

Universidade Federal do Maranhão
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Eletricidade

*Plataforma de Testes de Algoritmos de
Controle para Sistemas em Tempo Real*

Pedro Turibe Costa Filho

São Luís
2006

Universidade Federal do Maranhão
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Eletricidade

*Plataforma de Testes de Algoritmos de
Controle para Sistemas em Tempo Real*

Pedro Turibe Costa Filho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**São Luís
2006**

Costa Filho, Pedro Turibe

Plataforma de Testes de Algoritmos de Controle para Sistemas em Tempo Real / Pedro Turibe Costa Filho. - São Luís, 2006.

104f.:il.

Dissertação (Mestrado) Pós Graduação em Engenharia de Eletricidade) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, 2006.

Orientador: **Prof. João Viana da Fonseca Neto, Dr.**

1. Controle em Tempo Real 2. Identificação de Sistemas 3. Micro-controladores 4. Controle de Velocidade 5. Controle de Temperatura 6. Controlador PID ótimo. I.Título.

CDU 681.5.015.24

Plataforma de Testes de Algoritmos de Controle para Sistemas em Tempo Real

Pedro Turibe Costa Filho

Submetida em 31/10/2006

BANCA EXAMINADORA

Prof. João Viana da Fonseca Neto

Dr. em Engenharia Elétrica
Orientador

Prof. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda

Dr. em Engenharia Elétrica
Examinador Interno

Prof. Raimundo Silvério Freire

Dr. em Engenharia Elétrica
Examinador Externo

A Deus, fonte da vida.
Aos meus pais Pedro e Antonia, pelo incentivo e carinho constantes.
Aos amigos, pelo apoio e companheirismo.

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração desta dissertação de mestrado, em especial, ao Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto, pelo incentivo constante e pela orientação segura. Aos amigos João Inácio, Ivanildo Abreu, Joaquim, Patrícia e a todos os colegas pela boa convivência durante o curso de Pós-graduação.

RESUMO

Apresenta-se uma metodologia para o projeto de uma plataforma para avaliar o desempenho de algoritmos de controle em tempo real. O sistema é organizado em partes estrutural e funcional; a estrutural é constituída pelos elementos de *hardware* que são as plantas, sensores, atuadores e controladores; a parte funcional é constituída pelos algoritmos para o gerenciamento dos recursos da plataforma e para controle de sistemas dinâmicos. A plataforma é dedicada ao controle de velocidade de um motor de corrente contínua e controle de temperatura de um forno elétrico, estas plantas são utilizadas para o desenvolvimento de métodos e verificação de aplicações de controle em tempo real, estimação de parâmetros e sintonia de ganhos dos controladores. A plataforma é utilizada para o levantamento dos parâmetros do motor e forno. Os modelos das plantas são utilizados para o projeto de controladores do tipo PID que são sintonizados por métodos de otimização.

Palavras-chave: 1. Controle em Tempo Real 2. Identificação de Sistemas 3. Microcontroladores 4. Controle de Velocidade 5. Controle de Temperatura 6. Controlador PID Ótimo.

ABSTRACT

The conception, design and synthesis of a platform to evaluate the performance of the in real time control algorithms is the main focuses of this Master Thesis. For conception purpose, the platform is classified in structural and functional parts, the structural one is composed of *the hardware* that are sensors, actuators, controllers and related devices. The functional part is formed by algorithms to manager the platform resources and real time control strategies. The platform is dedicated to the speed control of a direct current motor and the temperature control of an electric furnace. These plants are used to develop methods for real time control, parameter estimation and controller tuning. The parameter estimation of the motor and furnace is performed in the platform, the obtained models are used to design the PID controller optimal gains.

Keyword: 1. Real Time Control 2. System Identification 3. Microcontrollers 4. DC motor. 5. Temperature Control 6. Optimal PID control.

Lista de Tabelas

4.1	Relação entre tensão e ângulo de disparo dos tiristores	43
5.1	Parâmetros do controlador PID - Motor CC	50
5.2	Temperaturas do forno para tensão de 180 volts	53
5.3	Resultados experimentais dos valores de K , T e τ	55
5.4	Parâmetros do controlador PID - Forno	56
C.1	Temperaturas do forno para tensão de 20 volts	77
C.2	Temperaturas do forno para tensão de 40 volts	80
C.3	Temperaturas do forno para tensão de 60 volts	82
C.4	Temperaturas do forno para tensão de 80 volts	84
C.5	Temperaturas do forno para tensão de 100 volts	86
C.6	Temperaturas do forno para tensão de 120 volts	88
C.7	Temperaturas do forno para tensão de 140 volts	90
C.8	Temperaturas do forno para tensão de 160 volts	92

Lista de Figuras

2.1	Plantas e Componentes da Plataforma para Controle Digital. . . .	15
2.2	Diagrama em blocos da arquitetura da plataforma.	16
2.3	Diagramas de Blocos do Sistema e Controlador em Malha Fechada.	20
3.1	Planta 1 - grupo motor-gerador	24
3.2	Planta 2 - forno elétrico	24
3.3	Sistema de controle do motor CC	26
3.4	Sistema de Controle do Forno Elétrico.	26
3.5	Esquema do atuador para o motor CC.	31
3.6	Fluxograma de inicialização/escolha.	34
3.7	Diagrama de transição de estados para o motor.	35
3.8	Diagrama de transição de estados para o forno.	35
3.9	Fluxograma de concorrência de processos.	36
3.10	Diagramas de transição de estados na seção crítica.	37
3.11	Fluxograma de limite de tempo do algoritmo de controle.	38
4.1	Sistema de controle da velocidade do motor CC.	41
4.2	Circuito de sincronismo para o atuador do motor CC.	42
4.3	Sistema de controle do forno elétrico.	44
4.4	Interface gráfica da plataforma.	45
5.1	Velocidade no Eixo do Rotor Motor CC.	49
5.2	Resposta ao degrau: (1)PID não otimizados(2) otimizados.	50
5.3	Esboço do Método das Áreas para Estimação de Parâmetros da do Forno.	52
5.4	Curva: temperatura do forno para a tensão de 180 volts.	54
5.5	Resposta ao degrau: (1)PID não otimizados(2) otimizados.	56

A.1	Circuito Equivalente de Motor de CC - Controle pela Armadura. .	62
A.2	Diagrama do Forno Elétrico.	70
A.3	Esboço do Método das Áreas para Estimação de Parâmetros da do Forno.	71
B.1	Sensor para o Sistema de Aquisição de Dados - Motor CC.	73
B.2	Sensor de Temperatura para o Forno Elétrico.	74
B.3	Características Elétricas Sensor de Temperatura.	74
B.4	Diagrama Esquemático do Controlador PIC16F877.	75
B.5	Pinagem do Conversor Digital-Analógico.	76
C.1	Curva: temperatura do forno para a tensão de 20 volts.	78
C.2	Curva: temperatura do forno para a tensão de 40 volts.	81
C.3	Curva: temperatura do forno para a tensão de 60 volts.	83
C.4	Curva: temperatura do forno para a tensão de 60 volts.	85
C.5	Curva: temperatura do forno para a tensão de 100 volts.	87
C.6	Curva: temperatura do forno para a tensão de 120 volts.	89
C.7	Curva: temperatura do forno para a tensão de 140 volts.	91
C.8	Curva: temperatura do forno para a tensão de 160 volts.	93

Lista de Abreviaturas e Siglas

CC	Corrente Contínua
Ganho DC	Amplitude da Função de transferência
PID	Proporcional, integral e diferencial
SCTR	Sistemas de Controle em Tempo Real
SISO	Sistemas com única entrada e uma única saída

Sumário

1	Introdução	8
1.1	Objetivos	9
1.1.1	Geral	9
1.1.2	Específico	9
1.2	Contribuição	9
1.3	Motivação	10
1.4	Justificativa	10
1.5	Metodologia	10
1.6	Organização da Dissertação	11
2	Plataforma de Controle	13
2.1	Arquitetura da Plataforma	14
2.1.1	Princípio de Funcionamento	14
2.1.2	O Sistema em Tempo Real	16
2.2	Projeto de Controladores	18
2.2.1	Controlador PID Discreto	19
2.3	Sintonia de Controladores PID	20
3	Hardware e Software de Tempo Real	22
3.1	Sistemas Dinâmicos - Plantas	24
3.2	Hardware em Tempo Real	27
3.2.1	Controlador Digital	27
3.2.2	Conversores A/D e D/A	29
3.2.3	Sensores	30
3.2.4	Atuadores	30
3.3	Algoritmo de controle em tempo real	31

3.4	Software para Sistemas em Tempo real	32
3.4.1	Princípio de Concorrência	33
3.4.2	Tempo de execução	35
4	Projeto da Plataforma-SCTR	39
4.1	Circuitos do Controle de Velocidade	40
4.2	Circuitos do controle de temperatura	43
4.2.1	A interface com o usuário	44
5	Identificação e Controle das Plantas	46
5.1	Modelagem e Controle do Motor CC	47
5.1.1	Levantamento do Modelo	47
5.1.2	Projeto do Controlador	49
5.2	Modelagem e Controle do Forno	50
5.2.1	Levantamento do Modelo	52
5.2.2	Determinação dos Parâmetros do Forno	54
5.2.3	Projeto do Controlador	55
6	Conclusão	57
6.1	Trabalhos Futuros	58
A	Identificação das Plantas	59
A.1	Modelo Discreto	59
A.1.1	Modelo de 1ª Ordem	59
A.1.2	Estimação dos Parâmetros Φ e Γ	61
A.2	Modelo do Grupo Gerador	62
A.2.1	Modelo para Identificação	63
A.2.2	Determinação da Região de Operação	66
A.2.3	Cálculo de K_g e K_a	67
A.2.4	Cálculo de R_a , L_a , J e f	68
A.3	Modelo do Forno Elétrico	70
B	O Hardware da Plataforma	72
B.1	Sensores	72
B.1.1	Sensor de Movimento	72

B.1.2	Sensor de Temperatura	73
B.2	Diagrama do PIC16F877	74
B.3	Conversor Digital Analógico	75
C	Parâmetros Experimentais do Forno	77
C.1	Cálculos para tensão de 20 volts	77
C.2	Cálculos para tensão de 40 volts	79
C.3	Resultado para tensão de 60 volts	81
C.4	Resultado para tensão de 80 volts	84
C.5	Resultado para tensão de 100 volts	86
C.6	Resultado para tensão de 120 volts	88
C.7	Resultado para tensão de 140 volts	90
C.8	Resultado para tensão de 160 volts	92
	Referências Bibliográficas	94

CAPÍTULO 1

Introdução

Apresenta-se o desenvolvimento de uma plataforma de testes de algoritmos para sistema de controle em tempo real usando um controlador digital. A finalidade da plataforma é testar e melhorar algoritmos para o controle de plantas de diferentes características. Esse sistema deverá monitorar e controlar por meio de sensores e atuadores os dispositivos periféricos conectados. O algoritmo a ser testado deve possuir características para as aplicações em tempo real e deve maximizar o uso do controlador a fim de obter controles eficientes. Nos três parágrafos salienta-se a importância da construção de uma plataforma para desenvolvimento de pesquisa e desenvolvimento de sistemas de controladores digitais.

A tecnologia digital atualmente é bastante difundida e está presente nas mais diversas atividades desenvolvidas pela sociedade contemporânea, sob a forma de produtos e serviços. As aplicações dessa tecnologia são amplas, estende-se desde o ramo das telecomunicações aos produtos de entretenimentos. Uma tendência consolidada nas últimas décadas, sendo que não se pode falar em avanço tecnológico sem associá-lo à tecnologia digital.

Para o usuário em geral, essa tecnologia se traduz principalmente na forma de produtos, como por exemplo os computadores, celulares etc. Para a engenharia significa diversas aplicações utilizando processadores e controladores digitais associados a algoritmos, constituindo os componentes essenciais dos sistemas embarcados. Os processadores e controladores desde que foram inventados tiveram suas características melhoradas, incorporaram novas estruturas e funções, o que possibilitou um aumento substancial na capacidade de processamento de informação.

Os avanços tecnológicos fizeram com que esses dispositivos executassem em menor tempo tarefas e programas. O aumento na capacidade de armazenar e as melhorias em processar dados são fatores decisivos para a utilização destes dispositivos eletrônicos em projetos para aplicações em tempo real.

As informações descritas nos parágrafos que são baseadas em observações ao longo do tempo, nos conduz ao estudo e ao desenvolvimento de laboratórios voltados para o emprego da tecnologia digital. Estes laboratórios visam apoiar os cursos em teoria e engenharia de controle, (Horacek 2000) e (Steen 1991). Estes laboratórios exploraram modelos em escala reduzida, ambientes de software e hardware para projeto de controladores digitais, hardware e software de tempo real.

Nas próximas seções apresenta-se os objetivos, motivações, justificativas e o conteúdo dos Capítulos e Apêndices.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Pesquisar e desenvolver uma arquitetura digital flexível para explorar as aplicações de Controladores Adaptativos e Ótimos.

1.1.2 Específico

Explorar os aspectos práticos de Controladores Ótimo do tipo regulador linear quadrático e da família PID, em arquitetura DspPIC.

1.2 Contribuição

Disponibilizar uma plataforma para investigar aspectos experimentais *indoor* de controladores digitais sob a égide de controle ótimo e adaptativos.

1.3 Motivação

Verificar o desempenho de controladores e algoritmos, construindo um sistema que incorpore os conceitos da teoria de controle digital, nos motivou a propor a plataforma na qual pode-se aplicar de forma prática os fundamentos teóricos de um projeto de controle. Evidenciar na prática o conhecimento e as informações adquiridos no curso de pós-graduação. Este projeto reúne diversos conteúdo disciplinares, pois utiliza em conjunto conhecimento em teoria de máquinas elétricas, eletrônica básica e de potência, circuitos digitais, microprocessadores e teoria de controle moderno.

1.4 Justificativa

A necessidade de construir um sistema de controle digital, sobre o qual se pretende desenvolver atividades de pesquisa e ensino, conduziram ao projeto e implementação da plataforma. O projeto também deverá servir de ponto de partida para outros de natureza semelhante desenvolvidos na área de controle do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão-UFMA.

1.5 Metodologia

Inicia-se por uma pesquisa bibliográfica sobre plataformas em tempo real para o processamento de algoritmos de controle (Sintotski *et al.* 2001) e (J.Spanos 2002) analisa-se as referências bibliográficas, os artigos e outras publicações sobre o assunto, para tomar conhecimento dos trabalhos desenvolvidos por estudantes, pesquisadores e instituições de pesquisa para sobretudo destacar as diferenças existentes entre os trabalhos apresentados e o que se propõe desenvolver.

Em seguida propõe-se a arquitetura do sistema, apresenta-se os componentes e os blocos funcionais da plataforma descreve-se cada um deles e as relações existentes entre si. Simula e/ou analisa-se o funcionamento de cada bloco funcional. Para realizar essa tarefa faz-se uso de recursos matemáticos, computacionais e experimentais. Paralelamente ao circuito físico, um algoritmo é desenvolvido e testado, assim pode-se detectar os obstáculos técnicos e apresentar soluções para eles e outros entraves que poderão surgir durante o desenvolvimento do projeto.

Após fazer as montagens dos circuitos, testes de desempenho e eficiência deverão ser realizados para analisar o funcionamento do sistema. Por outro lado, se houver necessidade, ajustes deverão ser realizados para obter melhorias. Os testes de desempenho do sistema de controle são avaliados sob o ponto de vista de modelos e de circuitos.

1.6 Organização da Dissertação

A dissertação é organizada em Capítulos e Apêndices que apresentam a concepção da plataforma, o projeto de controladores do tipo PID e os testes de validação da plataforma. Como também, as conclusões, comentários e propostas para o desenvolvimento de pesquisa na plataforma para testes de algoritmos em tempo real.

No Capítulo 2 caracteriza-se a plataforma de teste de algoritmo de controle em tempo real. Enfatizando que o sistema é representado por meio de um modelo de processo e do sistema de controle em tempo real. Especifica-se que na plataforma, cada planta é denominada processo e que o sistema de controle é constituído pelo *hardware* e o *software* em tempo real para o controle de um *grupo motor-gerador* e de um forno elétrico que são caracterizados por seus modelos matemáticos. Apresenta-se a estrutura dos controladores PID e discute-se os métodos de sintonia utilizados para o ajustes dos ganhos. As características técnicas dos principais elementos de *hardware* da plataforma, tais como: sensores de movimento e temperatura, conversor digital analógico e o diagrama esquemático do controlador, são apresentados no Apêndice B.

No Capítulo 3 apresenta-se o projeto do sistema de controle para o gerenciamento das plantas. Para alcançar o objetivo pretendido caracteriza-se o funcionamento de cada componente da plataforma. A plataforma é constituída por diversas unidades funcionais e cada uma delas opera de forma adequada, confiável e em sincronismo para atender as especificações desejadas. O projeto incorpora métodos e técnicas de sistema em tempo real e embarcados.

No Capítulo 4 estabelece-se as relações entre os diversos componentes físicos da plataforma que estão interligados. O funcionamento dos componentes está relacionado ao modo como o algoritmo executa sua ação de controle. Para explicar

as funções desempenhadas e fazer uma análise no sentido do controle moderno, deve-se dispor de equações matemáticas ou modelos que representem o sistema e sobre os quais se possa aplicar técnicas apropriadas, com a finalidade de verificar estabilidade, desempenho e segurança do sistema, características que entende-se essenciais para a viabilidade da plataforma.

No Capítulo 5 apresentam-se os experimentos para projeto e síntese dos modelos matemáticos do motor de CC e do forno elétrico. Os modelos são utilizados para o projeto dos controladores PID, os ganhos do PID são ajustados por meio de técnicas de otimização. As técnicas utilizadas para a identificação das plantas são descritas no Apêndice A. Este Capítulo é complementado com a apresentação dos parâmetros do modelo do forno para vários pontos de operação no Apêndice C.

Finalmente, apresenta-se uma conclusão no contexto da flexibilidade da utilização da plataforma para desenvolvimento e testes de controladores utilizando técnicas de Otimização. Discute-se alguns trabalhos futuros no sentido de promover melhorias na plataforma e verificar a metodologia baseada em redes neurais.

CAPÍTULO 2

Plataforma de Controle

Neste capítulo caracteriza-se a plataforma de teste de algoritmo de controle em tempo real. Em uma primeira camada de abstração para o projeto de sistemas de controle, o sistema é representado por meio de um modelo de processo e do sistema de controle em tempo real. O processo será chamado de planta e o sistema de controle é constituído pelo *Hardware e o Software* em tempo real para o controle de um *grupo motor-gerador* e de um forno elétrico que serão caracterizados por suas leis de controle.

