo:

$$T_1(s) [m_1 c_1 s + (K_{12} + K_{10})] = P(s) + K_{12} T_2(s) + K_{10} T_0(s) \quad (2.7)$$

$$K_{12} T_1(s) = T_2(s) [m_2 c_2 s + (K_{12} + K_{20})] - K_{20} T_0(s) \quad (2.8)$$

Isolando o valor de $T_1(s)$ nas equações (2.7) e (2.8), obtemos :

$$T_1(s) = \frac{P(s) + K_{12} T_2(s) + K_{10} T_0(s)}{m_1 c_1 s + (K_{12} + K_{10})} \quad (2.9)$$

$$T_1(s) = \frac{T_2(s)[m_2c_2s + (K_{12} + K_{20})] - K_{20}T_0(s)}{K_{12}} \quad (2.10)$$

Igualando as equações (2.9) e (2.10), teremos:

$$\frac{P(s) + K_{12}T_2(s) + K_{10}T_0(s)}{m_1c_1s + (K_{12} + K_{10})} = \frac{T_2(s)[m_2c_2s + (K_{12} + K_{20})] - K_{20}T_0(s)}{K_{12}} \quad (2.11)$$

Após algumas manipulações algébricas chegamos a equação:

$$P(s) K_{12} + K_{10} K_{12} T_0(s) + K_{20} m_1c_1s T_0(s) + K_{20} K_{12} T_0(s) + K_{20} K_{10} T_0(s) = [m_2m_1c_2c_1s^2 + m_1c_1s(K_{12} + K_{20}) + m_2c_2s (K_{12} + K_{10}) + K_{20} K_{12} + K_{12} K_{10} + K_{20} K_{10}] T_2(s)$$

Sendo $T_2(s) = Tr(s)$, teremos :

$$P(s) K_{12} + T_0(s) [K_{20} m_1c_1s + K_{10} K_{12} + K_{20} K_{12} + K_{20} K_{10}] = Tr(s) \{ m_1c_1m_2c_2s^2 + [m_1c_1(K_{12} + K_{20}) + m_2c_2(K_{12} + K_{10})] s + K_{20} K_{12} + K_{12} K_{10} + K_{20} K_{10} \}$$

$$Tr(s) = \frac{K_{12}P(s) + T_0(s)[K_{20}m_1c_1s + (K_{10}K_{12} + K_{20}K_{12} + K_{20}K_{10})]}{m_1c_1m_2c_2s^2 + s[m_1c_1(K_{12} + K_{20}) + m_2c_2(K_{12} + K_{10})] + (K_{20}K_{12} + K_{12}K_{10} + K_{20}K_{10})} \quad (2.12)$$

Logo, podemos representar a equação acima, da seguinte forma:

$$Tr(s) = \frac{Num_1(s)}{Den(s)} P(s) + \frac{Num_2(s)}{Den(s)} T_0(s) \quad (2.13)$$

Utilizando-se o método dos mínimos quadrados não recursivo, foram obtidos parâmetros para uma equação discreta de 2º ordem, e a partir destes gerados, por transformação, parâmetros para a função contínua da equação (2.14) [5].

$$\frac{T(s)}{P(s)} = \frac{K_0}{s^2 + \alpha_1s + \alpha_0} \quad (2.14)$$

Sendo de acordo com [5], seus valores :

$$K_0 = 0,0014; \quad \alpha_0 = 0,0079; \text{ e } \alpha_1 = 0,053843.$$

2.7- Sensor e Transdutor de Temperatura

A medição de temperatura é um dos problemas mais antigos do homem, pois ela afeta diretamente o meio ambiente e todas as reações físico-químicas da natureza. Pela sua grande importância, tanto no nosso dia-a-dia como na indústria, os transdutores de temperatura são os mais diversos possíveis.

A medição de temperatura é necessária para finalidades de monitoração ou controle de processos industriais, ambientais ou em engenharia biomédica. Diferentes tipos de sensores podem ser utilizados tais como os RTDs, termopares, termistores, cristais e junções semicondutoras. Os fatores que influenciam na escolha são, principalmente, faixa de temperatura a ser medida, resposta dinâmica, precisão desejada e complexidade do processo de medição.

2.7.1 - Sensor de Temperatura - Termopares

Ao colocarmos dois metais diferentes em contato elétrico, haverá uma diferença de potencial entre eles, que é função da temperatura. Esse fenômeno tem o nome de efeito termoelétrico e é utilizado para medir temperaturas numa faixa bastante ampla. O emprego de pares termoelétricos na determinação de temperaturas baseia-se em dois efeitos descritos por Alessandro G.A.A. Volta, (1800) e por Thomas Johann Seebeck (1826) [2].

Dependendo dos metais utilizados nas junções, obtêm-se características diferentes que caracterizam a aplicação da junção. A Tabela 2.1, mostra algumas junções mais comuns, juntamente com suas características.

TABELA 2.1 -Termopares mais comuns e suas características

TIPO	LIGA	MÁX. TEMP.(°C)	COEFICIENTE DE TEMP.($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	SAÍDA @100°C (mV)
J	Fe / Constantan	700(750)	51,45	5,268
K	Chromel/Alumel	1.100 (1.370)	42	4,095
S	Platina Pt/Rh (90/10)	1.550 (1.750)	8	0,645
W	W / Rh (26/74) W / Rh (5/95)	2.500	7,86	1

A Figura 2.8 mostra as curvas dos principais termopares com relação à temperatura de trabalho. Note que há uma linearidade bastante satisfatória em todas as faixas de funcionamento dos termopares, o que facilita o processamento das tensões de saída.

Os fabricantes fornecem tabelas que indicam as tensões dos termopares para cada grau centígrado dentro da faixa de temperatura do sensor. A Tabela 2.2 mostra as tensões de saída para a junção do tipo K. Conhecendo-se a curva ou a tabela equivalente do termopar, torna-se bastante fácil medir a temperatura; para isso, basta medir a tensão do termopar e procurar na tabela a temperatura respectiva.

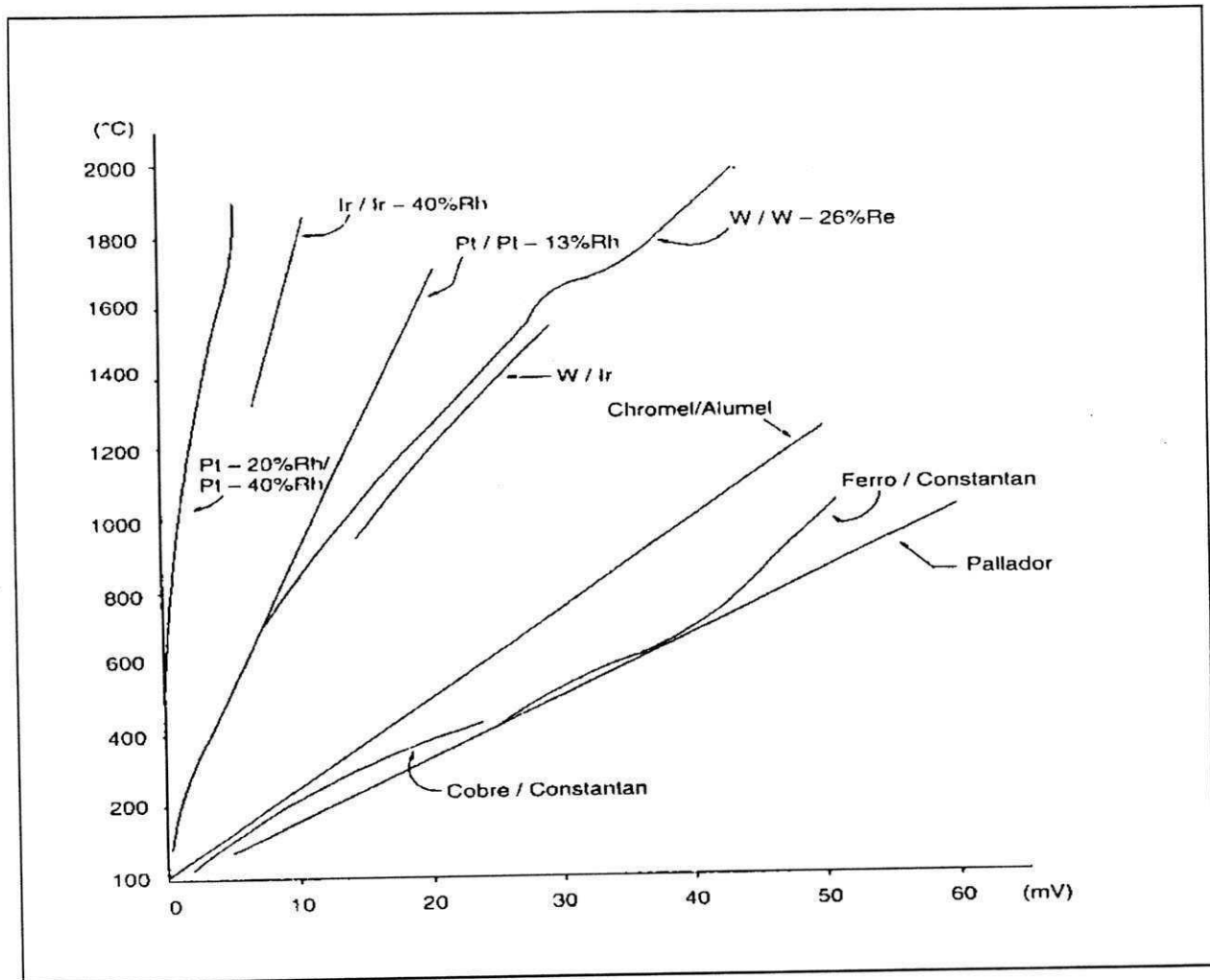


Figura 2.8 - Curvas características dos principais termopares

TABELA 2.2 - Tensões de saída de uma junção do tipo K

°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV
-140	-4.669	100	4.095	350	14.292	600	24.902	850	35.314	1.100	45.108
-130	-4.410	110	4.508	360	14.712	610	25.327	860	35.716	1.110	45.486
-120	-4.138	120	4.919	370	14.132	620	25.751	870	36.121	1.120	45.863
-110	-3.852	130	5.327	380	15.552	630	26.176	880	36.524	1.130	46.238
-100	-3.553	140	5.733	390	15.974	640	26.599	890	36.925	1.140	46.612
-90	-3.242	150	6.137	400	16.395	650	27.022	900	37.325	1.150	46.985
-80	-2.920	160	6.539	410	16.818	660	27.445	910	37.724	1.160	47.356
-70	-2.586	170	6.939	420	17.241	670	27.867	920	38.122	1.170	47.726
-60	-2.243	180	7.388	430	17.664	680	28.288	930	38.590	1.180	48.095
-50	-1.889	190	7.737	440	18.038	690	28.709	940	38.915	1.190	48.462
-40	-1.527	200	8.137	450	18.513	700	29.128	950	39.310	1.200	48.828
-30	-1.154	210	8.537	460	18.938	710	29.547	960	39.703	1.210	49.192
-20	-0.777	220	8.938	470	19.363	720	29.965	970	40.096	1.220	49.555
-10	-0.392	230	9.341	480	19.788	730	30.383	980	40.488	1.230	49.916
0	0.000	240	9.745	490	20.214	740	30.799	990	40.879	1.240	50.276
0	0.000	250	10.151	500	20.640	750	31.214	1.000	41.269	1.250	50.633
10	0.397	260	10.560	510	21.066	760	31.629	1.010	41.657	1.260	50.990
20	0.798	270	10.969	520	21.493	770	32.042	1.020	42.045	1.270	51.344
30	1.203	280	11.381	530	21.919	780	32.455	1.030	42.432	1.280	51.697
40	1.611	290	11.793	540	22.346	790	32.866	1.040	42.817	1.290	52.049
50	2.022	300	12.207	550	22.772	800	33.277	1.050	43.202	1.300	52.398
60	2.439	310	12.623	560	23.198	810	33.686	1.060	43.585	1.310	52.747
70	2.850	320	13.039	570	23.624	820	34.095	1.070	43.968	1.320	53.093
80	3.266	330	13.456	580	24.050	830	34.502	1.080	44.349	1.330	53.439
90	3.681	340	13.874	590	24.476	840	34.909	1.090	44.729	1.340	53.782

2.8 - Descrição dos Circuitos Implementados

Os circuitos apresentados a seguir são responsáveis pelo condicionamento de sinal correspondente a temperatura do material de referência (T_r), como também àqueles utilizados na estrutura de controle da temperatura do forno e acionamento da U A.

2.8.1 - Transdutor de Temperatura

Utilizamos como sensor de temperatura para o forno dois termopares tipo K, de ganho igual a $40 \cdot 10^{-6} V/^\circ C$ e amplificador de ganho igual a 100. Com os ganhos do termopar e do amplificador,

quando a temperatura atingir 1200°C (temperatura máxima de operação do forno), a tensão na entrada do conversor A/D será de $4,8\text{V}$ que é próxima a tensão máxima aceita pelo conversor A/D, que é igual a 5V .

Para o circuito, utilizamos o amplificador operacional LM725. Este amplificador possui uma performance superior em aplicações que exijam baixo ruído e baixa flutuação. É recomendado em aplicações em instrumentação com uma larga faixa de alimentação ($\pm 3\text{V}$ a $\pm 22\text{V}$). Apresentamos o diagrama do circuito na Figura 2.9.

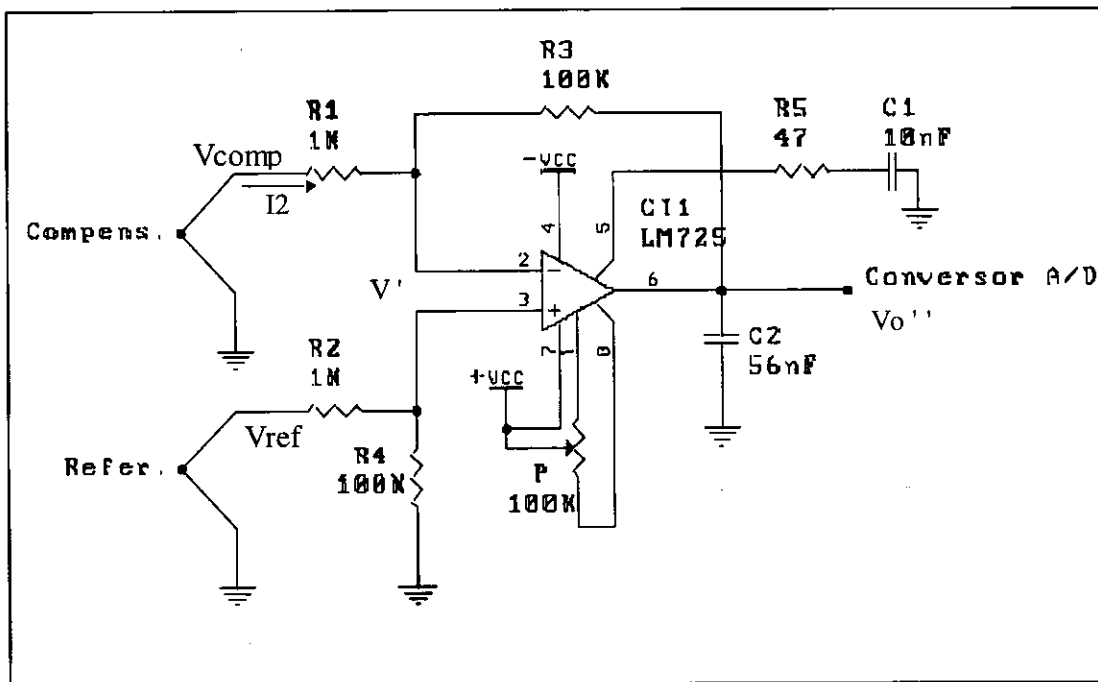


Figura 2.9 - Circuito transdutor de temperatura

Observando o circuito da Figura 2.9, desenvolvemos o seguinte conjunto de equações:

$$V' = \frac{100K}{100K + 1K} \times V_{ref}. \Rightarrow V' = \frac{100K}{101K} \times V_{ref}. \quad (2.15)$$

$$I_2 = \frac{V_{comp} - V'}{1K} = \frac{V' - V_0''}{100K} \quad (2.16)$$

Da equação (2.16), temos:

$$V' - V_0'' = \frac{100K}{1k} \times (V_{comp} - V') \Rightarrow V' - V_0'' = 100(V_{comp} - V')$$

$$V' + 100V' - V_0'' = 100V_{comp}. \Rightarrow 101V' - V_0'' = 100V_{comp}. \quad (2.17)$$

$$101 \times \frac{100}{101} \times V_{ref} - V_0'' = 100V_{comp}.$$

$$V_0'' = 100V_{ref} - 100V_{comp}$$

$$\boxed{V_0'' = 100 \times (V_{ref} - V_{comp})} \quad (2.18)$$

Onde: V_{ref} é a tensão na saída do termopar correspondente a temperatura de referência, e V_{comp} é a tensão na saída do termopar de compensação, correspondente a temperatura ambiente.

2.8.2 - Circuito de Acionamento

O circuito de acionamento da unidade de aquecimento utiliza uma combinação de **PWM** e *zero-crossing*, quando um tiristor (triac) é disparado no início dos semi-ciclos da tensão da rede elétrica, dentro do intervalo de trabalho do sinal **PWM** gerado pelo microcontrolador, com período múltiplo de um semi-ciclo da tensão da rede elétrica (Figuras 2.10 e 2.11). Com isto é evitado o ruído gerado em disparo de tiristores com carga resistiva, e a potência elétrica entregue ao forno é proporcional a largura de pulso do sinal **PWM**.

O diagrama elétrico do circuito utilizado no acionamento do forno é mostrado na Figura 2.11. O resistor R_m é tal que exige uma corrente suficiente para acionar o CI MOC3041, que é o circuito integrado através do qual a técnica de acionamento descrita acima foi implementada. Neste caso tal corrente é 15mA, o resistor utilizado foi 330Ω .

No circuito interno do MOC3041 (Figura 2.11), por motivos de segurança, há um acoplamento óptico para se evitar riscos de que a parte de alta tensão de 220V entregue ao forno entre em contato com a parte de baixa tensão.

O circuito de acionamento exige uma corrente máxima de 15mA para seu funcionamento, mas o microcontrolador MC68HC11 (apêndice A) não é capaz de fornecer essa corrente, assim tornou-se necessária a implementação de um *buffer* para protegê-lo. O circuito *buffer* é apresentado na Figura 2.12 e sua função é acoplar a saída do pulso de PWM gerado pelo microcontrolador através do pino PA3 a entrada do circuito de acionamento.

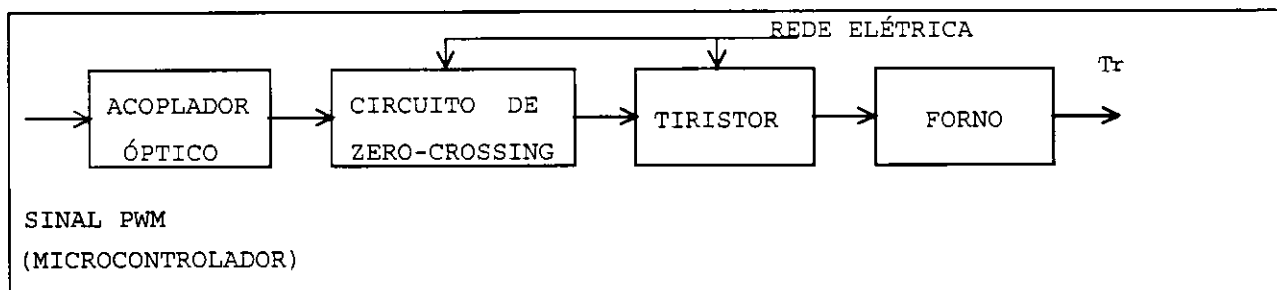
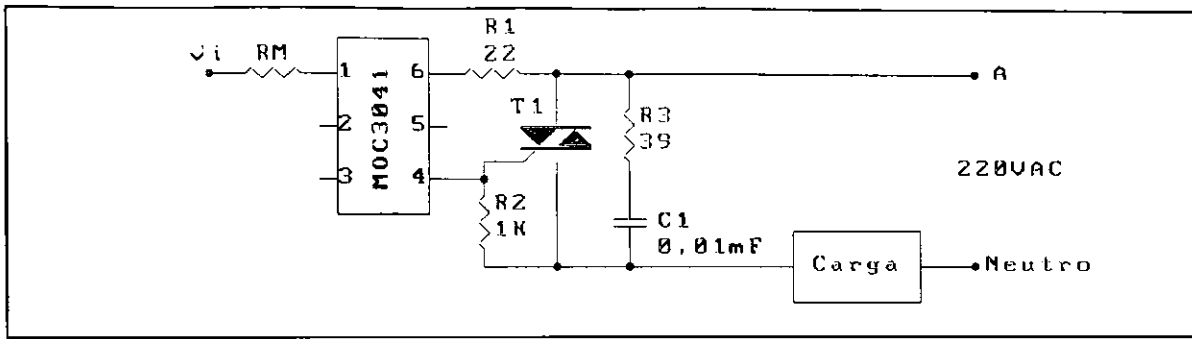


Figura 2.10 - Diagrama de blocos do circuito de acionamento do forno



2.11 - Circuito de acionamento do forno

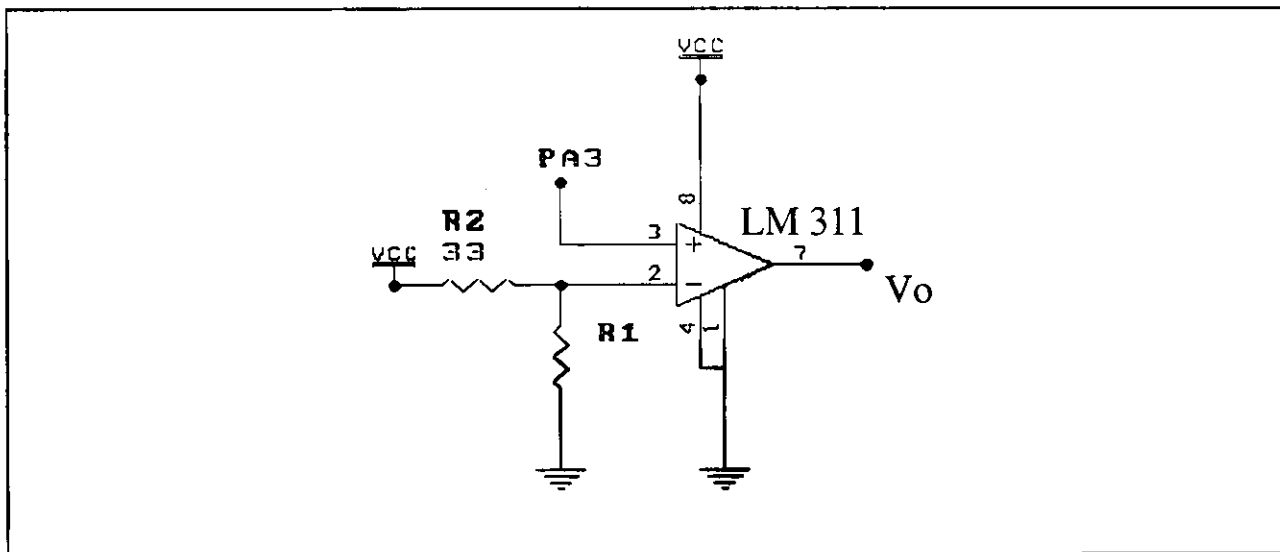


Figura 2.12 - Circuito de buffer

2.8.3 - O Circuito de Sincronismo

Para o controle com microcontrolador, precisamos de um gerador de pulsos externos, pois, como veremos com mais detalhes posteriormente, para nossa aplicação, o controlador necessita gerar uma onda **PWM** com período de 2,125 s. A frequência do *clock* interno do **MC68HC11** é de **2MHz** o que o impossibilita de gerar sinais com período tão elevado já que o seu contador interno *free - running* é de 16 bits. Dessa maneira, configuramos o pino **PA7** do microcontrolador para receber através de um circuito de relógio pulsos externos e, via *software* utilizando seu subsistema

acumulador de pulsos gerar o pulso **PWM** através do pino **PA3** de sua porta **A**, como também implementar um temporizador para uma série de tarefas executadas no sistema.

A Figura 2.13 representa o circuito de sincronismo, gerando pulsos de amplitude $4,7V$ na frequência de $120Hz$. Utilizamos para efeito de comparação o circuito integrado **LM311**, o transformador é simétrico com tensão de $\pm 7,5V$. Quando a tensão da rede elétrica torna-se maior que a tensão de referência na entrada não inversora do operacional, a tensão em sua saída será zero, caso contrário, o operacional satura, tornando-se a tensão em sua saída igual a tensão de alimentação **VCC**, gerando assim os pulsos de sincronismo necessários para a temporização do sistema de controle no microcontrolador, conforme podemos observar na Figura 2.14.

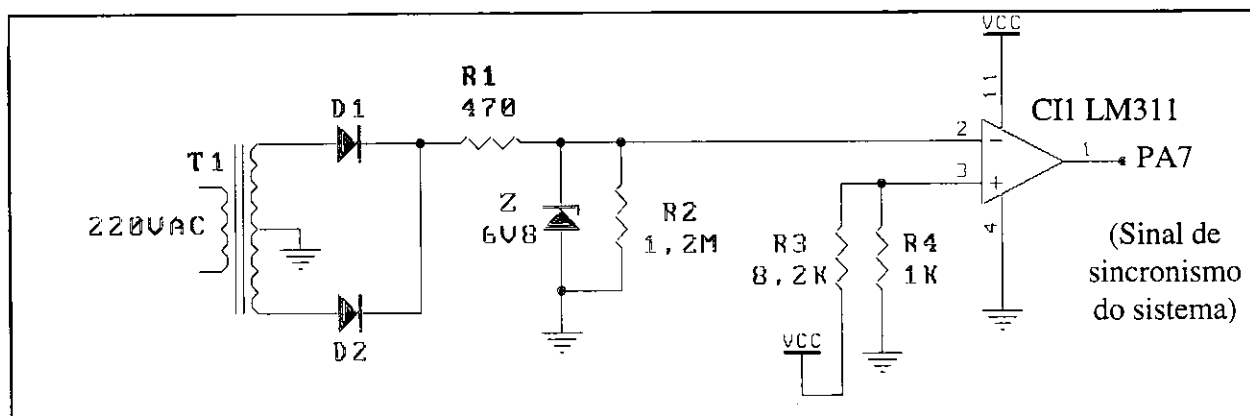


Figura 2.13 - Circuito de sincronismo

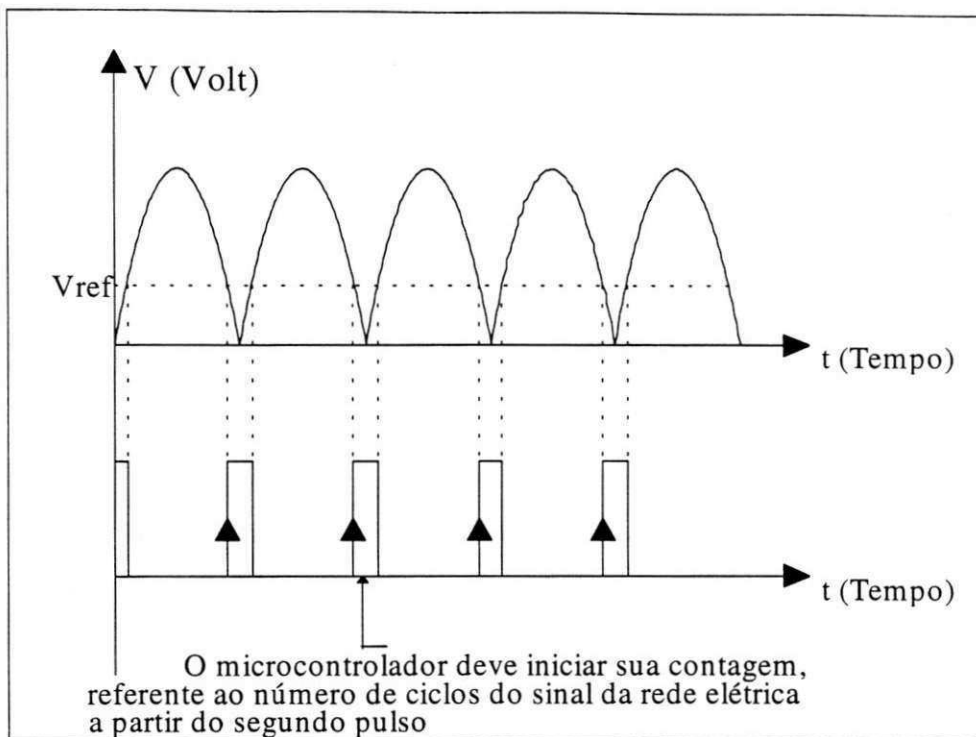


Figura 2.14 - Sinal de sincronismo para o sistema

2.9 - Conclusão

Neste capítulo apresentou-se a proposta para o desenvolvimento de um instrumento para ATD baseado na utilização do microcontrolador **MC68HC11** da Motorola.

É apresentado em diagrama de blocos, a configuração básica de um instrumento deste tipo, e os principais requisitos técnicos a serem satisfeitos pelo instrumento. É descrito o sistema de aquecimento utilizado, assim como apresentado um modelo matemático para a sua unidade de aquecimento. Apresenta-se também a estrutura de 'hardware' utilizada no processamento do sinal correspondente a temperatura de referência (T_r).

No capítulo seguinte será desenvolvido o projeto dos controladores implementados, para o controle da temperatura da unidade de aquecimento (**U A**).

FUNDAMENTOS PARA O CONTROLADOR

3.1 - Introdução

Um dos requisitos de um instrumento para análise térmica diferencial, é o crescimento uniforme da temperatura T_r ($dT_r/dT = \text{constante}$). Tal requisito pressupõe o uso de sistemas de controle realimentados, em que a variável de saída ou variável a ser controlada é a temperatura do forno.

Um sistema de controle realimentado é aquele no qual o sinal de saída possui efeito direto na ação de controle. O sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal realimentado (que pode ser o sinal de saída ou uma função do mesmo e suas derivadas), é alimentado no controlador de modo a reduzir o erro e manter a saída do sistema em um valor desejado. Quando a saída é realimentada ao ponto de soma para comparação com a entrada é necessário converter a forma do sinal de saída para aquela do sinal de entrada. Por exemplo, em um sistema de controle de temperatura, o sinal de saída é usualmente a temperatura controlada. O sinal de saída, deve ser convertido para as mesmas dimensões e unidades do sinal de entrada, antes de ser efetuadas a suas comparações. Esta conversão é efetuada pelo elemento de realimentação [13]. Na Figura 3.1 apresenta-se a relação entre a entrada e a saída de um sistema realimentado.

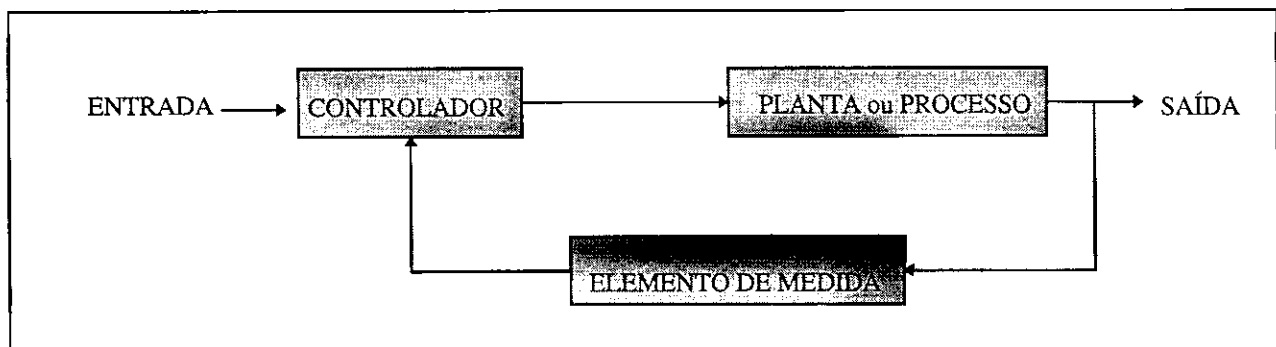


Figura 3.1 - Sistema de controle em malha fechada

O controlador compara o valor de saída do processo com o valor desejado, determina o desvio, e produz um sinal de controle que reduz o desvio a um valor nulo ou muito pequeno. A maneira pela qual o controlador produz o sinal de controle é denominado a ação de controle [13].

Neste capítulo é feita uma análise simplificada de três estratégias de controle, em que a unidade de aquecimento tem sua temperatura controlada através da implementação de um controlador proporcional (P), um controlador proporcional integral (PI) e um controlador proporcional integral derivativo (PID), tomando-se como referência a equação (2.14). A estrutura típica da unidade de aquecimento realimentada é mostrada na Figura 3.2. O produto dos ganhos do amplificador e do termopar foi definido como um ganho B e, o ganho da unidade de acionamento como parte integrante do controlador.

O tratamento analítico é apresentado de forma sumária e apenas os desenvolvimentos teóricos essenciais são demonstrados.

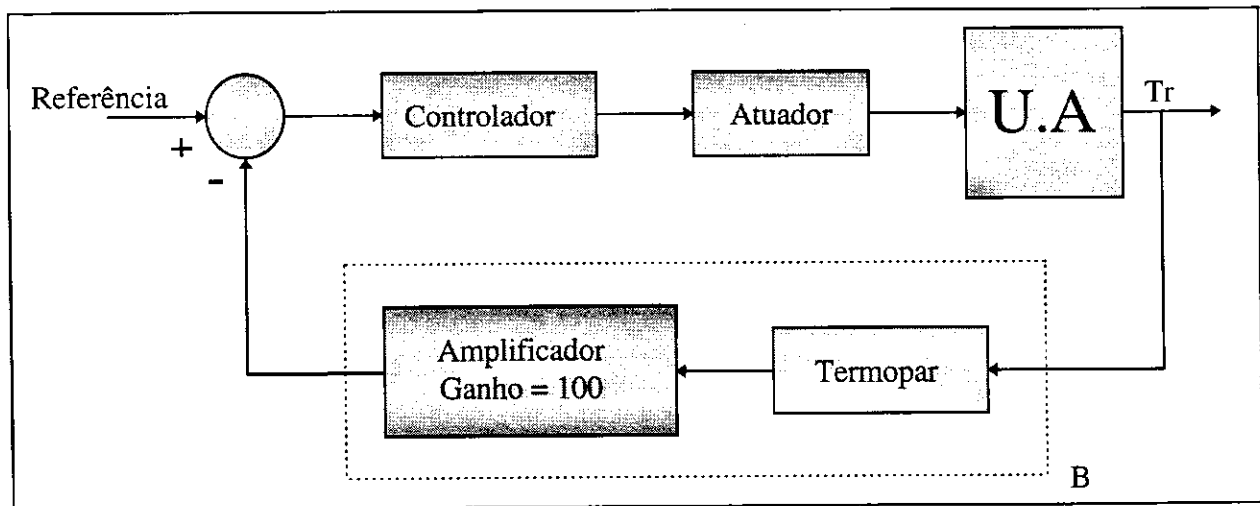


Figura 3.2 - Unidade de aquecimento realimentada

3.2 - Unidade de Aquecimento em Sistema Realimentado com Controlador Proporcional

Usando-se o forno em um sistema realimentado, com controlador proporcional, tem-se um sistema resultante mais rápido e menos sensível às variações de parâmetros da sua função de transferência. Nos sistemas de análise térmica diferencial, para estudo de argilas e cerâmica, não é necessário que a rampa tenha início com declividade constante e igual ao valor final. O importante é que esta se encontre dentro de certo limite (por exemplo 90% do valor final) na temperatura onde tem início as primeiras transformações. Portanto podemos utilizar de acordo com a Figura 3.3, um sistema de controle proporcional, utilizando uma rampa na entrada ($r(t) = C_2 t$) e, dimensionar A e B de tal forma que a declividade da rampa de saída não ultrapasse o limite especificado, o limite de $\pm 20\%$ é tolerável e pode ser adotado.