Para que o controle seja eficaz é necessário conhecer a variável ou as variáveis a serem controladas e sob as quais possa o controlador atuar de forma consistente. No caso do grupo motor-gerador a variável de interesse, é a velocidade rotacional no eixo do motor de c.c. Para o forno elétrico, a variável é a temperatura interna. Os modelos das plantas devem ser capazes de expressar relações precisas entre as variáveis independentes e as variáveis dependentes, dessa forma, o controlador receberá informações sobre essas variáveis e através de um algoritmo estabelece a forma de controle. Enfatiza-se ainda, os fundamentos teóricos e práticos sobre os quais se assentam o funcionamento da plataforma.

Este capítulo é organizado em secções que abordam tópicos relativos a sistemas em tempo real e projeto de controladores PID. Inicialmente, enfoca-se a arquitetura da plataforma sob os aspectos de seu funcionamento e de sistemas em tempo real. Apresenta-se a base teórica para o projeto e discretização de controladores da família PID. Finalmente, apresenta-se o método de otimização utilizado para ajustar os ganhos dos controladores. Estes controladores, em uma primeira

instância, são utilizados para avaliar o desempenho da plataforma e, em uma segunda instância, para avaliar o desempenho do método/técnica de sintonia.

2.1 Arquitetura da Plataforma

Ao iniciar-se o estudo e projeto da plataforma de testes de algoritmos de controle para sistemas em tempo real, faz-se algumas considerações necessárias para que se tenha o pleno entendimento dos fundamentos técnicos e científicos utilizados no seu desenvolvimento, os quais são representados por princípios, critérios, análise e métodos da teoria de controle.

Não há um procedimento que torne fácil a tarefa de elaboração e implementação de um sistema de controle do tipo que se propõe neste trabalho. Dentre os obstáculos, têm-se a dificuldade em estabelecer uma metodologia capaz de reunir em um só projeto conteúdos multidisciplinares. Uma outra dificuldade, especificamente da codificação do algoritmo de controle, não se dispõe, por exemplo, de uma linguagem de programação que atenda aos diversos requisitos para a aplicação em tempo real (Sintotski *et al.* 2001), apesar de todo o desenvolvimento alcançado nessa área nos últimos anos. Na verdade, usa-se a experiência e o resultado bem sucedido de outras áreas do conhecimento, como por exemplo, da ciência da computação, para estabelecer uma organização. Assim, a estruturação é bastante útil, na medida em que possibilita uma abordagem *top-down* para organizar o projeto da plataforma. Dessa abordagem *top-down* extrai-se o seguinte procedimento, define-se o problema, em seguida ele é dividido em partes menores, onde se pode observar com maior detalhe cada situação, a divisão encerra-se quando todos os problemas estão bem delimitados. O estudo teórico e prático deve ser acompanhado na medida do possível, de uma representação gráfica, a fim de facilitar o entendimento de cada problema nas diversas etapas de elaboração da plataforma.

2.1.1 Princípio de Funcionamento

O projeto da plataforma de teste de algoritmos se restringe ao controle de duas plantas (grupo motor-gerador e forno elétrico) observadas na Figura 2.1, por ser um sistema em tempo real, deve necessariamente atender a determinadas

restrições (velocidade de resposta aos estímulos externos, concorrência entre processos etc).

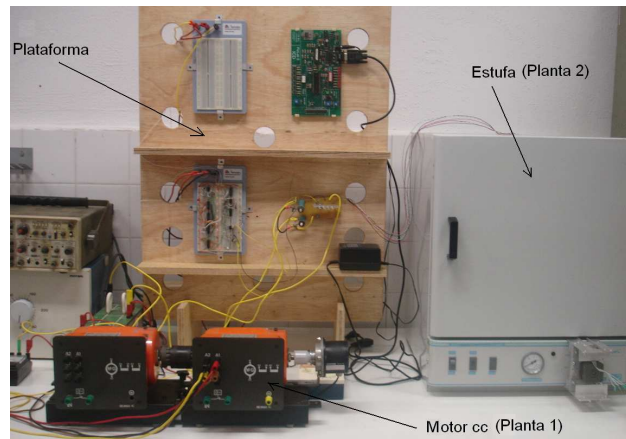


Figura 2.1: Plantas e Componentes da Plataforma para Controle Digital.

A questão a princípio, se limita a especificação de um sistema de controle para duas plantas distintas, sujeitas às características em tempo real. Sem considerar os fundamentos técnicos e científicos, o primeiro problema é a escolha das variáveis a serem controladas e sob as quais deve atuar o controlador. No caso em questão, as variáveis de interesse são a velocidade rotacional ω , no eixo do motor de c.c. do grupo motor-gerador e a temperatura t , no interior do forno elétrico. Escolhida as variáveis, deve-se optar pelo tipo de medição. Como se pretende medir diretamente as variáveis de interesse, opta-se pela medição direta, através do uso de um sensor de movimento e de temperatura, especificados através de suas folhas de dados nos apêndices B.1.1 e B.1.2.

O método de controle utilizado é o da realimentação, com o uso de um controlador PID digital, como núcleo do sistema. Quando a planta controlada sofre uma perturbação, o que significa no caso do grupo motor-gerador, uma alteração na velocidade rotacional no eixo do motor de c.c., provocada por exemplo, pela variação de carga ligada ao gerador, ou no caso do forno, pela mudança da temperatura interna provocada pela abertura de sua porta ou pela introdução de algum objeto no seu interior, essa perturbação, na forma de um sinal conveniente, tensão ou corrente, deverá ser realimentada, através de sensores, para o controlador, o qual processa o sinal de erro, que deve ser minimizado, esse sinal é processado por um controlador digital cuja lei de controle é um algoritmo PID. O sinal de controle,

após passar por um conversor D/A é introduzido num atuador que manterá o controle da planta.

2.1.2 O Sistema em Tempo Real

A plataforma de testes de algoritmos de controle para o sistema em tempo real é composta por: *hardware* e *software* em tempo real. O *hardware* - parte física do sistema - é constituído pelo controlador digital, conversores A/D, D/A, circuitos eletrônicos, atuadores, plantas controladas e outros aparatos físicos. O *software*, uma realização prática do algoritmo de controle, é implementado em linguagem *Assembler*. É utilizada a linguagem C na interface com o usuário. O algoritmo possui rotinas capazes de realizar o controle dos dispositivos periféricos conectados ao sistema. A representação da estrutura da plataforma em diagrama de blocos, é vista na Figura 2.2.

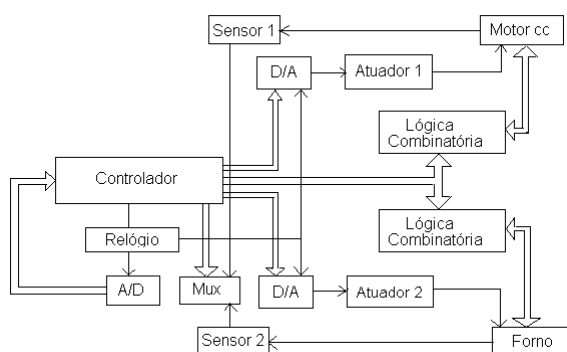


Figura 2.2: Diagrama em blocos da arquitetura da plataforma.

O parágrafo precedente especificou em linhas gerais, o funcionamento da plataforma basicamente ao nível do *hardware*, no entanto, a parte computacional, isto é, o algoritmo é imprescindível. A plataforma utiliza apenas um controlador digital para realizar o controle de duas plantas. Nesse contexto, as plantas, denominadas processos, são comutadas no tempo, através de interrupção de *hardware*, para acesso aos recursos do sistema (seção crítica), de tal maneira que se tem a impressão de que estão simultaneamente em execução. Essa transparência ao usuário só pode ser obtida se o algoritmo de controle atender aos princípios de concorrência entre processos, uma consequência direta da estrutura utilizada

no algoritmo de controle.

Pode surgir conflito entre os dois processos da plataforma (controle da velocidade do grupo motor-gerador e controle de temperatura do forno), quando competirem por recursos da seção crítica. Entende-se como seção crítica da plataforma, ao conjunto formado por dispositivos de entrada e saída de dados (I/O), memória, Unidade de Lógica e Aritmética - ULA, etc. Na plataforma, os processos necessitam acessar os recursos da seção crítica durante o curso de suas execuções. Cada processo não está ciente da existência do outro e não deve dessa forma, ser afetado pela execução mutualmente exclusiva. Assim, cada processo deve deixar o estado do recurso que ele usa inalterado.

Como não há troca de informações de competição entre os processos, na prática haverá um momento em que a execução de um processo deverá afetar a execução do outro, isto deve acontecer quando os dois processos desejarem acessar ao mesmo tempo, a seção crítica. De certa forma, um processo terá acesso ao recurso desejado enquanto o outro deverá aguardar. Porém como não há troca de informações de competição entre os processos, aquele que ficou aguardando, pode não acessar ao recurso pretendido e por via de consequência não terminar. Esse tipo de ocorrência deve ser evitada na plataforma, sobretudo porque em um sistema em tempo real esse tipo de situação pode levar o sistema a um colapso.

No caso de competição entre processos, alguns problemas de controle devem ser enfrentados. Tem-se a princípio a necessidade de *exclusão mútua*. Supor que no caso da plataforma, os dois processos requeiram acesso a um mesmo recurso, como por exemplo, ler um determinado local da memória. Durante a execução cada processo deverá solicitar esse recurso ao controlador, a leitura da posição de memória nesse caso constitui uma seção crítica. E somente um processo, em cada instante, pode ter acesso à seção crítica. Na plataforma, não se pode contar com os recurso de um sistema operacional para resolver essa situação de concorrência.

A necessidade da exclusão mútua cria dois problemas de controle adicionais. Um é o impasse (*deadlock*). Considere-se os dois processos da plataforma, representados por P1(controle de velocidade) e P2(controle de temperatura), e dois recursos críticos, R1 e R2. Supor que cada processo necessite acessar a ambos os recursos para realizar suas funções de controle. Então é possível que ocorra a seguinte situação: R1 está sendo utilizado por P2, e R2 está sendo utilizado por

P1. Cada processo está aguardando por um recurso que está sendo utilizado pelo outro. Nenhum dos processos libera aquele recurso que possui até que adquira o outro recurso que necessita para realizar sua seção crítica. Portanto, os processos estão em *deadlock*.

O segundo é a inanição (*starvation*). Supor novamente os dois processos da plataforma, P1 e P2, cada um requer acesso periódico ao recurso R. Considere a situação em que P1 está de posse de um recurso da seção crítica, e P2 esteja aguardando pela liberação desse recurso. Quando P1 deixar a seção crítica, P2 deve ter acesso a ela. Porém se P1 for mais rápido do que P2, P1 deverá novamente acessar à seção crítica e P2 continuar esperando. Se isso continuar ocorrendo continuamente, P2 deverá esperar indefinidamente pela liberação do recurso R. Neste caso diz-se que P2 está em *starvation*.

Do ponto de vista prático o sistema deve atender as exigências de um sistema em tempo real. Essas exigências refletem diretamente nas características do *hardware* e no *software*. Na plataforma usa-se um controlador digital como o núcleo do *hardware*, o controlador é robusto, flexível, rápido, suas características técnicas são especificadas na seção 3.2.1. O *software* é codificado em linguagem *assembler*. Essa linguagem possui características como segurança, legibilidade, flexibilidade, simplicidade, portabilidade e eficiência.

2.2 Projeto de Controladores

Os métodos, estruturas e procedimentos para projeto de Controladores Proporcional Integral e Diferencial (PID) são os principais enfoques desta seção. O grupo motor-gerador e o forno elétrico devem operar conforme as especificações do projetista, no caso o sistema de controle deve ter a habilidade de manter a velocidade do motor e a temperatura nos pontos de operação especificados. Os controladores devem resolver os problemas provocados com perturbações externas para as respectivas posições de referência de velocidade e de temperatura, estas tarefas são executadas pelas ações dos controladores PID.

Inicialmente apresenta-se o modelo do PID discreto que é acoplado a modelos do Motor CC e Forno Elétrico para fins de projeto dos sistemas de Controle. No Apêndice A apresenta-se os métodos utilizados para identificação das plantas que

consiste de métodos estimação para os seus parâmetros. Esta estimação tem por base métodos caixa branca, experimentos em laboratório e método dos mínimos quadrados.

2.2.1 Controlador PID Discreto

O princípio básico do esquema de controle PID é atuar sobre variáveis para manipular através de combinações próprias três ações de controle: ação proporcional (onde a ação de controle é proporcional ao sinal de erro atuante, que é a diferença entre a entrada e o sinal de realimentação), ação de controle integral (onde a ação de controle é proporcional a integral do sinal do erro atuante), e ação de controle derivativo (onde a ação de controle é proporcional à derivada do sinal do erro atuante).

Nas situações onde a maioria das plantas são controladas diretamente por um único computador digital (como em um esquema de controle no qual diversas malhas manipuladas são controladas por um único controlador digital), a maioria das malhas de controle podem ser manipuladas por um esquema de controle PID.

A ação de controle do PID em um controlador analógico é dado por

$$m(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.1)$$

sendo $e(t)$ a entrada do controlador (o sinal do erro atuante), $m(t)$ é a saída do controlador (o sinal manipulado), K é o ganho proporcional, T_i é o tempo integral (ou tempo *reset*), e T_d é o tempo derivativo (ou taxa de tempo).

Para obter a função transferência pulso para o controlador PID digital, pode-se discretizar a Equação (2.1). Aproximando o termo integral por um somatório trapezoidal e o termo derivativo pela forma diferença entre dois-pontos, obtém-se

$$m(kT) = K \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \left[\frac{e(0) + e(T)}{2} + \frac{e(T) + e(2T)}{2} + \dots \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{e((k-1)T) + e(kT)}{2} \right] + T_d \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \right\}$$

ou

$$m(kT) = K \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} + \right. \\ \left. + \frac{e(T_d)}{T} [e(kT) - e((k-1)T)] \right\} \quad (2.2)$$

após algumas manipulações matemáticas sobre a Equação (2.2), obtém-se:

$$M(z) = \left[K_p + \frac{K_i}{1 - z^{-1}} + K_D(1 - z^{-1}) \right] E(z) \quad (2.3)$$

Esta última equação é a forma discreta do controlador PID.

2.3 Sintonia de Controladores PID

O desenvolvimento do método de ajuste dos ganhos do controlador tem por base o diagrama de blocos canônico do sistema de controle e planta para fins de projeto, figura 2.3. A função de transferência associada ao diagrama de blocos,

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)H(s)} \quad (2.4)$$

sendo $R(s)$ a entrada ou referência do sistema, $G_c(s)$ é a função de transferência do controlador, $N(s)$ é o ruído ou perturbação da planta, $G(s)$ é a função de transferência da planta, $H(s)$ é a função de transferência do sensor e $C(s)$ é a saída do sistema, (Ogata 1995) e (Franklin *et al.* 1990).

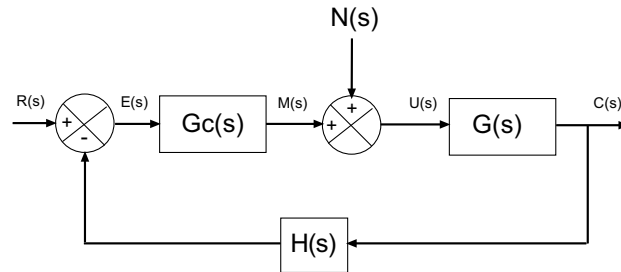


Figura 2.3: Diagramas de Blocos do Sistema e Controlador em Malha Fechada.

As funções de transferências associadas ao diagrama de blocos, $G_c(s)$ e $G(s)$ do controlador PID e das plantas são obtidas da Equação (2.3) e das Equações (A.12) e (A.38) do Apêndice A. Neste Apêndice apresenta-se os métodos experimentais utilizados para estimar os parâmetros das plantas para fins de projeto de controladores. Destaca-se, a importância da identificação do sistema dinâmico (motor e forno), considerando que o método de ajuste dos ganhos tem por base o modelo matemático para um dado ponto de operação.

O método para o sintonia dos controladores fundamenta-se na Teoria de Otimização de Sistemas para ajuste dos ganhos para o controlador PID. O nosso ajuste, isto é, a sintonia do controlador é realizada levando em consideração a minimização do erro entre o sinal de saída e o sinal de referência. A estrutura de otimização que representa a minimização proposta,

$$\min_{K_p K_i K_d} \quad \frac{1}{2} \|y_{ref} - y_s\|_2^2 \quad (2.5)$$

sa

$$K_P^{min} \leq K_P \leq K_P^{max} \quad (2.6)$$

$$K_i^{min} \leq K_i \leq K_i^{max} \quad (2.7)$$

$$K_d^{min} \leq K_d \leq K_d^{max} \quad (2.8)$$

sendo $y_{ref} = R(s)$ o sinal de referência e Y_s a saída do sistema. No caso do Motor CC e Forno a saída $Y_s = C(s)$ é obtida do diagrama em malha fechada da Figura 2.3.

Esta minimização tem por objetivo determinar os parâmetros do controlador PID, Equação (2.3), que minimiza o índice de desempenho, Equação (2.5), da estrutura de otimização, e as suas restrições, desigualdades (2.6-2.8).

CAPÍTULO 3

Hardware e Software de Tempo Real

O desenvolvimento do sistema de controle da plataforma é constituído das fases de projeto, implementação e testes. Na fase de projeto procura-se obter a melhor interação entre o *hardware* e o *software*, a fim de conseguir desempenho e robustez de operação. A fase de implementação consiste na construção da plataforma, fase esta em que o projetista tem a oportunidade de verificar a realizabilidade do seu projeto. Na fase de testes verifica-se o desempenho da plataforma em relação aos objetivos estabelecidos.

A apresentação de uma metodologia para projeto de um sistema de controle que gerencia a operação de duas plantas é o principal enfoque deste capítulo. Para se alcançar este objetivo deve-se conhecer as características e o funcionamento dos componentes da plataforma. Entenda-se que a plataforma é constituída por diversas unidades funcionais e que cada uma opera de forma adequada, confiável e em sincronismo para atender especificações desejadas. A metodologia incorpora métodos e técnicas de projeto de sistema em tempo real e embarcados.

A plataforma de testes utiliza um controlador que é programável. Os programas que ele executa segue um algoritmo implementado em linguagem *assembler*. A plataforma é um sistema em tempo real, o algoritmo apresenta características dessa natureza. O algoritmo possui rotinas com a capacidade de controlar duas plantas distintas; o grupo motor-gerador e o forno elétrico, devendo ser projetado para solucionar os problemas de concorrência entre tarefas (processos), evitando

deadlock, *starvation* e o mais importante num sistema desse tipo, fornecer resposta aos estímulos externo, num intervalo de tempo definido.

O esboço deste capítulo é como segue, primeiro descreve-se o *hardware*: sensores, controlador, conversores A/D e D/A, seguradores, atuadores e plantas. Durante o estudo dos componentes e dos circuitos da plataforma deverá ser destacado aquelas características que devem ser utilizadas no projeto e se tais características devem ser modificadas para se obter o melhor desempenho no controle das plantas. Analisa-se ainda a interação entre cada componente e o *software*, destacando os pontos críticos do sistema e as soluções necessárias. Finalmente, faz-se um estudo do algoritmo de controle e dos problemas relacionados à concorrência entre tarefas para o acesso aos recursos do sistema.

A plataforma de testes de algoritmos de controle para sistema em tempo real é composta por: *hardware* e *software* em tempo real. O *hardware* - parte física do sistema - é constituído pelo controlador digital, conversores A/D, D/A, circuitos eletrônicos, atuadores, plantas controladas e outros aparatos físicos. O *software*, uma realização prática do algoritmo de controle é implementado em linguagem *assembler* e a interface com o usuário em linguagem C. O algoritmo possui rotinas capazes de realizar o controle dos dispositivos periféricos conectados ao sistema. A representação da estrutura da plataforma, em diagrama de blocos, é vista na Figura 2.2.

Apesar de existirem diversos tipos de controladores digitais que possam ser utilizados em aplicações em tempo real, nem todos podem ser facilmente adaptados para essa finalidade. Como característica fundamental, um controlador digital deve ser capaz de executar ações rápidas de controle. Outra característica importante em um controlador usado em aplicações em tempo real é que ele possua uma estrutura modular fornecendo meios de adicionar unidades especializadas, como dispositivos de entrada e saída de dados, armazenamento, mecanismos de interrupção, enfim recursos que aumentem sua capacidade de realizar tarefas. Portanto, para que o controlador digital possa ser utilizado num projeto de sistema em tempo real ele deve atender à determinadas restrições.

3.1 Sistemas Dinâmicos - Plantas

O grupo motor-gerador e forno elétrico, figuras 3.1 e 3.2, são as plantas que fazem parte da plataforma de teste de algoritmos.

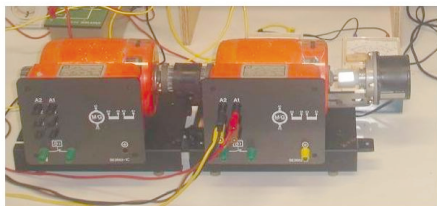


Figura 3.1: Planta 1 - grupo motor-gerador



Figura 3.2: Planta 2 - forno elétrico

Na elaboração de um sistema de controle para uma planta ou sistema, em primeiro lugar deve-se entender e representar o comportamento da planta através de um conjunto de equações capazes de descrever precisamente ou sensivelmente o seu comportamento dinâmico. As equações que representam o comportamento do sistema denomina-se modelo matemático. Os modelos podem assumir formas diferentes. Dependendo do sistema e das circunstâncias particulares, um modelo matemático pode ser mais adequado do que outro. Em problemas de controle ótimo, (Athans and Falb 1966) é vantajoso usar representações em espaço de estado. Em outras circunstâncias, a análise de resposta transitória ou de resposta de frequência de sistemas de entrada simples, saída simples, lineares e invariantes no tempo, a representação por função de transferência pode ser mais conveniente. Uma vez obtido um modelo matemático de um sistema, várias ferramentas analíticas e de computador podem ser usadas com propósitos de análise e de síntese (Ogata 1995).

A dinâmica de vários sistemas, como os mecânicos, térmicos, econômicos, elétricos, biológicos, etc., pode ser descrita em termos de equações diferenciais. As equações diferenciais podem ser obtidas utilizando as leis físicas que determinam o comportamento do sistema. Para os sistemas mecânicos as leis de Newton podem

ser utilizadas, para os sistemas elétricos pode-se utilizar as leis de Kirchhoff. Os modelos que normalmente utilizam equações diferenciais para descreverem seus comportamentos são aqueles que apresentam uma única entrada e uma única saída (SISO). Por outro lado, quando se trabalha com um sistema que possui múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), a representação em espaço de estado é mais adequada, além disso, essa representação é conveniente na implementação de algoritmos de projetos auxiliados por computador.

São dois os sistemas dinâmicos controlados na plataforma, um sistema elétrico mecânico e um sistema térmico. O sistema elétrico mecânico, é formado por um grupo motor-gerador que funciona da seguinte maneira: o gerador está ligado a cargas elétricas que são inserida no circuito de alimentação de forma aleatórias, o que provoca um aumento ou diminuição da potência fornecida pelo gerador. Dessa forma, há uma variação na intensidade de corrente consumida pelas cargas ligadas aos terminais do gerador, o aumento ou a diminuição do consumo, provoca uma queda ou aumento de tensão nos terminais de armadura do gerador, conforme o número de cargas aumente o diminua, respectivamente, provocando variação da velocidade no eixo do grupo motor-gerador. A variação de velocidade é detectada pelo sensor ligado ao motor, essa informação é enviada ao processador digital que deve processar e corrigir a velocidade tendo por base um valor de referência. Quando o processador, através do algoritmo de controle, gerar um sinal de resposta ao estímulo externo, um sinal de controle é enviado ao atuador, que em síntese é uma fonte de tensão variável (semiconversor monofásico), o circuito atua no sentido de manter constante a velocidade do motor ligado ao gerador.

Na Figura 3.3, pode-se ver o diagrama esquemático simplificado do sistema de controle do grupo motor-gerador e a Equação (3.1) representa o modelo matemático, em espaço de estado para esse sistema. A dedução completa desse modelo pode ser encontrada no apêndice A.

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt}i_a(t) \\ \frac{d}{dt}v_t(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_g}{K_t L_a} \\ \frac{K_a K_t}{J} & -\frac{f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ v_t(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} v_a(t) \quad (3.1)$$

O sistema térmico é representado por um forno elétrico, cujo sistema de controle funciona da seguinte forma: quando a porta do forno é aberta ou quando um objeto é inserido no interior do mesmo, a temperatura interna é alterada. A

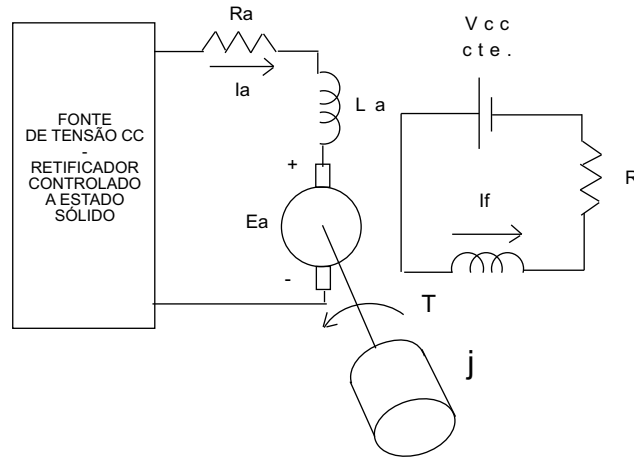


Figura 3.3: Sistema de controle do motor CC

variação de temperatura é detectada pelo sensor, que envia essa informação ao controlador. A informação processada pelo controlador é enviada ao atuador do forno. O atuador é constituído por um pequeno motor de passo, que atua diretamente no eixo do termostato do forno, provocando um aumento ou diminuição da temperatura conforme o caso. Na Figura 3.4, pode-se ver o diagrama simplificado do forno elétrico.

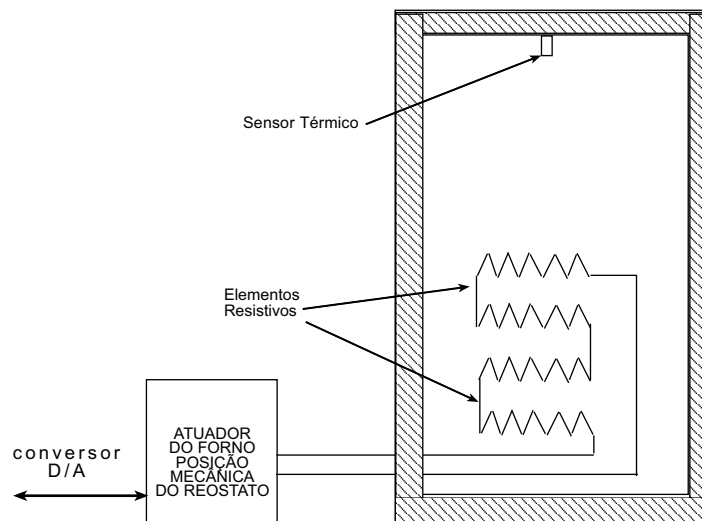


Figura 3.4: Sistema de Controle do Forno Elétrico.

A Equação (3.2) representa o modelo do forno elétrico.

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ts}}{\tau s + 1} \quad (3.2)$$

a dedução completa desse modelo é apresentada no Apêndice A.3.

3.2 Hardware em Tempo Real

Um sistema de controle em tempo real deve atender à diversas exigências que refletem diretamente no *hardware* e/ou no *software* utilizados na sua implementação. Em geral, o *hardware*, é constituído por um controlador digital, com uma ULA - Unidade de Lógica e Aritmética, memória, unidades de entrada e saída (I/O), barramento estruturado, mecanismo de interrupção, relógio em tempo real. Ainda em relação ao *hardware* temos: sensores, conversores de dados e atuadores etc. Nesta seção descreve-se cada um dos componentes do *hardware* da plataforma, destacando as principais características e funcionamento.

Inicialmente deve-se esclarecer que a palavra controlador digital, até este momento foi utilizada em sentido amplo, servindo para denominar tanto o controlador ou processador digital. Deve-se entender que qualquer controlador digital com barramento de dados de 8 bits, pode ter a CPU utilizada na plataforma, bastando para tanto fazer-se algumas modificações no programa usado para implementar o algoritmo de controle, a fim de que se possa explorar as estruturas funcionais do controlador utilizado no projeto. Pode-se afirmar que outros controladores de fabricantes como Motorola, INTEL, Texas Instruments, Philips, NEC etc, estão habilitados para uso no sistema. Porém, por questão que envolvem custo, disponibilidade, simplicidade, facilidade de manipulação, robustez entre outras características, utiliza-se nesse projeto um controlador de 8 bits da Microchips®.

3.2.1 Controlador Digital

A seguir analisa-se algumas características de *hardware* do controlador que são indispensáveis para o funcionamento da plataforma como: UCP - Unidade Central de Processamento, comprimento de dados, instruções, endereçamento, registradores, taxa de transferência de dados e interrupção.

Unidade Central de Processamento - UCP: O controlador utilizado neste trabalho é um dispositivo digital com uma arquitetura compacta, isto é, que possui embutido no próprio circuito integrado uma ULA, memória, barramento estruturado e unidade de entrada e saída de dados. O mais adequado neste caso é um controlador que usa tecnologia RISC, apropriada para uma aplicação em tempo real.

Comprimento da palavra de dados: O comprimento da palavra de dados utilizado na plataforma é de 8 bits, que corresponde ao barramento de dados do controlador utilizado. Essa largura é importante sob vários aspectos, sendo que o mais importante é a precisão nos cálculos efetuados no algoritmo de controle. A largura de dados também influencia na conversão A/D e D/A, especialmente no processo de quantização.

Repertório de instruções: O controlador possui um conjunto de instruções satisfatório. Esse repertório deve permitir realizar operações lógicas, aritmética e de controle, mesmo utilizando uma linguagem como assembler. O número de instruções representa um fator essencial no desempenho geral do controlador. No caso do controlador escolhido para a plataforma, o conjunto de instruções permitirá realizar operações matemáticas, decisão, contagem e endereçamento de dados.

D) Métodos de endereçamento: O controlador é usado para realizar endereçamento direto e indireto. Isto significa vantagens, no sentido de que se pode ter acesso rápidos à memória através do modo direto e também podemos utilizar o endereçamento indireto (ponteiros) para executar operações lógicas, controle e outras envolvendo endereço de memória.

E) Número de registradores: O controlador dispõe de registradores de uso específico e de uso geral, usados como memória RAM. Além disso o controlador torna acessível ao programador um registrador de uso geral. Os registradores de uso específico auxiliam o programador na configuração e programação do controlador utilizado.

F) Taxa de transferência de informações: Constar da folha de informação (*data sheet*) do controlador a velocidade de execução de cada instrução. O conhecimento dessa velocidade é importante para as operações internas e para as rotinas de controle do algoritmo. Contudo, a taxa de transferência de dados não se mantém constante quando se trata de transferência entre a CPU e os dispositivos externos e

vice-versa. Deve-se considerar os obstáculos que influenciarão diretamente na taxa de transferência de dados, e os meios de eliminá-los ou minimizar seus efeitos, isto porque, a taxa de transferência de dados entre a CPU e os dispositivos externos, assim como os ruídos, são fatores crítico no desempenho de sistema em tempo real.

G) Estrutura de Interrupção: Na plataforma de teste de algoritmo, as plantas terão seus pedidos de controle atendidos através de mecanismo de interrupção de hardware. O controlador possui interrupções não mascaradas, o que possibilitará diversas opções de implementação de controle.

3.2.2 Conversores A/D e D/A

O conversor Analógico Digital (A/D) utilizado na plataforma é um conversor de aproximação sucessiva de 10 bits de resolução, embutido no controlador. Nesse tipo de conversor cada um dos n bits que compõem a informação digital representa uma parcela do valor da tensão analógica a ser convertida, de forma que a soma de todas as contribuições de cada um dos n bits forma a tensão de entrada do conversor A/D(?). Sendo que a parcela de tensão proporcional ao bit m do conversor A/D é dada por:

$$V_{entrada} = \frac{\sum b_m 2^{(m-1)}}{2^n} V_{ref} \quad (3.3)$$

No conversor de aproximação sucessiva, a conversão é realizada do bit mais significativo para o menos significativo. Uma vez que o bit mais significativo (MSB) representa metade da tensão de referência, conhecer o valor deste bit (0 ou 1) significa saber se a tensão de entrada é maior ou menor que a metade da referência. Conhecido o bit mais significativo, passa-se ao próximo bit, que representa a metade da metade da tensão de referência, ou seja, $1/4$ da tensão de referência. A conversão segue assim até o bit menos significativo (LSB).

O controlador deve possuir um conversor Digital Analógico (D/A), para que o sinal de controle seja aplicado ao atuador. Assim, usa-se como conversor D/A de 10 bits de resolução conforme especificado no apêndice B.3.

3.2.3 Sensores

O sensor ou elemento de medição é um dispositivo que deve converter a variável de saída da planta, em uma outra variável adequada, tal como um deslocamento, uma pressão, voltagem, corrente etc, que pode ser usada para comparar a saída com o sinal de entrada de referência. Este elemento está no caminho de realimentação do sistema de malha-fechada. O ponto de ajuste do controlador deve ser convertido a uma entrada de referência com as mesmas unidades que o sinal de realimentação proveniente do sensor ou elemento de medição.

Uma vez que as características estática e dinâmica do sensor ou elemento de medida afetam a indicação do valor real da variável de saída, o sensor representa um papel importante na determinação do desempenho global do sistema de controle. O sensor normalmente determina a função de transferência no ramo de realimentação. Se as constantes de tempo de um sensor são suficientemente pequenas, comparadas com outras constantes de tempo do sistema de controle, a função de transferência do sensor simplesmente se torna uma constante (Ogata 1995). Para a plataforma, o sensor de velocidade é considerado uma constante, enquanto o sensor térmico é do tipo de segunda ordem superamortecido.

Usa-se no projeto da plataforma dois sensores: um fototransistor L14C1, visto no apêndice B.1.1, na função de detector de luz e um transistor LM35CZ, visto no apêndice B.1.2 como detector de temperatura.

3.2.4 Atuadores

Tem-se dois tipos de atuadores na plataforma, um para acionar o grupo motor-gerador (planta 1), é formado por um semiconversor monofásico (Rashid 1998) para o controle de tensão utilizando tiristores. O outro atuador é o do forno elétrico (planta 2), é formado por um pequeno motor de passos que atua diretamente no reostato do forno regulando a corrente nas resistência do forno.

O funcionamento do atuador do motor ocorre da seguinte forma: um circuito retificador de onda completa formado por diodos e tiristores, fornece alimentação ao circuito de armadura, a velocidade do motor CC do grupo motor-gerador, está relacionada ao valor eficaz de tensão aplicada ao circuito de armadura através do ângulo de gatilho dos tiristores. As tensões fornecidas pelos tiristores, dependem

do instante do gatilhamento dentro da excursão positiva do sinal de tensão senoidal aplicado aos tiristores, o diagrama esquemático do atuador da planta 1, é visto na Fig. 3.5. Para variar a tensão no circuito de armadura, deve-se aplicar na porta (*gate*) dos tiristores pulsos de tensão em instantes apropriados.

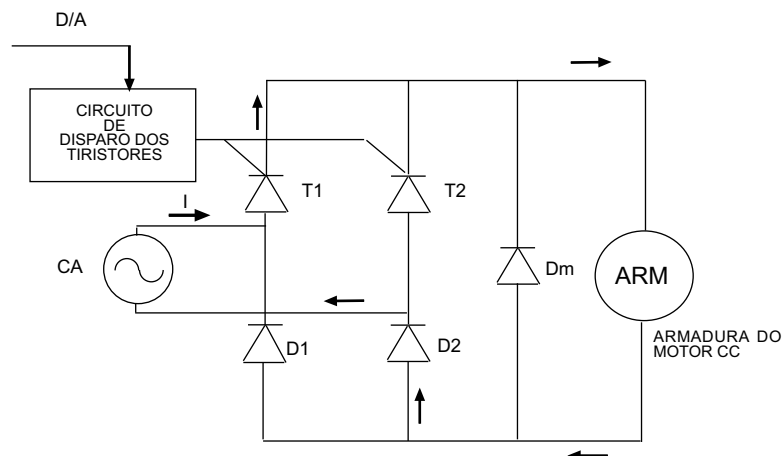


Figura 3.5: Esquema do atuador para o motor CC.

O circuito do atuador para o forno elétrico pode ser visto na seção 4.2. A temperatura do forno é controlada pela rotação do eixo do motor de passos que atua no reostato do forno controlando a intensidade de corrente elétrica sobre as resistências do forno, quanto maior a intensidade da corrente maior é o calor segundo o efeito Joule.

3.3 Algoritmo de controle em tempo real

Há uma preocupação constante, diante do fato de estar-se projetando um sistema em tempo real. Nesse sentido, o algoritmo de controle desempenha um papel decisivo, pois todas as suas estruturas lógicas e sequenciais devem apresentar características em tempo real. Nesse tipo de sistema, o tempo de resposta de uma ação é fundamental para o sucesso ou colapso do controle. Todas as rotinas (funções, laços, contadores, subrotinas etc) deverão ser executadas em intervalo de tempo específicos, a resposta depende da característica de cada dispositivo controlado. Se a rotina de controle não responder no tempo delimitado, o algoritmo deve prever uma solução adequada, o que consiste em avisar o operador do sistema através

de algum sinal áudio visual ou então desviar para uma outra rotina alternativa de controle. O importante a ser observado é que o sistema deve necessariamente, responder de alguma forma ao problema e não simplesmente travar. Fica claro a necessidade do algoritmo de controle permitir ao sistema responder de forma adequada aos estímulos externos, em um intervalo de tempo especificado, mantendo o controle do sistema.