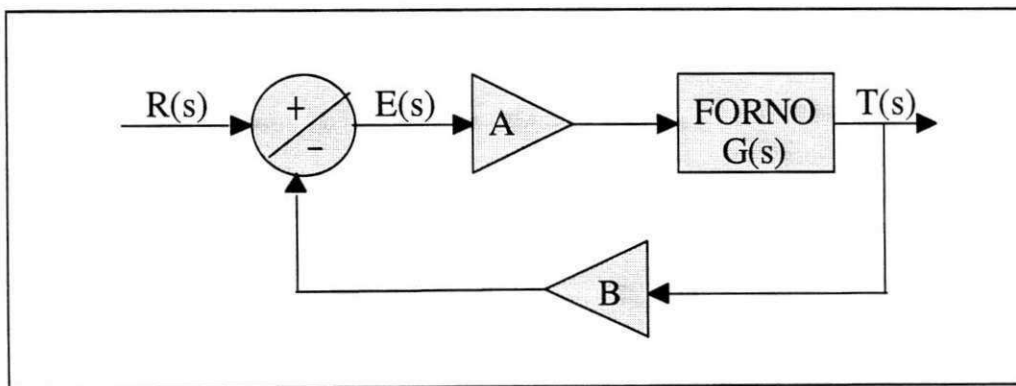


Figura 3.3 - Diagrama esquemático para o sistema realimentado com controlador proporcional

Analisando o diagrama apresentado na Figura 3.3, chegamos ao seguinte sistema de equações:

$$T(s) = G(s) A E(s) \quad (3.1)$$

Onde:

$$E(s) = R(s) - B T(s) \quad (3.2)$$

Substituindo $E(s)$ na equação (3.1), obtemos:

$$T(s) = G(s) A [R(s) - B T(s)] \quad (3.3)$$

Desenvolvendo (3.3), obtemos:

$$T(s) = G(s) A R(s) - G(s) A B T(s) \Rightarrow T(s) + G(s) A B T(s) = A G(s) R(s)$$

$$T(s) [1 + A B G(s)] = A G(s) R(s)$$

$$\boxed{\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{A G(s)}{1 + G(s) A B}} \quad (3.4)$$

Onde: $G(s)$ é a função de transferência do forno; A é o ganho de malha aberta e B é o ganho do elemento de realimentação

A função de transferência do forno foi obtida em (2.14), e os parâmetros para uma função contínua em s , em [5]; sendo:

$$G(s) = \frac{K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0};$$

logo, substituindo $G(s)$ na equação (3.4), obtemos:

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{A K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0} / \left(1 + \frac{K_0 A B}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0} \right)$$

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{A K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0} / \left(\frac{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + K_0 A B}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0} \right)$$

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{A K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + K_0 A B} \quad (3.5)$$

A função de transferência acima relacionando $T(s)$ a $R(s)$ é chamada função de transferência de malha-fechada. Esta função de transferência relaciona a dinâmica do sistema em malha-fechada com a dinâmica dos elementos do ramo direto e os elementos da realimentação.

3.3 - Determinação do Ganho Direto e do Ganho de Realimentação

A característica básica da resposta transitória de um sistema em malha fechada é determinada a partir dos pólos da malha-fechada. Portanto em problemas de análise, é importante localizar os pólos em malha-fechada no plano s [13].

No projeto de sistemas em malha-fechada, queremos ajustar os pólos e zeros de malha-aberta de modo a colocar os pólos e zeros em malha fechada nas posições desejadas no plano s .

Num instrumento de análise térmica diferencial, precisa-se de uma taxa de aquecimento constante ($dTr/dT = Cte.$), desde o instante inicial da análise. Em um instrumento real, isto não acontece e, neste caso, o controlador deve ser dimensionado de tal forma que, quando a faixa de temperatura em que ocorrem as primeiras transformações for alcançada, a variação de dTr/dT já se encontre dentro de um limite aceitável. Para a análise de materiais cerâmicos por exemplo, esta faixa de temperatura se situa próximo a $100^{\circ}C$, onde para alguns materiais ocorre um pico endotérmico devido a liberação de água.

Sendo assim desejamos que o nosso sistema seja tal que a variação da temperatura do forno em função do tempo, seja constante e diferente de zero em regime transitório, e o mais estável possível, em regime permanente. Os sistemas capazes de nos fornecer as características requeridas acima, são o subamortecido e o criticamente amortecido.

3.3.1 - Caso Subamortecido

Neste tipo de resposta, as raízes do denominador da função de transferência em malha fechada, que é a equação característica, apresenta duas raízes complexas conjugadas localizadas no segundo e terceiro quadrantes do plano S (plano complexo), conforme podemos observar na Figura 3.4.

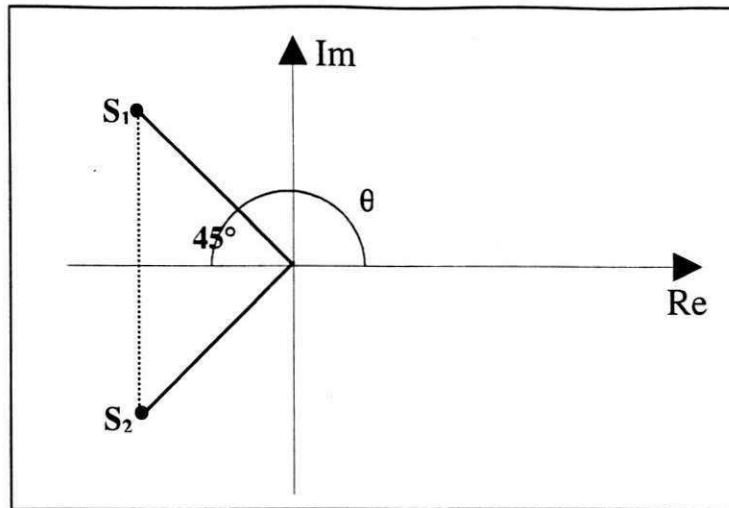


Figura 3.4 - Raízes no plano-s complexo de um sistema subamortecido

Do denominador da função de transferência em malha fechada, (equação característica), temos:

$$s^2 + \alpha_1 s + (\alpha_0 + BA K_0) = 0 \quad (3.6)$$

Cujas raízes são:

$$s_{1,2} = \frac{-\alpha_1 \pm i\sqrt{-(\alpha_1)^2 + 4(\alpha_0 + BAK_0)}}{2} \quad (3.7)$$

Para $\theta = 135^\circ$, obtemos:

$$\tan 135^\circ = \frac{\sqrt{-\alpha_1 + 4(\alpha_0 + BAK_0)}}{-\alpha_1} \Rightarrow \frac{\sqrt{-\alpha_1 + 4(\alpha_0 + BAK_0)}}{-\alpha_1} = -1$$

donde resulta:

$$BA = 16,4115 \quad (3.8)$$

Onde: B é o (ganho do termopar x ganho do amplificador x ganho do conversor A/D), sendo assim:

$$B = 40 \times 10^{-6} \times 100 \times 51 = 0,204$$

$$\text{Logo: } A = \frac{16,4115}{B} \Rightarrow A = 80,448. \quad (3.9)$$

De posse desses parâmetros, suponhamos que em regime permanente, desejemos que o forno atinja uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Da equação (3.5), temos a função de transferência do sistema definida pela expressão em malha fechada abaixo:

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{AK_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + K_0 AB}$$

Logo:

$$T(s) = \frac{AK_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + K_0 AB} R(s) \quad (3.10)$$

Para $R(s) = \frac{C}{s^2}$ - Rampa de referência com inclinação C aplicada à entrada,

teremos:

$$T(s) = \frac{AK_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + K_0 AB} \frac{C}{s^2}$$

Sabendo-se que:

$$\frac{dT(t)}{dt} \rightarrow U(s) = s T(s) = s \left(\frac{AK_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + K_0 AB} \right) \frac{C}{s^2} \quad (3.11)$$

Aplicando o teorema do valor final, a equação (3.11), teremos em regime:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dT(t)}{dt} = \lim_{s \rightarrow 0} \left[s \left(\frac{AK_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + K_0 AB} \right) \frac{C}{s} \right]$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{AK_0 C}{\alpha_0 + K_0 AB}$$

$$C = \frac{\frac{dT(t)}{dt} (\alpha_0 + K_0 AB)}{AK_0}$$

Para $\frac{dT(t)}{dt} = 10^\circ\text{C}/\text{min.}$, teremos:

$$C = \frac{10(0,0079 + 16,4115 \times 0,0014)}{80,448 \times 0,0014} \Rightarrow C = 2,74.$$

De posse dos parâmetros anteriormente calculados para A, B e C foram feitas simulações do processo (analisadas no item 3.4) para a avaliação de desempenho da resposta do sistema.

3.3.2 - Caso Criticamente Amortecido

No caso de um sistema criticamente amortecido, os pólos de malha fechada são duas raízes reais e iguais, como é demonstrado na Figura 3.5. Analogamente ao caso subamortecido, obtemos para $\theta = 180^\circ$, o produto AB igual a 5,3843. Logo A = 26,3936. Aplicando o teorema do valor final, obtemos para C o valor de 4,17. A seguir serão apresentados e analisados os resultados obtidos em simulação para os dois casos descritos anteriormente

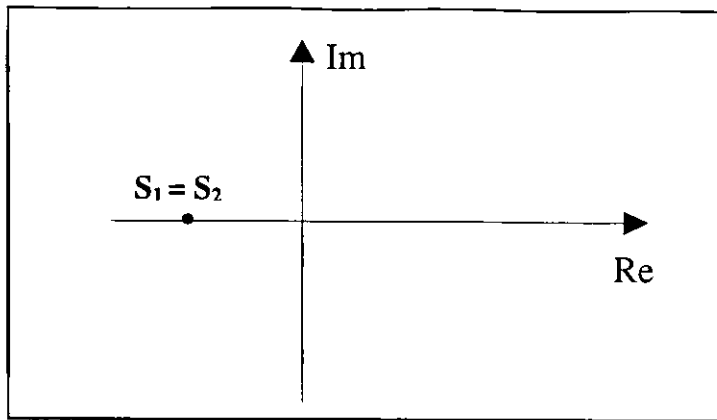


Figura 3.5 - Raízes no plano-s complexo de um sistema criticamente amortecido

3.4 - Análise das Simulações para o Controlador Proporcional

Determinado os valores dos ganhos A e B, foi simulada a planta da Figura 3.3. Para ambos os casos, o sinal de referência foi uma rampa com inclinação de $10^{\circ}C/min$. limitada a partir de 80 minutos a um valor constante. Percebemos que, para uma mesma excitação, os dois sistemas apresentam respostas distintas. Analisando as Figuras 3.6 e 3.7 podemos observar, que a partir de 40 minutos, o sistema subamortecido apresenta uma taxa de aquecimento de temperatura de $10^{\circ}C/min$. e atinge o regime permanente em 80 minutos com um pequeno *overshoot*. No caso criticamente amortecido, a mesma taxa constante é atingida apenas em 60 minutos e o regime permanente em 120 minutos (ver Figuras. 3.6 e 3.7), portanto aproximadamente o dobro do tempo do primeiro caso; o que o torna muito mais lento e de performance inferior ao primeiro caso para a aplicação a que se destina, razão pela qual optamos pelo caso subamortecido.

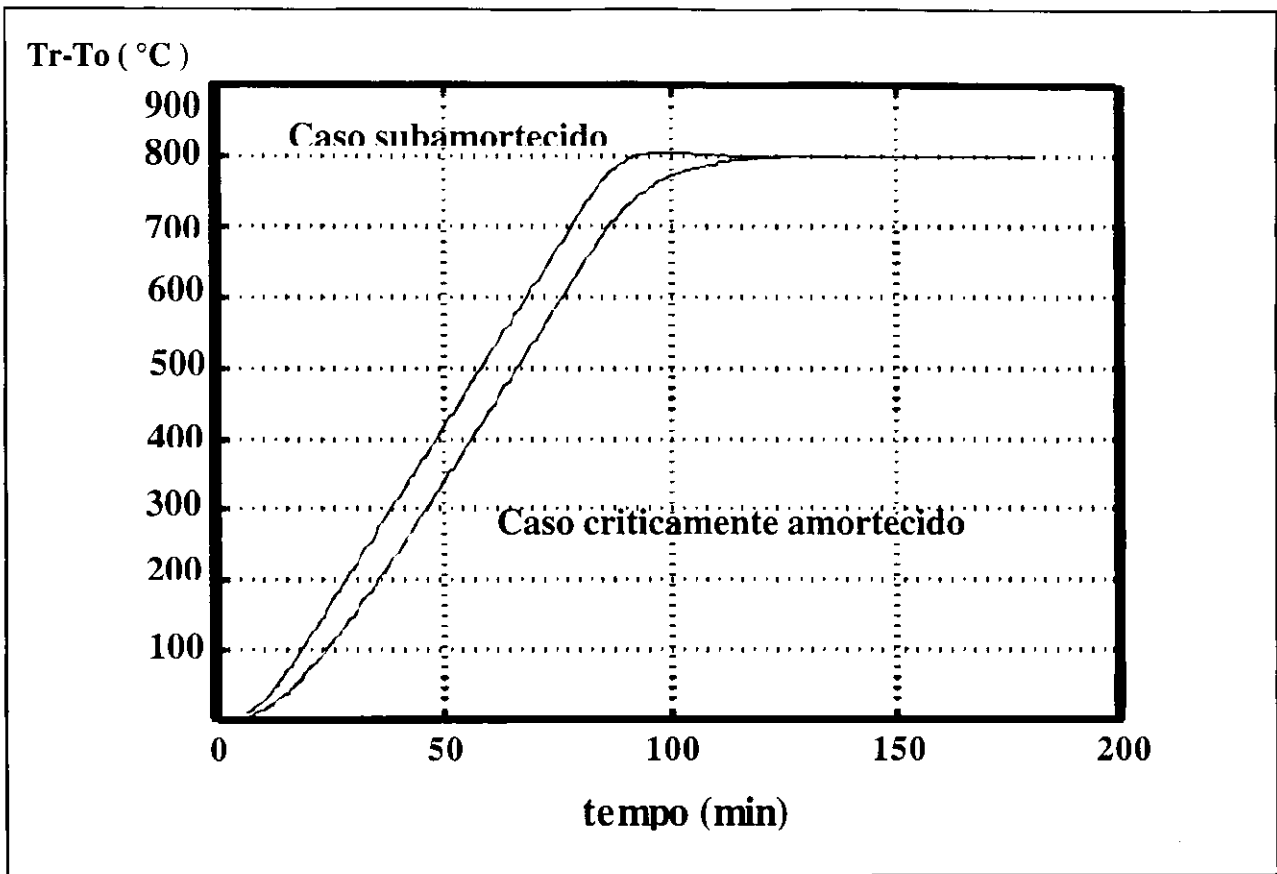


Figura 3.6 - Temperatura do forno versus tempo

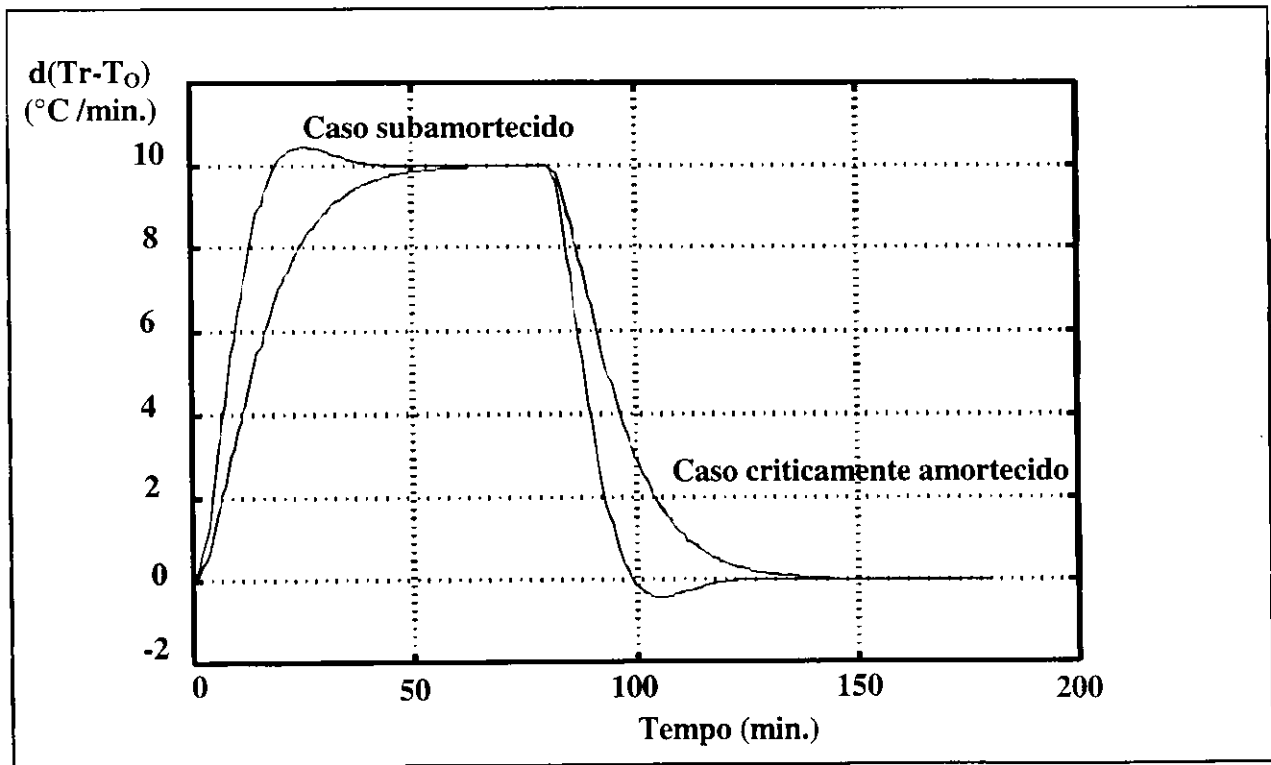


Figura 3.7 - Taxa de variação da temperatura do forno versus tempo

3.5 - Acionamento e Controle com Microcontrolador

Para teste experimental de acionamento e controle foi utilizada a placa de desenvolvimento MC68HC11EVB.

Os circuitos para medição de temperatura, de condicionamento de sinal (amplificador), acionamento e relógio para temporizador, foram mostrados no capítulo 2. O sinal pulsado de relógio é gerado a partir da tensão da rede elétrica e, o temporizador, é implementado via *software* utilizando-se o subsistema acumulador de pulsos do microcontrolador MC68HC11. O temporizador é incrementado a cada transição do pulso de relógio, em sincronismo com a tensão da rede elétrica. Ele é referência de tempo para funções do processo descritas nos itens 3.5.1 e 3.5.2.

Na Figura 3.8, é mostrado o diagrama de blocos para o sistema de controle, acionamento e condicionamento de sinal utilizando o microcontrolador MC68HC11.

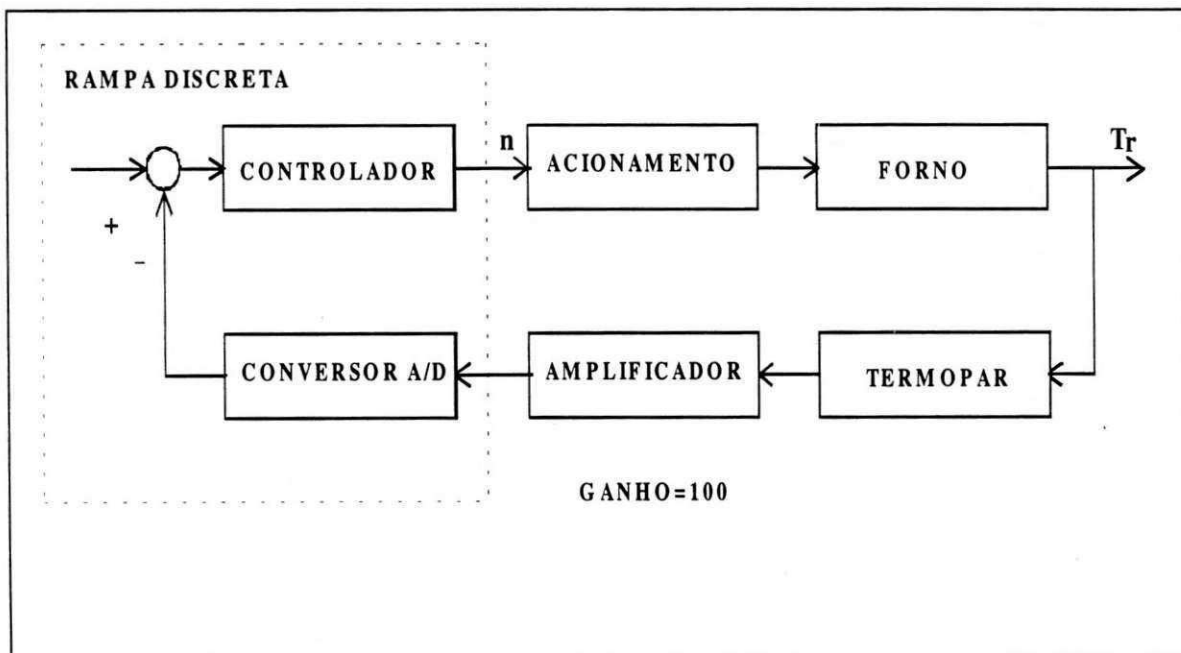


Figura.3.8 - Diagrama de blocos do sistema de controle, acionamento e condicionamento de sinal, utilizando o microcontrolador MC68HC11

3.5.1 - Ganho de Acionamento

O sinal de controle gerado pelo microcontrolador determina o número (n) de semi-ciclos da tensão da rede elétrica que deve ser entregue ao forno (Figura 3.9). O valor máximo para n , definido por N , é igual ao número de semi-ciclos em um período do sinal PWM. Como o sinal de controle é representado em 8 bits, $N = 2^8 - 1 = 255$.

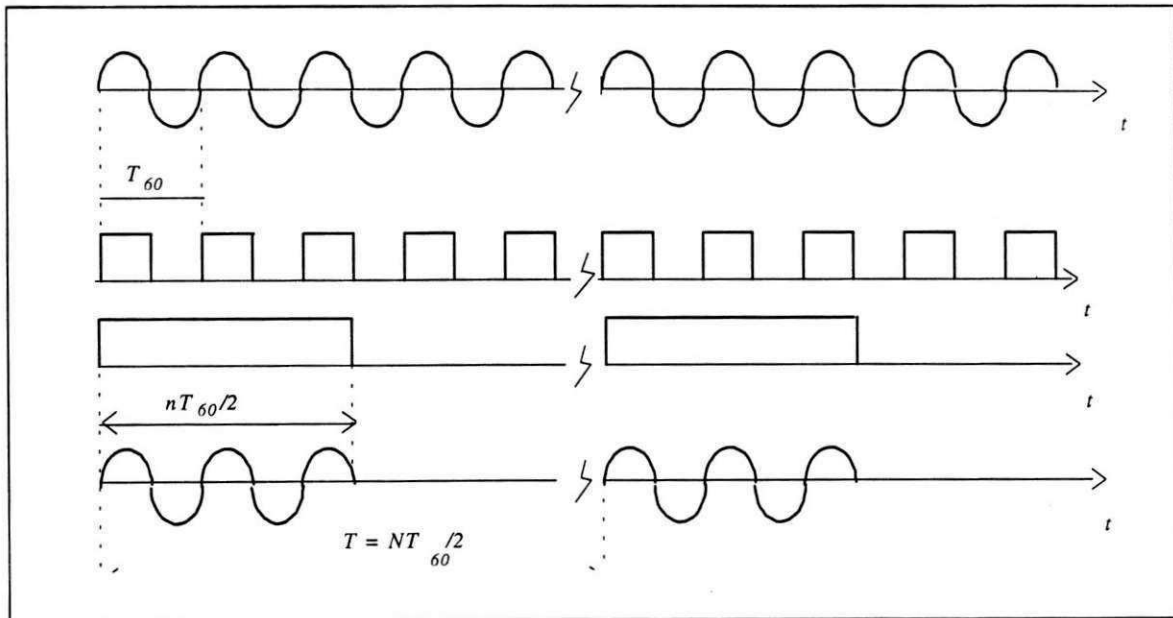


Figura 3.9 - Sinal de controle gerado pelo microcontrolador

O valor eficaz ao quadrado da tensão entregue ao forno (Figura 3.9), pode ser dado por:

$$V_f^2(ef) = \frac{1}{T} \int_0^T v_f^2(t) dt$$

$$V_f^2(ef) = \frac{1}{T} n \int_0^{T_r/2} V_p^2 \sin^2(\omega t) dt$$

$$V_f^2(ef) = \frac{nTr}{T} V_r^2(ef) \frac{1}{2}$$

onde $V_r(ef)$, é o valor eficaz da tensão da rede elétrica.

Substituindo $T = NT_r / 2$, teremos:

$$V_f^2(ef) = V_r^2(ef) \frac{n}{N}$$

O ganho de acionamento, é dado pela relação entre $V_f^2(ef)$ e n , logo:

$$G_a = \frac{V_f^2(ef)}{n} = \frac{V_r^2(ef)}{N} \quad (3.12)$$

Sendo assim, temos:

$$G_a = 220^2/255 = 189,8039 \quad (3.13)$$

3.5.2 - Controlador, Conversor A/D e Gerador de Rampa Discreta

Conforme mencionado anteriormente e mostrado na Figura 3.8, as funções de controle, conversão A/D e geração da rampa discreta de entrada são executadas pelo microcontrolador.

O controlador usado, é um controlador proporcional com ganho G_s desenvolvido para o microcontrolador tomando como referência o controlador descrito nos itens 3.2 e 3.3, e a rampa de entrada que é a referência do sistema é incrementada a cada ciclo do sinal PWM cujo período é $255/120 \text{ Hz}$, ou seja, $2,125 \text{ s}$ até o seu valor máximo. O valor do incremento para a rampa é calculado de forma a obtermos uma taxa de aquecimento constante para o forno e igual a $10^\circ\text{C}/\text{min}$. O produto $A B$ foi mantido igual a $16,4115$ e, nele foi incluído o ganho de conversão A/D e o ganho do acionamento dado pela equação (3.13).

A conversão A/D é feita em 8 bits com nível máximo de sinal de entrada igual a 5V . Ela é solicitada, a dois semi-ciclos do sinal da rede elétrica antes do início do intervalo de trabalho do sinal PWM. O ganho de conversão A/D ($G_{A/D}$) pode ser dado por:

$G_{A/D} = (2^8 - 1)/5 = 255/5 = 51$ e, sendo $AB = 16,4115$, teremos:

$$AB = 16,4115 \Rightarrow G_s G_a G_{A/D} G_h = 16,4115 \quad (3.14)$$

onde: G_s é o ganho do controlador proporcional; G_a é o ganho de acionamento; $G_{A/D}$ é o ganho do conversor A/D e, G_h é o ganho de um termopar tipo K x ganho do amplificador.

Logo:

$$G_s = \frac{16,4115}{G_a G_{A/D} G_h} \Rightarrow G_s = \frac{16,4115}{189,8039 \times 51 \times 4 \times 10^{-3}} \Rightarrow G_s = 0,423850 \quad (3.15)$$

Da equação (3.5), temos :

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{AG(s)}{1 + G(s)AB}$$

Onde:

$$G(s) = \frac{K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0};$$

$$A = G_s G_a;$$

$$B = G_{A/D} G_h;$$

Logo, resultando em:

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{\frac{G_s G_a K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}}{1 + \frac{G_s G_a G_{A/D} G_h K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}}$$

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{G_s G_a K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + G_s G_a G_{A/D} G_h K_0}$$

$$T(s) = \left(\frac{G_s G_a K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + G_s G_a G_{A/D} G_h K_0} \right) R(s) \quad (3.16)$$

Para $R(s) = \frac{C}{s^2}$ - Rampa de referência com inclinação C aplicada à entrada;

teremos:

$$T(s) = \left(\frac{G_s G_a K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + G_s G_a G_{A/D} G_h K_0} \right) \frac{C}{s^2} \quad (3.17)$$

Sabemos que :

$$\frac{dT(t)}{dt} \Rightarrow U(s) = s T(s) = \left(\frac{G_s G_a K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + G_s G_a G_{A/D} G_h K_0} \right) \frac{C}{s} \quad (3.18)$$

Aplicando o teorema do valor final a equação (3.18), acima teremos em regime permanente:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dT(t)}{dt} = \lim_{s \rightarrow 0} \left[s \left(\frac{G_s G_a K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + G_s G_a G_{A/D} G_h K_0} \right) \frac{C}{s} \right]$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{G_s G_a K_0 C}{\alpha_0 + G_s G_a G_{A/D} G_h K_0}$$

$$C = \frac{dT(t)}{dt} \left(\frac{\alpha_0 + G_s G_a G_{A/D} G_h K_0}{G_s G_a K_0} \right)$$

Para $\frac{dT(t)}{dt} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$, teremos:

$$C = \frac{10\alpha_0}{G_s G_a K_0} + 10 G_{A/D} G_h \quad (3.19)$$

Substituindo os parâmetros encontrados anteriormente em (3.19), obtemos $C = 2,741$.

Utilizando-nos de semelhança de triângulos, temos através da Figura 3.10.

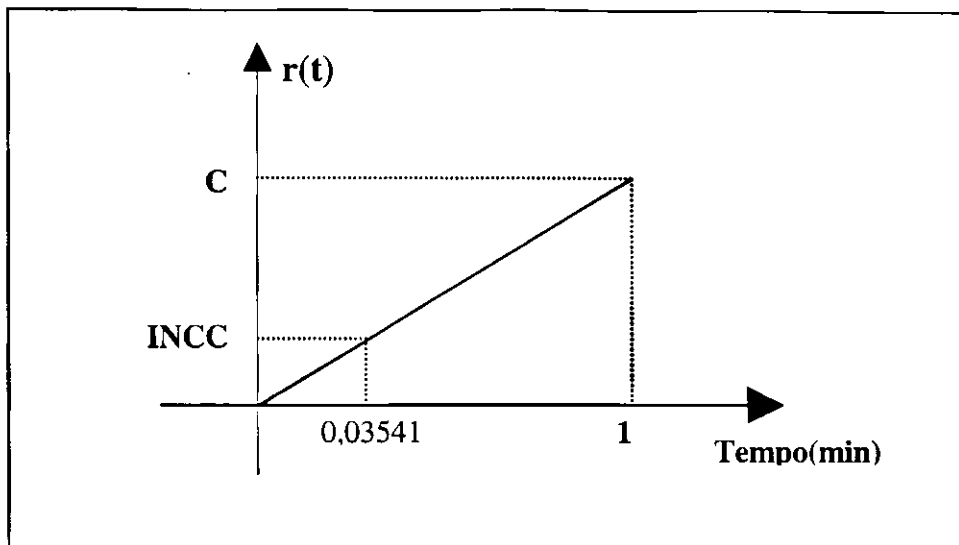


Figura 3.10 - Representação gráfica do incremento para a rampa de entrada

Portanto obtemos para o incremento da rampa $Y = INCC = 0,0970$

O fluxograma do programa principal e do controlador são mostrados respectivamente nas Figuras B.1 e B.2 no apêndice B. O programa em linguagem assembler foi implementado em aritmética de 16 *bits* e é apresentado no apêndice C.

3.5.3 - Descrição Sucinta do Programa Principal

Sendo o programa principal de acionamento do sistema, comum a todos os programas de controle implementados, diferenciando-se estes apenas nas subrotinas de controle, específicas ao tipo de controlador implementado. Apresentamos a seguir as principais tarefas executadas neste programa.

INÍCIO - Inicialização de variáveis (ciclo do sinal PWM, n, etc.) e parâmetros (inicialização da rampa discreta, valor final da rampa, etc.); definição de procedimentos (temporizador de referência, relógio para o temporizador, etc.).

ESPERA COMANDO PARA DAR INÍCIO AO PROCESSO- O microcontrolador espera transição positiva em uma entrada para dar início ao processo. Este procedimento e a entrada são definidos no início do programa e, tem função de sincronismo.

DÁ INÍCIO AO PRIMEIRO CICLO DO SINAL PWM - O programa ativa o pino de saída do microcontrolador, correspondente ao sinal PWM (pino de saída do sinal PWM). Esta saída é comutada do nível lógico 0 (zero) para o nível lógico 1 (um), dando início ao primeiro intervalo de trabalho do sinal PWM.

DEFINE E COMANDA O FINAL DO INTERVALO DE TRABALHO DO SINAL PWM, COM INFORMAÇÃO DO CONTROLADOR : A informação (n) do controlador é comparada ao valor contido no temporizador no início de um ciclo de sinal PWM, definindo assim, o instante (fim do intervalo de trabalho) no qual o pino de saída de sinal PWM deve ser desativado pelo microcontrolador.

ATUALIZA RAMPA DE ENTRADA E VERIFICA VALOR FINAL - A rampa discreta de entrada (Figura 3.10), ou sinal de referência é atualizada a dois semi-ciclos antes do final de intervalo de trabalho do sinal PWM. Para limitar a temperatura em um valor final máximo, o sinal de referência é mantido constante a partir do ciclo em que é constatado que a rampa atingiu seu valor máximo. Este valor máximo para a rampa é definido no início do programa, e a cada ciclo de sinal PWM ele é verificado.

CONVERSÃO A/D - A conversão A/D é efetuada pelo microcontrolador a dois semi-ciclos do sinal da rede, antes do início de novo ciclo do sinal PWM.

CONTROLADOR - Chamada para a subrotina do controlador.

DÁ INÍCIO A NOVO CICLO DE SINAL PWM - O início de novo ciclo de sinal PWM é definido quando o controlador for atualizado, indicando o número de ciclos do sinal da rede elétrica a ser enviado ao forno (largura de pulso do sinal PWM), o microcontrolador então ativa o pino de saída de sinal PWM.

3.5.4 - Frequência de Amostragem para o Sistema Realimentado Com Microcontrolador.

Em sistemas de tempo discreto, a frequência de amostragem deve ser maior ou igual a duas vezes à frequência máxima do espectro de frequência do sinal contínuo (Teorema da amostragem [13]).

Para o nosso sistema temos:

$$T_s = 2,1s \text{ - Período de amostragem :}$$

$$f_s = \frac{1}{2,1s} \Rightarrow f_s = 0,476Hz \text{ - Frequência de amostragem.}$$

$$f_n = \frac{W_n}{2\pi 60} \text{ - Frequência máxima natural presente no sistema.}$$

$$\text{Onde : } W_n = \sqrt{(\alpha_0 + ABK_0)} \text{ rad/min.}$$

Substituindo os parâmetros encontrados anteriormente, na expressão acima teremos:

$$W_n = 0,175 \text{ rad/min.} \Rightarrow f_n = 0,4642 \times 10^{-3} \text{ Hz.}$$

Logo :

$$\frac{f_s}{f_n} = 1025,42.$$

Portanto a condição de amostragem é satisfeita.

Os resultados experimentais de acionamento do sistema, implementado com o controlador proporcional desenvolvido anteriormente, são apresentados e analisados no capítulo 5, desse trabalho.

3.6 - O Controlador PI

No controle proporcional do nosso processo, há um erro de regime permanente, inerente ao tipo de controle utilizado. Para eliminarmos esse erro e melhorarmos a performance geral do sistema, implementamos um controlador proporcional integral.

Podemos observar no diagrama de blocos da Figura 3.11, a planta do sistema com controlador PI.