O objetivo desta seção é apresentar o desenvolvimento do algoritmo de controle da plataforma. O algoritmo deve possuir uma estrutura capaz de manter a coordenação e o controle das plantas controladas. Para alcançarmos este objetivo, o algoritmo deve estar em harmonia e explorar ao máximo as características próprias das plantas e dos demais dispositivos físicos da plataforma como controlador, sensores, atuadores, conversores etc, recebendo, manipulando e enviando sinais na forma apropriada e consistente. Dessa forma, espera-se que o controle seja eficiente e mantido dentro de um índice aceitável de desempenho.

3.4 Software para Sistemas em Tempo real

A linguagem de programação usada na elaboração do *software* para aplicação em tempo real deve ser confiável; posto que uma falha do sistema, seja através do *hardware* ou do *software* pode provocar grandes prejuízos e até a perda de vidas humanas.

Tradicionalmente a linguagem *assembler* tem sido usada para a implementação de *software* em tempo real, isto devido a necessidade de obter uso eficiente da CPU, fornecer habilidade para acessar dispositivos e suportar interrupção. Geralmente os programas desenvolvidos para sistema em tempo real são grandes e caros. Entretanto, para sistemas pequenos a linguagem *assembler* é a mais recomendada porque é a mais eficiente. Por outro lado a linguagem *assembler* pode ser utilizada em conjunto com outras linguagem de médio e alto nível para proporcionar melhorias da interação entre o usuário e o sistema de controle. A plataforma usa a linguagem *assembler* para implementar o algoritmo de controle e também faz uso da linguagem C, para a elaboração da interface com o usuário.

3.4.1 Princípio de Concorrência

Alguns pontos importantes são considerados na especificação do algoritmo de controle quando se refere à manipulação de tarefas, dentre os quais destacam-se: a exclusão mútua, *deadlock*, *starvation* e sincronização. No teste do algoritmo de controle para a plataforma, utiliza-se um controlador que gerencia duas tarefas distintas: o controle de velocidade do grupo motor-gerador e o controle da temperatura do forno elétrico.

Assegura-se através do *hardware* e do algoritmo de controle que não existirão problemas quanto à concorrência entre as duas tarefas a serem executadas e quanto ao acesso aos recursos compartilhados no sistema. O algoritmo deve fazer com que o controlador verifique as condições de funcionamento das plantas. A verificação é realizada através da leitura de unidades de entrada e saída de dados.

Após a inicialização dos controladores, do grupo motor-gerador e do forno elétrico, o algoritmo deve verificar continuamente o estado de funcionamento das plantas, Figura 3.6. A verificação é da seguinte forma: o controlador monitora continuamente as entradas de I/O, e quando uma das plantas sofrer uma alteração na variável controlada (velocidade ou temperatura), um sinal alto aparece nas entradas I/O específicas para cada uma delas.

O algoritmo ainda observa se a planta solicitante pode acessar os recursos do sistema, lendo o valor de um *flag*. Caso o acesso seja permitido, uma interrupção não mascarada de *hardware* é gerada para que a planta solicitante tenha acesso à seção crítica do sistema. A interrupção tem por finalidade suspender a execução do processo atual.

Os diagramas de transição de estados, vistos nas Figuras 3.7 e 3.8, são as representações gráficas dos processos. Apesar do algoritmo utilizar prioridade, sendo portanto, preemptivo. O mecanismo de interrupção só é usado para habilitar um processo aos recursos do sistema somente após o algoritmo de controle ter previamente selecionar a tarefa de maior prioridade. O que não contradiz os diagramas de transição de estados para o motor, Figura 3.7, e transição de estados para o forno, Figura 3.8.

A partir do estado pronto, o processo pode ser executado ou bloqueado, desde que outro não esteja em execução. Em outra situação um processo em execução também pode ser suspenso, à medida em que os recursos da seção crítica sejam so-

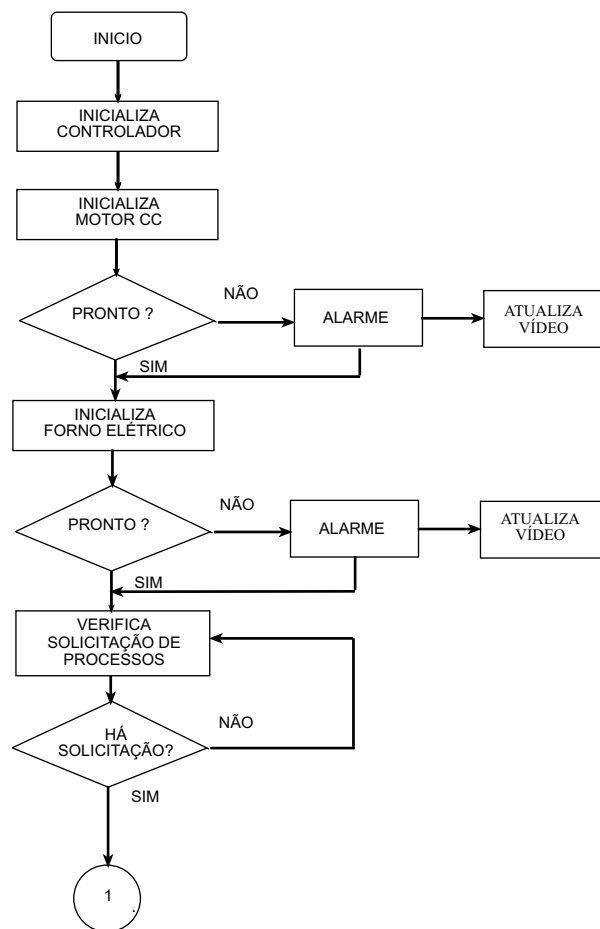


Figura 3.6: Fluxograma de inicialização/escolha.

licitados por um processo com maior prioridade ou nas situações em que envolvam problema de concorrência (inanição e impasse).

A seção crítica é composta pelos seguintes itens: ULA, registrador de uso geral, unidades de entrada e saída e memórias (RAM e ROM). Para gerar uma interrupção é enviado um pulso de nível alto para a entrada de interrupção do controlador. Quando uma interrupção é respondida, um *flag* do controlador de interrupções recebe o valor zero para desabilitar qualquer interrupção posterior. Por esta razão, antes que um processo entre na seção crítica, ele deve consultar o conteúdo do *flag*. Ver fluxograma de concorrência, Figura 3.9. O *flag* do controlador de interrupções funciona como um semáforo para controlar o acesso das tarefas (processos) à seção crítica. Quando a interrupção ocorre o endereço de retorno é colocado na pilha do controlador e o PC (Contador de Programa) é car-

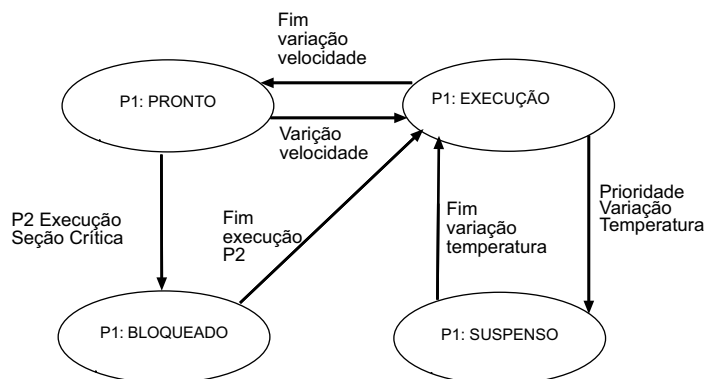


Figura 3.7: Diagrama de transição de estados para o motor.

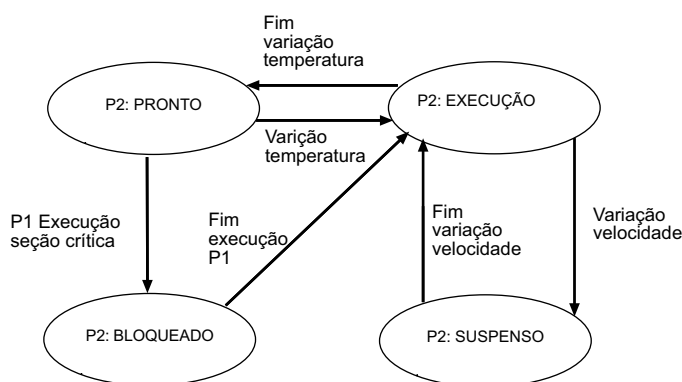


Figura 3.8: Diagrama de transição de estados para o forno.

regado com o endereço do vetor de interrupção. Outras informações importantes também devem ser salvas na pilha.

Para ocorrer a interrupção, o controle é desviado para um dispositivo de tempo real (relógio) que está conectado ao controlador e permite interrompê-lo quando acionado. O conteúdo da posição do vetor de interrupção é a de uma rotina que verifica o *status* do *flag* do controlador de interrupção. A verificação consiste em checar se ele está habilitado(1) ou desabilitado(0). O estado do *flag* habilitado significa que o processo requisitante pode ter acesso à seção crítica, se o bit *flag* indicar desabilitado o processo não terá acesso a essa

3.4.2 Tempo de execução

O limite no tempo de execução é uma exigência em tempo real, quando uma requisição é detectada o controlador deve desviar para uma rotina que antes de

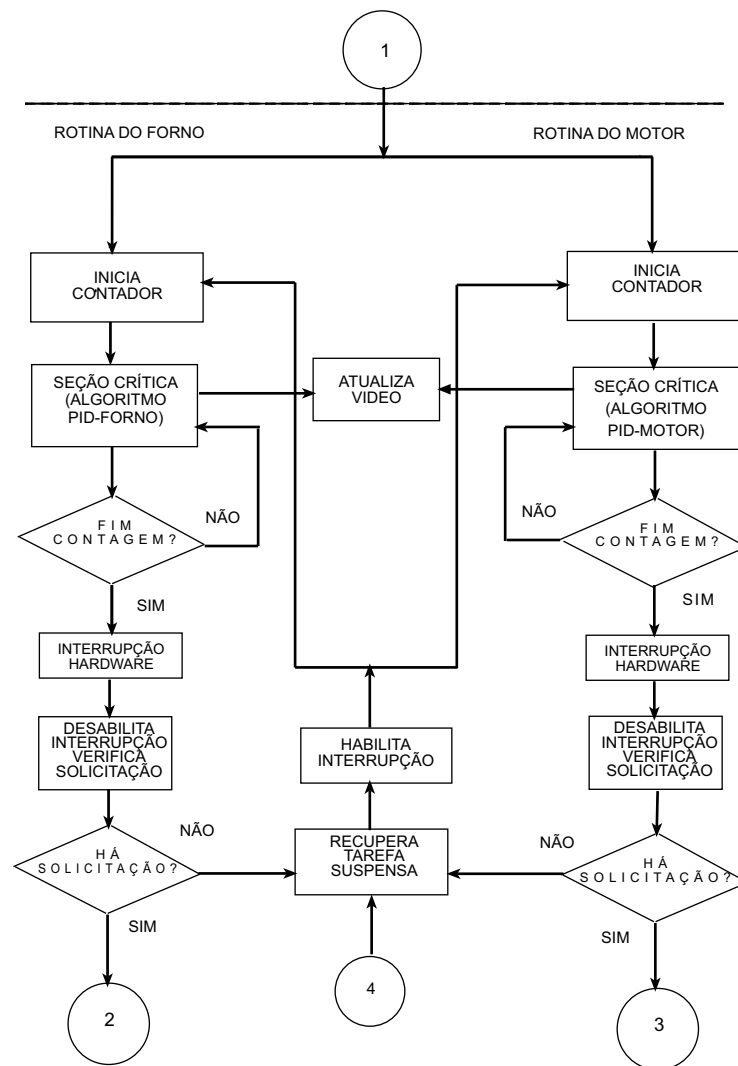


Figura 3.9: Fluxograma de concorrência de processos.

gerar uma interrupção verifica o conteúdo do *flag* do registrador controlador de interrupção, como mencionado anteriormente, este *flag* funciona como um semáforo para os acessos à seção crítica. Se o valor do *flag* estiver habilitado, a seção crítica pode ser acessada, o algoritmo faz o conteúdo do *flag* igual a zero, para impossibilitar que outra tarefa (processo) tenha acesso à seção crítica, logo após inicia a seção crítica da tarefa requisitante. Na Figura 3.10, ver-se as transições de estados de um processo dentro da seção crítica.

Antes de um processo entrar na seção crítica o controlador inicializa um contador via *hardware* externo. Este contador determina o tempo máximo que uma

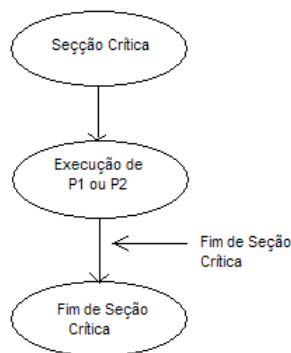


Figura 3.10: Diagramas de transição de estados na seção crítica.

tarefa ou processo deve permanecer na seção crítica. A limitação de tempo é uma das exigências de sistema em tempo real, ver Figura 3.11.

Quando o contador atinge o valor máximo, ele provoca uma interrupção de *hardware* não mascarada, por meio de um sinal de nível alto no pino de interrupção do controlador. As informações importantes da tarefa em execução são salvas na pilha. O PC é carregado com o conteúdo do vetor de interrupção que contém o endereço de uma rotina que verifica as entradas de comunicação do controlador com as plantas. O objetivo da verificação é detectar se uma planta realizou uma requisição. Caso a planta requisitante seja a planta em execução, o controlador recupera as informações guardadas na pilha, continua a executar a tarefa atual e inicializa nova contagem de tempo. Por outro lado, se a requisição for de uma outra planta e esta planta possuir uma prioridade maior que a planta em execução, a planta de maior prioridade terá acesso à seção crítica.

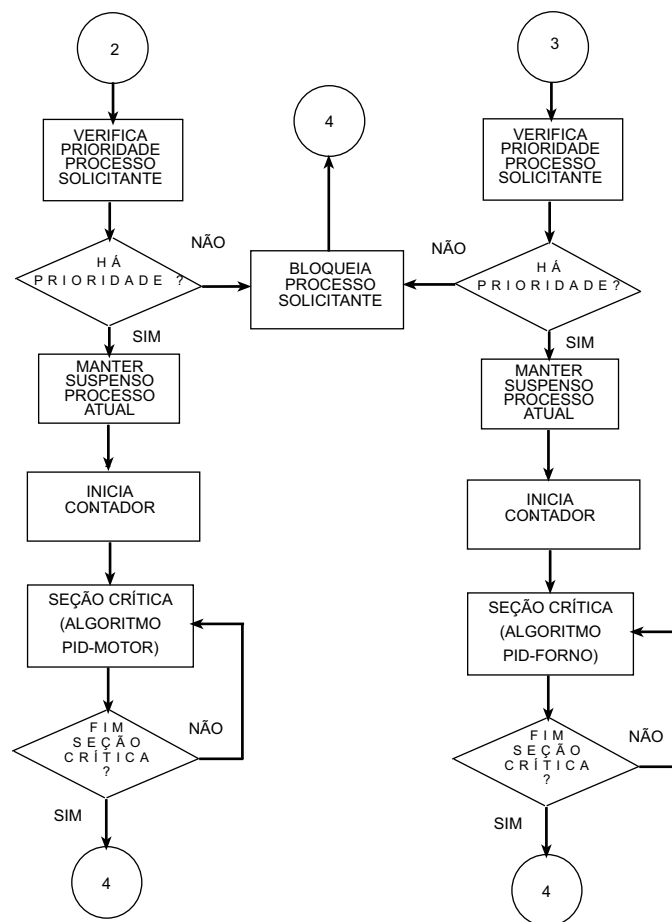


Figura 3.11: Fluxograma de limite de tempo do algoritmo de controle.

CAPÍTULO 4

Projeto da Plataforma-SCTR

Os diversos componentes físicos da plataforma estão interligados entre si e o funcionamento desses componentes está diretamente relacionado ao modo como o algoritmo executa sua ação de controle. Para explicar as funções desempenhadas de cada circuito e fazer uma análise no sentido do controle moderno, faz-se uso de simulações e experimentos práticos sobre os quais possa-se aplicar técnicas apropriadas, com a finalidade de síntese de projeto, verificando estabilidade, desempenho e segurança do sistema.

Utiliza-se meios apropriados como representações gráficas para entender o funcionamento de cada bloco funcional e dos circuitos. Com os modelos dos componentes do sistema, deseja-se realizar uma análise mais consistente e tão próximo da realidade quanto possível. Com análise do lugar das raízes pretende-se verificar a estabilidade do sistema de controle, com a análise no domínio da frequência, deve-se verificar as condições de oscilações e de regime estacionário, com a técnica de espaço de estado simula-se a plataforma no computador.

Por outro lado, deve-se enfatizar o funcionamento do sistema de forma geral, para tanto, a atenção deve ser focada no algoritmo de controle, especialmente, no gerenciamento do tempo de acesso à seção crítica das tarefas de controle do grupo motor-gerador do forno elétrico, a análise do algoritmo estará voltada para a sua eficiência no controle de acesso, na concorrência entre tarefas, na capacidade de evitar impasse (*deadlock*), inanição de tarefas (*starvation*), sobretudo atender com rapidez as solicitações de controle, estas e outras características são medidas adequadamente por meios de técnicas como por exemplo, o diagrama de *Gantt*. Por

fim, apresenta-se a interface gráfica da plataforma, este recurso permitirá que o operador visualize através de informações enviadas a um terminal de vídeo o funcionamento do sistema, além disso, a interface permitirá a interação entre usuário e a plataforma através da entrada de dados, por meio do qual os parâmetros de um algoritmo PID possam ser alterados.

Neste capítulo implementa-se a plataforma. Projetam-se os circuitos essenciais para o funcionamento do sistema. Analisa-se o algoritmo de controle através do gerenciamento das tarefas na seção crítica e os resultados práticos são esboçados. Em seguida apresenta-se a interface de comunicação da plataforma com o usuário.

4.1 Circuitos do Controle de Velocidade

Para verificar a viabilidade da plataforma de testes de algoritmos escolheu-se duas plantas para constituir os estudos de casos. O primeiro estudo de caso é o controle de velocidade de uma máquina de corrente contínua, no caso, um motor de c.c. Esta escolha se deu em função de que as máquinas elétricas de corrente contínua são versáteis e amplamente utilizadas na indústria. A sua característica volt-ampère ou torque-velocidade pode ser obtida através de variações entre as conexões dos circuitos de armadura e de campo.

O controle de velocidade do motor de corrente contínua é realizado pela variação da tensão sobre o circuito de armadura. Os sistemas de tensão ajustável de armadura utilizam circuitos retificadores a tiristores com controle de fase para fornecer potência ao motor CC. Na Figura 4.1, mostra-se o esquema principal de controle de velocidade. A tensão de armadura é ajustada por controle do ângulo elétrico, dentro da excursão positiva da onda de c.a., na qual o sinal de gatilho é aplicado a cada tiristor (Rashid 1998). Um tiristor funciona como uma chave que abre e fecha em frequência rápida, de modo que a tensão aplicada se divide entre a armadura e a chave, e resulta uma tensão média de armadura controlável. Nesta seção descreve-se as características do motor de c.c. utilizado na plataforma, assim como descreve-se a implementação do seu mecanismo de controle de velocidade ajustável. O motor de c.c. utilizado tem as seguintes características: tensão nominal de armadura 220 V, corrente nominal de armadura 0,62 A, potência nominal 0,1 kW, velocidade nominal 2200 RPM, tensão de campo de excitação 220

V, corrente de campo de excitação 0,8 A.

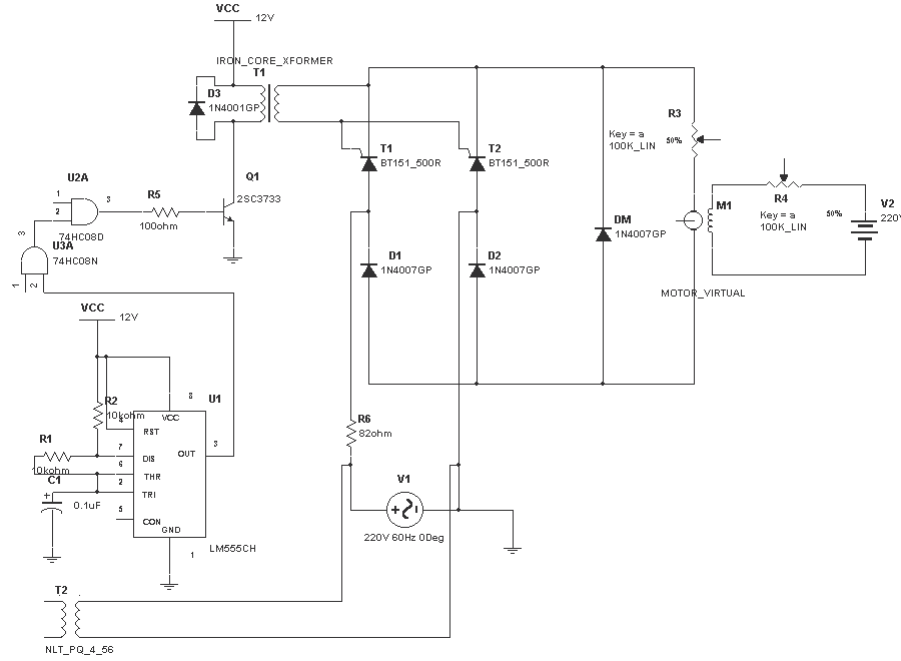


Figura 4.1: Sistema de controle da velocidade do motor CC.

No diagrama esquemático visto na Figura 4.1 a voltagem média pode ser determinada pela expressão,

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) \quad (4.1)$$

O funcionamento do circuito do atuador para o motor CC. pode ser descrito da seguinte maneira: os tiristores BTs 151 e os diodos 1N4007 constituem um semiconversor monofásico que produz uma tensão sobre o motor dado pela Equação (4.1). Os tiristores são gatilhados no semiciclo positivo da tensão senoidal fornecida pela fonte de 220 volts. Os pulsos de gatilhos são gerados por um oscilador construído com o temporizador 555. Os pulsos de gatilhos são aplicados em conjunto com outros sinais, a um amplificador formado pelo transistor 2SC3733. Após devidamente amplificados os pulsos de gatilhamento são aplicados num primário de um transformador que além da função de acoplamento, também funciona como isolador do lado de baixa e alta potência do circuito do atuador do motor de CC.

O circuito da Figura 4.1, por si só, não é suficiente para manter o controle do motor de c.c. Faltam as qualidades de sincronismo e ponto de gatilhamento dos tiristores. É necessário construir um circuito de sincronismo e outro que determine o ângulo de gatilhamento dos tiristores. O sincronismo é necessário para possibilitar que o disparo dos tiristores ocorra no período do sinal senoidal que compreende o ângulo de 0° a 180° , tendo em vista que utiliza-se um semiconversor monofásico. O circuito de gatilhamento deverá fazer com que o disparo dos tiristores ocorra no ângulo correspondente à tensão na saída do conversor D/A, que reflete o sinal do erro atuante gerado pelo algoritmo de controle PID embutido no controlador PIC16F877A.

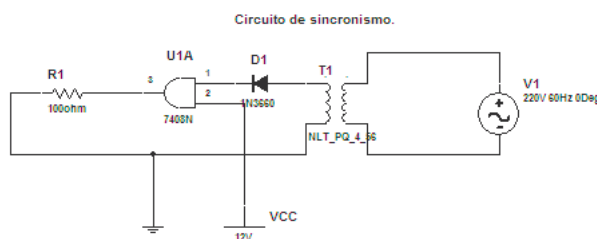


Figura 4.2: Circuito de sincronismo para o atuador do motor CC.

No circuito da Figura 4.1, o primário do transformador T1, está ligado à fonte de alimentação, que é a mesma que fornece potência ao semiconversor monofásico. Este transformador é de pequena potência, o suficiente apenas para fornecer uma amostra do sinal senoidal da fonte de alimentação. O secundário do transformador é ligado ao diodo 1N3660 que corta o semiciclo negativo do sinal senoidal, em seguida este sinal é introduzido em uma das entradas de uma porta AND do circuito CMOS 74HC08N, de tal forma que na saída deste circuito tem-se um sinal com um período de 8 ms.

O sinal de sincronismo possui um tempo de duração do semiciclo positivo do sinal da fonte na frequência de 60 Hz. Os pulsos de gatilhamento são aplicados apenas nesse intervalo de tempo, de tal maneira que o semiconversor monofásico só funcione neste intervalo de tempo.

O circuito de gatilhamento dos tiristores funciona da seguinte forma: o sinal na saída do conversor D/A do controlador, é introduzido num conversor A/D de um controlador PIC16f628 que possui um programa gravado na memória *FLASH*.

Este programa seleciona o ângulo de disparo dos tiristores, dividindo-se o tempo do semiciclo positivo em intervalos de tempo menores. Já se sabe que o intervalo de tempo do semiciclo positivo dura 8 ms. Esse intervalo é fracionado em intervalos menores de tal forma que a cada intervalo de tempo corresponde a um ângulo de disparo dos tiristores. Na Tabela 4.1, consta uma possível relação entre os valores das tensões na saída do conversor D/A e os ângulos de disparos dos tiristores.

Tabela 4.1: Relação entre tensão e ângulo de disparo dos tiristores

Item	tensão	ângulo	tensão	ângulo	tensão	ângulo
1	0,13	5 ⁰	0,28	10 ⁰	0,42	15 ⁰
2	0,55	20 ⁰	0,69	25 ⁰	0,83	30 ⁰
3	0,97	35 ⁰	1,11	40 ⁰	1,25	45 ⁰
4	1,38	50 ⁰	1,52	55 ⁰	1,66	60 ⁰
5	1,79	65 ⁰	1,94	70 ⁰	2,1	75 ⁰
6	2,21	80 ⁰	2,35	85 ⁰	2,5	90 ⁰
7	2,63	95 ⁰	2,8	100 ⁰	2,91	105 ⁰
8	3,04	110 ⁰	3,2	115 ⁰	3,32	120 ⁰
9	3,5	125 ⁰	3,6	130 ⁰	3,74	135 ⁰
10	3,87	140 ⁰	4,01	145 ⁰	4,15	150 ⁰
11	4,3	155 ⁰	4,43	160 ⁰	4,57	165 ⁰
12	4,70	170 ⁰	4,84	175 ⁰	4,98	180 ⁰

O sinal de disparo dos tiristores e os sinais de sincronismo e pulsos são aplicados nas entradas de uma porta AND, conforme visto na Figura 4.1, e posteriormente amplificados pelo transistor 2SC3733 e em seguida introduzidos nas portas dos tiristores.

4.2 Circuitos do controle de temperatura

Outro estudo de caso desenvolvido na plataforma refere-se ao controle de temperatura de um forno elétrico. O sistema de controle do forno deve manter a temperatura interna do forno constante. A variação de temperatura do forno deve acontecer devido à abertura da porta ou da introdução de algum objeto no interior do forno. Quando isto ocorrer o sensor de temperatura construído com o transistor LM35CZ envia ao controlador um sinal na forma de tensão indicando a variação de temperatura. O sinal de tensão é processado pelo controlador através do algoritmo PID, que gera um erro atuante que por sua vez é encaminhado ao atuador do forno.

O atuador do forno é constituído por um circuito eletrônico que possui um motor de passos acoplado diretamente no eixo do reostato do forno elétrico, como pode ser visto na Figura 4.3. Assim, a variação de temperatura é controlada pela variação da posição do eixo do reostato.

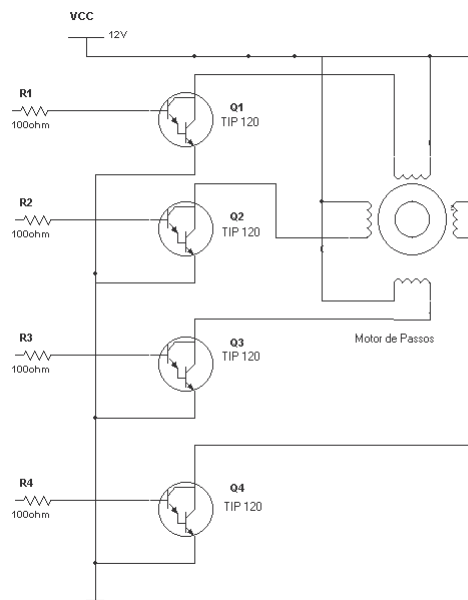


Figura 4.3: Sistema de controle do forno elétrico.

O funcionamento do atuador do forno elétrico ocorre da seguinte maneira: quando há uma variação da temperatura interna do forno, o sensor de temperatura envia uma mensagem ao controlador na forma de um sinal analógico de tensão. O controlador é interrompido de acordo com a concorrência entre tarefas especificada na seção 3.4.1. O sinal de tensão é convertido pelo conversor A/D. Este valor é comparado com o valor de referência, para gerar o valor do erro atuante que então é processado pelo algoritmo de controle PID para o forno elétrico. A partir de então se sabe se a temperatura deve ser aumentada ou diminuída, através do acionamento do motor de passos acoplado ao eixo do reostato.

4.2.1 A interface com o usuário

A interface da plataforma com o usuário é elaborada em linguagem C. A interface possibilitará a realização da interação entre o usuário e a plataforma. Através deste mecanismo pode-se acompanhar a concorrência entre os processos do motor

de c.c. e do forno aos recursos do sistema. As informações sobre os processos podem ser visualizadas no monitor do computador, onde deve constar informações do estado do processo como: pronto, executando, suspenso e bloqueado, além de informações gráficas representadas num diagrama de Gantt. A interface gráfica pode ser vista na Figura 4.4.

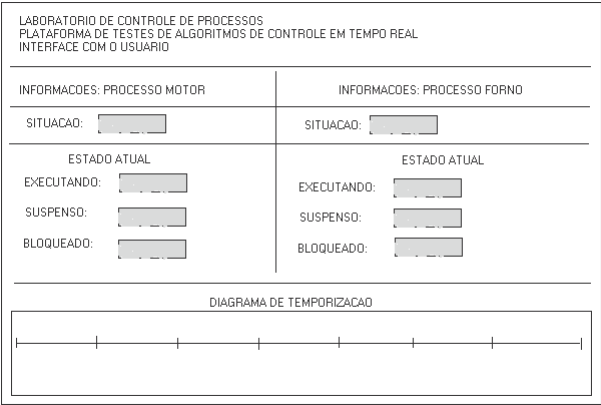


Figura 4.4: Interface gráfica da plataforma.

A comunicação entre o plataforma e o computador é realizado através de comunicação serial utilizando o padrão RS232, configurado para uma taxa de transferência de dados de 9600 *baud rate*.

CAPÍTULO 5

Identificação e Controle das Plantas

Neste capítulo apresentam-se os resultados experimentais para o levantamento dos parâmetros dos modelos do motor CC e do forno elétrico para fins de projeto de controladores. Os procedimentos para esta modelagem tem por base o método do mínimos quadráticos que é utilizado para estimar os parâmetros das descrições matemática em função de transferência e espaço de estados.

O Capítulo está organizado em duas secções que na sua estruturação são semelhantes. A diferença consiste na aplicação ou seja a planta que é modelada e como é modelada. Em ambas as plantas, os controladores PID são sintonizados por meio de técnicas de otimização.

No caso do grupo motor-gerador apresenta-se o modelo e o procedimento de testes para realizar a identificação de sistemas do tipo caixa branca. Determina-se a região linear de operação do motor por meio de medições de tensões terminais e velocidade rotórica. O método dos mínimos quadráticos é utilizado para estimar os parâmetros de um polinômio para avaliar o comportamento da velocidade da máquina em função de variações na tensão terminal. Finalizado o procedimento de levantamento dos parâmetros, o modelo de malha fechada é determinado e os ganhos do controlador são ajustados.

No caso da modelagem forno utiliza-se um modelo de primeira ordem, o procedimento para estimação dos parâmetros do modelo do forno tem por base a resposta ao degrau. O seu comportamento dinâmico é avaliado para tensões de

operação entre 20-180 volts. Devido a repetibilidade do processo de estimação dos parâmetros, os resultados destes experimentos são apresentados no Apêndice C. O modelo levantado e a estrutura do PID são utilizados para formar o modelo sistema de malha fechada. De posse do modelo em malha fechada, aplica-se o método para ajuste dos ganhos do PID.

No Apêndice A apresentam-se os procedimentos para conduzir os experimentos que levam a síntese dos modelos dos sistemas dinâmicos. O método de identificação, (Basilio 2004), enfatiza experimentos orientado no espaço de estados para a identificação de plantas do tipo motor CC e forno elétrico.

5.1 Modelagem e Controle do Motor CC

A determinação do modelo do grupo motor-gerador é realizada por identificação de Sistemas do tipo Caixa Branca. Neste caso, as leis que regem o princípio de funcionamento são conhecidas e estas são expressas em termos dos parâmetros mecânicos e elétricos da máquina. No Apêndice A apresenta-se o desenvolvimento dos modelos para fins de levantamento dos seus parâmetros.

O levantamento dos parâmetros do modelo passa pelas fases de adequação do modelo que é uma etapa de desenvolvimento teórico, adequa-se o modelo da máquina CC para fins de estimação dos parâmetros. Esta fase é descrita na Seção A.2.1 do Apêndice A como Modelo para Identificação. A segunda fase consiste na determinação da região linear de operação do motor que é determinada experimentalmente por meio de medições de tensões terminais e velocidade rotórica, o método dos mínimos quadráticos é utilizado para estimar os parâmetros de um polinômio que permite avaliar o comportamento da velocidade da máquina em função de variações na tensão terminal, seção A.2.2 do referido Apêndice. O método dos mínimos quadrados utilizado para estimar os parâmetros K_g , K_a , R_a , L_a , J e f a partir de medições das grandezas elétricas do motor e leitura dos sensor de velocidade, Seções A.2.3 e A.2.4 do Apêndice A.

5.1.1 Levantamento do Modelo

A forma geral do modelo O modelo em espaço de estado para o motor CC,

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt}i_a(t) \\ \frac{d}{dt}\omega(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_g}{L_a} \\ \frac{K_a}{J} & -\frac{f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} v_a(t) \quad (5.1)$$

Os elementos das matrizes A são determinados experimentalmente de acordo com os procedimentos descritos no Apêndice A. De uma forma geral o modelo do motor CC é estimado pelo método sugerido por (Basilio 2004). As matrizes de estados, controle e saída para o motor CC,

$$A = \begin{bmatrix} -9,4 \cdot 10^5 & -2,86 \cdot 10^4 \\ 1,33 \cdot 10^3 & -5,1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 19607,84 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

A descrição no espaço de estado é transformada em função de transferência, a fim de utilizar métodos de otimização para projeto de um controlador PID, usando o *MATLAB*®. Obtém-se a função de transferência equivalente ao modelo de espaço de estado visto anteriormente,

$$G(s) = \frac{1,961 \cdot 10^4}{s^2 + 9,4 \cdot 10^5 s + 4,283 \cdot 10^7} \quad (5.2)$$

O comportamento da Velocidade no Eixo do Rotor para excitação degrau unitário é apresentado na Figura 5.1.

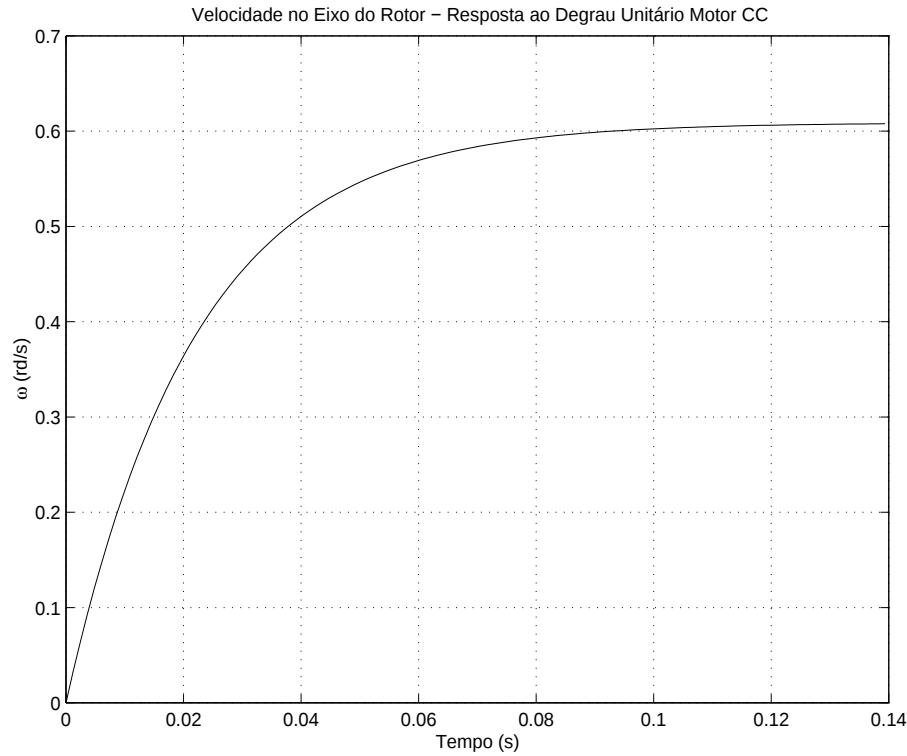


Figura 5.1: Velocidade no Eixo do Rotor Motor CC.