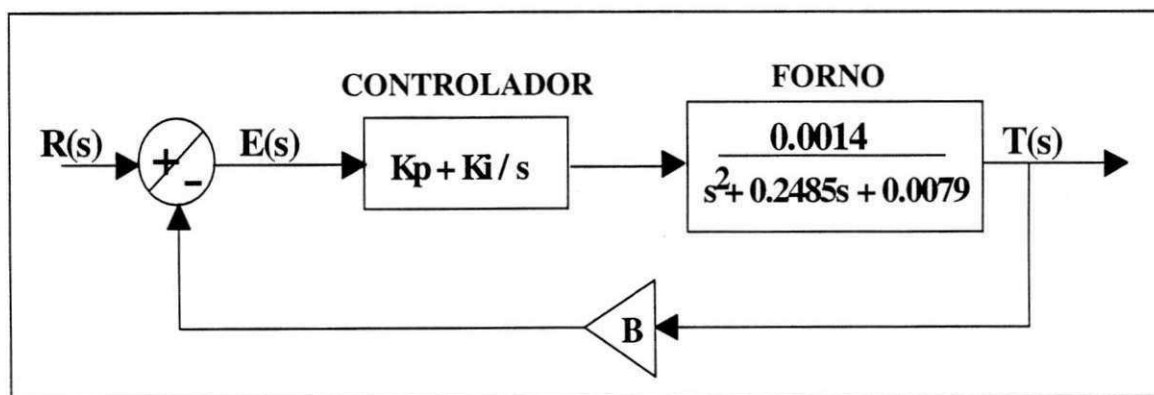


Figura 3.11 - Diagrama de blocos do controlador PI

Sendo $R(s)$ a entrada de referência, $T(s)$ a saída do sistema e $E(s)$ o seu erro de regime permanente, podemos encontrar a seguinte função de transferência em malha fechada.

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{(K_p + K_i / s) K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 + BK_0 (K_p + K_i / s)} \quad (3.20)$$

Onde: K_p é o ganho proporcional e, K_i é o ganho integral

Desenvolvendo a equação (3.20), obtemos:

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{K_p K_0 s + K_i K_0}{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s + B K_0 K_p s + B K_0 K_i} \quad (3.21)$$

Sendo $E(s) = R(s) - BT(s)$, temos:

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{R(s) - BT(s)}{R(s)} = 1 - \frac{BT(s)}{R(s)} \quad (3.22)$$

Substituindo a equação (3.21) em (3.22), teremos:

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s}{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s + B K_0 (K_p s + K_i)} \quad (3.23)$$

Se $R(s)$ for um degrau de amplitude C , aplicado a entrada, teremos da equação (3.23);

$$E(s) = \frac{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s}{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s + B K_0 (K_p s + K_i)} \left(\frac{C}{s} \right) \quad (3.24)$$

Aplicando o teorema do valor final a equação (3.24), temos:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left(\frac{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s}{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s + B K_0 (K_p s + K_i)} \right) \left(\frac{C}{s} \right) = 0 \quad (3.25)$$

Portanto, utilizando um controlador PI, podemos eliminar o erro de regime permanente para uma entrada em degrau.

Os parâmetros K_p e K_i , foram obtidos através de simulação da planta da Figura 3.11 em computador, utilizando uma rampa com inclinação de $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min.}$, como sinal de referência de entrada para o sistema.

O método adotado consistiu em manter K_p , com o mesmo valor obtido na implementação do controlador P, e por tentativa e erro variar o valor de K_i , repetindo esse procedimento várias vezes até encontrar valores para o parâmetro K_i que proporcionasse uma resposta do sistema com amortecimento adequado. Os parâmetros

encontrados foram $K_p = 0,423850$ e $K_i = 0,03125$. Os critérios adotados para avaliação da resposta desejada para o sistema, foi o mesmo utilizado para o controlador P.

3.6.1 - Implementação do Controlador PI com o Microcontrolador.

Ao implementarmos o controlador PI, no microcontrolador, observamos que o princípio geral de acionamento do sistema, mantém-se o mesmo que o definido para o controlador P, (fluxograma da Figura B.1, no apêndice B), diferenciando-se apenas, na implementação da ação de controle referente ao controle PI (fluxograma da Figura B.3 no apêndice B) cuja função característica de controle é definida pela expressão (3.26).

$$n = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.26)$$

A primeira parcela da expressão acima, foi implementada quando utilizamos o controlador P, restando-nos, então, implementarmos a função integral. Para realizarmos a integração, utilizamo-nos do método trapezoidal de integração numérica, em virtude do tipo de curva esperada para o erro e contando ainda com a presença de eventuais ruídos presentes no sistema.

Assim, para integrarmos a curva da função erro no intervalo compreendido entre $t = 0$ à $t = \tau$ (qualquer), devemos dividir esse intervalo em subintervalos menores e calcularmos a área sob a curva, utilizando-nos da equação (3.27).

$$\int_{t=0}^{\tau} e(t) dt = A_{\text{trapezio}} = I = (e_i - e_{i-1}) \frac{\Delta t}{2} + I_{i-1} \quad (3.27)$$

Assim, implementamos um algoritmo para executar a expressão definida pela equação 3.27. Onde: e_i é o valor atual do erro, correspondente a interação i ; e_{i-1} é o valor anterior do erro, correspondente a interação $i-1$; Δt é a taxa de amostragem do sistema, já definida anteriormente, $\Delta t = 2,1$ s; I_{i-1} é a integral anterior, correspondente a interação $i-1$ e, I é a integral atual, correspondente a interação i .

O sinal de referência que utilizamos para o controlador PI foi uma rampa com as mesmas características da utilizada no controlador P.

3.6.2 - Cálculo do passo de atualização da rampa (INCC)

Da equação (3.21), temos a função de transferência do sistema definida pela expressão em malha fechada, abaixo:

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{K_0(Kps + Ki)}{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s + BK_0(Kps + Ki)}$$

Logo:

$$T(s) = \frac{K_0(Kps + Ki)}{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s + BK_0(Kps + Ki)} R(s) \quad (3.28)$$

Para $R(s) = \frac{C}{s^2}$ - Rampa de referência com inclinação C aplicada à entrada,

Teremos:

$$T(s) = \frac{K_0(Kps + Ki)}{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s + BK_0(Kps + Ki)} \frac{C}{s^2} \quad (3.29)$$

Sabemos que:

$$\frac{dT(t)}{dt} \rightarrow U(s) = sT(s) = s \frac{k_0(Kps + Ki)}{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha'_0 s + BK_0(kps + ki)} \frac{C}{s^2} \quad (3.30)$$

Aplicando o teorema do valor final, a equação (3.30), teremos em regime:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dT(t)}{dt} = \lim_{s \rightarrow 0} s \left(\frac{K_0(Kps + Ki)}{s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_0 s + BK_0(Kps + Ki)} \frac{C}{s} \right)$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{K_0 K_i C}{BK_0 K_i}$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{C}{B} \Rightarrow C = B \frac{dT(t)}{dt} \quad (3.31)$$

Sendo $B = 0,204$ e para $dT(t)/dt = 10^\circ C/min.$, teremos:

$$C = 0,204 \times 10 \Rightarrow C = 2,04$$

Por semelhança de triângulos, temos através da Figura 3.12.

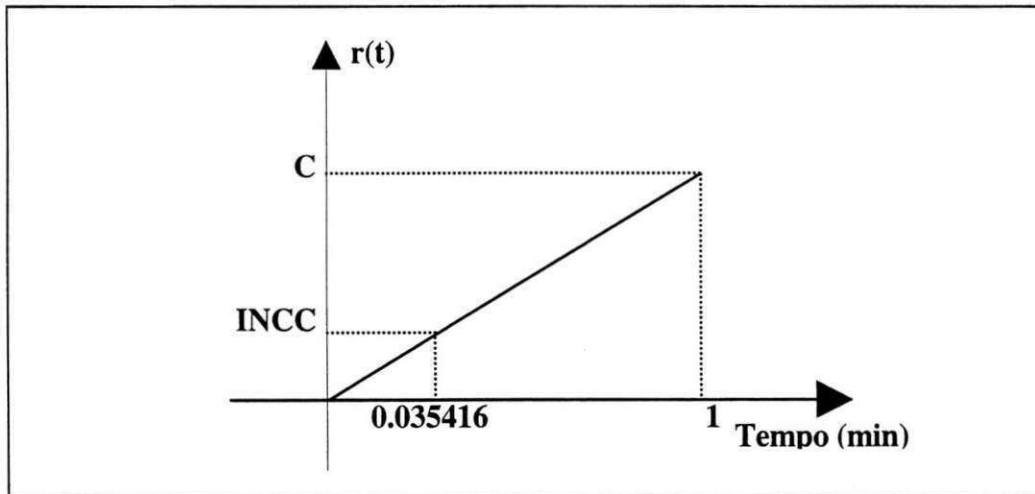


Figura 3.12 - Representação gráfica do passo de incremento da rampa de entrada

$$INCC = 0,07224864$$

onde: INCC é o passo de incremento para a rampa de entrada.

3.6.3 - Cálculo do valor final da rampa de entrada

Supondo-se que o forno em regime permanente deva atingir a temperatura de $800^\circ C$, sendo sua taxa de aquecimento $10^\circ C/min$, devemos esperar que a mesma será atingida em $80\ min$.

Da equação da reta dada pela expressão abaixo, temos:

$$Y = B \frac{dT(t)}{dt} \quad t \Rightarrow Y = 2,04 \quad t \quad (3.32)$$

Onde: Y é o valor final da rampa e, t é o tempo em minutos.

Logo: $P/t = 80 \text{ min.} \Rightarrow Y = 2,04 \times 80 = 162,2$.

O fluxograma do controlador PI implementado é mostrado na Figura B.3 no apêndice B. O programa em linguagem assembler foi implementado em aritmética de ponto flutuante (16 *bits*) e é mostrado no apêndice C. Os resultados experimentais de acionamento do sistema com o controlador PI, são apresentados e comentados no capítulo 5, deste trabalho.

3.7 - O Controlador PID

A combinação da ação de controle proporcional, ação de controle integral e ação de controle derivativa, é denominada ação de controle proporcional - mais - derivativa - mais - integral. Esta ação combinada possui as vantagens de cada uma das três ações de controle individuais. Com o uso da ação integral, eliminamos o erro em regime permanente, conforme demonstrado anteriormente. Com a ação derivativa, tendo a mesma um caráter antecipatório, obtemos um controlador com alta sensibilidade respondendo a variação do erro atuante e produzindo uma correção significativa antes que o valor do erro torne-se demasiadamente grande [13].

Podemos observar no diagrama de blocos da Figura 3.13, a planta do sistema com controlador PID.

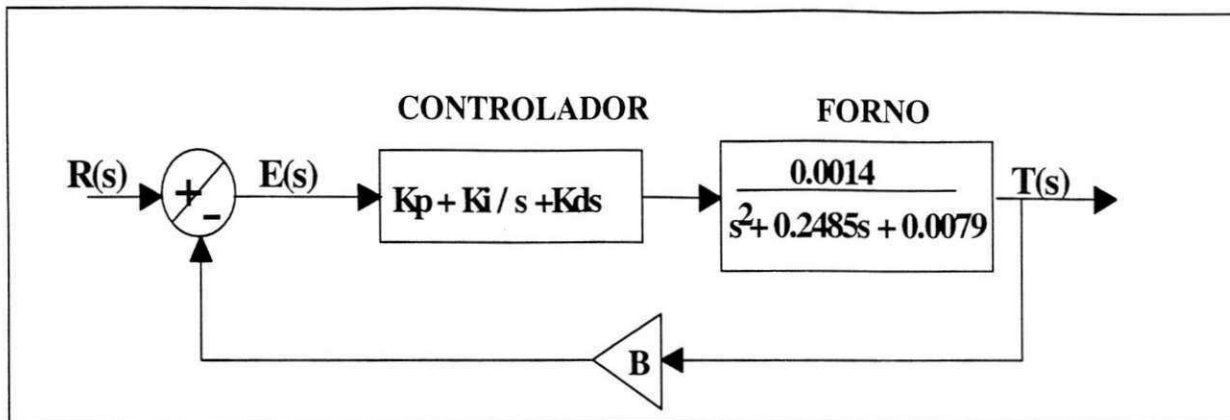


Figura 3.13 - Diagrama de blocos do controlador PID

A equação de um controlador com esta ação de controle combinada é dada pela equação (3.33).

$$n = Kp e(t) + Ki \int_0^t e(t) dt + Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (3.33)$$

Onde: Kp é o ganho proporcional; Ki é o ganho integral e, Kd é o ganho derivativo

De maneira análoga a anterior, podemos provar que o erro em regime permanente para o sistema da Figura 3.13, é nulo para uma entrada em degrau. Sendo $T(s)/R(s)$ a função de transferência de malha fechada; teremos:

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{(Kps + Ki + Kds^2) G_A K_0}{s(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0) + (Kps + Ki + Kds^2) G_A BK_0} \quad (3.34)$$

Sendo: $E(s) = R(s) - BT(s)$, temos:

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{R(s) - BT(s)}{R(s)} = 1 - \frac{BT(s)}{R(s)} \quad (3.35)$$

Logo:

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{s(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0)}{s(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0) + (Kps + Ki + Kds^2) G_A BK_0} \quad (3.36)$$

Sendo $R(s)$ a resposta a um degrau de amplitude C aplicado à entrada do sistema, e aplicando-se o teorema do valor final a equação (3.36) acima, teremos:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(s \frac{s(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0)}{s(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0) + (Kps + Ki + Kds^2) G_A BK_0} \frac{C}{s} \right) = 0 \quad (3.37)$$

Portanto, com o controlador PID podemos eliminar o erro de regime permanente para uma entrada em degrau.

Para o cálculo dos parâmetros Kp , Ki e Kd , utilizamo-nos de técnicas de cancelamento de pólos.

Sendo:

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{\frac{Kd(s^2 + Kp / Kds + Ki / Kd)}{s} G_A \left(\frac{K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0} \right)}{1 + BG_A Kd \left(\frac{s^2 + Kp / Kds + Ki / Kd}{s} \right) \left(\frac{K_0}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0} \right)} \quad (3.38)$$

$$\text{Fazendo: } \frac{Kp}{Kd} = \alpha_1 \quad (3.39)$$

$$\frac{Ki}{Kd} = \alpha_0 \quad (3.40)$$

teremos:

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_0 K d G_A}{s}}{1 + \frac{B G_A K d K_0}{s}}$$

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{K_0 K d G_A}{s + B G_A K d K_0} \quad (3.41)$$

Da equação (3.41), temos:

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{1}{B \left(\frac{s}{B G_A K_0 K d} + 1 \right)} \quad (3.42)$$

Logo:

$$T(s) = \frac{1}{B} \frac{1}{\left(\frac{s}{K_0 K d B G_A} + 1 \right)} R(s) \quad (3.43)$$

Para: $R(s) = \frac{C}{s}$ - Função de transferência para um degrau de amplitude C,

aplicado a entrada, teremos:

$$T(s) = \frac{C}{B} \frac{1}{(Ts + 1)} \frac{1}{s} \quad (3.44)$$

$$\text{Onde: } T = \frac{1}{K_0 K d B G_A} \quad (3.45)$$

Sabendo-se que T na equação (3.45), representa a constante de tempo do sistema, ou seja o tempo necessário para que a resposta atinja 63,2% de sua variação total, escolhemos $T = 5 \text{ min}$.

Sendo assim, da equação (3.45) temos:

$$K_0 K_d B G_A = \frac{1}{5} \quad (3.46)$$

Logo:

$$K_d = \frac{1}{K_0 B G_A 5} \quad (3.47)$$

Substituindo os valores de B, G_A e K_0 obtidos anteriormente na equação (3.47), teremos:

$$K_d = \frac{1}{0,0014 \times 189,8039 \times 0,204 \times 5} = 3,689492$$

Substituindo K_d nas equações (3.39) e (3.40), obtemos:

$$K_p = \alpha_1 K_d$$

$$K_p = 0,2485 \times 3,689492$$

$$K_p = 0,916838.$$

e

$$K_i = \alpha_0 K_d$$

$$K_i = 0,0097 \times 3,689492$$

O que resulta em $K_i = 0,02914$.

3.7.1-Implementação do Controlador PID em Microcontrolador

Para implementarmos a ação de controle proporcional - mais - integral - mais-derivativo (PID) no microcontrolador, devemos implementar a equação (3.33);

analisando esta equação constatamos que as duas primeiras parcelas já foram implementadas quando utilizamos o controlador PI, restando - nos implementar a ação derivativa descrita, abaixo:

$$m(t) = Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (3.48)$$

Assim, para derivarmos a função erro, recorremos a fórmula descrita na equação (3.49).

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e_i - e_{i-1}}{\Delta t} \quad (3.49)$$

Onde: e_i é o valor atual do erro, correspondente a interação i ; e_{i-1} é o valor anterior do erro, correspondente a interação $i-1$; Δt é a taxa de amostragem do sistema, definida anteriormente, $\Delta t = 2,11s$.

3.7.2 - Cálculo do passo de incremento da rampa de entrada

Na equação (3.43), temos:

$$T(s) = \frac{1}{B} \frac{1}{\left(\frac{s}{K_0 KdBG_A} + 1 \right)} R(s)$$

Para $R(s) = \frac{C}{s^2}$; - Rampa com inclinação C aplicada à entrada, teremos:

$$T(s) = \frac{1}{B} \frac{1}{\left(\frac{s}{K_0 KdBG_A} + 1 \right)} \frac{C}{s^2} \quad (3.50)$$

Sabendo que:

$$\frac{dT(t)}{dt} \Rightarrow U(s) = s T(s) = \frac{1}{B} \frac{1}{\left(\frac{s}{K_0 K_d B G_A} + 1\right)} \frac{C}{s} \quad (3.51)$$

Teremos aplicando o teorema do valor final a equação (3.51), em regime:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dT(t)}{dt} = \lim_{s \rightarrow 0} s \left[\frac{C}{B} \frac{1}{\left(\frac{s}{K_0 K_d B G_A} + 1\right)} \frac{1}{s} \right]$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{C}{B} \quad (3.52)$$

Logo:

$$C = B \frac{dT(t)}{dt} \quad (3.53)$$

Sendo $B = 0,204$ e escolhendo $dT(t)/dt = 10^\circ C/min.$, teremos:

$$C = 0,204 \times 10 \Rightarrow C = 2,04.$$

Utilizando-nos então de semelhança de triângulos, através da Figura 3.14, tem-se que $INCC = 0,0722224864$

Observe que foi o mesmo resultado obtido, quando da implementação do controlador PI.

O cálculo do valor final da rampa é obtido da mesma maneira que o cálculo para o controlador PI, obtendo-se o mesmo valor, $Y = 162,2$.

O fluxograma do controlador PID desenvolvido é mostrado na Figura B.4 no apêndice B. O programa em linguagem assembler foi implementado em aritmética de

CAPÍTULO IV

AQUISIÇÃO DE DADOS PARA ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL

4.1 - Introdução

Neste capítulo serão apresentados os circuitos responsáveis pela aquisição e tratamento (condicionamento) de dados relativos às análises térmicas ($T_a - T_r$), como também o sistema de aquisição e análise de dados para o equipamento, que permitirá ao usuário definir através de uma interface amigável uma série de parâmetros necessários a realização de um ensaio, e monitorar a plotagem gráfica em tempo real do termograma em microcomputador pessoal (PC).

4.2 - Circuitos para condicionamento de sinais

Apresenta-se na Figura 4.1, o circuito responsável pela aquisição e condicionamento de dados necessários a análise térmica diferencial (T_a e T_r). A aquisição dos dados correspondentes as temperaturas T_a e T_r são realizadas através de termopares tipo K, os quais são interligados a um estágio de amplificação para condicionamento de sinal, constituído por um amplificador diferencial e um amplificador não inversor ambos implementados com o amplificador operacional LM 725. Obtendo-se assim na saída do circuito uma tensão (V_o) proporcional a diferença de temperatura entre a amostra utilizada em ensaio e a temperatura do material de referência ($T_a - T_r$).

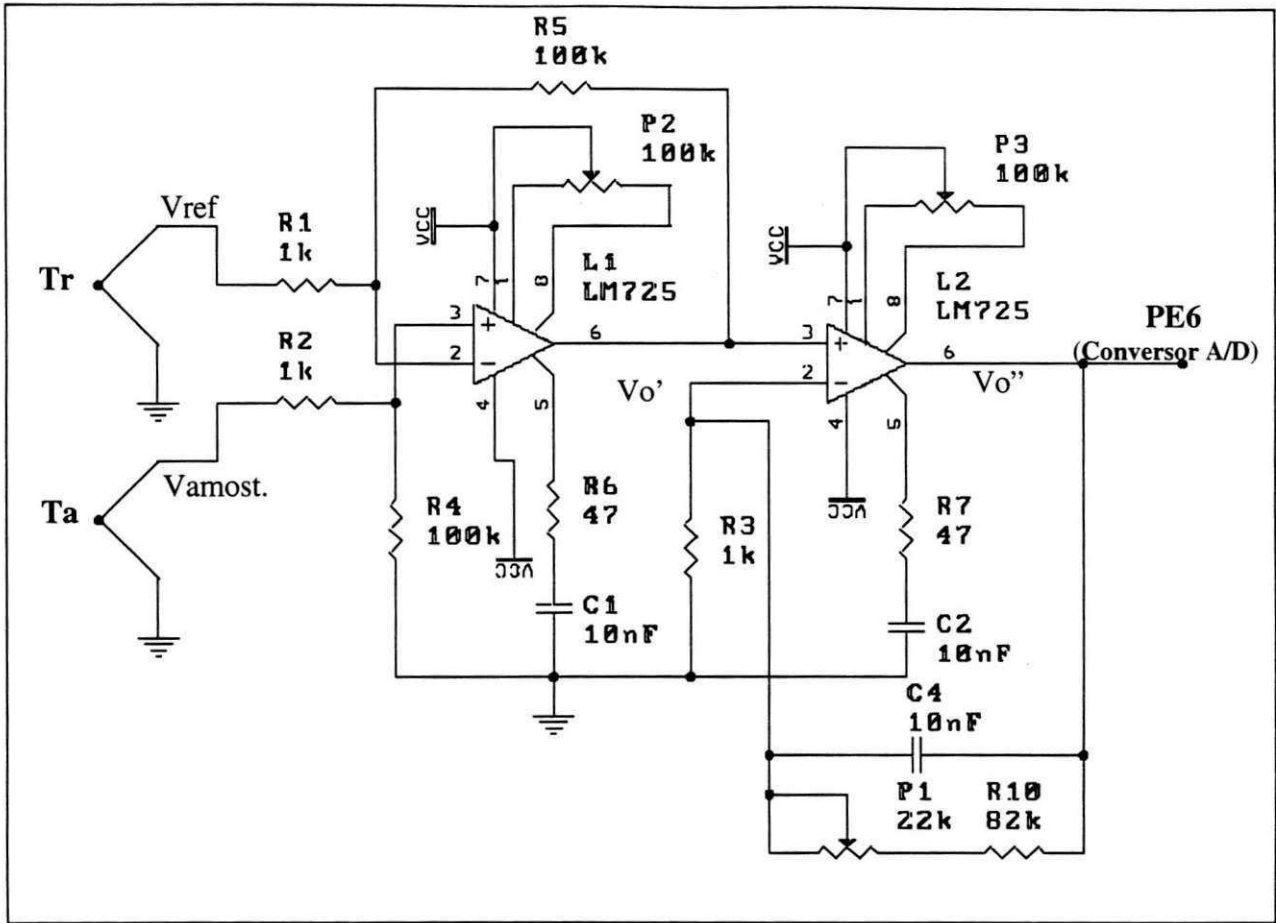


Figura 4.1- Circuito para aquisição da temperatura diferencial (Ta - Tr)

Observando o circuito da Figura 4.1, chegamos as seguintes equações:

$$V_0' = 100 \times (V_{amost} - V_{ref})$$

$$V_0'' = 100 \times V_0' \Rightarrow V_0'' = 100 \times [100 \times (V_{amost} - V_{ref})]$$

$$V_0'' = 10000 \times (V_{amost} - V_{ref})$$

$$\boxed{V_0'' = 10^4 \times (V_{amost} - V_{ref})} \quad (4.1)$$

Onde: V_{ref} é a tensão de saída do termopar correspondente a temperatura do material de referência (T_r); e V_{amost} é a tensão na saída do termopar referente a temperatura da amostra (T_a).

Analisando a equação (4.1), concluímos que a tensão entregue ao pino PE6 do conversor A/D do microcontrolador, consiste na tensão diferencial correspondente a ($T_a - T_r$) multiplicada por um ganho de 10^4 , obtido através da utilização do estágio de amplificação implementado com os amplificadores operacionais LM 725 de acordo com o circuito da Figura 4.1. Este ganho se faz necessário para aumentarmos a sensibilidade do equipamento, no que se refere ao registro das curvas térmicas diferenciais.

Sendo a resolução do conversor A/D do microcontrolador MC68HC11 dado por:

$$\frac{VRH - VRL}{2^n - 1} = \frac{5V - 0}{2^8 - 1} = \frac{5V}{255} = 19,6mV \quad (4.2)$$

Tendo os termopares utilizados ganho = $40\mu V/^\circ C$, teremos:

$$40\mu V/^\circ C \times 10^4 = 0,4V/^\circ C; \quad (4.3)$$

logo dividindo a equação (4.2) por (4.3), obtemos:

$$\frac{19,6mV}{0,4 V/^\circ C} = 0,049 \text{ } ^\circ C$$

Assim o equipamento proposto, terá sensibilidade para detectar uma diferença mínima de até $0,049^\circ C$, entre a temperatura do material de referência e a temperatura da amostra.

No entanto analisando a equação (4.1), observamos que quando a amostra sofrer uma transformação endotérmica, situação bastante freqüente em análise térmica diferencial, a temperatura da amostra torna-se menor que a temperatura do material de referência, logo a tensão

diferencial presente na saída do circuito da Figura 4.1 (V_0''); será negativa ($V_{amost} - V_{ref} < 0$). Sendo a faixa de operação do conversor A/D do microcontrolador MC68HC11, utilizada neste projeto compreendida entre 0 a 5V; concluímos então que esta tensão não poderá ser lida diretamente pelo conversor A/D do microcontrolador, sob pena de danificá-lo. Para solucionar este problema, foi implementado o circuito da Figura 4.2.

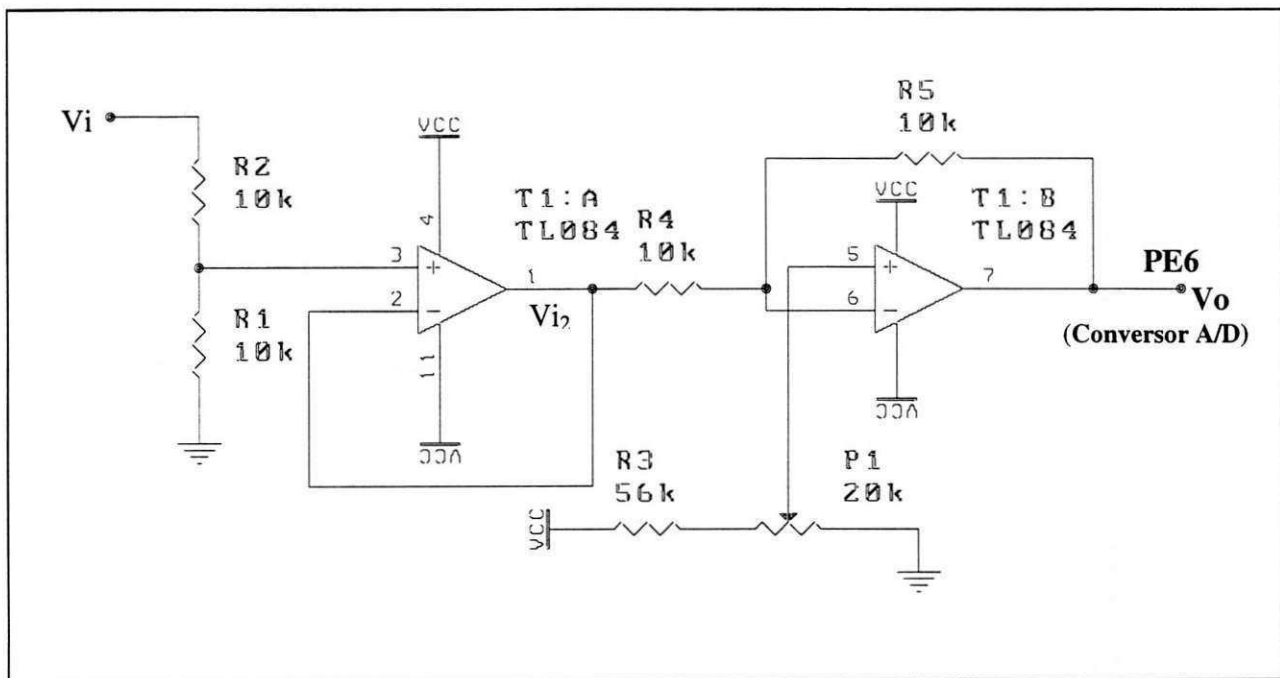


Figura 4.2 - Circuito para condicionamento de sinal

Este circuito tem como objetivo condicionar a tensão em sua saída, para a faixa de 0 a 5V, de acordo com o gráfico da Figura 4.3; sendo acoplado diretamente a saída do circuito da Figura 4.1, e tendo sua saída lida diretamente através do pino PE6 do conversor A/D do microcontrolador.

Observando o circuito da Figura 4.2, desenvolvemos o seguinte conjunto de equações .

$$V_{i2} = \frac{V_i}{2}$$

$$I = \frac{V_{i2} - V^+}{R} = \frac{V^+ - V_0}{R} \Rightarrow$$

$$V_{i2} - V^+ = V^+ - V_0 \Rightarrow V_{i2} - V^+ + V_0 = V^+ \Rightarrow V_0 = 2 \times V^+ - V_{i2}$$

Fazendo $V^+ = 1.25 \text{ V}$, teremos:

$$V_0 = 2.5 - V_{i2} \Rightarrow$$

$$V_0 = 2.5 - V_i / 2$$

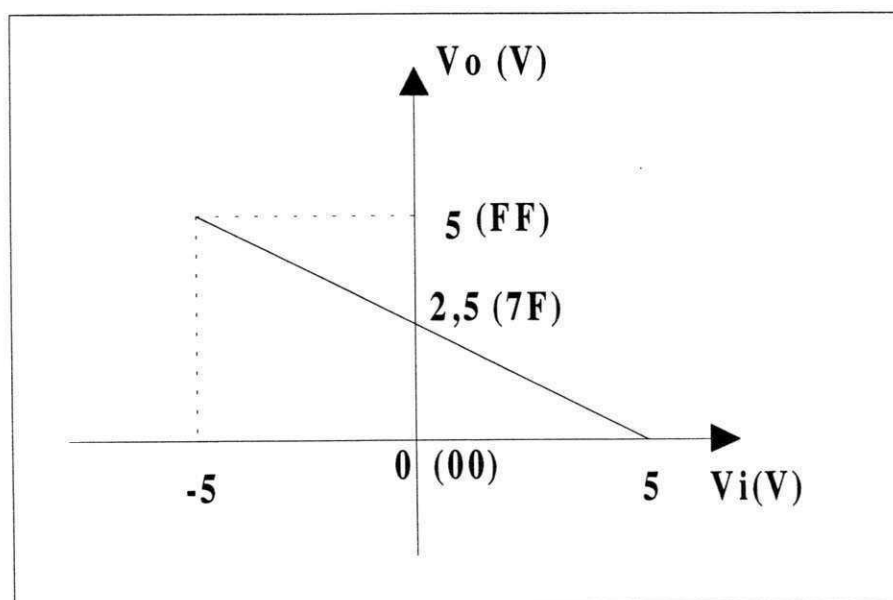


Figura 4.3 - Representação gráfica da faixa de variação da tensão de saída no circuito da Figura 4.2 em função de sua tensão de entrada.

Analisando o gráfico da Figura 4.3 concluímos que para uma variação da tensão diferencial ($V_{\text{most.}}(T_a) - V_{\text{ref}}(T_r)$), correspondente a uma transformação térmica compreendida entre $-5V$ e $+5V$, a tensão na saída do circuito se encontrará entre 0 e $+5V$, compatível com a faixa de operação do conversor A/D do microcontrolador MC68HC11.

No capítulo 2 foi apresentado um circuito transdutor para temperatura do forno (Figura 2.9). Este circuito foi utilizado com o objetivo de medir as variações de temperatura sofridas pelo forno durante o ensaio, fornecendo em sua saída uma tensão proporcional a diferença entre a temperatura no interior do forno (T_r) e a temperatura ambiente (T_0); sendo esta lida através do pino PE7 de entrada do conversor A/D do microcontrolador, onde o programa de controle para temperatura do forno é residente, utilizando-a como informação para o controlador.

4.3 - Circuitos para a compensação automática de temperatura

Os circuitos apresentados a seguir, tem como objetivo fazer a compensação automática de temperatura da junta fria do termopar responsável pela medição de temperatura do forno, fornecendo em sua saída uma tensão proporcional a temperatura interna do forno (T_r); compensando-se assim automaticamente o efeito da temperatura ambiente.

4.3.1 - Circuito de termômetro

Este circuito tem como objetivo, medir a temperatura ambiente, fornecendo em sua saída uma tensão proporcional a temperatura medida, a uma razão constante de $4mV/^{\circ}C$. Como elemento sensor foi utilizada a junção base-emissor com o coletor ligado na base do transistor de uso geral 2N2222.

Na Figura 4.4 é mostrado o circuito utilizado na medição da temperatura ambiente.

O elemento sensor é colocado em um dos braços da ponte utilizada conforme mostrado na Figura 4.4, e a seguir submetido a um ambiente de temperatura controlada para calibração do circuito.

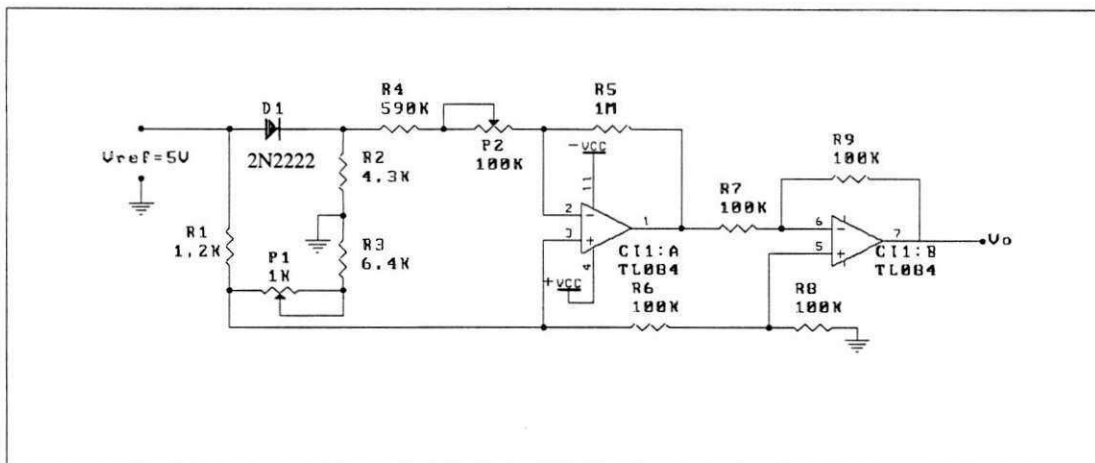


Figura 4.4 - Circuito de termômetro

O potenciômetro P1 é utilizado para calibração do circuito da ponte a 0°C (Temperatura de gelo). Uma vez calibrado o circuito da ponte é acoplado a um estágio amplificador, constituído por um amplificador inversor CI1:A e amplificador diferencial CI1:B, ambos implementados com o amplificador operacional TL084. O potenciômetro P2 é finalmente ajustado para obtermos na saída do circuito (V_0) um coeficiente de temperatura de $4\text{mV}/^{\circ}\text{C}$.

A seguir foi levantado experimentalmente o comportamento térmico do circuito, objetivando-se com isso observar o comportamento do sensor utilizado; para tanto a temperatura do sensor foi progressivamente aumentada de 1°C na faixa compreendida entre 7 e 38°C ; medindo-se a tensão na saída do circuito para a temperatura correspondente no sensor, obtendo-se assim o gráfico da Figura 4.5, o qual nos permite observar melhor o comportamento do circuito.

Observando o gráfico da Figura 4.5 concluímos que o circuito apresenta boa linearidade de resposta, para a faixa de temperatura de teste, apresentando uma razão aproximadamente constante de $4mV/^{\circ}C$, em sua saída.