A partir da função de transferência, Equação (5.2), e dos métodos de otimização do Toolbox do *MATLAB*®, obtém-se os valores dos parâmetros do controlador PID e o comportamento do sistema para uma entrada degrau unitário é apresentado na Figura 5.2.

5.1.2 Projeto do Controlador

Monta-se um sistema de malha fechada com a Equação (5.2) que é a função de transferência do sistema do grupo motor-gerador e com a Equação (2.1) que representa o controlador PID analógico. Em uma primeira instância, o desempenho do controlador é verificado pelo comportamento do sistema para resposta ao degrau unitário.

Os resultados são obtidos em duas etapas. Utiliza-se na primeira experiência um controlador PID com parâmetros K_p , K_i e K_d escolhidos aleatoriamente

Tabela 5.1: Parâmetros do controlador PID - Motor CC

Parâmetros do PID (motor)	Kp	Ki	Kd
Não-otimizados	18	12,81	0,35
Otimizados	2,9186	0,1398	12,62

obtendo a resposta do sistema. Em seguida adota-se o mesmo procedimento utilizando parâmetros K_p , K_i e K_d otimizados obtidos do Toolbox de otimização do *MATLAB*®, vistos na Tabela 5.1.2. O comportamento da velocidade do sistema para as duas situações são apresentadas na Figura 5.2.

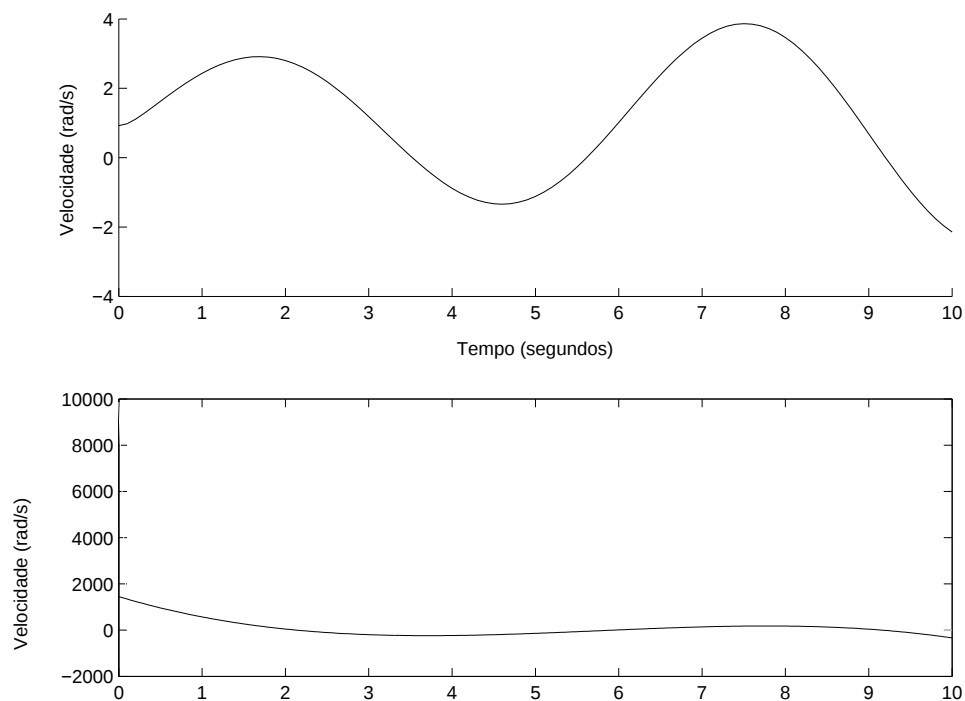


Figura 5.2: Resposta ao degrau: (1)PID não otimizados(2) otimizados.

5.2 Modelagem e Controle do Forno

Os fundamentos teóricos do método utilizado para estimar os parâmetros do modelo do forno elétrico, representado por um modelo de primeira ordem, são apresentados Apêndice A. O modelo de primeira ordem,

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ts}}{\tau s + 1} \quad (5.3)$$

sendo K a representação do ganho DC, T é o atraso de transporte (tempo morto) e τ é a constante de tempo do sistema.

O método utilizado para estimação dos parâmetros do forno tempo base as referências (Astrom 1995) e (Basilio 2002). Os passos do procedimento para estimação dos parâmetros do modelo do forno,

Passo 1 - Alimentar o forno com degrau de diferentes amplitudes A (tensões alternadas) e faz-se a aquisição da resposta $y(t)$ =temperatura em graus *Celsius*, no intervalo de 2 em 2 minutos, até que a temperatura alcance um determinado valor e permaneça constante;

Passo 2 - Identificar na resposta um instante de tempo t_s e, para todo instante $t_i > t_s$ obtém-se $y(t_i) = y_\infty$;

Passo 3 - calcula-se K de acordo com a expressão;

$$K = \frac{y_\infty}{A} \quad (5.4)$$

Passo 4 - Calcular numericamente a área A_0 da Figura 5.2, tendo como limite superior o tempo t_s e determina-se;

$$T + \tau = \frac{A_0}{y_\infty} \quad (5.5)$$

Passo 5 - Calcular numericamente a área A_1 , com o valor de $T + \tau$, da Figura 5.2. Calcular a constante de tempo τ ,

$$\tau = \frac{A_{1e}}{y_\infty} \quad (5.6)$$

Passo 6 - Calcular o atraso T com os valores de A_0 e A_1 obtidos nos itens d e e, respectivamente.

$$T = \frac{A_0}{y_\infty} - \tau = \frac{1}{y_\infty}(A_0 - A_{1e}) \quad (5.7)$$

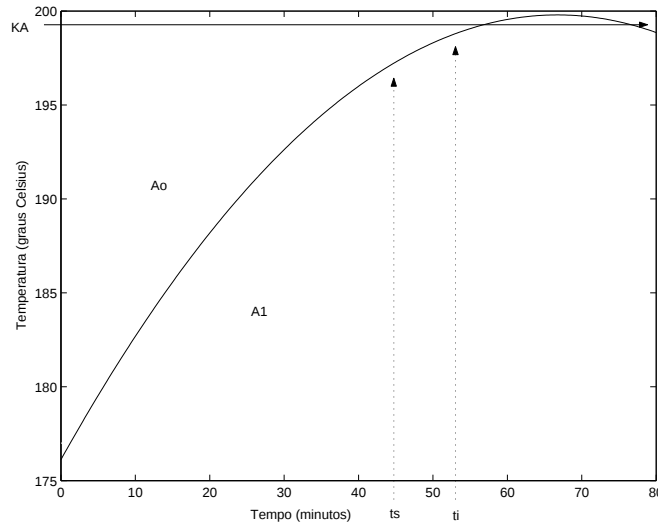


Figura 5.3: Esboço do Método das Áreas para Estimação de Parâmetros da do Forno.

Os valores de T e τ é através do método das áreas (Astrom 1995). A determinação dos parâmetros T e τ é feita a partir do cálculo das áreas A_0 e A_1 representadas na Figura 5.2.

No sentido de obter o modelo do forno elétrico que é representado pela Equação (3.2). Alimenta-se o forno com tensões de 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 e 180 volts, a fim de obter-se o seu comportamento dinâmico. A partir das informações das variações das temperaturas para os valores das tensões aplicadas, calcula-se os valores dos parâmetros K , T e τ , seguindo o algoritmo.

5.2.1 Levantamento do Modelo

Realizou experimentos para variações da tensão entre 20 até 180 Volts, nesta Secção apresenta-se os resultados para 180 Volts. O procedimento de determinação dos parâmetros é repetitivo. Portanto, optou-se para apresentar os demais resultados no Apêndice C.

O forno é excitado com um degrau de amplitude de 180 volts e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.2.1.

O instante t_s para a tensão de 180 volts é de 44 min. Como $t_i > t_s$. Escolhe-se t_i igual a 52 min. Assim $y(t_i) = y_\infty$. O valor de y_∞ ,

Tabela 5.2: Temperaturas do forno para tensão de 180 volts

Números Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Temperatura (°C)	177,0	177,0	178,2	179,7	182,0	182,0	184,0	185,2	186,0	187,2
Números Pontos	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tempo (min)	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Temperatura (°C)	188,8	189,6	190,8	191,2	191,6	192,5	193,5	193,5	194,5	195,0
Números Pontos	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tempo (min)	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
Temperatura (°C)	195,0	196,5	197,0	198,0	198,0	198,5	199,0	199,5	199,5	199,5
Números Pontos	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Tempo (min)	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
Temperatura (°C)	199,5	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5

$$y_{\infty 180} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\infty i}$$

$$= \frac{1}{14}(199,0 + 199,5 + 199,5 + 199,5 + 199,5 + 199,5 +$$

$$199,5 + 199,5 + 199,5 + 199,5 + 199,5 + 199,5 + 199,5 + 199,5) = 199,46$$

o valor de K ,

$$K_{180} = \frac{y_{\infty}}{A} = \frac{199,46}{180} = 1,11$$

Determinar os parâmetros T e τ , deve-se calcular as áreas A_0 , e A_1 vistas na Figura 5.2.1.

Cálculo da área A_0 . A área do retângulo de dimensões $KA = 195,5$ e $t_i = 52$. Subtrai-se desse valor a área determinada pela curva:

$$y_{180} = -0,0053x^2 + 0,71x + 180 \quad (5.8)$$

$$A_0 = 195,5 \cdot 52 - \int_0^{52} -0,0053x^2 + 0,71x + 180 = 94,48$$

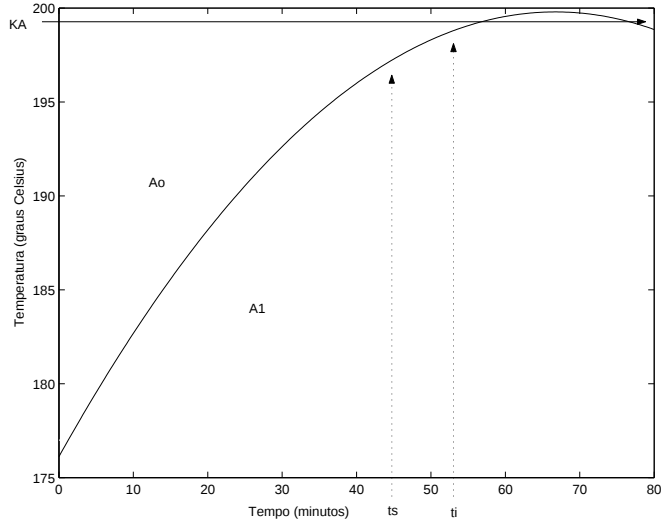


Figura 5.4: Curva: temperatura do forno para a tensão de 180 volts.

$T + \tau$:

$$T + \tau = \frac{94,48}{199,46} = 0,47$$

cálculo de A_1 :

$$A_1 = \int_0^{0,1} -0,0053x^2 + 0,71x + 180 = 18,03$$

cálculo de τ ,

$$\tau_{180} = \frac{A_1 e}{y_\infty} = \frac{18,03 \cdot 2,72}{199,46} = 0,24$$

Cálculo de T :

$$T_{180} = \frac{A_0}{y_\infty} - \tau = \frac{94,48}{199,46} - 0,24$$

5.2.2 Determinação dos Parâmetros do Forno

Com os resultados experimentais elabora-se a Tabela 5.3 que contém os valores experimentais de K , T e τ . A partir da tabela, obtém-se polinômios de K , T e τ em função das tensões aplicadas.

Tabela 5.3: Resultados experimentais dos valores de K , T e τ

Tensão aplicada	Temp.final (° C)	Varição de temp. (°C)	K	T (seg)	τ (seg)
20	30,5	1,6	0,066	2,40	12,13
40	38,8	8,3	0,94	0,36	6,54
60	55,8	17,8	4,53	3,57	51,64
80	81,1	25,3	1,01	3,40	15,35
100	103,9	22,3	1,03	12,05	49,89
120	125,4	20,6	0,94	0,83	1,86
140	152,3	27,2	1,08	1,93	5,18
160	178,8	26,7	1,12	0,96	3,43
180	195,5	18,50	1,11	0,232	0,24

O modelo do forno dado pela Equação (3.2), no domínio da frequência, após as substituições de T , K e τ , devidamente ajustados pelo método dos mínimos quadrados,

$$G(s)_{forno} = \frac{(-9,5e^{-8}s^4 + 4,4e^{-5}s^3 - 0,0071s^2 + 0,44s - 6,5)}{(7,1e^{-7}s^4 - 0,00022s^3 + 0,016s^2 + 0,21s - 0,79)s + 1} e^{(-0,011s+3,9)s} \quad (5.9)$$

Obtido o modelo do forno, passa-se à etapa de simulação utilizando o SIMULINK, o Toolbox de otimização do *MATLAB*®, a fim de gerar os parâmetros K_p , K_i e K_d do controlador PID.

5.2.3 Projeto do Controlador

Monta-se um sistema de malha fechada com a Equação (5.9) que é a função de transferência do forno elétrico e com a Equação (2.1) que representa o controlador PID analógico e aplica-se na entrada deste sistema um degrau unitário, a fim de obter a resposta dinâmica.

Os resultados também são obtidos em duas etapas. Utiliza-se na primeira experiência um controlador PID com parâmetros K_p , K_i e K_d escolhidos aleatoriamente obtendo a resposta do sistema. Em seguida adota-se o mesmo procedimento utilizando parâmetros K_p , K_i e K_d otimizados obtidos do Toolbox de otimização do *MATLAB*®, vistos na Tabela 5.2.3.

As respostas à entrada degrau unitário para os ganhos dos controladores da Tabela 5.2.3 são apresentadas na Figura 5.5.

Tabela 5.4: Parâmetros do controlador PID - Forno

Parâmetros do PID (forno)	K _p	K _i	K _d
Não-otimizados	25	0,25	2,8
Otimizados	0,56	0,059	4,9

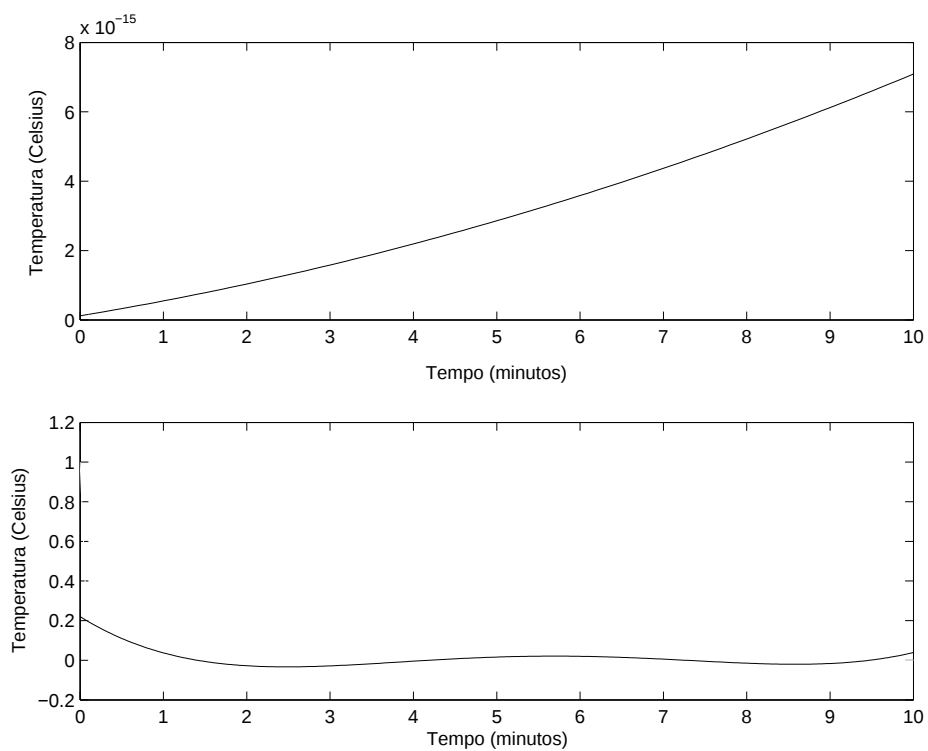


Figura 5.5: Resposta ao degrau: (1)PID não otimizados(2) otimizados.

CAPÍTULO 6

Conclusão

A plataforma de testes de algoritmos apresentada neste trabalho possui múltiplas finalidades práticas e teóricas. As restrições de funcionamento em tempo real impostas ao sistema, permite estabelecer conclusões qualitativas em relação a execução do algoritmo.

Os resultados obtidos da concorrência entre os processos, no tempo para acesso aos recursos do sistema implicam em melhorias das características do algoritmo de controle, se considerarmos o *hardware* perfeitamente ajustado, o que do ponto de vista de operação significa que os componentes físicos são os mais adequados ao sistema. Quanto ao algoritmo possibilita aumentar a sua eficiência através da elaboração de um código mais realístico.

As informações geradas a partir das transições dos estados dos processos na plataforma, permite estabelecer estudos de aperfeiçoamento na medida que as informações sobre estes estados, sejam utilizada para analisar o comportamento do algoritmo na prática.

Através de tentativa e erro, é possível alcançar resultados satisfatório de desempenho do sistema, posto que os parâmetros do PID gerados na simulação computacional em conjunto com as informações do funcionamento do sistema na prática podem ser utilizadas para obter a otimização da plataforma.

Os parâmetros do controlador PID obtidos experimentalmente utilizando dos modelos das plantas no MATLAB[®], constitui uma ferramenta poderosa no sentido de conduzir a plataforma de um estado de funcionamento qualquer para um estado otimizado.

6.1 Trabalhos Futuros

Este sistema pode ser útil para testar outros métodos de sintonia. Por exemplo, algoritmos genéticos, porque a partir dos melhores parâmetros que minimizam o erro entre os sinais de entrada e das saídas das plantas controladas, um algoritmo genético poderia utilizar esses parâmetros para adaptar a plataforma para um estado de funcionamento ótimo.

APÊNDICE A

Identificação das Plantas

Nesta Apêndice apresenta-se os conceitos para identificação dos dois Sistemas Dinâmicos que fazem parte da plataforma. Estes sistemas são chamados des plantas que são o motor CC e do forno elétrico. Apresenta-se o método dos mínimos quadrados para estimação dos parâmetros do motor, (Basilio 2004), e o método das áreas sugerido em (Astrom 1995).

A.1 Modelo Discreto

Nesta secção apresenta-se os principais tópicos de Identificação de Sistemas que são utilizados para a estimar os parâmetros dos modelos das plantas para fins de projeto de controladores.