Uma vez obtida a tensão de saída do circuito da Figura 4.4, correspondente a temperatura ambiente (T_0), esta é adicionada à tensão de saída do circuito da Figura 2.9, apresentado no capítulo 2, relacionada a $(T_r - T_0)$, através do circuito somador não inversor da Figura 4.6, compensando-se assim o efeito da temperatura ambiente. Logo a tensão na saída do circuito da Figura 4.6 é proporcional a temperatura do forno, sendo esta lida através do pino PE7 do conversor A/D do microcontrolador, que a utilizará como informação para o programa de controle para a temperatura do forno nele (microcontrolador) residente.

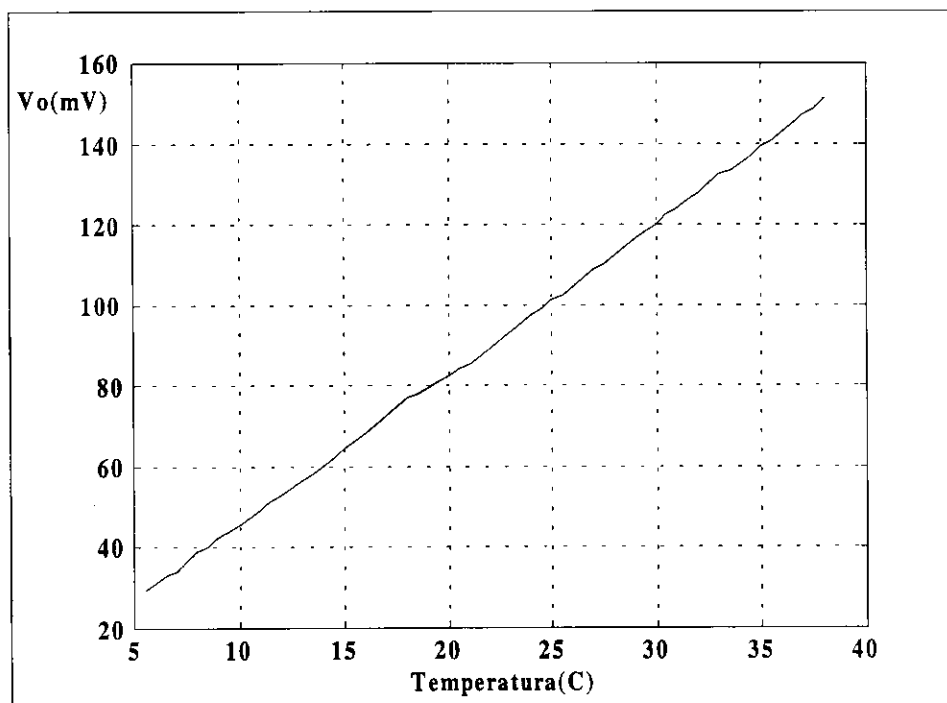


Figura 4.5 - Gráfico da tensão de saída do circuito de termômetro em função da temperatura do sensor.

A seguir é apresentado nas Figuras 4.7 e 4.8, o resultado experimental de acionamento do sistema, com compensação automática da temperatura ambiente. Este ensaio foi realizado com o

objetivo de avaliar o desempenho do sistema de controle para a temperatura do forno, constatando-se assim a funcionalidade ou não do circuito para a compensação da temperatura ambiente. O ensaio foi realizado a uma temperatura ambiente de 24°C.

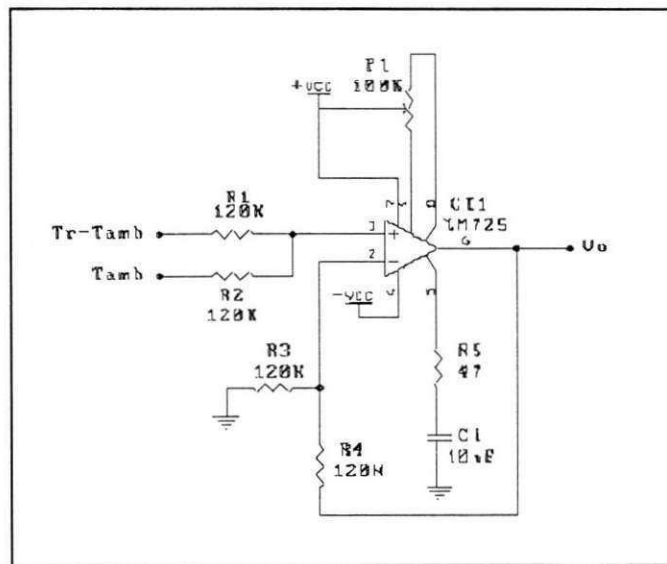


Figura 4.6 - Circuito somador não-inversor

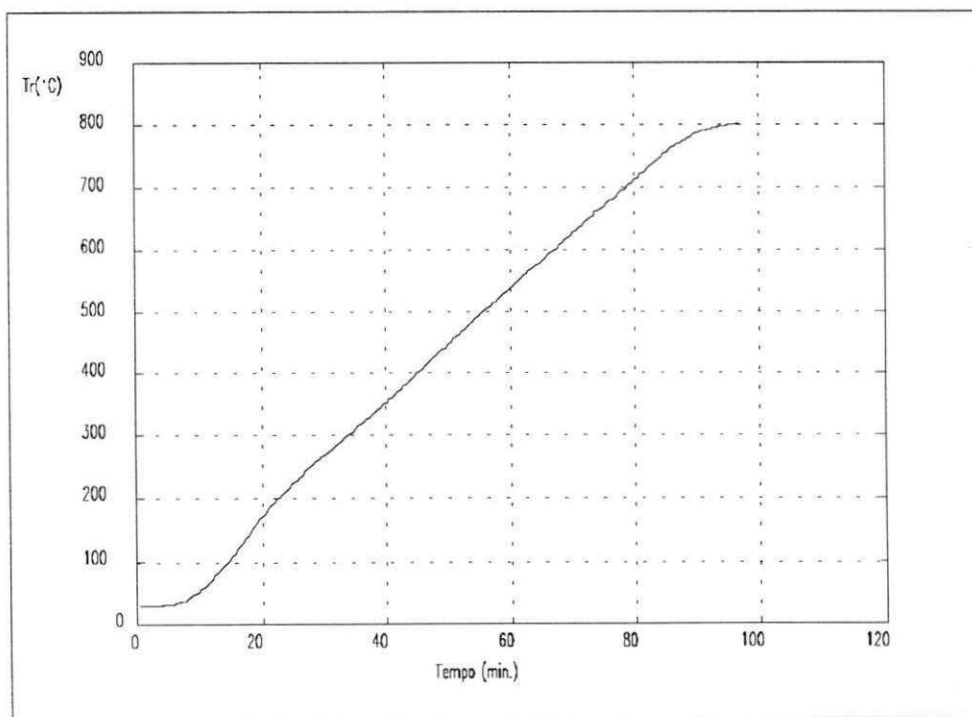


Figura 4.7 - Temperatura do forno versus tempo

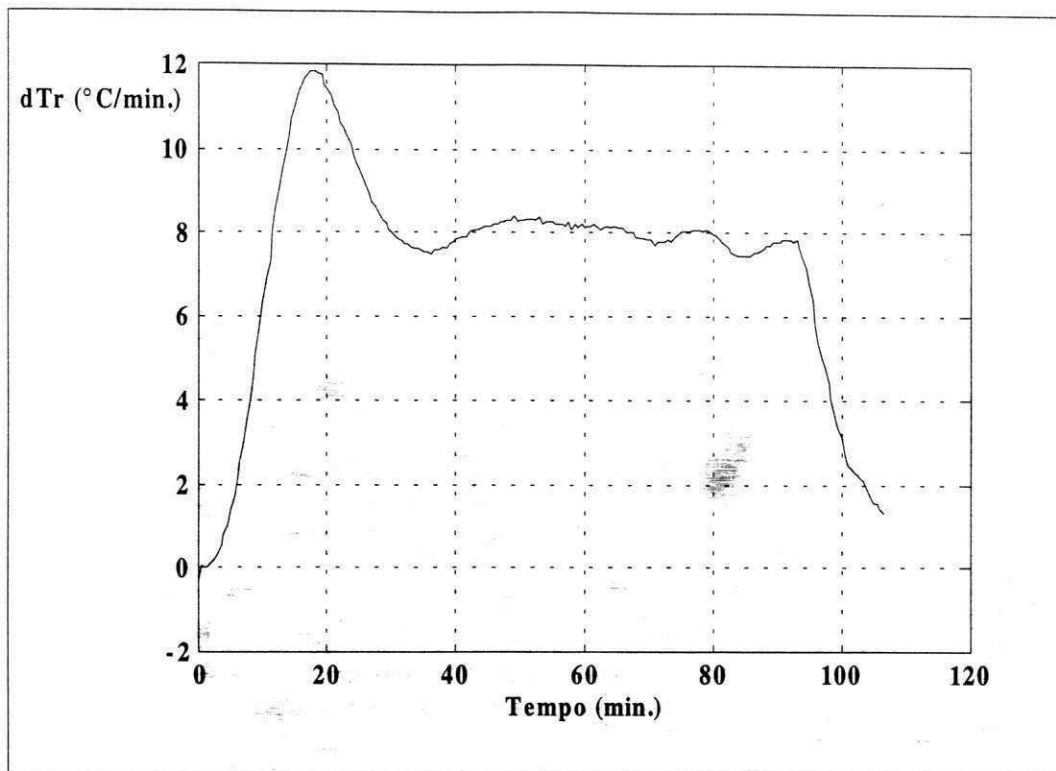


Figura 4.8 - Taxa de aquecimento do forno versus tempo

Observando os resultados experimentais obtidos, podemos constatar a funcionalidade do circuito para compensação da temperatura ambiente implementado, uma vez que conforme podemos observar no gráfico da Figura 4.7 a temperatura inicial do forno é de aproximadamente 24°C que é a temperatura ambiente, sendo a seguir progressivamente elevada a uma taxa constante, de acordo com o gráfico da Figura 4.8 até a temperatura final de 800°C .

4.4 - Programa de Aquisição e Análise de Dados

O programa implementado para a aquisição e análise de dados no instrumento para ATD aqui apresentado, consiste basicamente em duas etapas. Na primeira denominada - Programa Monitor - que é armazenado previamente no microcontrolador tem como função, realizar o acionamento do sistema e controle de aquecimento do forno, através dos programas de controle e acionamento apresentados e desenvolvidos no capítulo 3 e enviar para o microcomputador os dados térmicos (T_r e $T_a - T_r$) a uma taxa de 1 amostra a cada 30 segundos.

A segunda etapa, denominada programa **ATD** é uma interface Homem-máquina amigável para o usuário, possibilitando ao mesmo definir diversos parâmetros necessários a realização do ensaio, como também a comunicação de dados entre o PC e a placa de desenvolvimento EVB, fazer a aquisição de dados de ensaio (T_r e $T_a - T_r$) para plotagem gráfica do termograma, como também o armazenamento destes dados em arquivos.

Na Figura 4.9 apresenta-se um fluxograma do programa monitor, que consiste, basicamente, das seguintes etapas.

A - INICIALIZAÇÃO - Executa o protocolo de comunicação de dados entre o programa Monitor armazenado no microcontrolador e o PC de acordo com o fluxograma da figura 4.10, recebendo deste informações necessárias a realização do ensaio; tais como:

- Temperatura final de aquecimento do forno (T_r).
- Taxa de aquecimento utilizada.
- Configura porta serial para a comunicação de dados.
- Define a taxa de transferência de dados.

- Tipo de controlador a ser utilizado para o controle de temperatura do forno; apresentando como opções os controladores P ou PI, cujas performances de acionamento no sistema, serão analisadas no capítulo 5.

B - CONTROLADOR - Chamada para a subrotina do controlador escolhido.

C - AQUISIÇÃO DE DADOS - Faz a aquisição dos dados relativos a T_r e $T_a - T_r$, através do conversor A/D do microcontrolador .

D - TRANSMISSÃO - Transfere os dados relativos a T_r e $T_a - T_r$, através da serial do microcontrolador para o PC, a uma taxa de 1 amostra a cada 30 segundos.

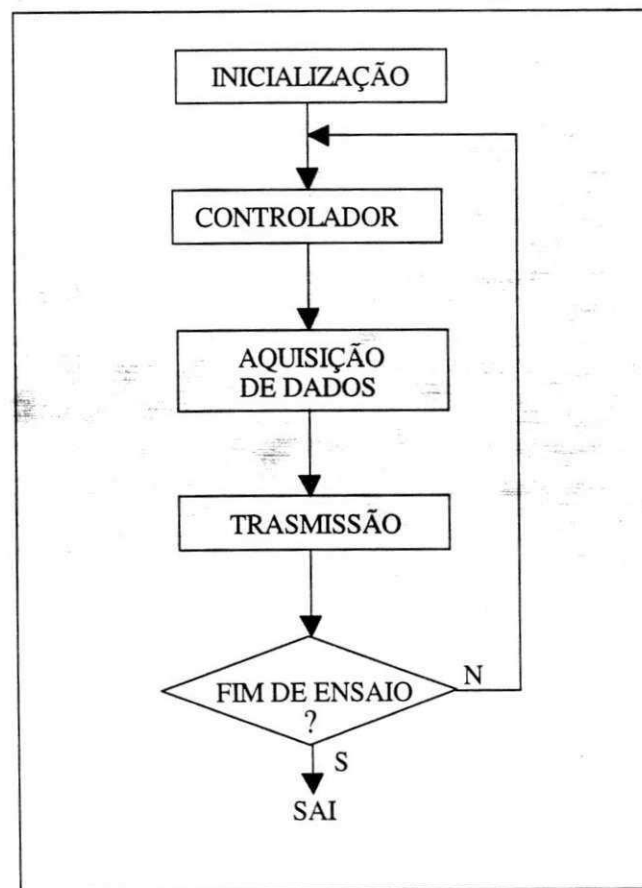


Figura 4.9 - Diagrama de fluxo do programa monitor

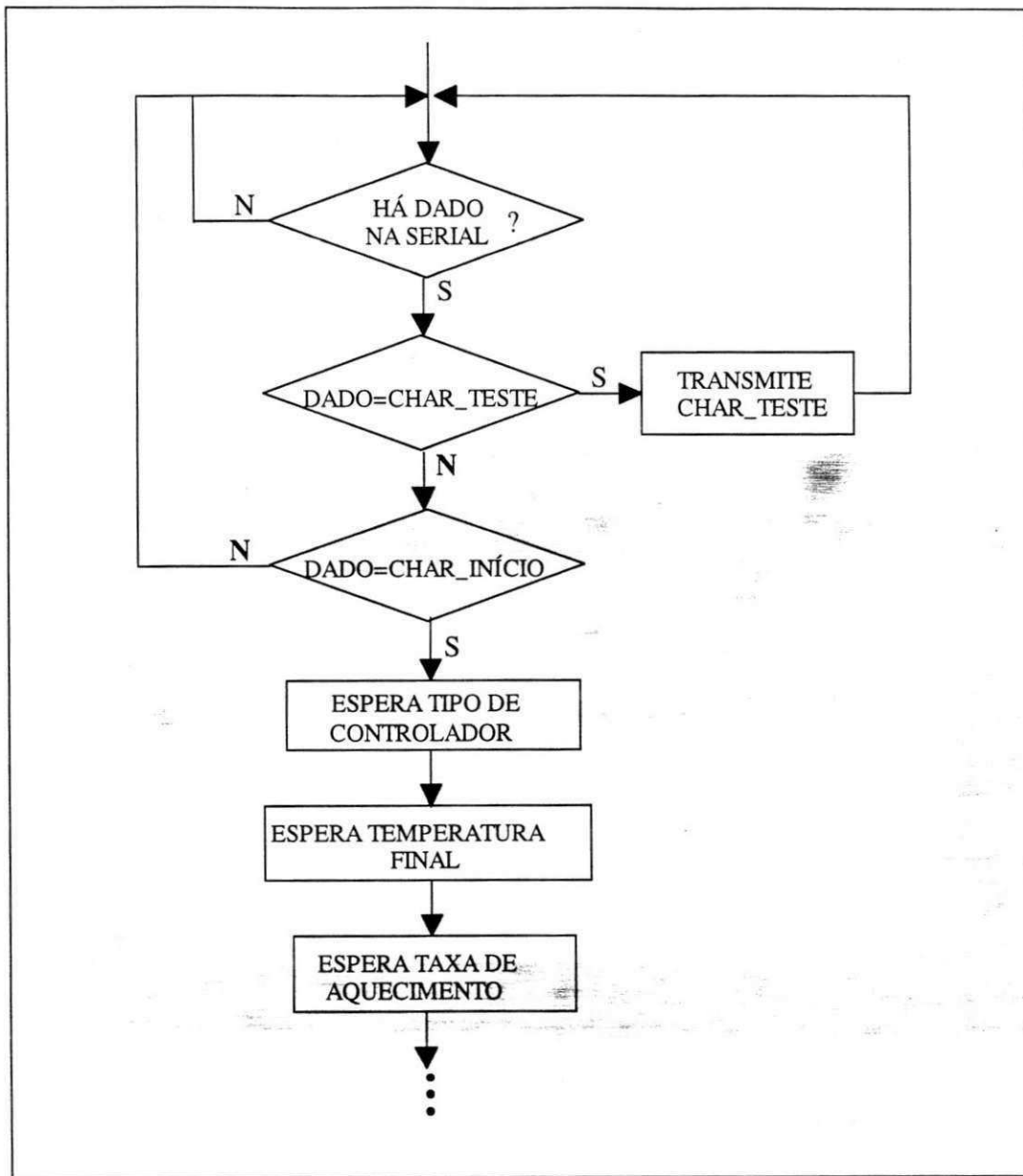


Figura 4.10 - Diagrama de fluxo do bloco de inicialização

O programa **ATD** oferece quatro serviços ao usuário, selecionáveis através da movimentação por uma barra de opções horizontal:

- 1 - ENSAIO; 2 - SERIAL; 3 - DOS ; 4 - SAI**

Cada serviço pode possuir subserviços, cuja seleção é feita pela movimentação por menus verticais. Na Figura 4.11 apresenta-se todos os serviços e subserviços do programa.

⇒ **Menus Verticais**

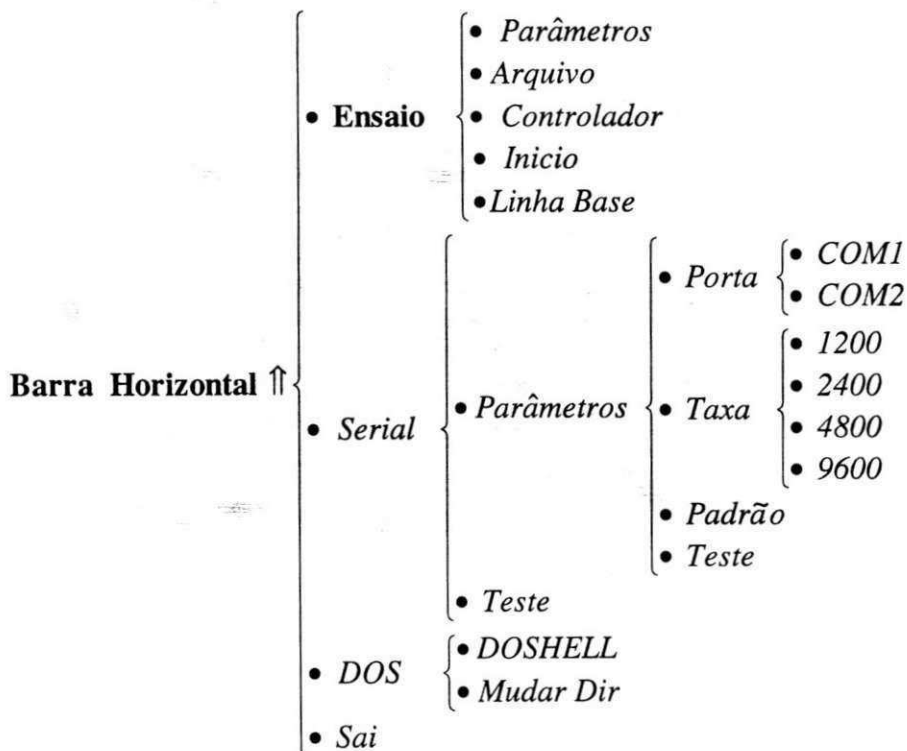


Figura 4.11 - Serviços e subserviços disponíveis no programa ATD

Uma tela típica do programa **ATD** é mostrada na Figura 4.12, na qual pode-se observar todos os elementos de uma tela do programa. Neste exemplo temos:

- a barra horizontal, na linha superior da tela, com o serviço **ENSAIO** ativado
- dia - mês e ano da realização do ensaio
- hora - minutos e segundos da realização do mesmo

- três linhas de mensagens , no canto inferior da tela, informando o subdiretório corrente, o nome do arquivo em que será armazenados os dados térmicos diferenciais de análise e uma mensagem relativa ao serviço ativo, informando as ações executadas pelo mesmo.

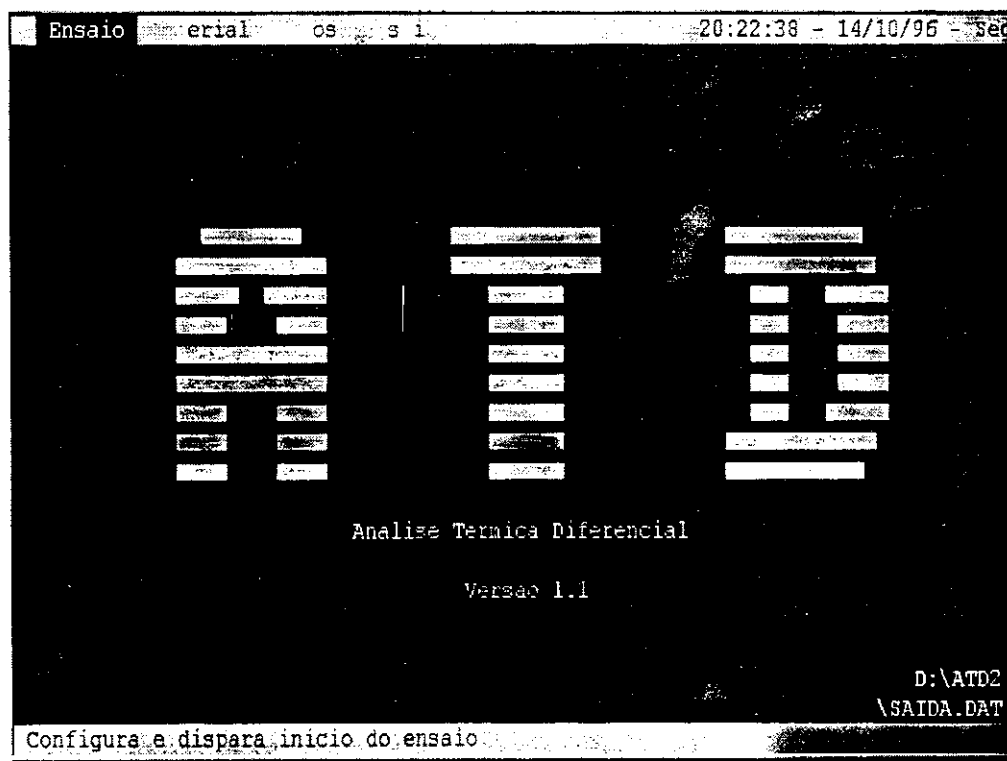


Figura 4.12 - Exemplo de uma tela do programa ATD

A navegação pela barra de opções horizontal é feita por meio de teclas de seta para a direita e para esquerda, movimentando-se assim de um serviço para o outro seqüencialmente. O serviço a ser selecionado permanece em destaque e a tecla **ENTER** o seleciona, abrindo o menu de opções verticais para aquele serviço. Pode-se ainda pressionar uma tecla de atalho para um determinado serviço, correspondente à letra em destaque para o serviço na barra horizontal. Uma vez aberto um menu vertical, pode-se selecionar um subserviço por processo semelhante ao utilizado na barra vertical, utilizando-se as teclas de setas para cima e para baixo e a tecla **ENTER** ou ainda as teclas de atalho para o subserviço requerido.

A seguir, serão apresentados todos os serviços e subserviços do programa ATD , além de alguns exemplos de telas.

4.4.1 - ENSAIO

O serviço **ENSAIO** tem a função de possibilitar a passagem de parâmetros necessários a execução da análise térmica por parte do usuário para o programa monitor armazenado previamente no microcontrolador, como também dar início ao ensaio e levantar a linha de base necessária a calibração do equipamento. Para tanto existem cinco subserviços disponíveis:

1 - PARÂMETROS; 2 - ARQUIVO; 3 - CONTROLADOR; 4 - INICIO; 5 - LINHA BASE

A tela correspondente a este serviço é mostrada na Figura 4.13.

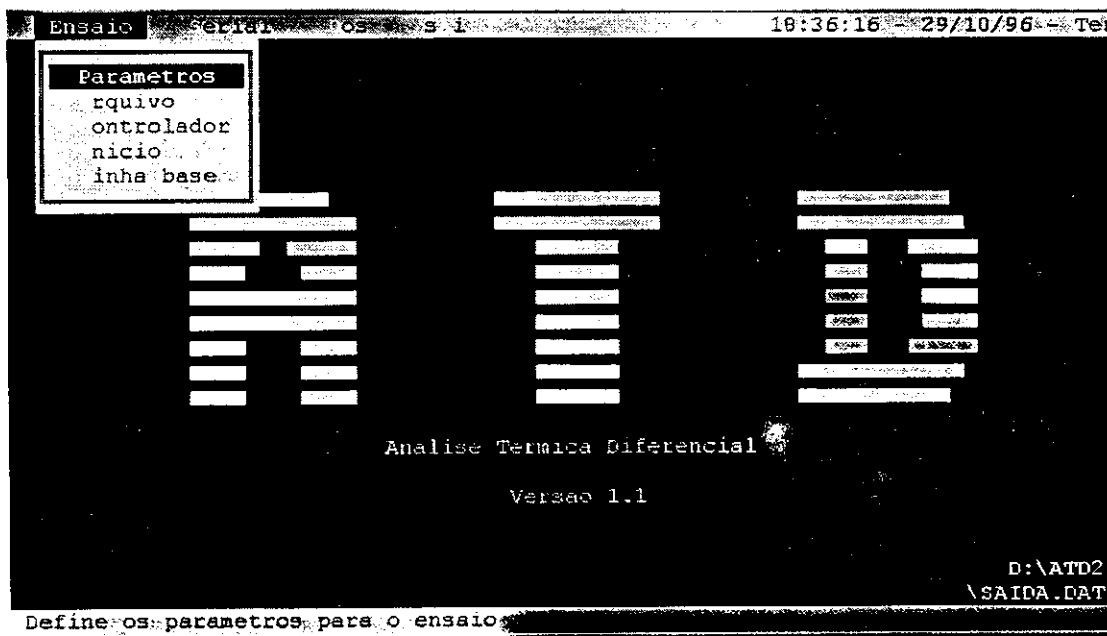


Figura 4.13 - Exemplo de tela para o serviço ENSAIO

O subserviço **PARÂMETROS** tem a função de passar como parâmetros para o programa de controle armazenado no microcontrolador a temperatura final de ensaio, estabelecendo assim a faixa de temperatura a ser realizado o ensaio ($T_{amb} - T_f$), assim como a taxa de aquecimento para o forno a ser utilizados no ensaio. No canto direito inferior da tela encontramos uma linha de mensagem, a qual pede a confirmação ou não dos parâmetros escolhidos para análise, abandonando esta tela apenas após tal pergunta ser respondida, caso a resposta seja negativa o prompt do programa é levado a janela “parâmetros do ensaio” onde o usuário poderá alterar ou definir os novos parâmetros, caso contrário, tal janela será fechada definindo-se assim a confirmação dos parâmetros escolhidos. Na Figura 4.14 é mostrada a tela correspondente a este subserviço.



Figura 4.14 - Exemplo de tela para o subserviço **PARÂMETROS**

O subserviço **ARQUIVO**, tem como função armazenar os dados térmicos diferenciais obtidos em ensaio ($T_r - T_a$) em arquivo de dados. Uma tela representativa deste subserviço é mostrada na Figura 4.15. Nesta podemos observar duas janelas abertas, onde na primeira é solicitado

ao usuário definir o nome do arquivo de saída onde serão armazenados os dados obtidos em análise, devendo tal escolha para o nome de arquivo não ultrapassar o total de 7 caracteres, na segunda logo abaixo é apresentado ao usuário todos os arquivos de dados disponíveis de análises anteriormente executadas naquele subdiretório, podendo-se alterar o subdiretório corrente do disco pressionando-se a tecla de função **F2**, ou cancelar o subserviço pressionando-se a tecla **ESC**. No canto inferior da tela encontramos o nome do subdiretório corrente, o nome do arquivo de saída escolhido e uma linha de mensagem informando a ação executada pelo subserviço.

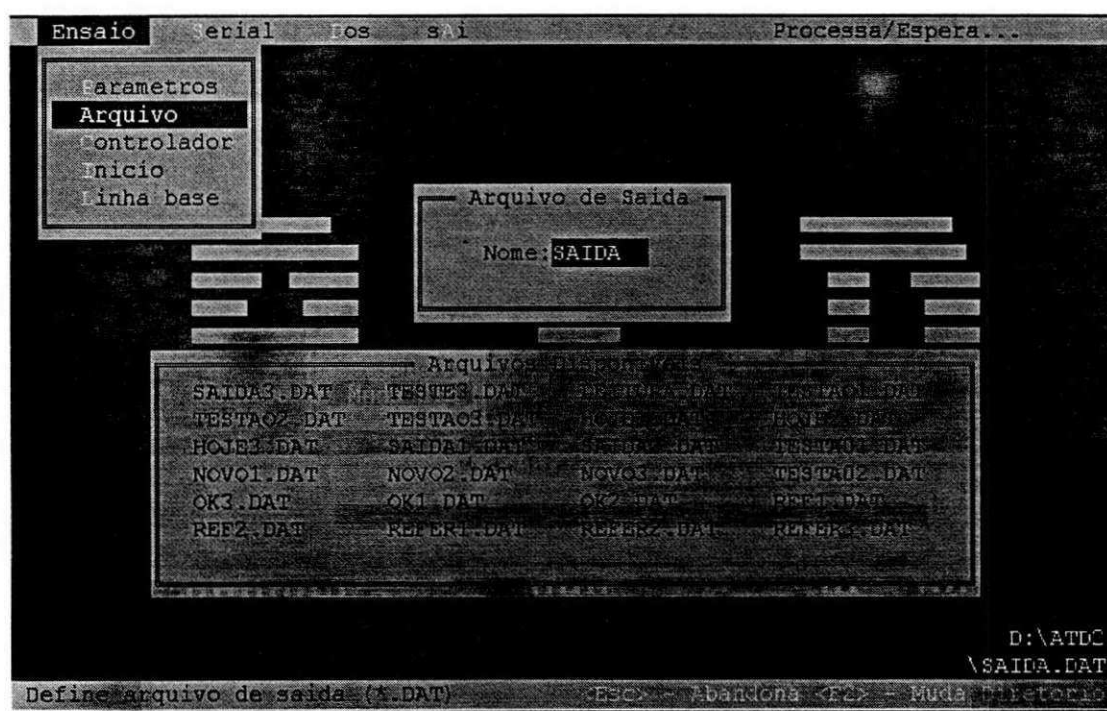


Figura 4.15 - Exemplo de tela para o subserviço **ARQUIVO**

No subserviço **CONTROLADOR** é solicitado ao usuário definir a escolha do tipo de controlador utilizado no ensaio. O exemplo de tela para este subserviço é apresentada na Figura 4.16. Nela observamos tal subserviço ativado, com a escolha do controlador PI para acionamento, para confirmar a escolha o usuário pressionará a tecla **ENTER**, caso deseje abandonar este

subserviço deverá pressionar a tecla **ESC**. No canto inferior da tela encontramos uma linha de mensagem, informando a ação executada pelo subserviço.

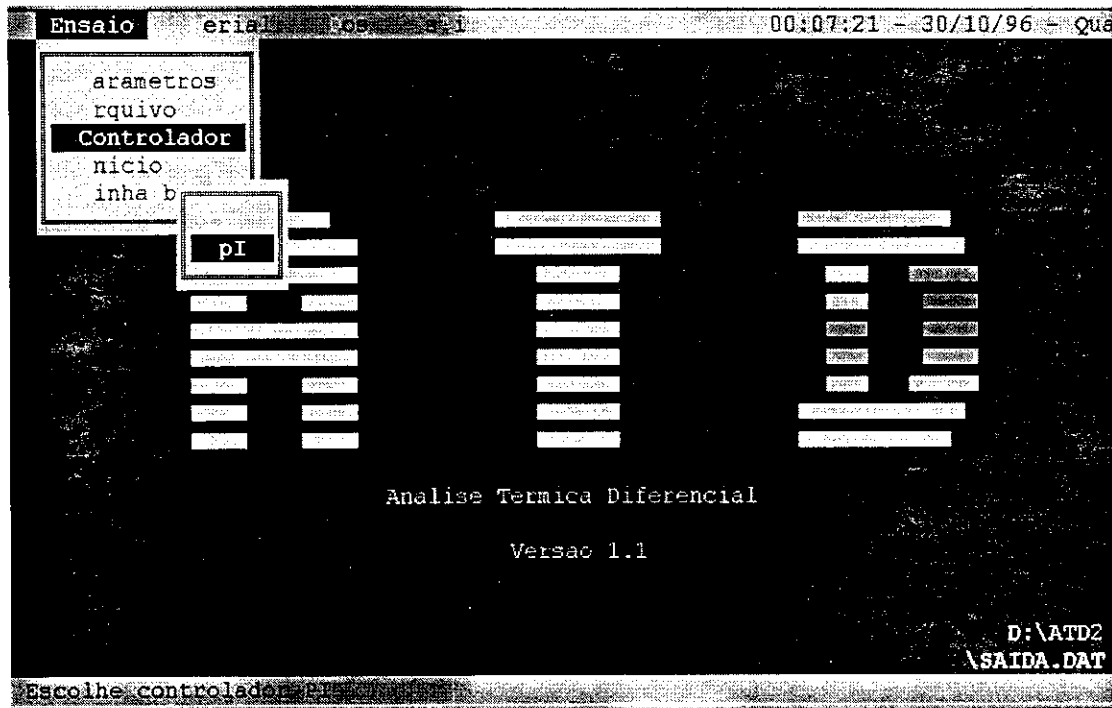


Figura 4.16 - Exemplo de tela para o subserviço **CONTROLADOR**

O subserviço **INICIO** dispara a execução do ensaio, dando início ao programa de controle previamente armazenado no microcontrolador. Ao dispararmos o início do ensaio o programa **ATD** sai da tela apresentada na Figura 4.17, representativa deste subserviço e entra em uma tela gráfica para a plotagem do termograma, na tela do computador, em tempo real de execução de ensaio, caso o usuário deseje cancelar a operação deverá pressionar a tecla **ESC** e automaticamente o ensaio será cancelado e o programa voltará a apresentar a sua tela principal. No canto inferior da tela é apresentada uma linha de mensagem da ação executada pelo subserviço.

Figura 4.17 - Exemplo de tela para o subserviço **INICIO**

O subserviço **LINHA BASE** tem como função levantar a linha de base para a calibração do equipamento. Ao pressionar a tecla **ENTER** este subserviço será ativado, dando origem a uma tela gráfica para plotagem em tempo real da linha de base do equipamento, e ao mesmo tempo armazenar os dados obtidos em arquivo para serem utilizados na execução de ensaio, para cancelar esta operação basta digitar a tecla **ESC**. Na Figura 4.18 é apresentada a tela para este subserviço.

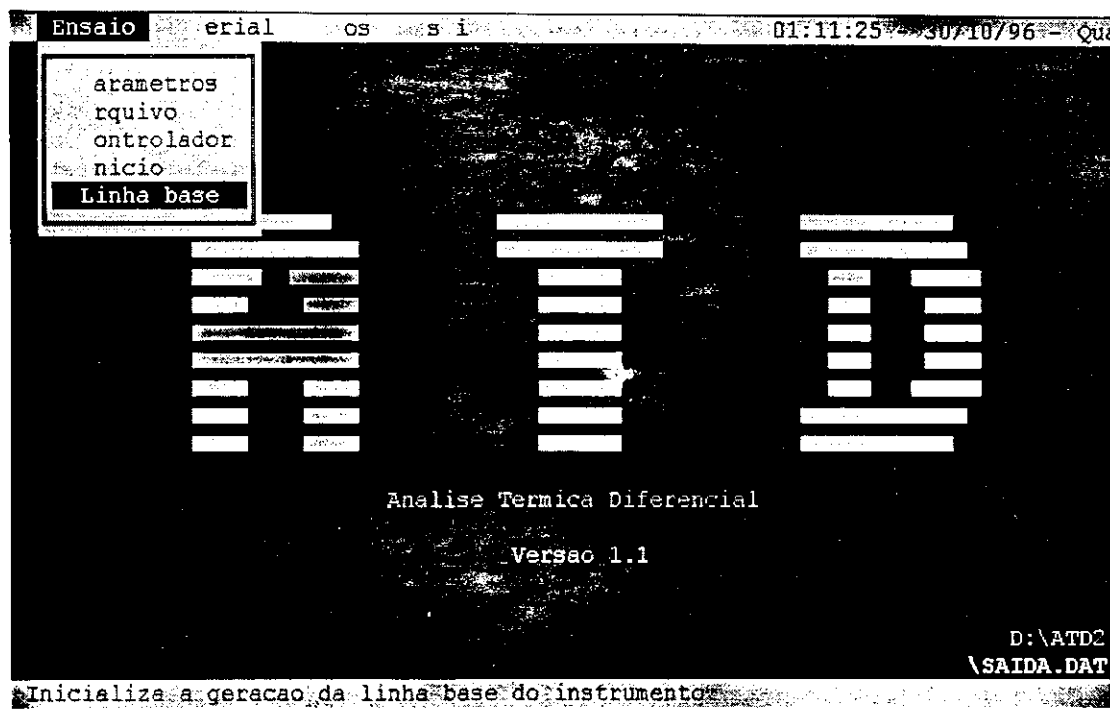


Figura 4.18 - Exemplo de tela para o subserviço LINHA BASE .

4.4.2 - SERIAL

O serviço **SERIAL** oferece as opções de selecionar a porta serial em que está conectada a placa de desenvolvimento, configurar a taxa de transferência de dados e testar a comunicação entre microcomputador e placa. Para isto, oferece os subserviços **PARÂMETROS E TESTE** .

Ao ser selecionado, o subserviço **PARÂMETROS** abre um menu vertical oferecendo quatro opções:

- 1 - **PORTA** - seleciona a porta COM1 ou COM2 para a comunicação de dados;
- 2 - **TAXA** - seleciona a taxa de transferência de dados (1200, 2400, 4800 ou 9600 bps), caso as opções 1 e 2 não sejam definidas pelo usuário, serão utilizados os valores padrão como *default*;

3 - **PADRÃO** - muda parâmetros para os valores padrão, que são respectivamente a porta **COM2** com uma taxa de 9600 bps;

4 - **TESTE** - verifica se a comunicação entre o microcomputador e a placa de desenvolvimento, respeitando-se os parâmetros escolhidos, está normal.

A escolha da porta ou da taxa de transferência é feita de forma semelhante. Ao selecionar-se, por exemplo a opção **PORTA**, um menu vertical oferece as portas disponíveis e o usuário escolhe uma delas através das teclas de movimentação ou de atalho e da tecla **ENTER**. A tela para escolha da porta é mostrada na Figura 4.19

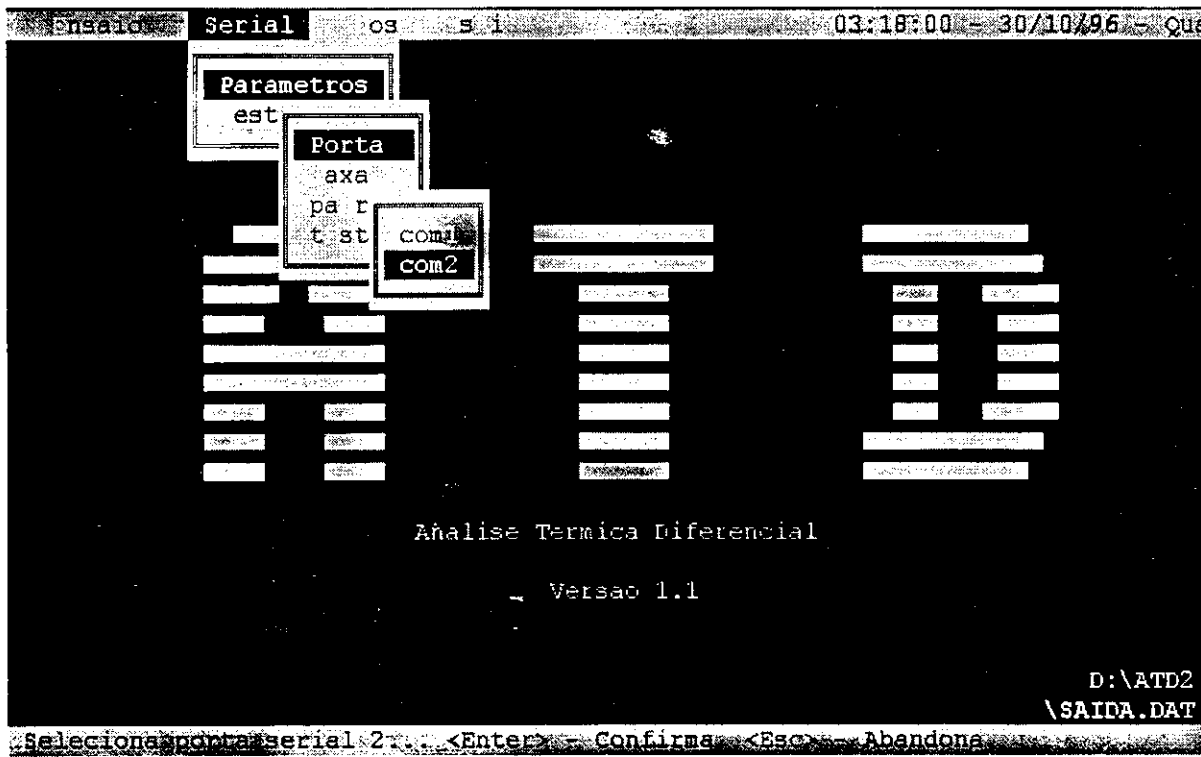


Figura 4.19 - Exemplo de tela para o subserviço **SERIAL**

4.4.3 - DOS

Como o programa **ATD** não possui serviços internos de edição, o serviço **DOS** permite ao usuário suspender temporariamente a execução do programa **ATD** e voltar ao sistema operacional, de onde podem ser executados programas com aquele serviço.

Um outro subserviço do **DOS**, o **MUDA DIR**, troca o subdiretório corrente de forma a permitir a busca de arquivos do usuário em qualquer ponto das unidades de disco rígido ou flexível do microcomputador.

A troca para um determinado subdiretório é feita digitando-se seu nome e uma lista de todos os subdiretórios disponíveis é apresentada na janela central da tela, conforme mostrado na Figura 4.20.

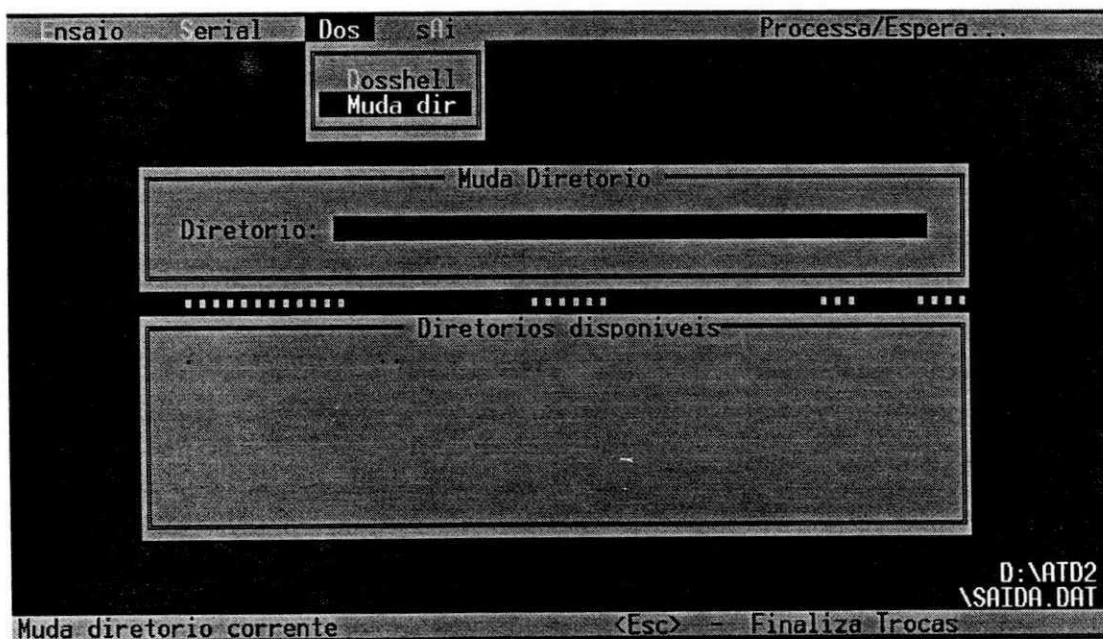


Figura 4.20 - Exemplo de tela para o subserviço **DOS**

4.4.4 - SAI

A opção **SAI** da barra horizontal permite ao usuário abandonar o programa **ATD**. Para isto, a mensagem “Encerrar programa ... Confirma? (S/N)” é apresentada na linha de mensagens e a confirmação do usuário é aguardada até ser pressionada a tecla S para sim e N para não.

4.5 - Conclusão

Apresentou-se neste capítulo os circuitos para a aquisição das temperaturas T_a e T_r , e os circuitos para a compensação automática da temperatura ambiente. Os programas para aquisição e análise de dados foram descritos, bem como os serviços por estes realizados.

No capítulo seguinte serão apresentados, avaliados e discutidos os testes e resultados experimentais obtidos com o sistema proposto. Serão analisadas as performances das estratégias de acionamento para os três controladores implementados. Será levantada a linha de base do instrumento e serão feitos ensaios de **ATD** para argilominerais, e estes termogramas serão comparados com os existentes na literatura especializada.

CAPÍTULO V

TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 - Introdução

Os testes do sistema proposto foram realizados em duas etapas distintas. A primeira etapa consistiu na validação de projeto dos controladores implementados para o controle da temperatura do forno (UA); em que foram obtidos dados experimentais de acionamento do sistema, correspondentes aos três tipos de controladores implementados. Os dados foram obtidos a intervalos regulares de 30 segundos, com multímetro HP3457 A, comandado por microcomputador via interface HP-IB (IEEE 488) [14]. Os dados foram então armazenados em arquivo no formato ASCII para plotagem gráfica posterior através do programa Matlab.

A segunda etapa do trabalho consistiu na realização de ensaios experimentais de **ATD** com o instrumento desenvolvido. Nesta fase os dados térmicos diferenciais, correspondentes a diferença de temperatura entre a amostra e o material de referência, são transferidos pelo microcontrolador para o PC, através de um programa de comunicação de dados residente no microcontrolador a uma taxa de 1 amostra a cada 30 segundos.

A seguir são apresentados e analisados os resultados experimentais de acionamento do sistema para cada ação de controle implementada. Objetivando-se com isso validar o projeto dos controladores implementados.

5.2 - Resultados Experimentais Obtidos Com a Utilização do Controlador Proporcional

De posse dos parâmetros obtidos no projeto do sistema implementado com controlador proporcional (P), realizamos em seguida o acionamento do sistema obtendo os dados experimentais correspondentes, estando estes representados nos gráficos das Figuras 5.1 e 5.2.

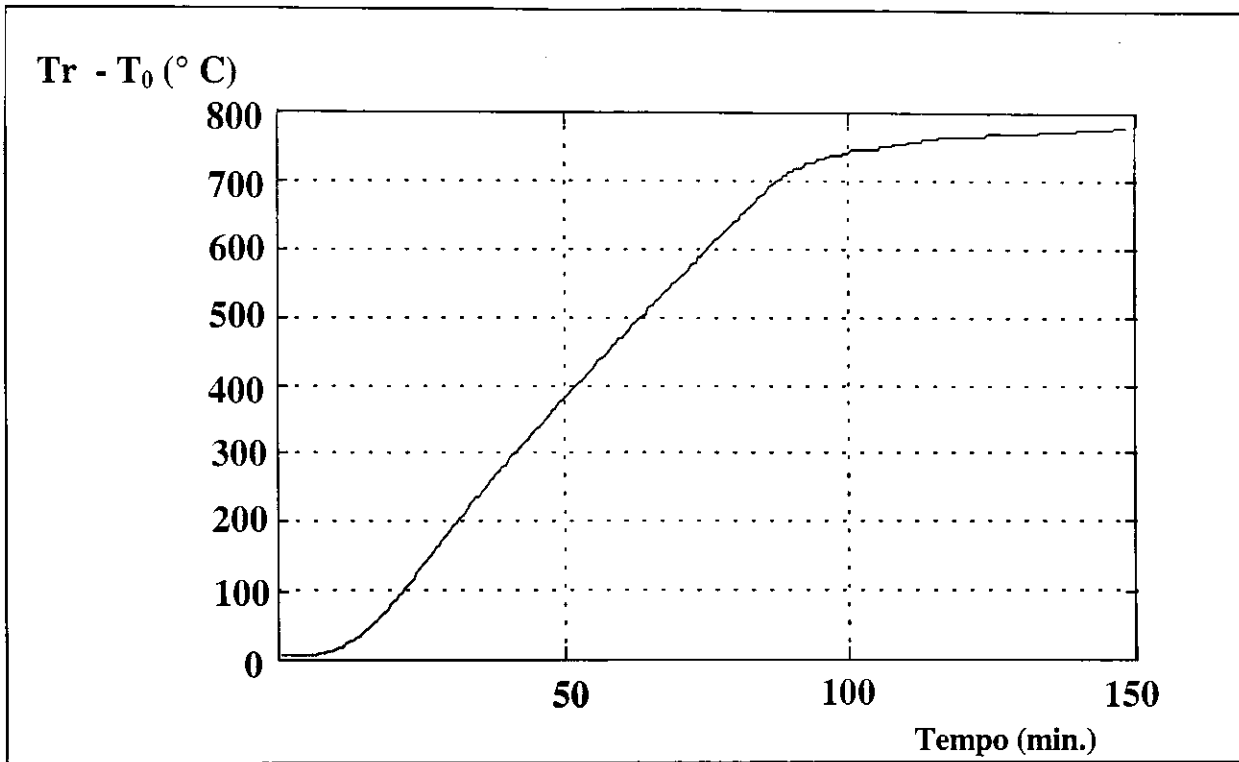


Figura 5.1 - Temperatura do forno versus tempo

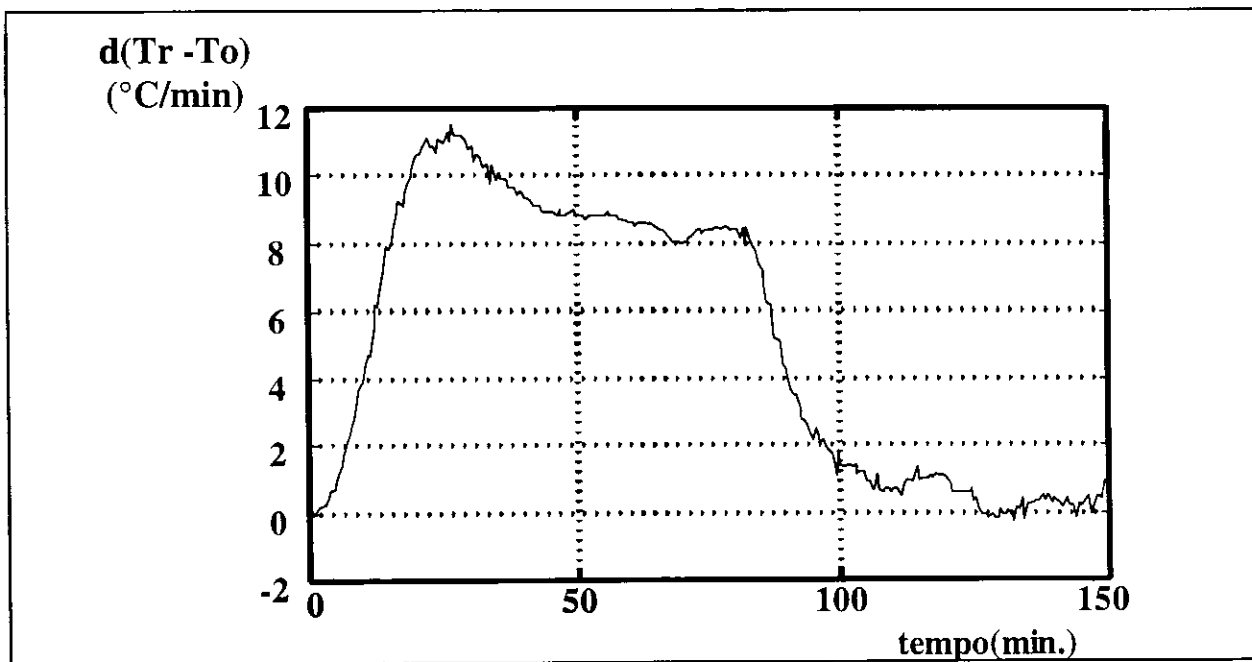


Figura 5.2 - Taxa de aquecimento do forno versus tempo

Ao compararmos os gráficos de resultados experimentais obtidos (Figuras 5.1 e 5.2) com os obtidos em simulação (Figuras 3.6 e 3.7), podemos observar que eles se assemelham bastante. O valor final da temperatura do forno se estabilizou em torno de 750°C o que corresponde a um erro de aproximadamente 0,93%. A taxa de aquecimento permaneceu aproximadamente constante, com erro máximo de 20%, no intervalo compreendido entre aproximadamente 20 e 80 minutos.

As diferenças observadas quando comparamos os valores experimentais de acionamento com os resultados de simulação, devem-se a diversos fatores dentre os quais podemos destacar:

I) Em simulação, utilizamos um modelo matemático para representar a função de transferência do forno, o que naturalmente por mais preciso que seja o modelo, este consiste numa aproximação do seu comportamento real.

II) Em acionamento, houve a presença de distúrbios, tais como ruídos provenientes da rede elétrica e ruídos de contato (referentes às montagens), os quais não foram considerados em simulação.

III) Ao implementar-mos os parâmetros de controle em microcontrolador, recorreu-se a aproximações e, como o número de cálculos executados é elevado, provavelmente ocorreu propagação de erros, etc.

Para melhorarmos a performance geral do sistema de controle e obtermos resultados experimentais mais precisos notadamente no que se refere a uma taxa de aquecimento mais estável, implementamos o controlador proporcional mais integral (PI).

5.3 - Resultados Experimentais Obtidos com a Utilização do Controlador PI

De posse dos parâmetros, calculados no projeto do controlador PI, realizamos ensaios experimentais (acionamento), e em seguida, comparamos estes aos resultados obtidos em simulação. Os gráficos foram, então, sobrepostos para melhor observação, como podem ser visualizados nas Figuras 5.3 e 5.4.

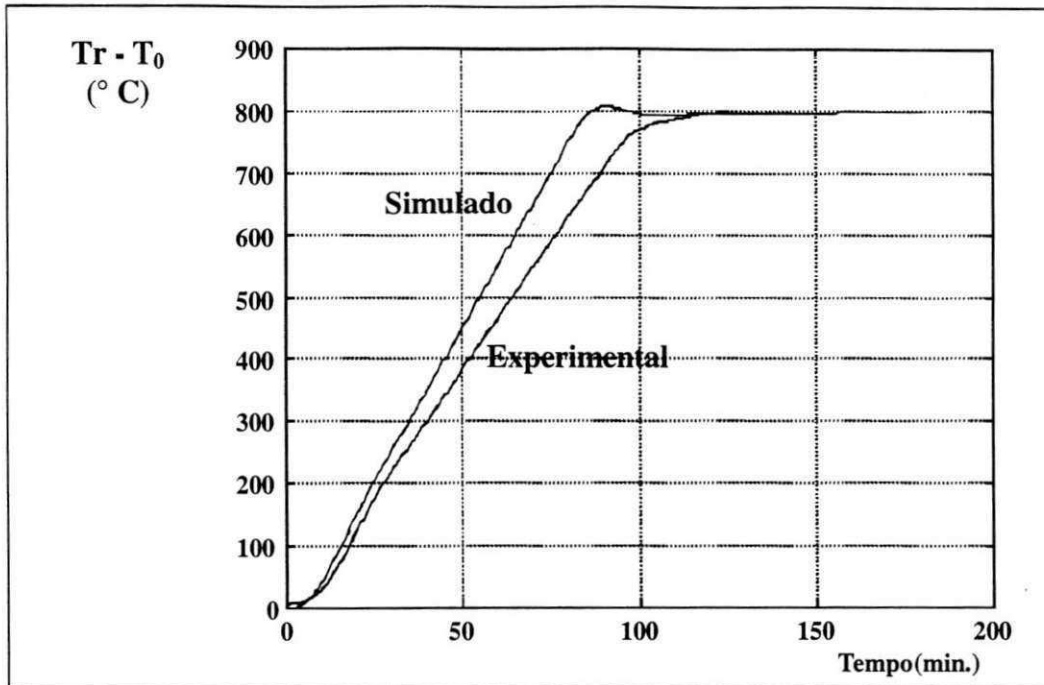


Figura 5.3 - Temperatura do forno versus tempo

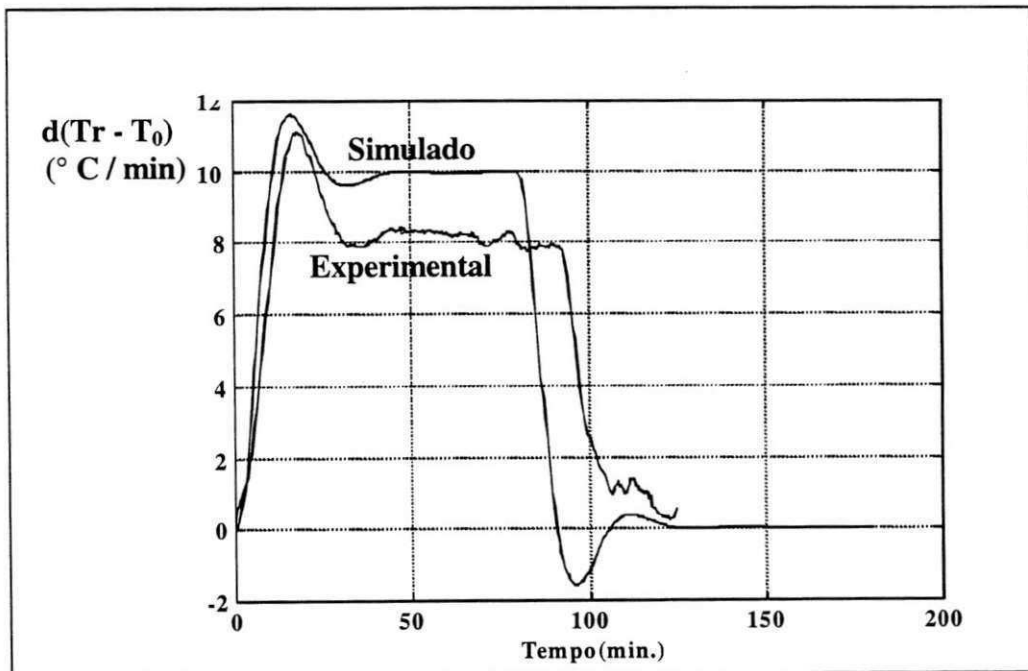


Figura 5.4 - Taxa de aquecimento do forno versus tempo

Observando os gráficos das Figuras 5.3 e 5.4, percebemos que com a implementação do controlador PI, o sistema resultante tornou-se bem mais rápido que o obtido anteriormente com controlador P.

No entanto, a principal diferença entre as performances dos dois controladores, deve-se ao fato de que através do controlador PI, obtemos uma taxa de aquecimento em regime permanente bem mais estável (constante) que a obtida com o controlador P.

Analisando o gráfico da Figura 5.4, verificou-se que em regime permanente ocorreu uma diferença entre os resultados experimental e o simulado com relação a taxa de aquecimento de cerca de 17%. Tal fato no entanto não compromete a performance do controlador, pois em Análise Térmica Diferencial, um dos critérios adotados como condicionante para uma boa performance do instrumento e conseqüentemente a garantia de uma boa reprodutibilidade dos ensaios é que a taxa de aquecimento se mantenha mais constante quanto possível, no intervalo em que se realiza o ensaio. Tal requisito foi alcançado satisfatoriamente ao implementarmos o controlador PI, pois conforme podemos visualizar na Figura 5.4, a taxa de aquecimento se mantém em aproximadamente $8,3^{\circ}\text{C}/\text{min.}$, durante todo o ensaio.

5.4 - Resultados Experimentais Obtidos com a Utilização do Controlador PID

De posse dos parâmetros obtidos no projeto do controlador PID, simulamos em computador o comportamento do controlador e em seguida realizamos ensaios experimentais confrontando os resultados obtidos com os observados em simulação. Os gráficos foram sobrepostos para melhor observação para posterior análise, conforme podem ser visualizados a seguir, nas Figuras 5.5 e 5.6.

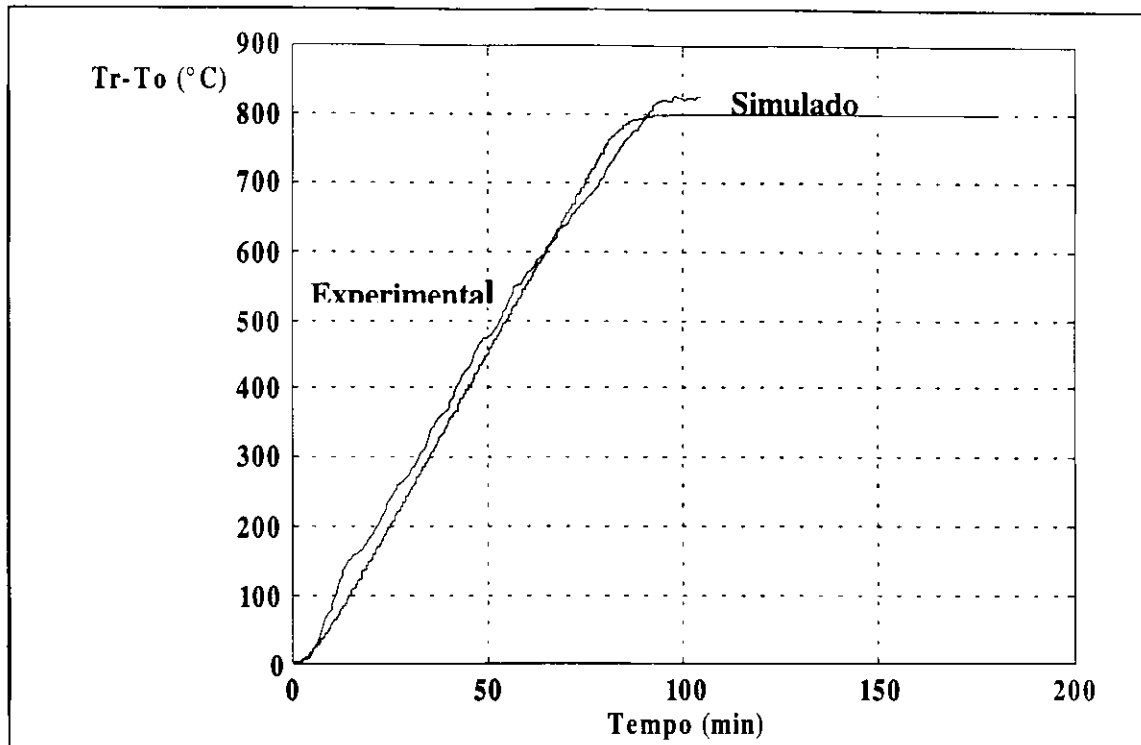


Figura 5.5 - Temperatura de aquecimento do forno versus tempo

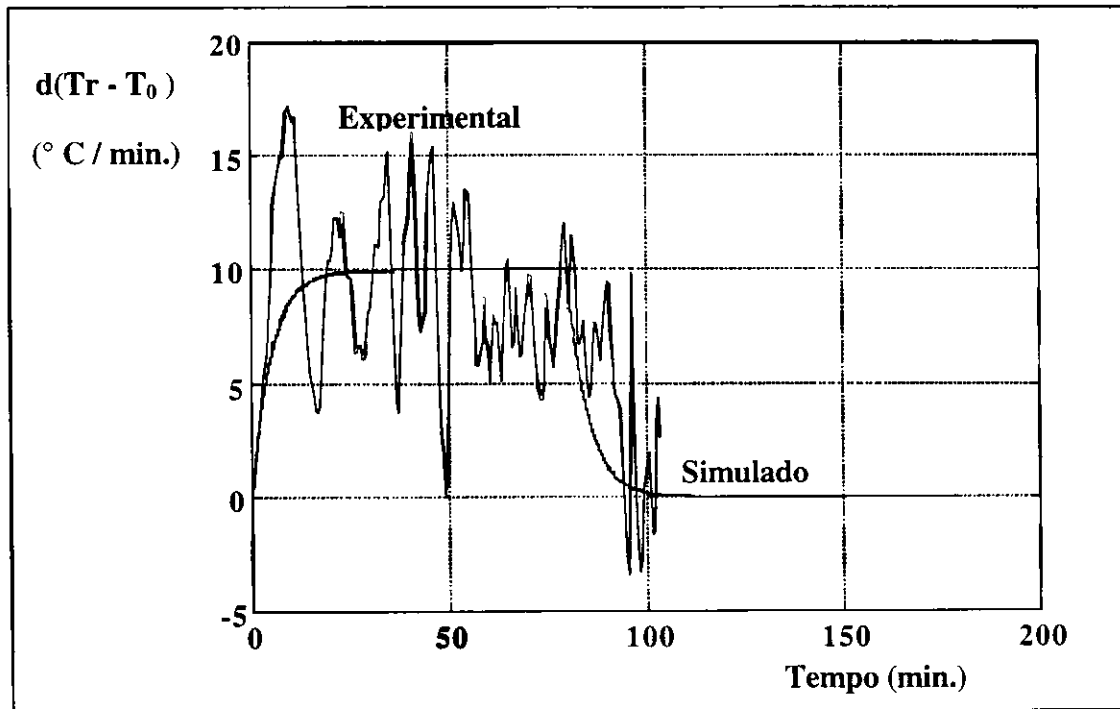


Figura 5.6 - Taxa de aquecimento do forno versus tempo

Como pode ser observado na Figura 5.6, os resultados obtidos nos ensaios diferem bastante dos obtidos em simulação. Tal fato ocorreu devido ao erro de quantização provocado pelo conversor A/D do microcontrolador. A quantização é o efeito de aproximação do processo de conversão A/D e o erro de quantização é a diferença entre a entrada original analógica e a saída no conversor digitalizada. Quanto maior a resolução do conversor A/D menor é essa diferença que pode ser interpretada pelo controlador como sendo um ruído (ruído de quantização). Sendo o controlador PID mais sensível a presença de ruídos que o P e o PI, devido a presença da ação derivativa que amplifica esta diferença (erro), constatamos então que o controlador PID é inadequado para a aplicação requerida, uma vez que para o processo apresentado, sua performance foi comprometida pela resolução do conversor A/D utilizado.

Para constatar tal fato, simulamos a planta indicada na Figura 3.19, utilizando nesta os mesmos parâmetros calculados anteriormente, porém agora com a presença de um quantizador na malha de realimentação, simulando dessa forma, a resolução de 8 *bits* do conversor A/D utilizado. A seguir realizamos outra simulação, nesta aumentamos a resolução do conversor A/D para 10 *bits*. Nas Figuras 5.7 e 5.8, são plotados em um mesmo gráfico, os resultados experimentais de ensaio e os resultados obtidos nas simulações acima descritas.

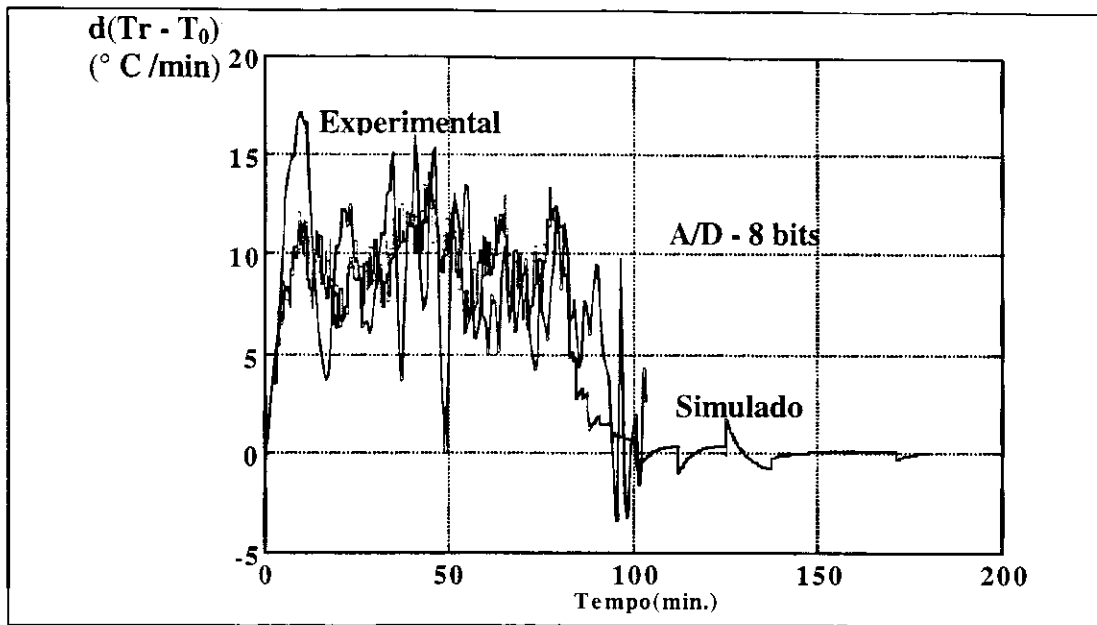


Figura 5.7 - Taxa de aquecimento versus tempo

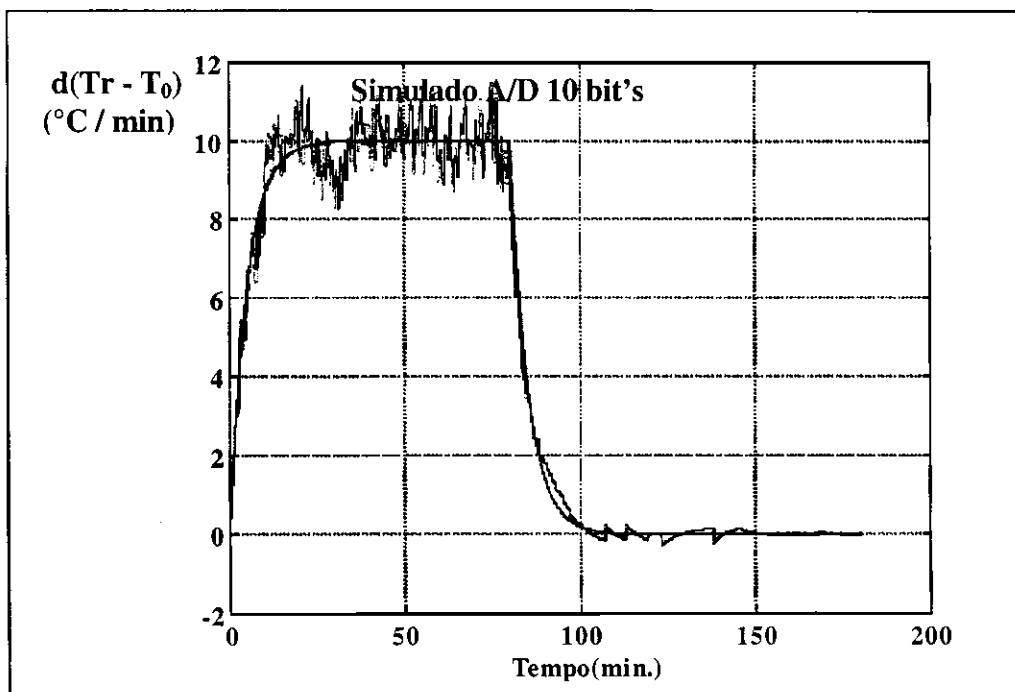


Figura 5.8 - Taxa de aquecimento versus tempo

Podemos verificar observando o gráfico da Figura 5.7, que os resultados experimentais se assemelham bastante aos obtidos em simulação. Sendo assim, concluímos que um conversor A/D de 8 bits, não possui resolução adequada para implementarmos a estrutura de controle da temperatura do forno, através de um controlador PID. No entanto, sua performance melhora bastante ao aumentarmos a resolução do conversor A/D utilizado, conforme podemos observar na Figura 5.8.