A.1.1 Modelo de 1^a Ordem

Os métodos de ajuste de controladores do tipo PID utilizam um modelo de 1^a ordem para representação do comportamento da planta. A partir deste modelo são obtidos os valores de tempo e de saída que são utilizados para calcular os parâmetros do controlador.

Outra consideração importante, os métodos de resposta em frequência e ao degrau não podem ser aplicados diretamente na identificação dos parâmetros de um sistema de segunda ordem (Basilio 2004). Uma dificuldade usualmente encontrada na preparação de um laboratório de controle orientado a espaço de estados,

é que muitas das técnicas de identificação de sistemas disponíveis na literatura são para sistemas do tipo SISO.

A solução para contornar essa dificuldade é a utilização da identificação paramétrica. Dessa forma, um modelo discreto para um sistema contínuo de primeira ordem. Seja a Equação (A.1), a função de transferência de um sistema contínuo de primeira ordem, sem retardo de tempo, com constante τ e ganho de regime permanente K ,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (\text{A.1})$$

a representação direta em espaço de estados para (A.1),

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

sendo $A = \frac{-1}{\tau}$, $B = \frac{K}{\tau}$ e, $C = 1$.

Sabe-se da teoria de controle (e B. Wittenmark 1990), que o modelo discreto equivalente a um sistema contínuo dado por (A.2),

$$\begin{aligned} x(t_{k+1}) &= \Phi x(t_k) + \Gamma u(t_k) \\ y(t_k) &= Cx(t_k) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

sendo t_k t_{k+a} as representações contíguas dos instantes de amostragem.

$$\Phi = e^{Ah} = e^{-\frac{h}{\tau}} \quad (\text{A.4})$$

$$\Gamma = \int_0^h e^{Ax} B dx = K(1 - \Phi) \quad (\text{A.5})$$

sendo $h = t_{k+1} - t_k$ a variável que representa o período de amostragem. Facilmente se observa que (A.3) conduz a seguinte equação diferença linear,

$$y(t_k) = \Phi y(t_{k-1}) + \Gamma u(t_{k-1}) \quad (\text{A.6})$$

A partir da expressão anterior pode-se observar que, estimados os parâmetros Φ e Γ , então o ganho K e a constante de tempo τ do modelo contínuo (A.1), podem ser calculados usando a relação dada em (A.4).

A.1.2 Estimação dos Parâmetros Φ e Γ

Nesta seção apresenta-se a estimação dos parâmetros Φ e Γ utilizando o método dos mínimos quadrados. As diretrizes para a esta estimativa são as sugeridas por (?). Considerando que a saída do sistema $y(t_k)$ e a entrada $u(t_k)$ sejam conhecidas para $k = 0, 1, \dots, q$. Dessa forma a equação (A.6),

$$\begin{cases} y(t_1) = \Phi y(t_0) + \Gamma u(t_0) \\ y(t_2) = \Phi y(t_1) + \Gamma u(t_1) \\ \vdots \\ y(t_q) = \Phi y(t_{q-1}) + \Gamma u(t_{q-1}) \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

A sua forma matricial equivalente,

$$\underline{b} = A\underline{x} \quad (\text{A.8})$$

sendo

$$\underline{b} = \begin{bmatrix} y(t_1) \\ y(t_2) \\ \vdots \\ y(t_q) \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} y(t_1) & u(t_0) \\ y(t_2) & u(t_1) \\ \vdots & \vdots \\ y(t_{q-1}) & u(t_{q-1}) \end{bmatrix},$$

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \Phi \\ \Gamma \end{bmatrix}$$

É importante lembrar que, na prática, $q + 1$ (o número de entradas e saídas registradas) é muito maior do que 2 (o número de colunas de A). Este fato torna quase impossível uma solução para o sistema dado pela Equação (A.8), e, portanto, procura-se uma solução aproximada. Uma solução bem conhecida deste

problema é a solução dos "mínimos quadrados", isto é, aquela que minimiza a norma Euclidiana de $\underline{e} = b - A\underline{x}$ e é dada por

$$\underline{x} = (A^t A)^{-1} A^t \underline{b} \quad (\text{A.9})$$

Na estimação dos parâmetros de um sistema discreto pelo método dos mínimos quadrados, a forma do sinal de entrada representa um papel importante, desde que ele pode fazer com que a matriz A perca o *rank*, evitando o cálculo da inversa de $A^t A$ em (A.9). Tal problema pode ser evitado pelo uso de um sinal de entrada, que são suficientemente rico tanto quanto às informações de frequência que se esteja interessado.

A.2 Modelo do Grupo Gerador

O grupo motor-gerador é modelado como um sistema de segunda ordem. A carga, no caso o gerador, é modelada por um sinal externo de distúrbio aplicado a entrada da planta. Desta forma, obtém-se o modelo do grupo gerador CC que é o mesmo de um motor controlado pela armadura, Figura A.2.

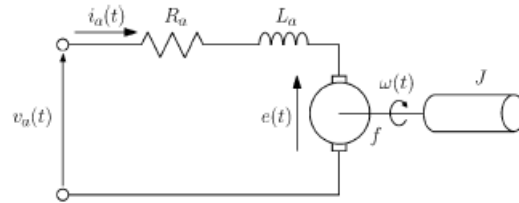


Figura A.1: Circuito Equivalente de Motor de CC - Controle pela Armadura.

Aplicando as leis de *Kirchoff* e de *Newton* ao sistema representado na Figura A.2,

$$\begin{aligned} L_a \frac{d}{dt} i_a(t) + R_a i_a(t) + e(t) &= v_a(t) \\ J \frac{d}{dt} \omega(t) + f \omega(t) &= T_m(t) - T_d(t) \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

sendo $T_m(t)$ o conjugado do motor e $T_d(t)$ é o conjugado externo ou carga. R_a e L_a são a resistência e a indutância da armadura. J é a constante de inércia e f é o atrito. As relações entre as partes elétrica e mecânica do motor CC,

$$\begin{aligned} e(t) &= K_g \omega(t) \\ T_m(t) &= K_a i_a(t) \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

sendo o conjugado $T_m(t)$ do eixo do motor relacionado com a corrente de armadura I_a pela constante K_a . A velocidade $\omega(t)$ do eixo é relacionada com a força contra- eletromotriz pela constante K_g . A descrição no espaço de estado é obtida pela substituição das relações anteriores nas equações (A.10),

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a(t) \\ \frac{d}{dt} \omega(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_g}{L_a} \\ \frac{K_a}{J} & -\frac{f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} v_a(t) \quad (\text{A.12})$$

Considerações sobre o modelo do atrito é enfatizado em (Basilio 2004). Os atritos de *Coulomb* e Viscoso são os dois tipos presentes no motor CC. As contribuições classificados como Atrito de *Coulomb* tem como origem as escovas e o comutador. O atrito viscoso tem suas origens nas fontes de atrito, por exemplo: engrenagens lubrificadas que produzem atrito viscoso devido ao fluxo laminar do lubrificante. O atrito de *Coulomb* torna-se significativo para valores pequenos de tensão de armadura.

A.2.1 Modelo para Identificação

Em termos práticos o valor da velocidade no eixo de rotor é monitorado por meio de sensores do tipo tacômetro ou encoder. Este dispositivos apresentam como saída uma tensão $v_t(t)$ que é proporcional a $\omega(t)$,

$$v_t(t) = K_t \omega(t) \quad (\text{A.13})$$

Substituindo a Equação (A.13), em termos da velocidade $\omega(t)$, na expressão (A.10) e desenvolvendo na equação elétrica,

$$\begin{aligned} v_a(t) &= R_a i_a(t) + L_a \frac{d}{dt} i_a(t) + k_g \omega(t) \\ v_a(t) &= R_a i_a(t) + L_a \frac{d}{dt} i_a(t) + \frac{k_a}{k_t} v(t) \end{aligned}$$

Ainda,

$$L_a \frac{d}{dt} i_a(t) + R_a i_a(t) = v_a(t) - \frac{k_g}{k_t} v(t) \quad (\text{A.14})$$

Em relação a Equação mecânica,

$$\begin{aligned} T_m(t) - T_d(t) - f\omega(t) &= J \frac{d}{dt} \omega(t) \\ T_m(t) - f \frac{v_t(t)}{k_t} &= J \frac{d}{dt} \frac{v(t)}{k_t} \\ k_t t_m(t) - f v(t) &= J \frac{d}{dt} v(t) \end{aligned}$$

Ainda,

$$k_t k_a i_a(t) - f v(t) = J \frac{d}{dt} v(t) \quad (\text{A.15})$$

No desenvolvimento da expressão anterior, considera-se $T_d(t) = 0$.

No intuito de associar ao modelo todos parâmetros envolvidos no processo de identificação, as equações (A.14) e (A.15) do modelo são representados em termos de variáveis de tensão de corrente do circuito de armadura. O modelo, Equações (A.14) e (A.15), na forma de entradas das partes elétrica e mecânica,

$$\begin{aligned} L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) &= u_e(t) \\ J \frac{dv(t)}{dt} + f v(t) &= u_m(t) \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

sendo

$$\begin{aligned} u_e(t) &= v_a(t) - \frac{K_g}{K_t} v(t) \\ u_m(t) &= K_a K_t i_a(t) \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

As equações das entradas em (A.17) representam dois sistemas de primeira ordem, um sistema elétrico e um sistema mecânico, que são representados por dois sistemas no espaço de estados. Considerando $x_e(t) = i_a(t)$ e $x_m(t) = v_t(t)$,

A equação completa do sistema elétrico,

$$\begin{aligned} \dot{x}_e(t) &= A_e x_e(t) + B_e u_e(t) \\ y_e(t) &= x_e(t) \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

sendo $A_e = -R_a/L_a$ e $B_e = 1/L_a$

Em relação ao sistema mecânico,

$$\begin{aligned} \dot{x}_m(t) &= A_m x_m(t) + B_m u_m(t) \\ y_m(t) &= x_m(t) \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

sendo $A_m = -f/J$ e $B_m = 1/J$.

Segundo a Equação (A.17), a entrada $u_e(t)$ depende de um controle variável $v_a(t)$ e outro $v_t(t)$, e dos parâmetros da máquina. Conclusão semelhante pode ser feita para $u_m(t)$, do qual depende de $i_a(t)$, e dos parâmetros do motor. Uma consequência imediata deste fato é que a identificação de R_a, L_a, J e f não pode ser feita pelas técnicas de identificação que utilizam resposta em frequência ou de passo. Este problema aparentemente pode ser contornado se uma técnica de identificação de sistema de tempo-discreto for empregada ¹. Uma vez que a planta está sendo descrita pelo modelo linear dado na equação A.10, deve ser determinada sua região linear de operação.

As descrições em espaço de estados das Equações (A.18) e (A.19) são apresentadas na forma discretizada,

$$\begin{aligned} x_e(t_{k+1}) &= \Phi_e x_e(t_k) + \Gamma_e u_e(t_k) \\ y_e(t_k) &= x_e(t_k) \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

sendo $\Phi_e = e^{-h/\tau_e}$ e $\Gamma_e = K_e(1 - \Phi_e)$.

$$\begin{aligned} x_m(t_{k+1}) &= \Phi_m x_m(t_k) + \Gamma_m u_m(t_k) \\ y_m(t_k) &= x_m(t_k) \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

sendo $\Phi_m = e^{-h/\tau_m}$ e $\Gamma_m = K_m(1 - \Phi_m)$.

As equações (A.20) e (A.21), sugerem que o conhecimento dos parâmetros Φ_e, Φ_m, Γ_e e Γ_m conduz a determinação dos ganhos K_e e K_m e das constantes de tempo τ_e e τ_m . A partir dos valores estimados determina-se parâmetros $R_a = 1/K_e, f = 1/K_m$, $L_a = R_a \tau_e$ e $J = f \tau_m$ dos modelos elétrico e mecânico.

¹ASTROM, K.J. and WITTEMMARK, B., *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*, 2ª edition, Prentice-Hall, 1990.

A.2.2 Determinação da Região de Operação

Neste item é apresentado o procedimento para determinação da região linear de operação de um motor CC. Estes algoritmos determinam os valores de entrada para os quais o sistema apresenta um comportamento linear.

Consideramos que o ganho do tacômetro K_t seja conhecido. Se K_t é desconhecido, seu valor pode ser determinado pelo método dos mínimos quadrados ², a partir dos pontos (ω_i, V_{ti}) , $i = 1, 2, \dots, n$, sendo ω_i a velocidade no eixo e V_{ti} é a tensão correspondente nos terminais do tacômetro.

Seja V_a a amplitude do sinal de tensão aplicado ao circuito de armadura do motor CC e que V_t corresponde ao valor de regime permanente da tensão nos terminais do tacômetro. A determinação da região linear de operação pode ser realizada como descrito nos parágrafos seguintes.

Passo 1 Aplica-se ao circuito de armadura uma tensão de amplitude V_{ai} , $i = 1, 2, \dots, n$, e registra-se os valores de regime-permanente das correspondentes tensões nos terminais do tacômetro V_{ti} , para $i = 1, 2, \dots, n$.

Passo 2 Forma-se os pontos (V_{ai}, V_{ti}) , para $i=1, 2, \dots, n$, e determina-se os coeficientes a_k , $k = 0, 1, \dots, q$ de um polinômio $V_t = f(V_a)$ de grau q ,

$$V_t = a_0 V_a^q + a_1 V_a^{q-1} + a_{q-1} V_a + a_q \quad (\text{A.22})$$

Os parâmetros do polinômio são estimados pelo método dos mínimos quadrados, aos pontos (V_{ai}, V_{ti}) . A formalização do método, os coeficientes a_i , para $i = 0, 1, \dots, q$ do polinômio $V_t = p(V_a)$, dados na Equação A.22 podem ser calculados pelo método dos mínimos quadrados. Com as medidas obtidas do experimento, o seguinte sistema de equações é formado,

$$\begin{bmatrix} V_{i1} \\ V_{i2} \\ \vdots \\ V_{tn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a1}^q & V_{a1}^{q-1} & \dots & V_{a1} \\ V_{a2}^q & V_{a2}^{q-2} & \dots & V_{a2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{an}^q & V_{an}^{q-1} & \dots & V_{an} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{q-1} \end{bmatrix} \quad (\text{A.23})$$

²Id., *Cálculo Numérico, Aspectos Teóricos e Computacionais*, 2ª edição, Makron Books, 2000.

A região linear de operação é dada por V_a , tal que a derivada de V_t , em relação a V_a é aproximadamente constante.

O Sistema é visto como um sistema linear $Ax = b$, sendo $x = [a_0, a_1, \dots, a_q]^t$ e sua solução $(A^t A)^{-1} A^t b$. A otimização dos mínimos quadrado é sugerida, o número de linhas associados com o número de pontos registrados no experimento é muito maior que o número de colunas da matriz A que é grau do polinômio $p(V_a) + 1$.

Uma maneira de determinar a quantidade de coeficientes q , fazer $q = 1$ e calcular $\|e\|_2 = \|Ax - b\|_2$. Utilizando-se como critério para estabelecer a quantidade de coeficientes, o aumento q até que a matriz A se torne quase singular ou o decréscimo em $\|e\|_2$ esteja abaixo de um valor estabelecido como limite.

O procedimento proposto permite caracterizar um efeito não linear conhecido como zona morta, para tensões com amplitude abaixo de um certo valor V_0 , o eixo do motor não gira.

A.2.3 Cálculo de K_g e K_a

Quando são expressa em unidades do sistema internacional, as constantes eletromotiva K_g e de conjugado K_a , possuem os mesmos valores. Assim, apenas um experimento é suficiente para determiná-las. A partir da Equação A.11, se um conjugado externo constante for aplicado ao eixo, o motor CC é forçado a funcionar como um gerador, e a tensão induzida de regime-permanente nos terminais de armadura sem carga conectada,

$$E = \left(\frac{K_g}{K_t}\right)v_t \quad (\text{A.24})$$

A expressão anterior, sugere o seguinte procedimento para o cálculo de K_g , conforme o que segue.

Passo 1 - Aplica-se um conjugado externo no motor e registra-se a tensão nos terminais do tacômetro V_{ti} e a tensão induzida nos terminais da armadura V_{ai} , para diferentes velocidades. Uma vez que, não exista carga conectada ao circuito da armadura, pode-se dizer que V_{ai} é aproximadamente igual a E_i .

Passo 2 - Montar os os vetores,

$$e = \begin{bmatrix} E_1 & E_2 & \dots & E_n \end{bmatrix}^t \quad (\text{A.25})$$

$$v = \begin{bmatrix} V_{t1} & V_{t2} & \dots & V_{tn} \end{bmatrix}^t \quad (\text{A.26})$$

Passo 3 - Cálculo K_g

$$K_g = K_t \frac{v^T e}{v^T v} \quad (\text{A.27})$$

Se a velocidade do eixo ω_i for registrada, em vez da tensão nos terminais do tacômetro, V_{ti} , o vetor $\omega = [W_1 W_2 \dots W_n]^t$, em vez de V , e expressar $K_g = \frac{\omega^t e}{\omega^t \omega}$

A.2.4 Cálculo de R_a , L_a , J e f

As descrições em Espaço de Estado, Equações (A.20) e (A.21), sugerem que as saídas sejam representadas por equações lineares a diferença. Desta maneira, temos uma formulação adequada para estimação dos parâmetros por meio de medições diretas de tensão e corrente. As equações a diferença para os sistemas elétrico e mecânico,

$$y_e(t_k) = \Phi_e y_e(t_{k-1}) + \Gamma_e u_e(t_k - 1) \quad (\text{A.28})$$

$$y_m(t_k) = \Phi_m y_m(t_{k-1}) + \Gamma_m u_m(t_k - 1) \quad (\text{A.29})$$

sendo $y_e(t_k) = i_a(t_k)$, $y_m(t_k) = v_t(t_k)$, $u_e(t_k) = v_a(t_k) - (K_g/K_t)v_t(t_k)$ e $u_m(t_k) = K_a K_t i_a(t_k)$. Φ_e e Γ_e e Φ_m e Γ_m que são estimados para fins de determinação dos parâmetros.

Aplicando um sinal de tensão $v_a(t)$ e registrando $v_a(t_k)$, $i_a(t_k)$ e $v_t(t_k)$ no instante de amostragem t_k , $k = 0, 1, \dots, n$ ($n \gg 2$). As medidas são utilizadas para montar dois sistemas um para estimação das grandezas relacionadas com a parte elétrica e outra para a parte mecânica.

Para fins de medições, o conjunto de medidas das grandezas elétricas e mecânicas relacionadas com as Equações (A.28) e (A.29) são representadas por

$$i_a = M_e x_e \quad (\text{A.30})$$

$$v_t = M_m x_m \quad (\text{A.31})$$

sendo M_e e M_m as matrizes de medição e entrada. x_e e x_m são os valores estimados Φ_e e Γ_e e Φ_m e Γ_m pelo método dos mínimos quadráticos.