Concluímos então a partir dos resultados experimentais apresentados e analisados anteriormente, que dentre as três estratégias de controle implementadas para o controle de aquecimento da temperatura do forno, que o controlador PI apresentou a melhor performance para o instrumento.

5.5 - Ensaio Experimentais de ATD

A segunda fase deste trabalho consistiu na realização de ensaios experimentais de **ATD** com o instrumento desenvolvido. Nesta etapa os dados térmicos diferenciais, correspondentes a diferença de temperatura entre a amostra e o material de referência ($T_a - T_r$), são adquiridos pelo microcontrolador no sistema a cada 2 segundos e transferidos para o PC, através de um programa de comunicação de dados residente no microcontrolador a uma taxa de 1 amostra a cada 30 segundos.

A seguir é apresentado os resultados experimentais de ensaio (**ATD**) obtidos através da utilização do instrumento, utilizando em seu sistema de controle para a temperatura do forno o controlador PI. Nestes ensaios foram utilizados como amostra, materiais cujos termogramas são previamente conhecidos na literatura. Assim podemos constatar a funcionalidade do instrumento projetado, através da comparação dos termogramas obtidos através deste com os termogramas referenciais daqueles materiais.

A seguir é apresentado o levantamento de linha base do instrumento, assim como os termogramas obtidos através dele.

A horizontabilidade da linha de base do termograma é função do bom estado e montagem correta dos termopares diferenciais, do suporte da amostra e do sistema de aquecimento. O conjunto desses fatores pode ser englobado pela expressão: simetria do sistema termodiferencial e deve ser apreciado em conjunto [15]. Quando o conjunto constituído pelo suporte da amostra e termopares esta em bom estado e o instrumento é posto a funcionar utilizando o material de referência nos dois compartimentos do porta amostra, o termograma resultante aparece como uma linha reta e horizontal que seria a linha de base, como é usualmente chamada.

A seguir é apresentada na Figura 5.9, o resultado experimental de acionamento do sistema para o levantamento da linha-base do instrumento.

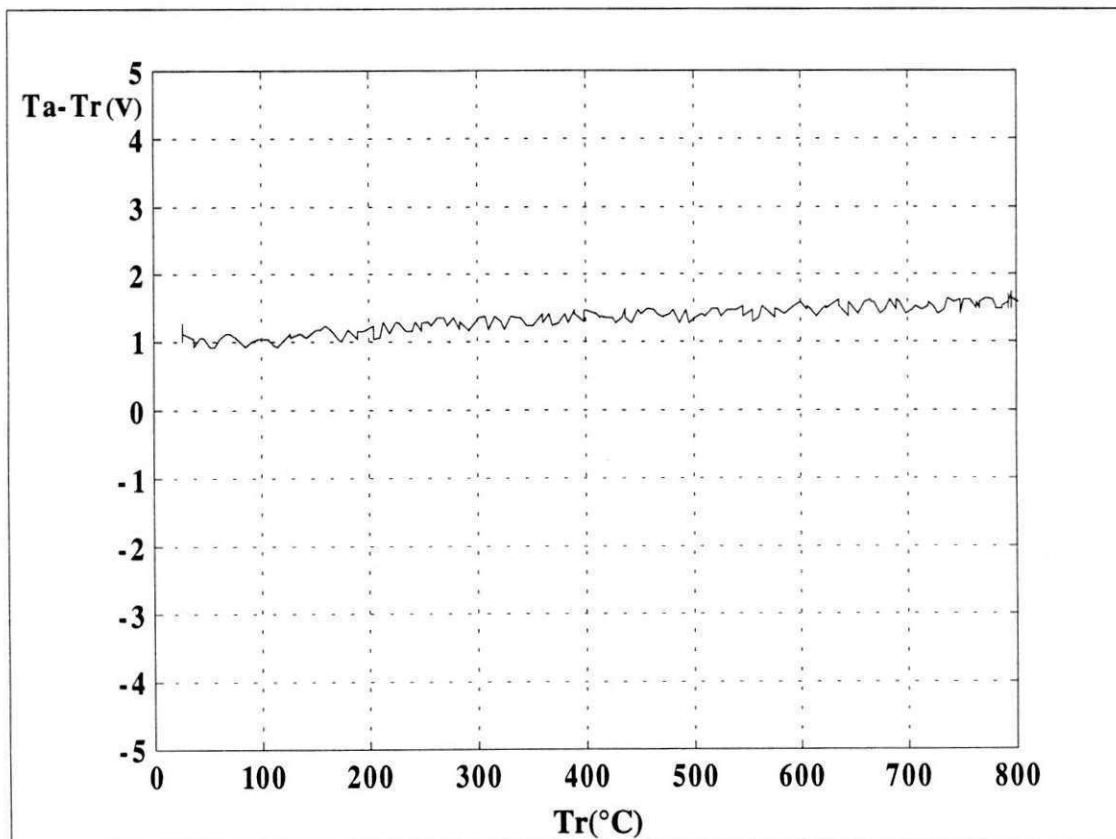


Figura 5.9 -Linha base ou referência

Observando a Figura 5.9, constatamos o bom funcionamento do sistema termodiferencial implementado, uma vez que o termograma obtido consiste em uma linha horizontal levemente ascendente.

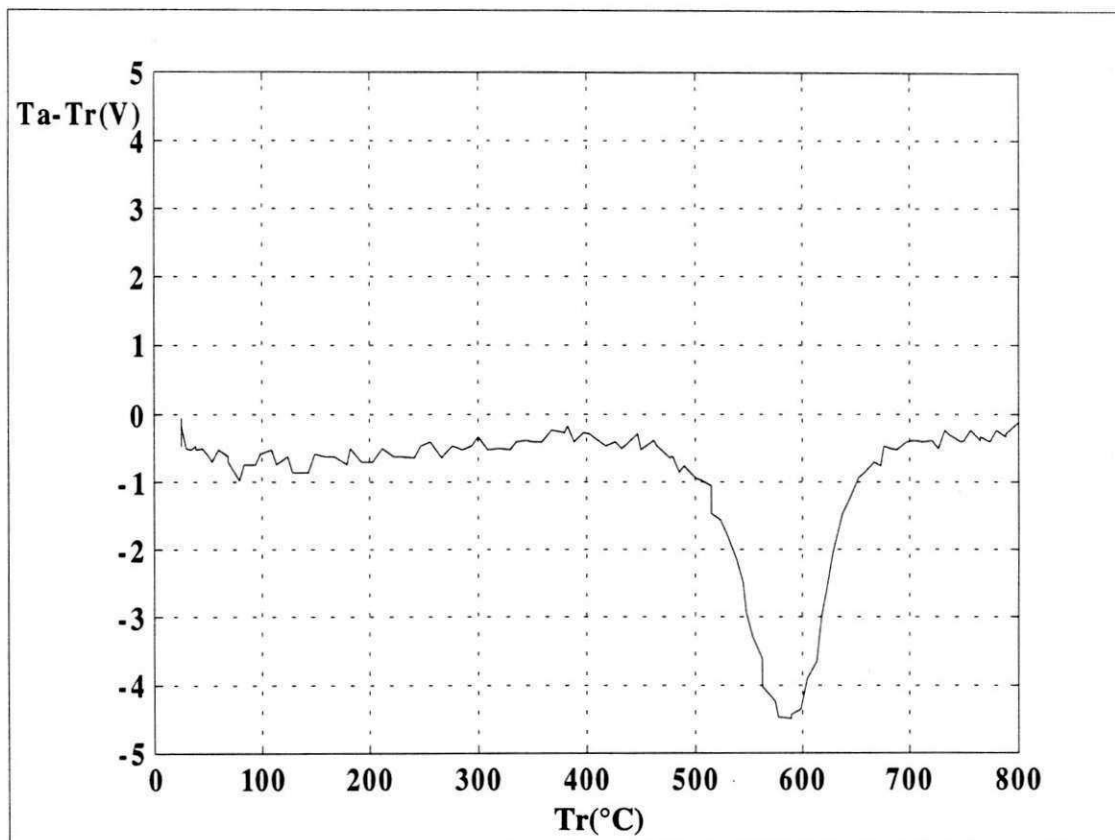


Figura 5.10 - ATD1 - material : caulin natural

O termograma da argila analisada, apresentado na Figura 5.10, tem a seguinte característica:

1 - Grande pico endotérmico com máximo a 590°C devido a perda de hidroxila da camada octaédrica. Este termograma é compatível com o apresentado pelo argilomineral caulinita, de acordo com [4], Figura 13.3, página 283.

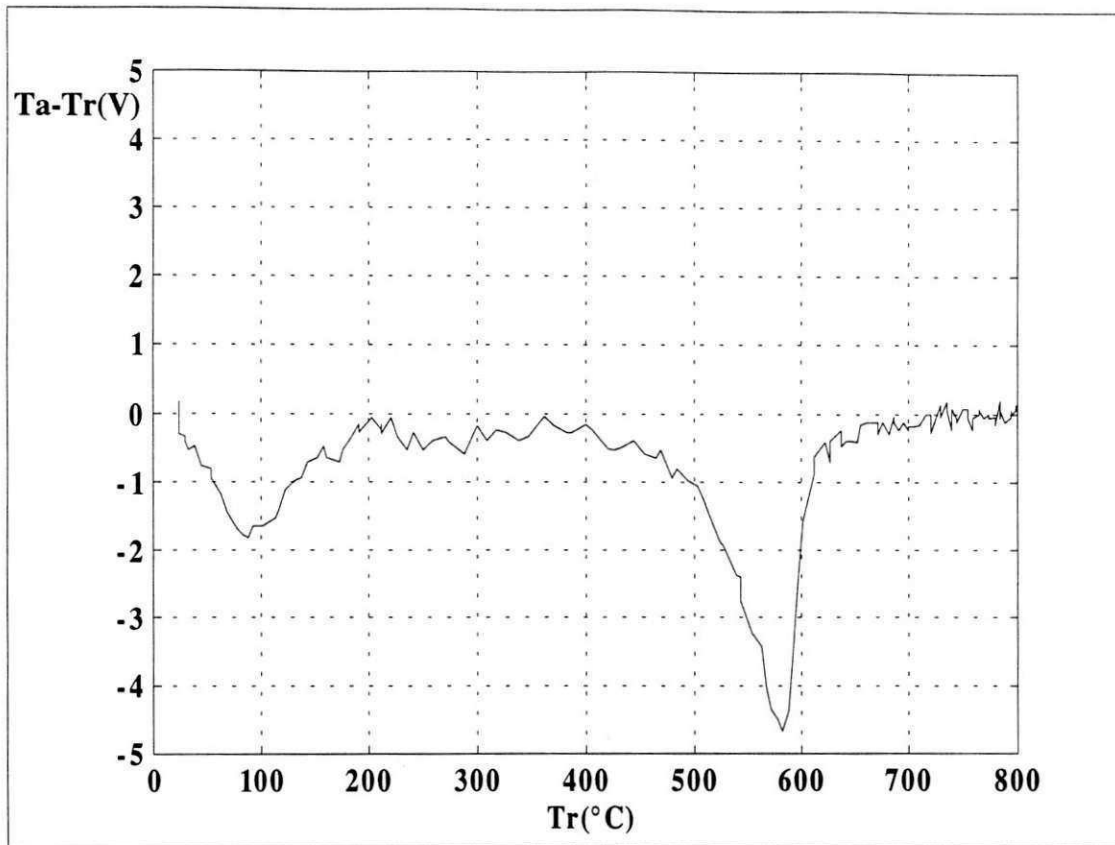


Figura 5.11 - ATD 2.- material : argila Mamuaba

O termograma da argila representado na Figura 5.11, apresenta as seguintes características:

1 - Pequeno pico endotermico a 100°C devido a perda de água livre e adsorvida.

2 - Grande pico endotermico com máximo a 580°C devido a perda de hidroxilas. Este termograma é compatível com o apresentado pelo argilomineral caulinita, de acordo com [4], Figura 13.3, página 283.

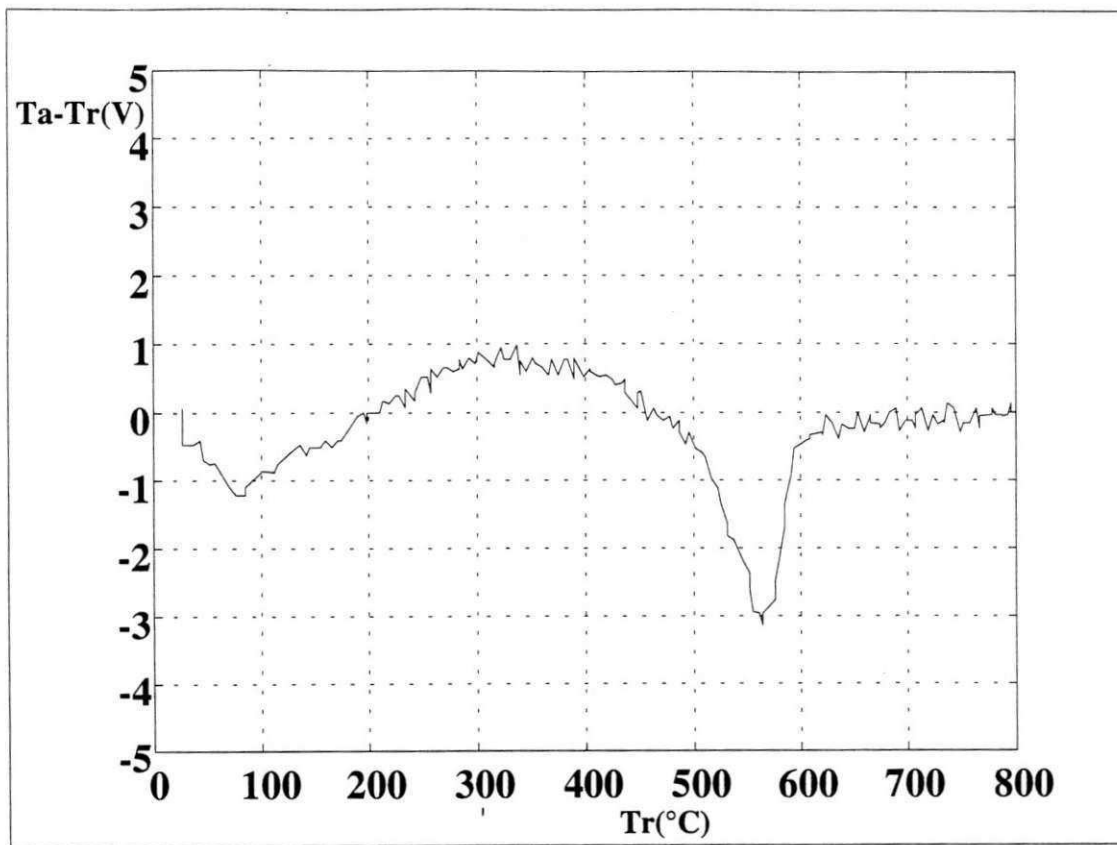


Figura 5.12 -ATD 3 - material: argila Mataraca

Este termograma apresenta as seguintes características:

- 1 - Pequeno pico endotermico a 100°C devido a perda de água livre e adsorvida.
- 2 - Grande banda exotermica devido a presença de materia orgânica na amostra.
- 3 - Grande pico endotermico devido a perda de hidroxilas da camada octaedrica. Este termograma é compatível com o apresentado pelo argilomineral caulinita, de acordo com [4], Figura 13.3, página 283.

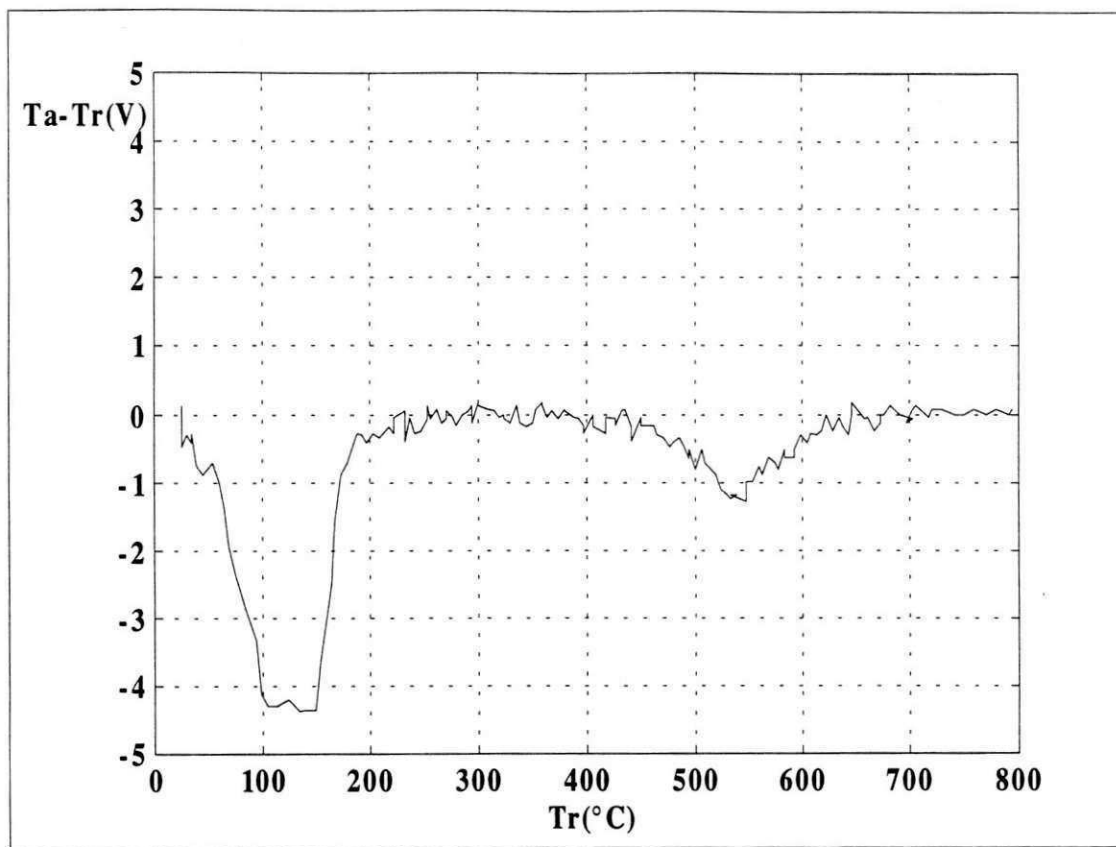


Figura 5.13 -ATD 4 - material: esmectita.

O termograma da argila analisada representado na Figura 5.13, apresenta as seguintes características :

- 1 - Grande pico endotermico com máximo a 150°C devido a perda de água livre e adsorvida.
- 2 - Pico endotermico com máximo a 540°C, devido a perda de hidroxilas estruturais. Este termograma é compatível com o apresentado por argilomineral do grupo da esmectita, de acordo com [4], Figura 13.3, página 287.

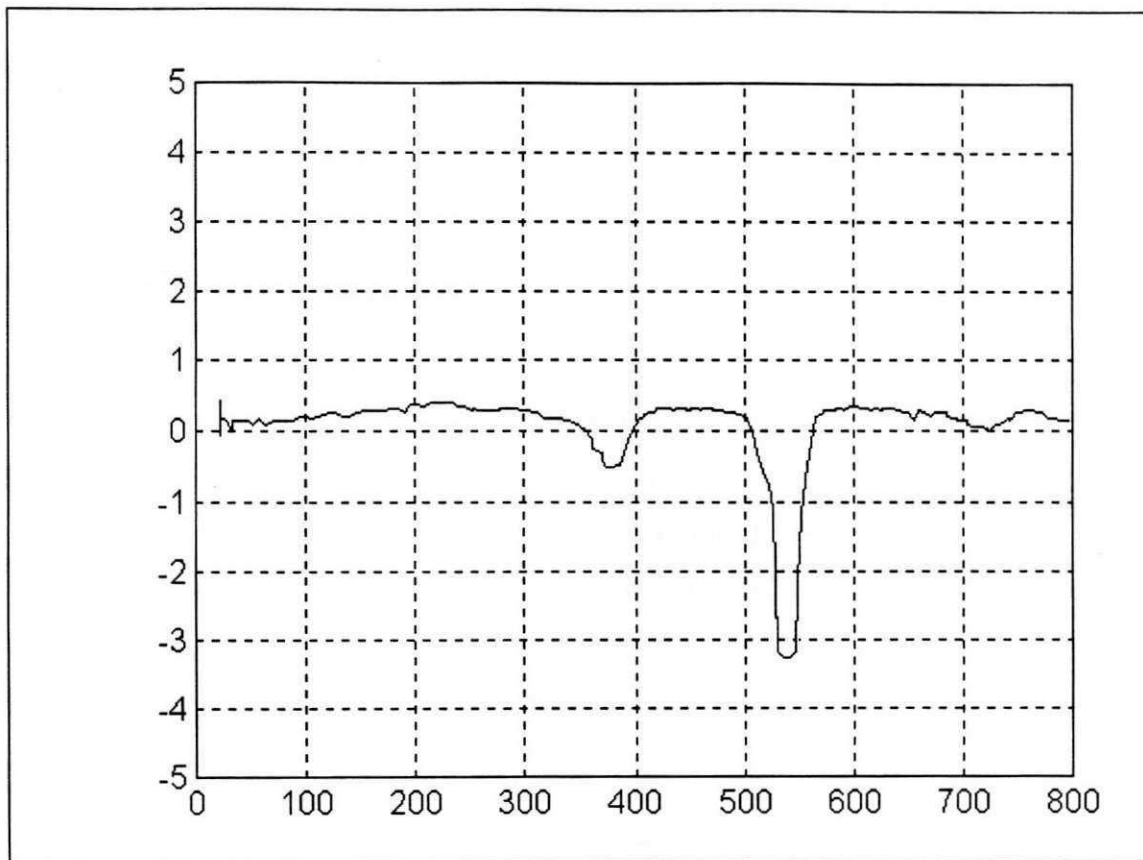


Figura 5.14 - ATD 5 - material : argila plástica para cerâmica vermelha

O termograma da argila analisada representado na Figura 5.14, apresenta as seguintes características :

- 1 - Banda exotérmica compreendida entre 150°C e 300°C, resultante da queima de matéria orgânica.
- 2 - Pico endotérmico em aproximadamente 380°C, devido a perda de hidroxilas do hidróxido de alumínio.
- 3 - Grande pico endotérmico em aproximadamente 540°C, devido a perda de hidroxilas da camada octaédrica.

Este termograma é compatível com o apresentado pelo argilomineral caulinita, de acordo com [4], Figura 13.11, página 296.

5.6 - Conclusão

Apresentou-se neste capítulo os resultados experimentais obtidos através da utilização do multímetro HP3457A, comandado por microcomputador via interface GPIB para o acionamento do sistema com os três controladores projetados e implementados neste trabalho, para em seguida compara-los com os obtidos através de simulação, possibilitando-se assim analisar a validação ou não do projeto para os controladores implementados. Concluindo-se, então, após esta etapa que o controlador PI é o que entre as estratégias de controle implementadas o que apresentou os melhores resultados.

Em seguida foram realizados ensaios de **ATD** com o instrumento implementado, e através destes, observou-se que os objetivos básicos do instrumento apresentado, ou seja, a realização de ensaios de análise termica diferencial para argilominerais, foram alcançados de forma satisfatória, uma vez que os ensaios de ATD realizados através do instrumento para os argilominerais utilizados em teste, mostraram resultados compatíveis com seus termogramas referenciais apresentados em [4].

CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho o projeto, o desenvolvimento e a implementação de um instrumento para análise térmica diferencial de argilominerais baseado na utilização do microcontrolador **MC68HC11** da Motorola. O protótipo do instrumento proposto, difere dos demais instrumentos deste tipo apresentados na literatura, principalmente, em relação a seu sistema de proteção da unidade de aquecimento, correção automática de linha - base e *interface* amigável para o usuário.

Neste trabalho foi apresentado um modelo matemático para a unidade de aquecimento, os circuitos utilizados para o condicionamento de sinais relativos a temperatura do material de referência (T_r) e a diferença de temperatura entre a amostra e o material de referência ($T_a - T_r$), como também os circuitos utilizados para a compensação automática da temperatura ambiente e uma forma de acionamento do forno de modo simples e facilmente comandada por microcontrolador.

Foi também desenvolvido o projeto e implementação de três estratégias de controle para a temperatura da unidade de aquecimento, correspondendo respectivamente aos controladores P, PI e PID, resultados experimentais de acionamento foram obtidos e conclusões a respeito da performance de funcionamento do sistema para cada controlador implementado, foram apresentadas.

No projeto de um instrumento para análise térmica diferencial, utilizando a estrutura proposta neste trabalho, o controlador proporcional embora apresente limitações, ainda assim satisfaz os requisitos para o instrumento no entanto, o controlador PI é sem dúvida entre as estratégias de controle implementadas a que apresentou os melhores resultados.

O controlador PID não apresentou bons resultados, embora teoricamente entre as demais formas clássicas de controle, fosse o mais apropriado. No entanto, sua eficiência foi prejudicada conforme demonstrado, pela baixa resolução (8 *bits*) do conversor A/D do Microcontrolador **MC68HC11**.

Apresentou-se também o projeto de uma *interface* amigável para o instrumento desenvolvido, sendo apresentados todos os serviços e subserviços fornecidos pelo programa, assim como demonstrado seu funcionamento.

Finalmente levantou-se a linha de base para o instrumento e foram realizados ensaios de **ATD** com o instrumento desenvolvido para argilominerais cujos termogramas eram previamente conhecidos na literatura, comparando-se assim os termogramas obtidos com os termogramas referenciais destes argilominerais, constatando-se então que os resultados obtidos foram satisfatórios, na medida em que os termogramas obtidos proporcionaram a identificação correta dos argilominerais presentes na amostra.

Este trabalho tenta suprir uma lacuna no que diz respeito ao projeto de instrumento para análise térmica diferencial no que se refere a simplicidade de implementação, manutenção e totalmente implementado com dispositivos facilmente encontrados no mercado nacional, possibilitando-se assim sua fácil reprodução.

A seguir são apresentadas algumas sugestões para a continuação do trabalho.

Em instrumentos onde seja necessário uma tolerância menor para a variação da taxa de aquecimento da temperatura do forno, o controlador PID é sem dúvida o mais apropriado, no entanto conforme discutido anteriormente, para a sua funcionalidade na implementação utilizando-se o microcontrolador **MC68HC11**, necessitamos aumentar a resolução do conversor A/D do microcontrolador, para tanto algumas técnicas podem ser utilizadas tais como: conversão A/D de rampa múltipla e conversão A/D por integração direta das amostras, ambas aumentam a resolução do conversor A/D interno do microcontrolador MC68HC11 de 8 para 16 *bits*, melhorando-se assim consideravelmente a performance do instrumento.

Apresentamos como proposta para a continuação do trabalho desenvolvido, retirar O microcomputador (PC), da parte integrante do equipamento, tornando assim o instrumento independente do uso de um microcomputador. Para tanto propõe-se o sistema apresentado na Figura C1, a seguir.

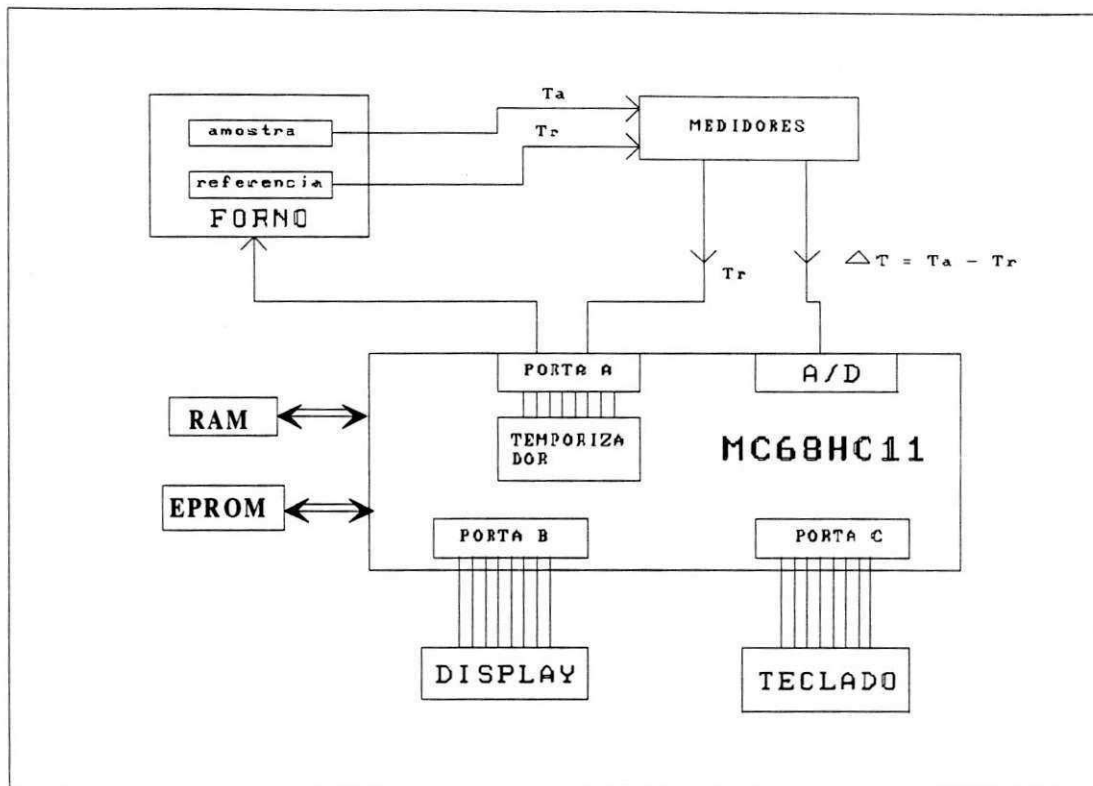


Figura C1 - Configuração básica de um instrumento para a análise térmica diferencial

O sistema proposto consiste basicamente em :

- Uma unidade de Controle (microcontrolador)
- *Interface* para teclado e display para a comunicação de dados entre o usuário e a placa do equipamento
- Unidade de aquecimento
- Atuadores para acionamento do forno
- Circuitos para condicionamento de sinal

Para este sistema proposto foram realizados alguns estudos iniciais, todavia, não foi possível sua implementação em virtude do tempo disponível para conclusão deste trabalho.

MICROCONTROLADOR MC68HC11

Este apêndice faz uma breve análise da arquitetura do microcontrolador **MC68HC11**, dando ênfase a alguns de seus subsistemas, com o objetivo de facilitar o entendimento do texto. Maiores informações podem ser obtidas em [16,17].

Os microcontroladores têm facilitado o desenvolvimento de sistemas digitais pois através de sua filosofia compacta, que procura agregar vários blocos funcionais em uma única pastilha encerram, no mesmo circuito integrado da unidade central de processamento, portas de entrada e saída de dados, interfaces para a comunicação de dados, memórias voláteis e não voláteis, conversor A/D, temporizadores e outros dispositivos necessários a muitos sistemas de monitoramento e controle. Sendo atualmente bastante difundidos em aplicações de controle industrial [18].

A tecnologia utilizada é a HCMOS, que combina a redução de tamanho e a alta velocidade dos TTL com o baixo consumo e alta imunidade a ruído dos dispositivos CMOS. A memória interna é composta de 8K *bytes* de ROM, 512 *bytes* de EEPROM e 256 *bytes* de RAM [17,18].

A .2 - REGISTRADORES

O microcontrolador MC68HC11 dispõe de 64 registradores internos de 8 *bits* para controle de operações do sistema. Existem registradores de configuração de portas, registradores de mascara de interrupção, registradores de escrita/leitura em portas, registradores de configuração, etc. Quando o microcontrolador é ligado, estes registradores e a RAM interna são mapeados a partir de \$1000 e \$0000, respectivamente. No entanto, pode-se realocá-los para outras posições de memória, através da programação do registrador **INIT**.

Além dos registradores de propósitos específicos, tem-se os usuais da **CPU**, que são: os acumuladores **A** e **B** (de 8 *bits*) e o registrador **D** (formado pelos acumuladores **A** e **B**), o contador de programa **PC** (16 *bits*), o apontador de pilha **SP** (de 16 *bits*), os indexadores **X** e **Y** (de 16 *bits*) e o registrador de código de condições **CCR** (de 8 *bits*), os sete registradores da Unidade Central de Processamento encontram-se representados na Figura A.2.

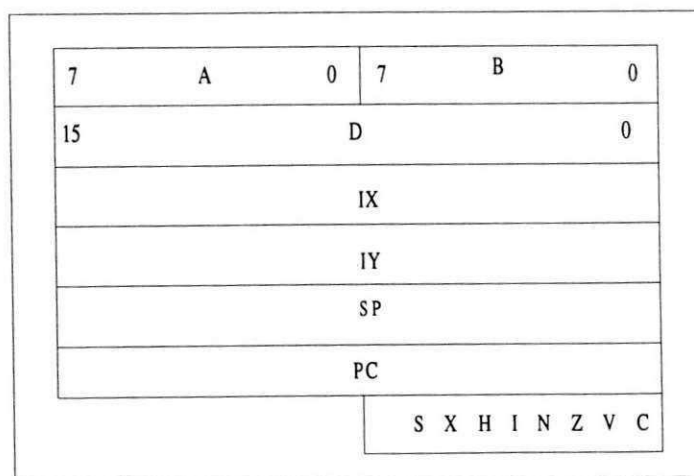


Figura A.2 - Registradores da CPU do MC68HC11

A . 3 - MODOS DE OPERAÇÃO

Existem primariamente dois modos de operação do microcontrolador, a saber, os modos normais de operação *single-chip* e expandido multiplexado. Como variações destes modos, o sistema pode operar nos modos *Special Bootstrap* e *Special Test*. A seleção é feita pelos pinos **MODB** e **MODA**, conforme indicado na Tabela A.1.

Tabela A.1 - Modos de Operação em função dos pinos **MODA** e **MODB**

MODB	MODA	MODO DE OPERAÇÃO
+Vcc	0	“Single - Chip”
+Vcc	+Vcc	Expandido Multiplexado
0	0	“Special Bootstrap”
0	+Vcc	“Special Test”

A . 4 - MEMÓRIAS

O microcontrolador MC68HC11 possui 8 *kbytes* de memória **ROM** (gravada em fábrica), 512 *bytes* de memória **EEPROM**, programável e apagável por software com auxílio da própria estrutura do microcontrolador, sem a necessidade de fonte de alimentação suplementar. Contém ainda 256 *bytes* de **RAM** com endereço inicial programável pelo registrador de inicialização (**INIT**), de forma que o endereço de início é X000, onde X é dado pelas quatro posições mais significativas do registrador **INIT**.

Quando utilizado no modo expandido multiplexado, o microcontrolador pode endereçar até 64 *kbytes* de memória externa, embora isto signifique a perda das portas B e C utilizáveis normalmente no modo *single-chip* bem como dos pinos de controle **STRA** e **STRB**.

O registrador de configuração (**CONFIG**), implementado em células de memória **EEPROM**, configura o sistema através de suas quatro posições menos significativas.

As memórias disponíveis internamente no MC68HC11 estão dispostas de acordo com o mapa de memória mostrado na Figura A.3. No entanto, pode haver uma relocação deste endereçamento, através dos registradores de inicialização (**INIT**) e configuração (**CONFIG**).

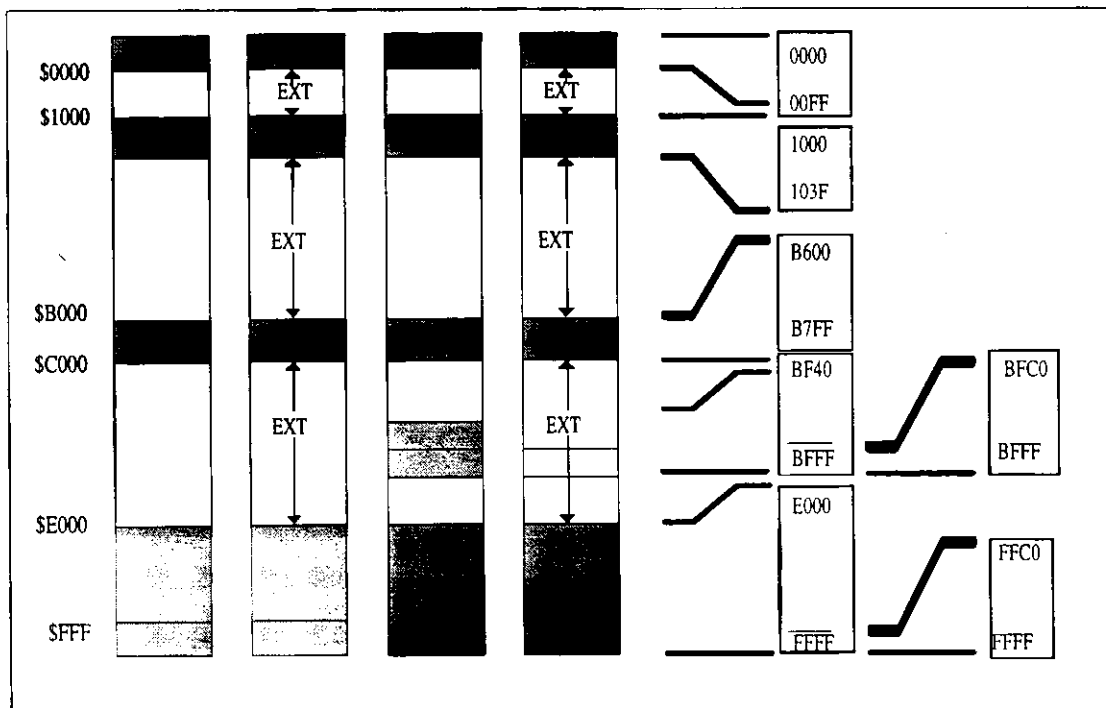


Figura A.3 - Mapeamento de memórias internas do MC68HC11

A.5 - TEMPORIZADOR

O temporizador é baseado em um contador livre de 16 *bits* que muda de estado livremente após sua inicialização.

O sinal de relógio que serve de referência ao temporizador é gerado a partir do relógio interno **E**, que é de 2Mhz e pode ter sua frequência dividida pelos fatores 1, 4, 8 ou 16, programáveis pelas duas posições menos significativas do registrador **TMSK2**.

Existem registradores de 16 *bits* associados ao temporizador, três de entrada (registradores apenas de leitura) e cinco de saída (registradores de escrita e leitura), associados aos pinos da porta A. Os registradores de entrada TIC3, TIC2 e TIC1 estão associados as entradas de captura IC3, IC2 e IC1, respectivamente, enquanto que os registradores de saída TOC5, TOC4, TOC3, TOC2 e TOC1 estão associados as saídas de comparação OC5, OC4, OC3, OC2 e OC1.

Aplicações para a entrada de captura descritas acima seriam, por exemplo, a medição da defasagem entre dois sinais, medição de frequência e controle de processos por dispositivos externos, entre outras.

As quatro saídas de controle do temporizador, denominadas saídas de comparação, são programadas por *software* de maneira que quando o conteúdo do contador torna-se igual ao conteúdo do registro interno correspondente à saída de comparação, a saída é ativada, desativada ou troca de estado, de acordo com a programação.

Geração de pulsos de duração específica e controle de processos podem ser realizadas pelas saídas de comparação.

A . 6 - ACUMULADOR DE PULSOS

O acumulador de pulso é um sistema contador/temporizador de 8 *bits*, que pode ser configurado para operar segundo dois modos básicos: No modo contagem de eventos (como sistema contador) e no modo duração de eventos (como sistema temporizador), ambas programáveis pelo registrador de controle do acumulador de pulso **PACTL**.

Ao contrário do temporizador, o conteúdo deste acumulador pode ser lido ou alterado a qualquer instante..

A Figura A.4 ilustra o registro **PACTL** e seus respectivos bits de controle, relacionados ao acumulador de pulsos.

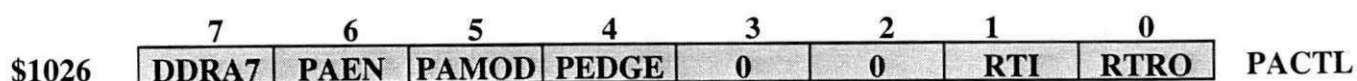


Figura A.4 - Configuração do Registrador PACTL

DDRA7 - Controle de direção do dado de entrada na porta A, bit7

0 = O *bit* 7 fica configurado como entrada;

1 = O *bit* 7 fica configurado como saída.

PAEN - Habilita o sistema acumulador de pulsos

0 = desabilita acumulador de pulsos;

1 = habilita o acumulador de pulsos.

PAMOD - Seleciona os modos de operação do acumulador de pulsos

0 = O modo de contagem de eventos é selecionado

1 = O modo de duração de eventos é selecionado

PEDGE - Seleciona a borda de ativação do acumulador de pulso

0 = O acumulador de pulso responde a bordas de descida.

1 = O acumulador de pulso responde a bordas de subida.

Os demais *bits* do **PACTL** não são usados pelo acumulador de pulsos.

O registrador **TFLG2** é usado para indicar a ocorrência de um sistema de eventos. O status do registrador é limpo quando se escreve 1 no *bit* correspondente ao que se deseja zerar, conforme indicado na Figura A.5.

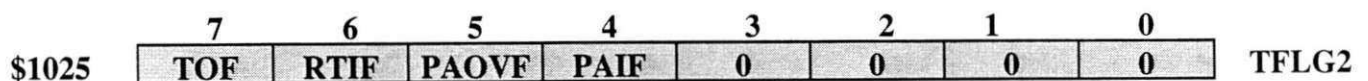


Figura A.5 - Configuração do Registrador TFLG2

TOF - Indica *overflow* do contador interno do microcontrolador ;

RTIF - Esse *bit* é setado cada vez que uma borda de subida é detectada;

PAOVIF - Esse *bit* é setado quando ocorre *overflow* no acumulador de pulso;

PAIF - Esse *bit* é setado quando uma transição positiva é detectada no pino PA7. E é limpo ao escrever -se 1 nesta posição.

Bits 3 - 0 - São sempre zero.

A.7 - PORTAS DE ENTRADA E SAÍDA DE DADOS

O **MC68HC11** possui um total de 40 pinos para entrada e saída de dados distribuídos entre as portas **A**, **B**, **C**, **D** e **E**.

As portas unidirecionais possuem apenas um registrador para leitura ou escrita, enquanto as bidirecionais possuem um registrador para direção de dados e um registrador de leitura/escrita.

As operações de E/S são mapeadas em memória, ou seja, uma leitura/escrita no registrador de E/S equivale a E/S de dados pela porta correspondente.

A porta **A** é utilizada pelo temporizador, pelo acumulador de pulsos ou para propósitos gerais. Possui oito pinos dos quais três são de entrada somente (**PA0**, **PA1** e **PA2**), quatro de saída somente (**PA3**, **PA4** e **PA5**) e um bidirecional (**PA7**). A direção do pino **PA7** é controlada pelo conteúdo da posição mais significativa do registrador **PACTL**.

A porta **B** possui oito pinos de saída somente. Quando o microcontrolador opera em modo multiplexado, a porta **B** fornece as oito posições mais significativas da palavra de endereçamento de 16 posições. No modo *single-chip* a porta é utilizada para saída de dados

A porta **C** é a porta mais complexa do microcontrolador pois pode ser usada em propósitos gerais, para entrada e saída de dados utilizando-se a técnica de *handshake* ou ainda fornecer dados ou endereços multiplexados. A direção dos dados é dada pelo registrador **DDRC**, cada posição do registrador corresponde a um pino da porta. O pino é de saída se sua posição no registrador está setada, caso contrário, torna-se um pino de entrada.

O microcontrolador possui um subsistema capaz de enviar ou receber dados pelas portas **B** e **C**, utilizando técnicas de *handshake*.

Existem três modos de operação deste subsistema, controlados pelo registrador **PIOC**. O primeiro modo é o *simple strobe* que envolve a porta **B** como saída de dados do tipo *strobe output* e a porta **C** como entrada de dados do tipo *latching input*. Assim, ao se colocar dados na porta **B** através de uma escrita no registrador **PORTB**, é gerado um pulso no pino **STRB** com duração de dois pulsos do relógio interno do microcontrolador. Neste intervalo de tempo, o dispositivo externo deve ler o dado disponível nas linhas da porta **B**.

De outra forma, para a entrada de dados, a informação é colocada nas vias da porta **C** e o dispositivo externo sinaliza através de um pulso na linha **STRA** que comanda a entrada de dados no registrador tipo *latch* **PORTCL** e pode gerar um pedido de interrupção, dependendo do estado da posição **STAI** do registrador **PIOC**.

No modo *full handshake*, a entrada de dados é habilitada após uma leitura no registrador **PORTCL**, quando a linha **STRB** é ativada. Ao se dispor da informação na via de dados, o dispositivo externo deve sinalizar ao microcontrolador o estado de dado pronto através de uma transição ativa na linha **STRA**.

A detecção de uma transição ativa na linha **STRA** provoca a transferência do dado proveniente do dispositivo externo para o registrador tipo *latch* **PORTCL**, seta a posição **STAF** do registrador **PIOC** (opcionalmente causando uma interrupção) e, finalmente, desabilita a linha **STRB**, evitando novas entradas de dados até uma nova leitura no registrador **POTCL**.

A saída de dados é feita de forma semelhante à entrada. Após uma escrita no registrador **PORTCL**, a linha **STRB** é ativada e os dados ficam disponíveis nas linhas da porta **C**. O dispositivo externo faz a leitura dos dados e sinaliza ao microcontrolador o estado de dado lido através da transição ativa na linha **STRA**.

A detecção de uma transição ativa na linha **STRA** seta a posição **STAF** (opcionalmente causando uma interrupção) e desabilita a linha **STRB** até uma nova escrita no registrador **PORTCL**.

A . 8 - CONVERSOR ANALÓGICO/DIGITAL

O subsistema conversor analógico-digital (A/D) do **MC68HC11** consiste de um único conversor A/D de 8 *bits*, que usa a técnica de aproximações sucessivas e apresenta uma precisão de mais ou menos $\frac{1}{2}$ LSB (bit menos significativo), possui 8 canais de entradas multiplexadas. Duas linhas dedicadas (**VRL** e **VRH**) fornecem as tensões de referência para o conversor (**VRL** - tensão baixa e **VRH**-tensão alta), O sistema pode operar com **VRL** acima de 0 volts e **VRH** de +5 *Volts* desde que a diferença **VRH -VRL** esteja na faixa de +2,5 a 5,0 *Volts*, ou seja, $2,5V \leq VRH-VRL \leq 5,0V$.

Uma tensão de entrada igual a **VRL** é convertida para \$00 e uma tensão de entrada **VRH** é convertida para \$FF. Logo, o fundo de escala é FF_{16} que é igual 255_{10} .

O usuário pode selecionar a conversão em somente um canal ou em um grupo de canais através da posição **MULT** do registrador **ADCTL**. Uma outra posição, denominada **SCAN**, seleciona ainda se a conversão será feita continuamente. O usuário, portanto, pode selecionar a conversão contínua ou simples de um único canal ou de quatro canais.

Após uma escrita no registrador **ADCTL** (Figura A.6), cujo endereço é \$1030, o processo de conversão é inicializado, obedecendo a programação do registrador.

Na conversão simples de um único canal, a tensão é convertida quatro vezes consecutivas e os resultados são armazenados sucessivamente nos registradores **ADR1**, **ADR2**, **ADR3** e **ADR4**, os quais ocupam respectivamente os endereços \$1031, \$1032, \$1033 e \$1034, respectivamente.. O fim do processo é sinalizado pela posição 7 do registrador **ADCTL**. Para a conversão contínua, o ciclo de conversão é repetido até uma escrita no registrador **ADCTL**. Cada conversão leva $64\mu s$.

Todos os *bits* do registrador **ADCTL** podem ser lidos ou escritos exceto o *bit* 7, que é só de leitura e torna-se 1 se, e somente se, 4 conversões tiverem sido feitas. Os outros bits possuem as seguintes funções:

bit 6: não possui finalidade:

bit 0 ao bit 3 ⇒ Estes 4 *bits* são utilizados para selecionar os canais a serem utilizados, como mostra a Tabela A.2, quando o *bit* 4 (MULT) for igual a um, ou seja, quando for escolhido canais múltiplos para a conversão dos sinais.



Figura A.6 - Configuração do Registrador ADCTL

Tabela A.2 - seleção dos canais de entrada do microcontrolador.

CD	CC	CB	CA	MULT=1	FUNÇÕES
0	0	0	0	ADR1	SELECIONA OS QUATRO PRIMEIROS CANAIS
0	0	0	1	ADR2	
0	0	1	0	ADR3	
0	0	1	1	ADR4	
0	1	0	0	ADR1	SELECIONA OS QUATRO ÚLTIMOS CANAIS
0	1	0	1	ADR2	
0	1	1	0	ADR3	
0	1	1	1	ADR4	

A.9 - INTERFACE PARA COMUNICAÇÃO SERIAL

A interface para comunicação serial é um subsistema do microcontrolador destinado à transmissão e recepção assíncronas em modo *full-duplex*. Utiliza o formato padrão **NRZ**, ou seja, um *bit* de inicialização, oito ou nove *bits* de dados e um *bit* de parada.

A taxa de transferência é programável por *software*, podendo-se selecionar um de 32 diferentes valores. Para tornar este subsistema compatível com o padrão **RS232** ou **RS422** o usuário deve prover o sistema de um circuito condicionador e transformar os níveis lógicos de 0 e +5 Volts na saída da **SCI** em níveis de ± 12 Volts.

A .10 - INTERFACE PERIFÉRICA SERIAL (SPI)

A *interface* periférica serial é constituída, basicamente, por um registrador de oito *bits* com lógica de controle e *status* para iniciar e informar o estado da transferência de dados. A S.P.I. tem quatro pinos de *interface*, a saber: Clock Serial (SCK), Master In/Slave Out (MISO) e Slave Select (SS). A S.P.I. destina-se a interconectar o microcontrolador MC68HC11 com dispositivos periféricos.

A . 11 - PLACA DE DESENVOLVIMENTO M68HC11EVB

A placa M68HC11EVB é um sistema completo destinado ao desenvolvimento de projetos baseados no microcontrolador **MC68HC11**. Possui programa monitor (**BUFFALO**) residente em memória não volátil, oferecendo um eficiente ambiente de desenvolvimento. Maiores informações são apresentadas em [19].

A placa inclui:

- Dois conectores compatíveis com o padrão RS-232C para ligação a um terminal de vídeo ou a um sistema hospedeiro.
- Adaptador para comunicação serial baseado no circuito integrado **MC6850 (ACIA)**:
- Seis taxas de transferência de dados, selecionáveis no *hardware*;

- Unidade de reposição de portas (**PRU**), tornado disponíveis as portas **B** e **C** e os pinos **STRA** e **STRB** do microcontrolador;
- 16 *kbytes* de memória **RAM** e **EEPROM**;
- Conector interligado as portas, pinos de controle, relógio e alimentação do microcontrolador.

FLUXOGRAMA DOS CONTROLADORES:

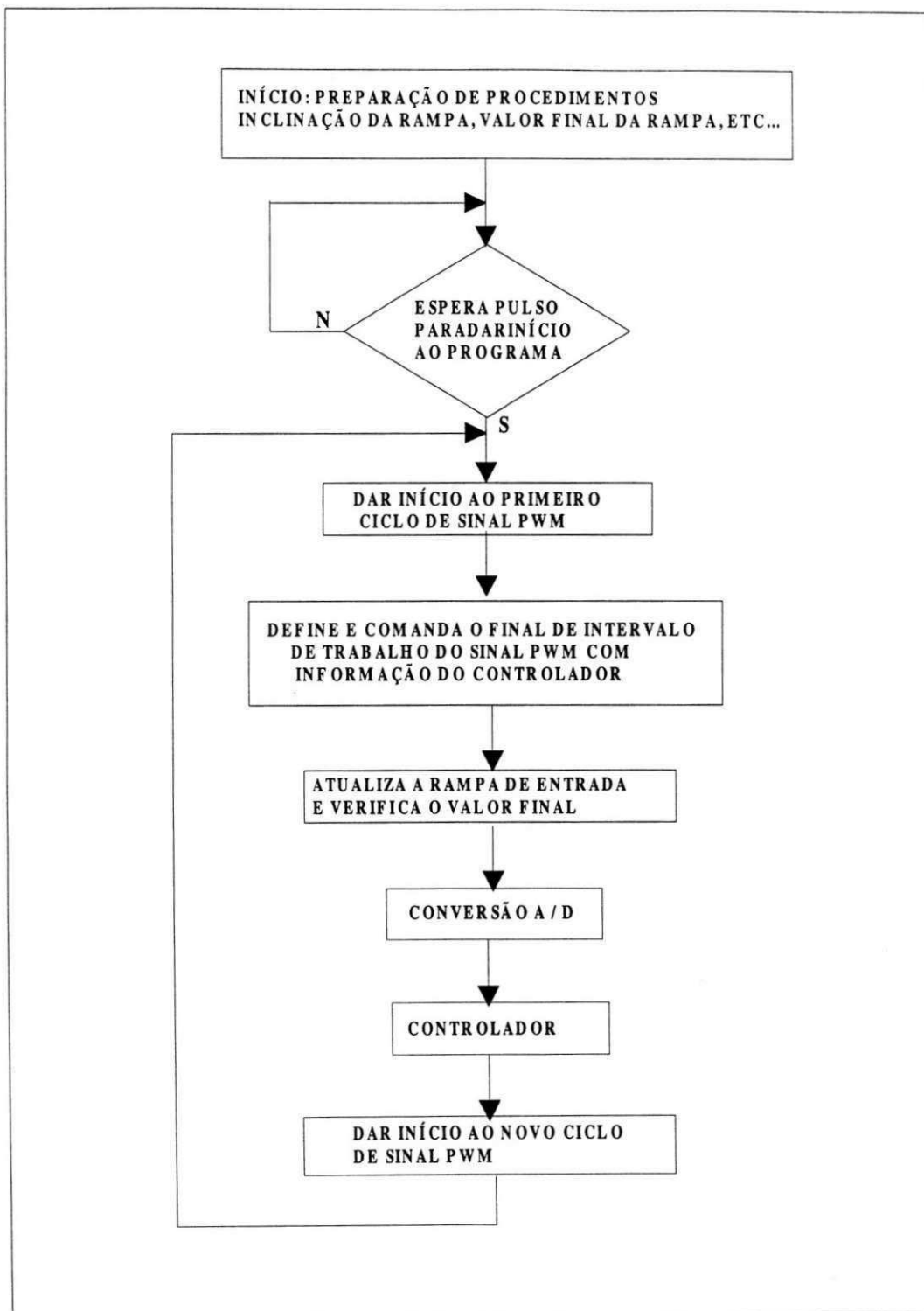


Figura B.1 - Fluxograma do programa principal

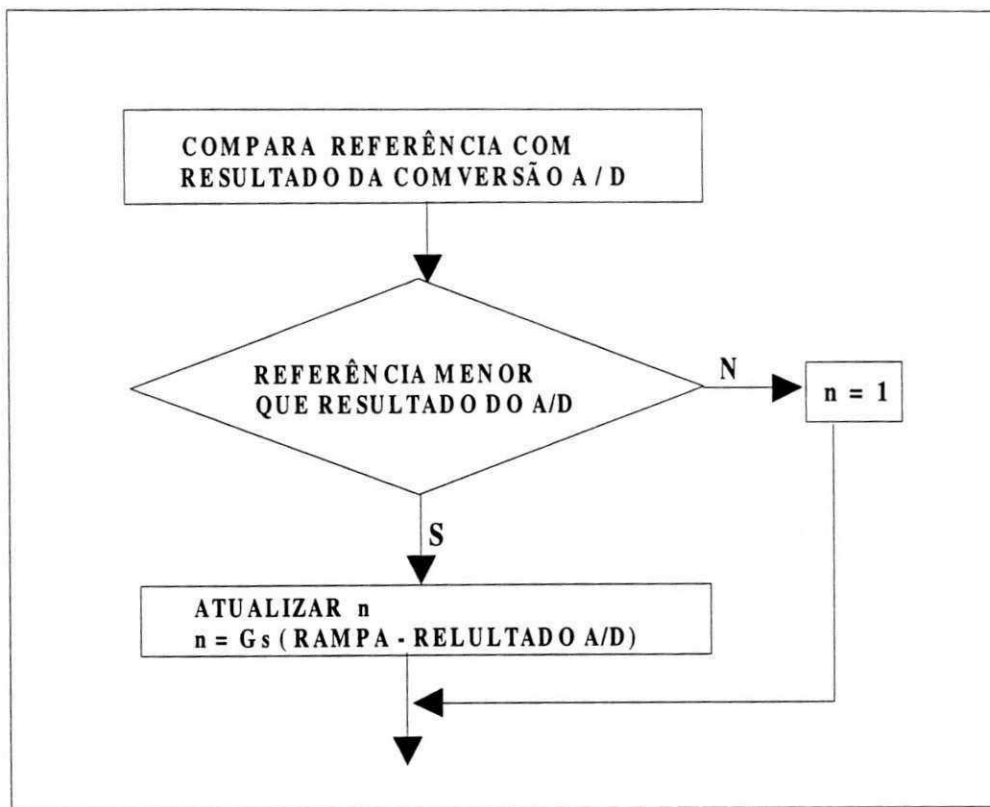


Figura B.2 - Fluxograma do controlador proporcional

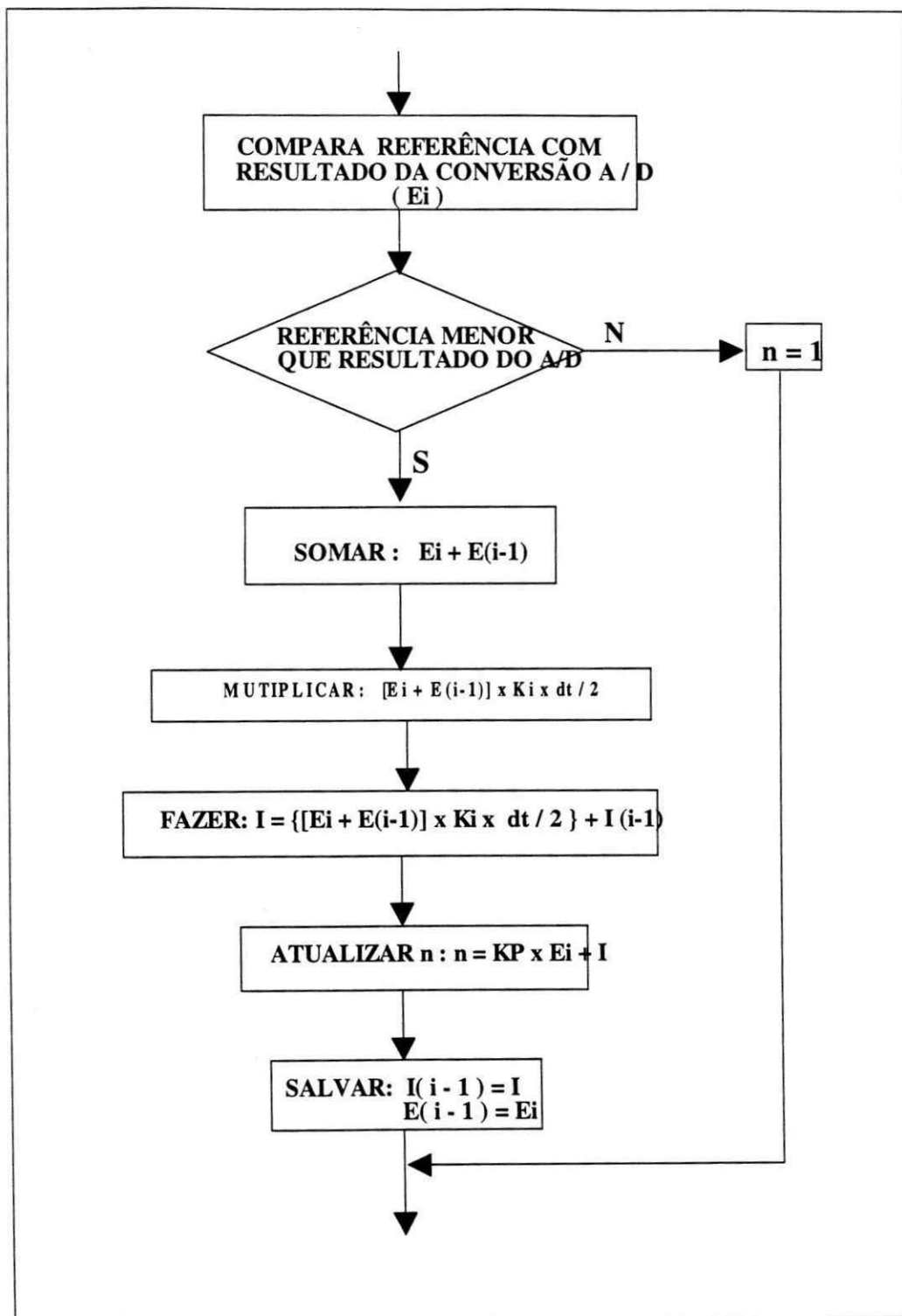


Figura B.3 - Fluxograma do controlador PI

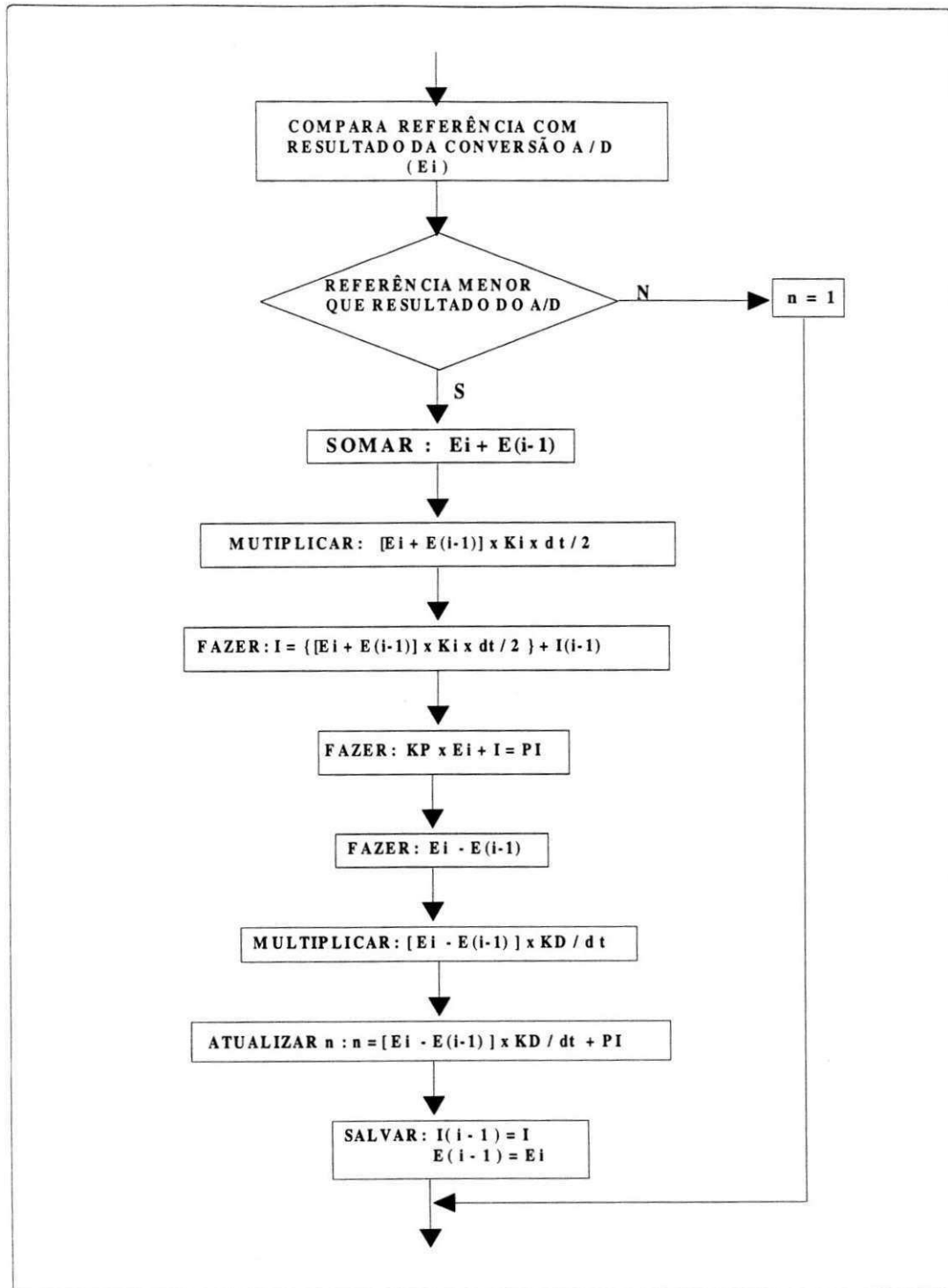


Figura B.4 - Fluxograma do controlador PID

APÊNDICE C

```
*****
* SOFTWARE _ CONTROLADOR _ PROPORCIONAL [P]          *
* ANALISADOR TERMICO DIFERENCIAL                      *
* VERSAO _ 1.0 _ FEVEREIRO _ 96                      *
*****
```

```
* *****
* * VARIAVEIS DO SISTEMA *
* *****
```

```
PACTL    EQU    $1026    * REGISTRO DE CONTROLE DO ACUMULADOR DE PULSOS *
TFLG2    EQU    $1025    * FLAG DE SINALIZACAO *
ADCTL    EQU    $1030    * REGISTRO DE CONFIGURACAO DO CONVERSOR A/D *
ADR4     EQU    $1034    * ULTIMO VALOR DO CONVERSOR A/D *
PORTA    EQU    $1000    * REGISTRO DE LEITURA/ESCRITA DA PORTA A *
```

ORG \$C000

```
INCC     RMB     2        * PASSO DE INCREMENTO DA RAMPA *
KP       RMB     2        * GANHO PROPORCIONAL *
KI       RMB     2        * GANHO INTEGRAL *
KD       RMB     2        * GANHO DERIVATIVO *
RAMPA    RMB     2        * RAMPA DE ENTRADA *
R_ATL    RMB     2        * RAMPA ATUALIZADA *
R_FIAL   RMB     2        * LIMITE SUPERIOR DA RAMPA *
RELOG    RMB     1        * TEMPORIZADOR DE REFERENCIA DO SISTEMA *
N        RMB     1        * DEFINE O PERIODO DO SINAL PWM *
N        RMB     2        * NUM. DE SEMI_CICLOS DO SINAL DA REDE *
```

```
* *****
* * PROGRAMA PRINCIPAL *
* *****
```

```
INICIO   ORG     $C100
         LDAA    PORTA
         BITA    #$04
         BEQ     INICIO
         JSR     INICIALIZACAO1
         JSR     INICIALIZACAO2
         LDX    #$01
         STX    N
         LDD    #$1B60
```

```

LOOP0      STD   R_FIAL          * DETERMINA O LIMITE SUPERIOR DA RAMPA *
           JSR   TIME1          * GERA NIVEL ALTO DO SINAL PWM *
           JSR   TIME2          * GERA NIVEL BAIXO DO SINAL PWM *
           JSR   READ_CONVERTOR * CONVERSAO A/D *
           LDAA  ADR4           * RESULTADO DO CONVERTOR A/D *
           LDAB  #$20
           MUL
           STD   $DF02          * RESUL A/D --> FPACC1 *
           JSR   SINT2FLT
           JSR   SALVA          * FPACC1 --> FPACC2 *
           JSR   LIMPA
           JSR   RAMPA0        * ATUALIZA RAMPA E TESTA SEU LIMITE SUPERIOR *
           STD   $DF02          * RAMPA --> FPACC1 *
           JSR   SINT2FLT
           JSR   FLTSUB        * RAMPA - RESULTADO A/D -->FPACC1 *
           LDX  $DF04
           CPX  #$FF
           BNE  SIGA
           LDX  #$01
           STX  N
           JSR  TIME0
           CLR  RELOG
           JMP  LOOP0
SIGA      JSR  SALVA          * E(K)--> FPACC2 *
           JSR  SALVA0        * E(K)--> $DF10 - $DF14 *
           JSR  LIMPA
           LDD  KP
           STD  $DF02
           JSR  SINT2FLT
           JSR  FLTMUL
           JSR  SALVA1        * KP * E(K) -->$DF1A - $DF1E *
           JSR  FLT2INT
           LDD  $DF02
           JSR  DESLOCAMENTO
           JSR  DESLOCAMENTO
           STD  N
           JSR  TIME0
           CLR  RELOG
           JMP  LOOP0
           SWI  * FIM DO P *

```

```

* *****
* * FIM DO PROGRAMA PRINCIPAL *
* *****

```

```
* *****
* * PROCEDIMENTOS DE INICIALIZACAO DO SISTEMA *
* *****
```

```
INICIALIZACAO1 LDD  #S03      * { C = 1,421 * 32D } *
                STD  INCC      * DEFINE O PASSO DE ATUALIZACAO DA RAMPA *
                LDD  #S0D
                STD  KP        * ( GANHO * 32D ) *
                LDAA #SFF
                STAA N          * DEFINE O PERIODO DO SINAL PWM --> N = 255D *
                LDAA #S00
                STAA N
                LDD  #S0000
                STD  RAMPA      * VALOR INICIAL DA RAMPA --> RAMPA=0 *
                STAA RELOG      * ZERA RELOGIO - TEMPORIZADOR --> RELOG = 0 *
                STD  R_ATL
                LDX  #SDF00
                LDD  #0000
PILHALIMPA     STD  0,X
                INX
                INX
                CPX  #SDF42
                BNE  PILHALIMPA
                RTS
```

```
* *****
* * ESPERA PULSO PARA DAR INICIO AO PROCESSO *
* *****
```

```
INICIALIZACAO2 LDAA  #S50
                STAA PACTL * HABILITA ACUMULADOR DE PULSOS *
LOOP1          LDAA  TFLG2
                BITA  #S10
                BEQ  LOOP1 * ESPERA A CHEGADA DO PULSO *
                STAA  TFLG2 * ZERA FLAG DE SINALIZACAO *
                RTS
```

```
* *****
* * GERA NIVEL ALTO DO SINAL PWM, ATRAVES DO PINO PA3 --> PA3 = 1 *
* *****
```

```
TIME1      LDAA #$08
           STAA PORTA * GERA NIVEL ALTO DO SINAL PWM --> PA3 = 1 *
LOOP2      BSR  TIME0 * CONTA PULSOS DO RELOGIO *
           LDD  N
           CMPB RELOG
           BLS  LOOP3 * ( N - RELOGIO ) <= 0 *
           JMP  LOOP2
LOOP3      RTS
```

```
* *****
* * GERA NIVEL BAIXO DO SINAL PWM, ATRAVES DO PINO PA3 --> PA3 = 0 *
* *****
```

```
TIME2      LDAA #$00
           STAA PORTA * GERA NIVEL BAIXO DO SINAL PWM -->PA3 = 0 *
LOOP4      BSR  TIME0 * CONTA PULSOS DO RELOGIO *
           LDD  #$FE
           CMPB RELOG
           BNE  LOOP4 * ( ( N - 1 ) - RELOGIO ) > 0 *
           RTS
```

```
* *****
* * ESPERA A CHEGADA DE PULSOS *
* *****
```

```
TIME0      LDAA TFLG2
           BITA #$10
           BEQ  TIME0 * ESPERA A CHEGADA DE PULSO *
           STAA TFLG2 * ZERA FLAG DE SINALIZACAO *
           INC  RELOG
           RTS
```

```
* *****
* * LER CONVERSOR A/D *
* *****
```

```
READ_CONVERSOR LDAA #$07 * SELECIONA CANAL PE7 DO CONVERSOR A/D *
               STAA ADCTL * INICIALIZA CONVERSAO *
LOOP5          LDAA ADCTL
               BPL  LOOP5 * ESPERA FINAL DE CONVERSAO *
               RTS
```

```
* *****
* * ATUALIZA RAMPA DE ENTRADA E TESTA SEU LIMITE SUPERIOR *
* *****
```

```
RAMPA0      LDD RAMPA
             ADDD INCC * ATUALIZA RAMPA *
             STD R_ATL
             LDX R_FIAL
             CPX R_ATL
             BLS LOOP6 * ( RAMPA FINAL - RAMPA ATUAL ) <= 0 *
             STD RAMPA * RAMPA = RAMPA ATUAL *
             RTS
LOOP6       STX RAMPA * RAMPA = RAMPA FINAL *
             RTS
```

```
* *****
* * DESLOCAMENTO LOGICO DE 5 CASAS PARA A DIREITA NA VARIAVEL AUX1 ( AUX / 32D ) *
* *****
```

```
DESLOCAMENTO LSRD
             LSRD
             LSRD
             LSRD
             LSRD
             LSRD
             RTS
```

```
*****
** LIMPA OS 2 BYTES MAIS SIGNIFICATIVO DE FPACC1 **
*****
```

```
LIMPA       PSHX
             LDX #0000
             STX $DF00
             LDAA #$00
             STAA $DF04
             PULX
             RTS
```

```
*****
** SALVAR OPERANDOS **
*****
```

```
SALVA       PSHX
             LDX #$DF00
             LDY #$DF05
LOOP8 LDAA 0,X
             STAA 0,Y
             INX
             INY
             CPX #$DF05
```

```

BNE LOOP8
PULX
RTS
    
```

```

*****
* E(K) = RAMPA - RESULT A/D -->$DF10 - $DF14 *
*****
    
```

```

SALVA0    PSHX
          LDX  #$DF00
          LDY  #$DF10
LOOP9     LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPX  #$DF05
          BNE  LOOP9
          PULX
          RTS
    
```

```

*****
* KP * E(K) ----> $DF1A - $DF1E *
*****
    
```

```

SALVA1    PSHX
          LDX  #$DF00
          LDY  #$DF1A
LOOP10    LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPX  #$DF05
          BNE  LOOP10
          PULX
          RTS
    
```

```

*****
* E(K) ---> PACC1 *
*****
    
```

```

CARREGA0  PSHX
          LDX  #$DF10
          LDY  #$DF00
LOOP11    LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPY  #$DF05
          BNE  LOOP11
          PULX
          RTS
    
```

```

*****
* E(K-1) ----> PACC2 *
*****

CARREGA1  PSHX
          LDX  #SDF15
          LDY  #SDF05
LOOP12    LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPY  #SDF10
          BNE  LOOP12
          PULX
          RTS
    
```

FIM DO P

```

* *****
* *   SOFTWARE _ CONTROLADOR PROPORCIONAL_INTEGRAL [PI]   *
* *   ANALISADOR TERMICO DIFERENCIAL                       *
* *   VERSAO _ 1.0 _ ABRIL _ 96                           *
* *****
* *****
* * VARIAVEIS DO SISTEMA *
* *****
    
```

```

PACTL EQU $1026 * REGISTRO DE CONTROLE DO ACUMULADOR DE PULSOS *
TFLG2 EQU $1025 * FLAG DE SINALIZACAO *
ADCTL EQU $1030 * REGISTRO DE CONFIGURACAO DO CONVERSOR A/D *
ADR4 EQU $1034 * ULTIMO VALOR DO CONVERSOR A/D *
PORTA EQU $1000 * REGISTRO DE LEITURA/ESCRITA DA PORTA A *
    
```

ORG SC000

```

INCC RMB 2 * PASSO DE INCREMENTO DA RAMPA *
KP RMB 2 * GANHO PROPORCIONAL *
KI RMB 2 * GANHO INTEGRAL *
KD RMB 2 * GANHO DERIVATIVO *
RAMPA RMB 2 * RAMPA DE ENTRADA *
R_ATL RMB 2 * RAMPA ATUALIZADA *
R_FIAL RMB 2 * LIMITE SUPERIOR DA RAMPA *
RELOG RMB 1 * TEMPORIZADOR DE REFERENCIA DO SISTEMA *
N RMB 1 * DEFINE O PERIODO DO SINAL PWM *
N RMB 2 * NUM. DE SEMI_CICLOS DO SINAL DA REDE *
    
```

```

* *****
* *   PROGRAMA PRINCIPAL   *
* *****

      ORG   $C100

INICIO LDAA  PORTA
      BITA  #$04
      BEQ   INICIO
      JSR   INICIALIZACAO1
      JSR   INICIALIZACAO2
      LDX   #$01
      STX   N
      LDD   #$1466
      STD   R_FIAL          * DETERMINA O LIMITE SUPERIOR DA RAMPA *
LOOP0 JSR   TIME1          * GERA NIVEL ALTO DO SINAL PWM *
      JSR   TIME2          * GERA NIVEL BAIXO DO SINAL PWM *
      JSR   READ_CONVERSOR * CONVERSAO A/D *
      LDAA  ADR4          * RESULTADO DO CONVERSOR A/D *
      LDAB  #$20
      MUL
      STD   $DF02          * RESULT A/D --> FPACC1 *
      JSR   SINT2FLT
      JSR   SALVA          * FPACC1 --> FPACC2*
      JSR   LIMPA
      JSR   RAMPA0        * ATUALIZA RAMPA DE ENTRADA E TESTA SEU LIMITE SUPERIOR *
      STD   $DF02          * RAMPA --> FPACC1 *
      JSR   SINT2FLT
      JSR   FLTSUB        * RAMPA - RESULTADO A/D -->FPACC1 *
      JSR   SALVA        * E(K)--> FPACC2 *
      JSR   SALVA0       * E(K)--> $DF10 - $DF14 *
      JSR   LIMPA
      LDD   KP
      STD   $DF02
      JSR   SINT2FLT
      JSR   FLTMUL
      JSR   SALVA1        * KP X E(K) -->$DF1A - $DF1E *
      JSR   CARREGA0     * E(K) --> FPACC1 *
      JSR   CARREGA1     * E(K-1) --> FPACC2 *
      JSR   FLTADD       * E(K) + E(K-1) *
      JSR   FLT2INT
      LDD   $DF02
      JSR   DESLOCAMENTO1
      JSR   LIMPA
      STD   $DF02
      JSR   SINT2FLT
      JSR   SALVA2       * E(K)+E(K-1) -->$DF1F - $DF23 *
      JSR   CARREGA2    * INTEG_ANT --> FPACC2 *
      JSR   FLTADD
      JSR   SALVA3       * INTEGRAL ---> $DF29 - $DF2D *
      JSR   CARREGA3    * KP X E(K) ---> FPACC2 *
      JSR   FLTADD       * KP X E(K) + INTEGRAL = PI-->FPACC1*

```



```

JSR SALVA4      * KP*E(K)+INTEGRAL-->$DF2E - $DF32
LDX $DF04
CPX #$FF
BNE SIGA1
JSR TIME0
LDX #$01
STX N
CLR RELOG
JMP LOOP0
SIGA1 JSR SALVA5      * INTEGRAL -->INTEG_ANT *
JSR SALVA6      * E(K) --> E(K-1) *
JSR FLT2INT
LDD $DF02
JSR DESLOCAMENTO
JSR DESLOCAMENTO
STD N
JSR TIME0
CLR RELOG
JMP LOOP0

* *****
* * FIM DO PROGRAMA PRINCIPAL *
* *****

* *****
* * PROCEDIMENTOS DE INICIALIZACAO DO SISTEMA *
* *****

INICIALIZACAO1  LDD #$02      * { C = 1,421 * 32D } *
                STD INCC      * DEFINE O PASSO DE ATUALIZACAO DA RAMPA *
                LDD #$20
                STD KP        * ( GANHO * 32D ) *
                LDD #$1
                STD KI
                LDD #$76
                STD KD
                LDAA #$FF
                STAA N        * DEFINE O PERIODO DO SINAL PWM --> N = 255D *
                LDD #$00
                STD N
                JSR READ_CONVERTOR
                LDAA ADR2
                LDAB #$20
                MUL
                STD RAMPA    * VALOR INICIAL DA RAMPA--> RAMPA=TEMP.AMB.*
                LDD #$0000
                STD RAMPA    * VALOR INICIAL DA RAMPA --> RAMPA=0 *
                STAA RELOG   * ZERA RELOGIO - TEMPORIZADOR --> RELOG = 0 *
    
```

```

                STD R_ATL
                LDX #$DF00
                LDD #0000
PILHALIMPA     STD 0,X
                INX
                INX
                CPX #$DF42
                BNE PILHALIMPA
                RTS
    
```

```

* *****
* * ESPERA PULSO PARA DAR INICIO AO PROCESSO *
* *****
    
```

```

INICIALIZACAO2  LDAA #$50
                STAA PACTL * HABILITA ACUMULADOR DE PULSOS *
LOOP1           LDAA TFLG2
                BITA #$10
                BEQ LOOP1 * ESPERA A CHEGADA DO PULSO *
                STAA TFLG2 * ZERA FLAG DE SINALIZACAO *
                RTS
    
```

```

* *****
* * GERA NIVEL ALTO DO SINAL PWM, ATRAVES *
* * DO PINO PA3 --> PA3 = 1 *
* *****
    
```

```

TIME1           LDAA #$08
                STAA PORTA * GERA NIVEL ALTO DO SINAL PWM --> PA3 = 1*
LOOP2           BSR TIME0 * CONTA PULSOS DO RELOGIO *
                LDD N
                CMPB RELOG
                BLS LOOP3 * ( N - RELOGIO ) <= 0 *
                JMP LOOP2
LOOP3           RTS
    
```

```

* *****
* * GERA NIVEL BAIXO DO SINAL PWM, ATRAVES DO PINO PA3 --> PA3 = 0 *
* *****
    
```

```

TIME2           LDAA #$00
                STAA PORTA * GERA NIVEL BAIXO DO SINAL PWM -->PA3 = 0 *
LOOP4           BSR TIME0 * CONTA PULSOS DO RELOGIO *
                LDD #$FE
                CMPB RELOG
                BNE LOOP4 * ( ( N - 1 ) - RELOGIO ) > 0 *
                RTS
    
```

```
* *****
* * ESPERA A CHEGADA DE PULSOS *
* *****
```

```
TIME0      LDAA TFLG2
           BITA #$10
           BEQ TIME0 * ESPERA A CHEGADA DE PULSO *
           STAA TFLG2 * ZERA FLAG DE SINALIZACAO *
           INC RELOG
           RTS
```

```
* *****
* * LER CONVERTOR A/D *
* *****
```

```
READ_CONVERTOR LDAA #$14 * SELECIONA CANAL PE7 DO CONVERTOR A/D *
               STAA ADCTL * INICIALIZA CONVERSAO *
LOOP5          LDAA ADCTL
               BPL LOOP5 * ESPERA FINAL DE CONVERSAO *
               RTS
```

```
* *****
* * ATUALIZA RAMPA DE ENTRADA E TESTA SEU LIMITE SUPERIOR *
* *****
```

```
RAMPA0       LDD  RAMPA
             ADDD INCC * ATUALIZA RAMPA *
             STD  R_ATL
             LDX  R_FIAL
             CPX  R_ATL
             BLS  LOOP6 * ( RAMPA FINAL - RAMPA ATUAL ) <= 0 *
             STD  RAMPA * RAMPA = RAMPA ATUAL *
             RTS
LOOP6        STX  RAMPA * RAMPA = RAMPA FINAL *
             RTS
```

```
* *****
* * DESLOCAMENTO LOGICO DE 5 CASAS PARA A DIREITA *
* * NA VARIÁVEL AUX1 ( AUX / 32D ) *
* *****
```

```
DESLOCAMENTO LSRD
             LSRD
             LSRD
             LSRD
             LSRD
             LSRD
             RTS
```

```
* *****
* * DESLOCAMENTO LOGICO DE 6 CASAS PARA A DIREITA *
* * NA VARIAVEL TEMP ( TEMP / 64D ) *
* *****
```

```
DESLOCAMENTO1  LSRD
                LSRD
                LSRD
                LSRD
                LSRD
                LSRD
                RTS
```

```
* *****
* *      SUBROTINA DE COMPARACAO      *
* *****
```

```
COMPARA        LDD N
                CPD N
                BPL LOOP7 * ( N - N ) > 0 *
                STD N   * ( N = N ) *
LOOP7          RTS
```

```
*****
** LIMPA OS 2 BYTES MAIS SIGNIFICATIVO DE FPACC1 E O DE SINAL **
*****
```

```
LIMPA          PSHX
                LDX  #0000
                STX  $DF00
                LDAA #00
                STAA $DF04
                PULX
                RTS
```

```
*****
** SALVAR OPERANDOS **
*****
```

```
SALVA          PSHX
                LDX  #$DF00
                LDY  #$DF05
LOOP8 LDAA     0,X
                STAA 0,Y
                INX
                INY
                CPX  #$DF05
                BNE  LOOP8
                PULX
                RTS
```

 * E(K) = RAMPA - RESULT A/D -->\$DF10 - \$DF14 *

```
SALVA0    PSHX
          LDX  #$DF00
          LDY  #$DF10
LOOP9     LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPX  #$DF05
          BNE  LOOP9
          PULX
          RTS
```

 * KP * E(K) ----> \$DF1A - \$DF1E *

```
SALVA1    PSHX
          LDX  #$DF00
          LDY  #$DF1A
LOOP10    LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPX  #$DF05
          BNE  LOOP10
          PULX
          RTS
```

 * E(K) ---> PACC1 *

```
CARREGA0 PSHX
          LDX  #$DF10
          LDY  #$DF00
LOOP11    LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPY  #$DF05
          BNE  LOOP11
          PULX
          RTS
```

```
*****
* E(K-1) ----> PACC2 *
*****
```

```
CARREGA1  PSHX
          LDX #DF15
          LDY #DF05
LOOP12    LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPY #DF10
          BNE LOOP12
          PULX
          RTS
```

```
*****
* E(K)+E(K-1) ----> $DF1F - $DF23 *
*****
```

```
SALVA2    PSHX
          LDX #DF00
          LDY #DF1F
LOOP13    LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPX #DF05
          BNE LOOP13
          PULX
          RTS
```

```
*****
* INTEG_ANT ---> PACC2 *
*****
```

```
CARREGA2  PSHX
          LDX #DF24
          LDY #DF05
LOOP14    LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPY #DF10
          BNE LOOP14
          PULX
          RTS
```

```
*****
* KP * E(K) + INTEGRAL --->$DF2E - $DF32 *
*****
```

```
SALVA4   PSHX
         LDX #$DF00
         LDY #$DF2E
LOOP15   LDAA 0,X
         STAA 0,Y
         INX
         INY
         CPX #$DF05
         BNE LOOP15
         PULX
         RTS
```

```
*****
* E(K)+E(K-1) + INTEG_ANT ----> $DF29 - $DF2D *
*****
```

```
SALVA3   PSHX
         LDX #$DF00
         LDY #$DF29
LOOP16   LDAA 0,X
         STAA 0,Y
         INX
         INY
         CPX #$DF05
         BNE LOOP16
         PULX
         RTS
```

```
*****
* KD * E(K) ---> FPACC2 *
*****
```

```
CARREGA3 PSHX
         LDX #$DF1A
         LDY #$DF05
LOOP17   LDAA 0,X
         STAA 0,Y
         INX
         INY
         CPX #$DF1F
         BNE LOOP17
         PULX
         RTS
```

```
*****
* INTEGRAL ---> INTEG_ANT *
*****
```

```
SALVA5   PSHX
         LDX  #$DF29
         LDY  #$DF24
LOOP18   LDAA 0,X
         STAA 0,Y
         INX
         INY
         CPX  #$DF2E
         BNE  LOOP18
         PULX
         RTS
```

```
*****
* E(K) ---> E(K-1) *
*****
```

```
SALVA6   PSHX
         LDX  #$DF10
         LDY  #$DF15
LOOP19   LDAA 0,X
         STAA 0,Y
         INX
         INY
         CPX  #$DF15
         BNE  LOOP19
         PULX
         RTS
```

FIM DO PI

```
* *****
* * SOFTWARE _ CONTROLADOR PROPORCIONAL_INTEGRAL_DERIVATIVO [PID] *
* * ANALISADOR TERMICO DIFERENCIAL *
* * VERSAO _ 1.0 _ MAIO _ 96 *
* *****
```

```
* *****
* * VARIAVEIS DO SISTEMA *
* *****
```

```
PACTL   EQU  $1026 * REGISTRO DE CONTROLE DO ACUMULADOR DE PULSOS *
TFLG2   EQU  $1025 * FLAG DE SINALIZACAO *
ADCTL   EQU  $1030 * REGISTRO DE CONFIGURACAO DO CONVERSOR A/D *
ADR4    EQU  $1034 * ULTIMO VALOR DO CONVERSOR A/D *
PORTA   EQU  $1000 * REGISTRO DE LEITURA/ESCRITA DA PORTA A *
```


ORG \$C000

```

INCC      RMB      2      * PASSO DE INCREMENTO DA RAMPA *
KP        RMB      2      * GANHO PROPORCIONAL *
KI        RMB      2      * GANHO INTEGRAL *
KD        RMB      2      * GANHO DERIVATIVO *
RAMPA     RMB      2      * RAMPA DE ENTRADA *
R_ATL     RMB      2      * RAMPA ATUALIZADA *
R_FIAL    RMB      2      * LIMITE SUPERIOR DA RAMPA *
RELOG     RMB      1      * TEMPORIZADOR DE REFERENCIA DO SISTEMA *
N         RMB      1      * DEFINE O PERIODO DO SINAL PWM *
N         RMB      2      * NUM. DE SEMI_CICLOS DO SINAL DA REDE *
    
```

```

* *****
* *   PROGRAMA PRINCIPAL   *
* *****
    
```

```

INICIO    ORG   $C100
          LDAA  PORTA
          BITA  #$04
          BEQ  INICIO
          JSR  INICIALIZACAO1
          JSR  INICIALIZACAO2
          LDX  #$01
          STX  N
          LDD  #$1466
          STD  R_FIAL * DETERMINA O LIMITE SUPERIOR DA RAMPA *
LOOP0     JSR  TIME1  * GERA NIVEL ALTO DO SINAL PWM *
          JSR  TIME2  * GERA NIVEL BAIXO DO SINAL PWM *
          JSR  READ_CONVERTOR * CONVERSAO A/D *
          LDAA ADR4  * RESULTADO DO CONVERTOR A/D *
          LDAB #$20
          MUL
          STD  $DF02 * RESULT A/D --> FPACC1 *
          JSR SINT2FLT
          JSR SALVA * FPACC1 --> FPACC2*
          JSR LIMPA
          JSR RAMPA0 * ATUALIZA RAMPA DE ENTRADA E TESTA SEU LIMITE SUPERIOR
          STD  $DF02 * RAMPA --> FPACC1 *
          JSR SINT2FLT
          JSR FLTSUB * RAMPA - RESULTADO A/D -->FPACC1 *
          JSR SALVA * E(K)--> FPACC2 *
          JSR SALVA0 * E(K)--> $DF10 - $DF14 *
          JSR LIMPA
          LDD  KP
          STD  $DF02
          JSR SINT2FLT
          JSR FLTMUL
          JSR SALVA1 * KP X E(K) -->$DF1A - $DF1E *
          JSR CARREGA0 * E(K) --> FPACC1 *
          JSR CARREGA1 * E(K-1) --> FPACC2 *
    
```

```

JSR  FLTADD      * E(K) + E(K-1) *
JSR  FLT2INT
LDD  $DF02
JSR  DESLOCAMENTO1
JSR  LIMPA
STD  $DF02
JSR  SINT2FLT
JSR  SALVA2      * E(K)+E(K-1) -->$DF1F - $DF23 *
JSR  CARREGA2    * INTEG_ANT --> FPACC2 *
JSR  FLTADD
JSR  SALVA3      * INTEGRAL ---> $DF29 - $DF2D *
JSR  CARREGA3    * KP X E(K) ---> FPACC2 *
JSR  FLTADD      * KP X E(K) + INTEGRAL = PI-->FPACC1*
JSR  SALVA4      * KP X E(K) + INTEGRAL-->$DF2E - $DF32 *
JSR  CARREGA0    * E(K) ---> FPACC1 *
JSR  CARREGA1    * E(K-1) --->FPACC2 *
JSR  FLTSUB
JSR  SALVA5      * FPACC1--> E(K) - E(K-1) --->$DF33 - $DF37 *
JSR  LIMPA
LDD  #$1E        * 1/Ta *
STD  $DF02
JSR  SINT2FLT
JSR  SALVA      *1/TA --> FPACC2 *
JSR  CARREGA4    * E(K) - E(K-1) --> FPACC1 *
JSR  FLTMUL
JSR  SALVA6      * (E(K) - E(K-1) X 1/TA) -->$DF38 -$DF3C *
JSR  SALVA      * (E(K) - E(K-1) X 1/TA) --> FPACC2 *
JSR  LIMPA
LDD  KD
STD  $DF02
JSR  SINT2FLT
JSR  CARREGA5    * (E(K) - E(K-1)) X 1/TA --> FPACC2 *
JSR  FLTMUL
JSR  CARREGA6    * PI ---> FPACC2 *
JSR  FLTADD      *KDX(E(K)-E(K-1))X1/TA)+PI -->FPACC1 *
LDX  $DF04
CPX  #$FF
BNE  SIGA1
JSR  TIME0
LDX  #$01
STX  N
CLR  RELOG
JMP  LOOP0
SIGA1 JSR  SALVA7      * INTEGRAL -->INTEG_ANT *
JSR  SALVA8      * E(K) --> E(K-1) *
JSR  FLT2INT
LDD  $DF02
JSR  DESLOCAMENTO
JSR  DESLOCAMENTO
STD  N
JSR  TIME0
CLR  RELOG

```

```
JMP LOOP0
SWI * FIM DO PID *
```

```
* *****
* * FIM DO PROGRAMA PRINCIPAL *
* *****
```

```
* *****
* * PROCEDIMENTOS DE INICIALIZACAO DO SISTEMA *
* *****
```

```
INICIALIZACAO1  LDD #$09    * { C = 1,421 * 32D } *
                 STD INCC    * DEFINE O PASSO DE ATUALIZACAO DA RAMPA *
                 LDD #$1D
                 STD KP      * ( GANHO * 32D ) *
                 LDD #$1
                 STD KI
                 LDD #$76
                 STD KD
                 LDAA #$FF
                 STAA N      * DEFINE O PERIODO DO SINAL PWM --> N = 255D *
                 LDD #$00
                 STD N
                 LDD #$0000
                 STD RAMPA   * VALOR INICIAL DA RAMPA --> RAMPA=0 *
                 STAA RELOG  * ZERA RELOGIO - TEMPORIZADOR --> RELOG = 0 *
                 STD R_ATL
                 LDX #$DF00
                 LDD #0000
PILHALIMPA      STD 0,X
                 INX
                 INX
                 CPX #$DF42
                 BNE PILHALIMPA
                 RTS
```

```
* *****
* * ESPERA PULSO PARA DAR INICIO AO PROCESSO *
* *****
```

```
INICIALIZACAO2  LDAA #$50
                 STAA PACTL  * HABILITA ACUMULADOR DE PULSOS *
LOOP1           LDAA TFLG2
                 BITA #$10
                 BEQ LOOP1  * ESPERA A CHEGADA DO PULSO *
                 STAA TFLG2 * ZERA FLAG DE SINALIZACAO *
                 RTS
```

```
* *****
* * GERA NIVEL ALTO DO SINAL PWM, ATRAVES *
* * DO PINO PA3 --> PA3 = 1 *
* *****
```

```
TIME1      LDAA #$08
           STAA PORTA * GERA NIVEL ALTO DO SINAL PWM --> PA3 = 1 *
LOOP2      BSR TIME0 * CONTA PULSOS DO RELOGIO *
           LDD N
           CMPB RELOG
           BLS LOOP3 * ( N - RELOGIO ) <= 0 *
           JMP LOOP2
LOOP3      RTS
```

```
* *****
* * GERA NIVEL BAIXO DO SINAL PWM, ATRAVES *
* * DO PINO PA3 --> PA3 = 0 *
* *****
```

```
TIME2      LDAA #$00
           STAA PORTA * GERA NIVEL BAIXO DO SINAL PWM -->PA3 = 0 *
LOOP4      BSR TIME0 * CONTA PULSOS DO RELOGIO *
           LDD #$FE
           CMPB RELOG
           BNE LOOP4 * ( ( N - 1 ) - RELOGIO ) > 0 *
           RTS
```

```
* *****
* * ESPERA A CHEGADA DE PULSOS *
* *****
```

```
TIME0      LDAA TFLG2
           BITA #$10
           BEQ TIME0 * ESPERA A CHEGADA DE PULSO *
           STAA TFLG2 * ZERA FLAG DE SINALIZACAO *
           INC RELOG
           RTS
```

```
* *****
* * LER CONVERSOR A/D *
* *****
```

```
READ_CONVERSOR LDAA #$07 * SELECIONA CANAL PE7 DO CONVERSOR A/D *
                STAA ADCTL * INICIALIZA CONVERSAO *
```

```

LOOP5          LDAA ADCTL
                BPL LOOP5 * ESPERA FINAL DE CONVERSAO *
                RTS
    
```

```

* *****
* * ATUALIZA RAMPA DE ENTRADA E TESTA SEU LIMITE *
* * SUPERIOR *
* *****
    
```

```

RAMPA0         LDD RAMPA
                ADDD INCC * ATUALIZA RAMPA *
                STD R_ATL
                LDX R_FIAL
                CPX R_ATL
                BLS LOOP6 * ( RAMPA FINAL - RAMPA ATUAL ) <= 0 *
                STD RAMPA * RAMPA = RAMPA ATUAL *
                RTS
LOOP6          STX RAMPA * RAMPA = RAMPA FINAL *
                RTS
    
```

```

* *****
* * DESLOCAMENTO LOGICO DE 5 CASAS PARA A DIREITA *
* * NA VARIABEL AUX1 ( AUX / 32D ) *
* *****
    
```

```

DESLOCAMENTO   LSRD
                LSRD
                LSRD
                LSRD
                LSRD
                RTS
    
```

```

* *****
* * DESLOCAMENTO LOGICO DE 6 CASAS PARA A DIREITA *
* * NA VARIABEL TEMP ( TEMP / 64D ) *
* *****
    
```

```

DESLOCAMENTO01 LSRD
                LSRD
                LSRD
                LSRD
                LSRD
                LSRD
                RTS
    
```

```
*****
** LIMPA OS 2 BYTES MAIS SIGNIFICATIVO DE FPACC1 E O DE SINAL **
*****
```

```
LIMPA PSHX
      LDX #0000
      STX $DF00
      LDAA #$00
      STAA $DF04
      PULX
      RTS
```

```
*****
** SALVAR OPERANDOS **
*****
```

```
SALVA PSHX
      LDX #$DF00
      LDY #$DF05
LOOP8 LDAA 0,X
      STAA 0,Y
      INX
      INY
      CPX #$DF05
      BNE LOOP8
      PULX
      RTS
```

```
*****
* E(K) = RAMPA - RESULT A/D -->$DF10 - $DF14 *
*****
```

```
SALVA0 PSHX
      LDX #$DF00
      LDY #$DF10
LOOP9 LDAA 0,X
      STAA 0,Y
      INX
      INY
      CPX #$DF05
      BNE LOOP9
      PULX
      RTS
```

```
*****
* KP * E(K) ----> $DF1A - $DF1E *
*****
```

```
SALVA1    PSHX
          LDX  #$DF00
          LDY  #$DF1A
LOOP10    LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPX  #$DF05
          BNE  LOOP10
          PULX
          RTS
```

```
*****
* E(K) ---> PACC1 *
*****
```

```
CARREGA0  PSHX
          LDX  #$DF10
          LDY  #$DF00
LOOP11    LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPY  #$DF05
          BNE  LOOP11
          PULX
          RTS
```

```
*****
* E(K-1) ----> PACC2 *
*****
```

```
CARREGA1  PSHX
          LDX  #$DF15
          LDY  #$DF05
LOOP12    LDAA 0,X
          STAA 0,Y
          INX
          INY
          CPY  #$DF10
          BNE  LOOP12
          PULX
          RTS
```

```
*****
* E(K)+E(K-1) ---> $DF1F - $DF23      *
*****
```

```
SALVA2      PSHX
             LDX #$DF00
             LDY #$DF1F
LOOP13      LDAA 0,X
             STAA 0,Y
             INX
             INY
             CPX #$DF05
             BNE LOOP13
             PULX
             RTS
```

```
*****
* INTEG_ANT ---> PACC2      *
*****
```

```
CARREGA2    PSHX
             LDX #$DF24
             LDY #$DF05
LOOP14      LDAA 0,X
             STAA 0,Y
             INX
             INY
             CPY #$DF10
             BNE LOOP14
             PULX
             RTS
```

```
*****
* KP * E(K) + INTEGRAL --->$DF2E - $DF32      *
*****
```

```
SALVA4      PSHX
             LDX #$DF00
             LDY #$DF2E
LOOP15      LDAA 0,X
             STAA 0,Y
             INX
             INY
             CPX #$DF05
             BNE LOOP15
             PULX
             RTS
```



```
*****
* E(K)+E(K-1) + INTEG_ANT ----> $DF29 - $DF2D *
*****
```

```
SALVA3      PSHX
            LDX #$DF00
            LDY #$DF29
LOOP16      LDAA 0,X
            STAA 0,Y
            INX
            INY
            CPX #$DF05
            BNE LOOP16
            PULX
            RTS
```

```
*****
* KD * E(K) ---> FPACC2 *
*****
```

```
CARREGA3   PSHX
            LDX #$DF1A
            LDY #$DF05
LOOP17      LDAA 0,X
            STAA 0,Y
            INX
            INY
            CPX #$DF1F
            BNE LOOP17
            PULX
            RTS
```

```
*****
* INTEGRAL ---> INTEG_ANT *
*****
```

```
SALVA7      PSHX
            LDX #$DF29
            LDY #$DF24
LOOP18      LDAA 0,X
            STAA 0,Y
            INX
            INY
            CPX #$DF2E
            BNE LOOP18
            PULX
            RTS
```

 * E(K) ---> E(K-1) *

```
SALVA8      PSHX
            LDX  #$DF10
            LDY  #$DF15
LOOP19      LDAA 0,X
            STAA 0,Y
            INX
            INY
            CPX  #$DF15
            BNE  LOOP19
            PULX
            RTS
```

 * E(K) - E(K-1) ---> \$DF33 - \$DF37 *

```
SALVA5      PSHX
            LDX  #$DF00
            LDY  #$DF33
LOOP20      LDAA 0,X
            STAA 0,Y
            INX
            INY
            CPX  #$DF05
            BNE  LOOP20
            PULX
            RTS
```

 * E(K) - E(K-1) ---> FPACC1 *

```
CARREGA4    PSHX
            LDX  #$DF33
            LDY  #$DF00
LOOP21      LDAA 0,X
            STAA 0,Y
            INX
            INY
            CPX  #$DF38
            BNE  LOOP21
            PULX
            RTS
```

```
*****
* ( E(K) - E(K-1) ) X 1/TA ---> $DF38 - $DF3C *
*****
```

```
SALVA6      PSHX
            LDX  #$DF00
            LDY  #$DF38
LOOP22      LDAA 0,X
            STAA 0,Y
            INX
            INY
            CPX  #$DF05
            BNE  LOOP22
            PULX
            RTS
```

```
*****
* ( E(K) - E(K-1) ) X 1/TA ---> FPACC2 *
*****
```

```
CARREGA5    PSHX
            LDX  #$DF38
            LDY  #$DF05
LOOP23      LDAA 0,X
            STAA 0,Y
            INX
            INY
            CPX  #$DF3D
            BNE  LOOP23
            PULX
            RTS
```

```
*****
*          PI ---> FPACC2          *
*****
```

```
CARREGA6    PSHX
            LDX  #$DF2E
            LDY  #$DF05
LOOP24      LDAA 0,X
            STAA 0,Y
            INX
            INY
            CPX  #$DF33
            BNE  LOOP24
            PULX
            RTS
```

FIM DO PID

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Van Vlack, Lawrence Hall - **Princípios de Ciências dos Materiais**, São Paulo, (1970).
- [2] - Giolito, I. - **Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial**, Instituto de Química da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1974.
- [3] - Mackenzie, R.C. , **The Differential Thermal Investigation of Clays**, Mineralogical Socite, London, (1959).
- [4] - Santos, P. de S., **Tecnologia de Argilas**, Vol. 1 - fundamentos, Editora Edgard Blucher LTDA. Editora da Universidade de São Paulo - S. P. (1975).
- [5] - Oliveira. A . , Deep , G. S. , Freire , R.C.S. - **Desenvolvimento de Instrumento para Análise Térmica Diferencial usando Microcontrolador**, UFPB - Campina Grande - PB.
- [6] - West, A R., **Solid State Chemistry and its Applications**, John Wiley & Sons (ed.), New York (1984).
- [7] - **Thermal Analyst 2000**; Operator's Manual- version 8.9, TA Instruments,Inc. - October 1993.
- [8] - Welcher, F.J., **Standard Methods of Chemical Analysis**; D. Van Nostrand Company, Inc. (ed.), New York (1966).
- [9] - Wendlandt, W.W. e Gallagher, P.K., **Thermal Characterization of Polymeric Materials**, Academic Press, Inc. (ed.), New York (1981).
- [10] - Grim, R.E. e Roland, R.A., **Diferential Thermal Analylis of Clays and Others Hydrous Materials**, Amer. Miner. 27, 746 (1942).
- [11] - Collins, Edward A. - **Experiments in Polimer Science**, New York, (1973).

[12] - Zacon , A , Dweck, J. et all. **Protótipo de Aparelho de Análise Térmica Diferencial usando Forno Elétrico com Elementos de Carbetto de Silício**, Anais do 36º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 7 a 10 de julho de 1992, Caxambú - MG, PP. 749 a 756.

[13] - Ogata, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. Editora Prentice Hall do Brasil. Rio de Janeiro - R.J. 1993.

[14] -Helett Packard Company, HP3457A Multimeter, Operation Manual.

[15] - Zandonadi, A. R., Santos, P.S. - **Operação e calibração do aparelho de análise térmica diferencial**, Instituto de pesquisas tecnológicas, São Paulo - S.P. 1975.

[16] - Motorola, **M68HC11 Reference Manual**, USA: Motorola INC,1990.

[17] - Motorola, **MC68HC11A8 - HCMOS Single-Chip Microcontroller** - Advance Information - Motorola INC, USA, 1988.

[18] - Peatman, J.B. **Design With Microcontrollers**, Editora McGraw-Hill, New York, 1988.

[19] - Motorola, **M68HC11EVB Evaluation Board User's Manual**, USA : Motorola, 1996.