As soluções do mínimo quadrático para o sistema de Equações (A.30) e (A.31),

$$x_e = (M_e^T M_e)^{-1} M_e^T i_a \quad (\text{A.32})$$

$$x_m = (M_m^T M_m)^{-1} M_m^T v_t \quad (\text{A.33})$$

As soluções das Equações (A.32) e (A.30) são utilizadas para determinação dos parâmetros R_a , L_a , J e f do motor CC,

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{1-\Phi_e}{\Gamma_e}, & L_a &= -\frac{R_a h}{\ln(\Phi_e)}, \\ f &= \frac{1-\Phi_m}{\Gamma_m}, & J &= -\frac{f h}{\ln(\Phi_m)} \end{aligned} \quad (\text{A.34})$$

sendo h o período de amostragem.

Os sistemas de equações (A.30) e (A.31) para estimação dos parâmetros forma expandida,

$$\begin{bmatrix} i_a(t_1) \\ i_a(t_2) \\ i_a(t_3) \\ \vdots \\ i_a(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a(t_0) & u_e(t_0) \\ i_a(t_1) & u_e(t_1) \\ i_a(t_2) & u_e(t_2) \\ \vdots & \vdots \\ i_a(t_{n-1}) & u_e(t_{n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_e \\ \Gamma_e \end{bmatrix} \quad (\text{A.35})$$

e

$$\begin{bmatrix} v_t(t_1) \\ v_t(t_2) \\ v_t(t_3) \\ \vdots \\ v_t(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_t(t_0) & u_m(t_0) \\ v_t(t_1) & u_m(t_1) \\ v_t(t_2) & u_m(t_2) \\ \vdots & \vdots \\ v_t(t_{n-1}) & u_m(t_{n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_m \\ \Gamma_m \end{bmatrix} \quad (\text{A.36})$$

A.3 Modelo do Forno Elétrico

O modelo do elétrico, representado com o seu sistema de controle na A.3, utilizado para representar o comportamento dinâmico do forno elétrico é o sugerido por (?) e o procedimento desenvolvido por (Astrom 1995) é utilizado para estimar os parâmetros do modelo. O forno elétrico possui as seguintes características nominais: tensão de 220 volts, corrente de 10 ampères, resistência de 22 ohms e temperatura de 350 ° Celsius.

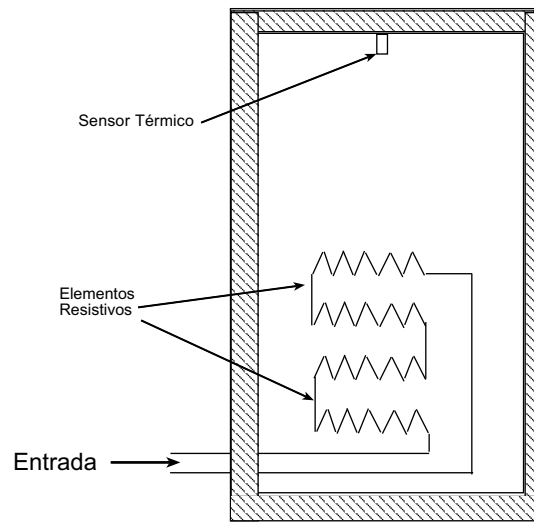


Figura A.2: Diagrama do Forno Elétrico.

A planta é modelada como um sistema de primeira ordem com atraso que é descrito por função de transferência,

$$G(s) = \frac{K e^{-Ts}}{\tau s + 1} \quad (\text{A.37})$$

sendo K a representação do ganho DC, T é o atraso de transporte (tempo morto) e τ é a constante de tempo do sistema.

Aplicando a transformada inversa de Laplace na Equação (A.37), a resposta $y(t)$ do sistema para entrada degrau $u(t) = A/s$,

$$y(t) = KA \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}(t-T)} \right), \quad t \geq T \quad (\text{A.38})$$

Os parâmetros K , τ e T são estimados com o auxílio da Equação (A.38). Para a identificação do ganho K , a partir da Equação (A.38), tem-se que $y_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$,

$$K = \frac{y_\infty}{A} \quad (\text{A.39})$$

Deve ser ressaltado que na prática o sinal de saída $y(t)$ é, em geral, bastante ruidoso. Pode ser facilmente verificado que, neste caso, o valor de y_∞ que minimiza $\|e\|_2$, sendo $y_{\infty i}$, $i = 1, 2, \dots, n$ são valores de $y(t_i)$ para valores de $t = t_i \geq t_s$ sendo um instante de tempo para o qual a resposta do sistema pode ser considerada como estando em regime permanente.

Uma maneira automática de se obter os valores de T e τ é através do método das áreas (Astrom 1995). Nesse método, a determinação dos parâmetros T e τ é feita a partir do cálculo das áreas A_0 e A_1 representadas na Figura A.3. Assim sendo, a determinação dos parâmetros K , T e τ pode ser feita de acordo com o seguinte algoritmo.

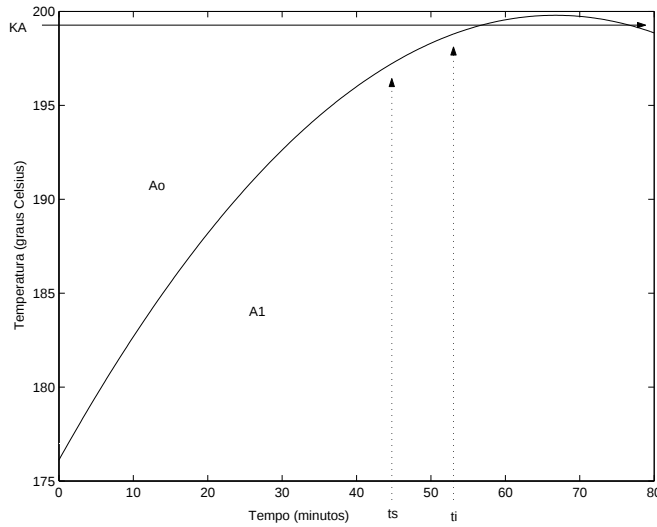


Figura A.3: Esboço do Método das Áreas para Estimação de Parâmetros da do Forno.

APÊNDICE B

O Hardware da Plataforma

Neste Apêndice apresenta-se os dados do fabricante dos sensores de movimento e temperatura, conversor digital analógico e o diagrama esquemático do PIC16F877.

B.1 Sensores

Nesta seção apresenta-se as principais características técnicas dos sensores de movimento e de temperatura que são utilizados na plataforma.

B.1.1 Sensor de Movimento

O sensor de movimento usado na plataforma para o controle de velocidade do motor CC é implementado com um fototransistor de silício, no caso um L14C1 fabricado pela FAIRCHILD® ou equivalente. O L14C1 é um componente eletrônico hermeticamente selado, com uma ampla recepção angular. Nesse dispositivo a corrente induzida por efeito fotoelétrico é a corrente de base do transistor. O corrente de coletor está diretamente relacionada ao aumento da intensidade de luz. A representação física e as características elétricas do fototransistor podem ser vistas na Figura B.1.

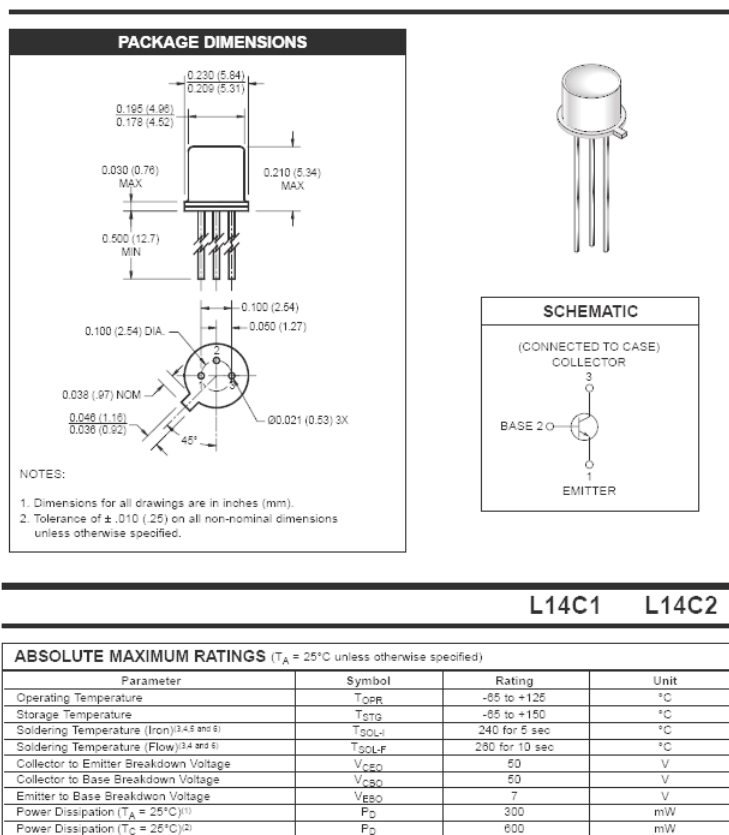


Figura B.1: Sensor para o Sistema de Aquisição de Dados - Motor CC.

B.1.2 Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura é o LM35DZ, figura B.2, fabricado pela RS components[®]. O LM35DZ é um sensor semiconductor de precisão para medir temperatura, figura xx. Fornecendo uma saída de 10mV por graus Celsius. Ao contrário de outros dispositivos com saídas proporcional a temperatura absoluta (em graus Kelvin), este sensor não possui grande *off-set* de tensão. Ele possui ainda, uma precisão de 1/4 $^\circ\text{C}$ em temperatura local ou 3/4 $^\circ\text{C}$ para toda a faixa de temperatura. Na figura B.3 apresenta-se as características elétricas deste sensor.

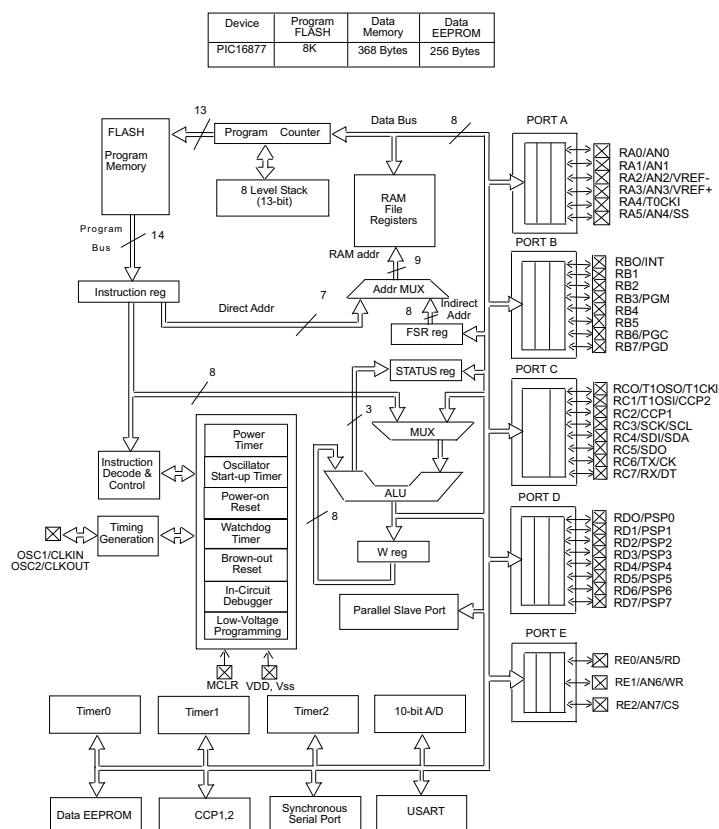


Figura B.4: Diagrama Esquemático do Controlador PIC16F877.

B.3 Conversor Digital Analógico

O conversor Digital Analógico utilizado na plataforma é um circuito integrado TLC5602x da Texas Instruments®. É um dispositivo de baixa potência, de alta velocidade. O conversor TLC5602x converte sinal digital para analógico em taxa de amostragem de até 20 MHz. Por causa da operação de alta velocidade, o TLC5602x é conveniente para aplicações como televisão digital, processamento de vídeo de computador e processamento de sinal de radar. Este conversor pode funcionar na faixa de temperatura entre 0°C a 70°C. A aparência deste conversor pode ser visto na figura B.3.

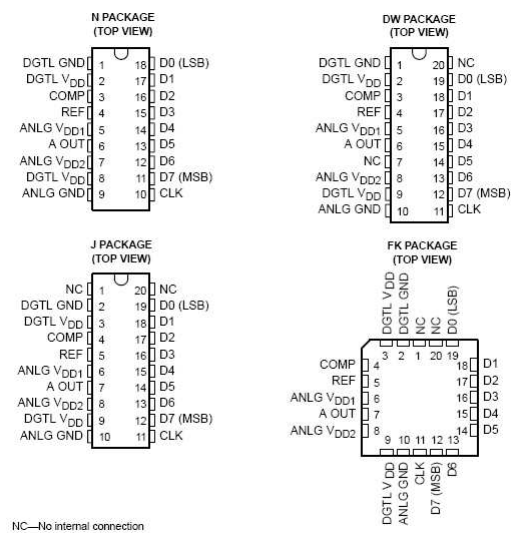


Figura B.5: Pinagem do Conversor Digital-Analógico.

APÊNDICE C

Parâmetros Experimentais do Forno

Neste Apêndice apresenta-se as medidas e a estimação dos parâmetros para o modelo do forno elétrico para vários valores de tensões. O sistema dinâmico é representando por um modelo de primeira ordem para vários pontos de operação. Considerando uma faixa de operação para tensões de atuação entre 20 V, apresenta-se K , T e τ para nove modelos que são utilizados para avaliar comportamento dinâmico do forno e para fins de projeto de controladores.

C.1 Cálculos para tensão de 20 volts

Na expressão (3.2) é necessário determinar os parâmetros K , T e τ , para que o modelo fique completo. A Tabela (C.1) contém os resultados das variações da temperatura do forno, quando é aplicada uma tensão de 20 volts.

Tabela C.1: Temperaturas do forno para tensão de 20 volts

Números Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Temperatura (°C)	28,9	28,8	28,9	29,0	29,1	29,1	29,2	29,3	29,4	29,5
Números Pontos	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tempo (min)	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Temperatura (°C)	29,5	29,6	29,7	29,8	29,8	29,9	30,0	30,0	30,1	30,1
Números Pontos	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tempo (min)	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
Temperatura (°C)	30,2	30,2	30,2	30,3	30,4	30,4	30,4	30,5	30,5	30,5

Com os resultados para a tensão de 20 volts e de acordo com o item 2 do algoritmo, escolhe-se $t_i = 30$ min. Calculando-se y_∞ para a tensão de 20 volts, tem-se:

$$y_{\infty 20} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\infty i}$$

$$= \frac{1}{21} (30,1 + 30,1 + 30,2 + 30,2 + 30,2 + 30,3 + 30,4 +$$

$$30,4 + 30,5 + 30,5 + 30,5 + 30,5 + 30,5 + 30,5 + 30,5 + 30,5 +$$

$$30,5 + 30,5 + 30,5 + 30,5) = 1,30$$

O valor de K,

$$K_{20} = \frac{y_\infty}{A} = \frac{1,31}{20} = 0,066$$

Para determinar os parâmetros T e τ . Deve-se calcular a área A_0 , vista na Figura C.1.

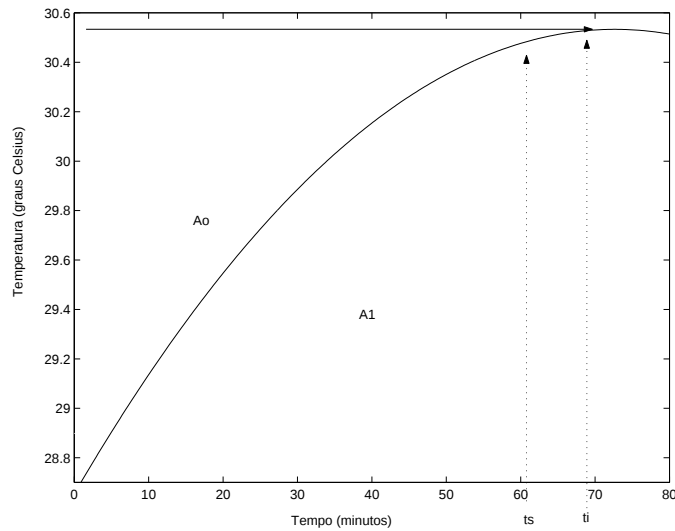


Figura C.1: Curva: temperatura do forno para a tensão de 20 volts.

O cálculo da área A_0 pode ser realizado da seguinte maneira: primeiro calcula-se a área determinada pelo retângulo de dimensões $KA = 30,5$ e $t_i = 69,8$. Em seguida, subtrai-se dessa área o valor determinada pela curva:

$$y = -0,00036x^2 + 0,052x + 29 \quad (C.1)$$

A Equação (C.1), foi determinada ajustando pelo método dos mínimos quadrados, os dados da curva temperatura em função do tempo, na tensão de 20 volts. Assim,

$$A_0 = 30,5 \cdot 69,8 - \int_0^{69,8} -0,00036x^2 + 0,052x + 29 = 18,9$$

a partir do item 4, calcula-se $T + \tau$:

$$T + \tau = \frac{18,9}{1,30} = 14,54$$

para calcular A_1 faz-se:

$$A_1 = \int_0^{0,2} -0,00036x^2 + 0,052x + 29 = 5,80$$

calcula-se τ da seguinte forma:

$$\tau_{20} = \frac{A_1 e}{y_\infty} = \frac{5,80 \cdot 2,72}{1,30} = 12,13$$

e para calcular o valor de T tem-se:

$$T_{20} = \frac{A_0}{y_\infty} - \tau = \frac{18,9}{1,30} - 12,13 = 2,40$$

C.2 Cálculos para tensão de 40 volts

O forno é alimentado com um degrau de amplitude de 40 volts e faz-se a aquisição da resposta $y(t)$ =temperatura em graus *Celsius*. Os resultados obtidos são os mostrados na Tabela C.2.

O instante t_s para a tensão de 40 volts é de 76 min. Como $t_i > t_s$. Escolhe-se t_i igual a 88 min. Então $y(t_i) = y_\infty$. O valor de y_∞ é:

Tabela C.2: Temperaturas do forno para tensão de 40 volts

Números Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Temperatura (°C)	30,5	30,6	30,7	30,9	31,2	31,5	31,8	32,0	32,4	32,7
Números Pontos	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tempo (min)	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Temperatura (°C)	33,0	33,4	33,8	33,9	34,4	34,6	34,8	35,0	35,3	35,6
Números Pontos	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tempo (min)	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
Temperatura (°C)	35,7	35,9	36,1	36,2	36,4	36,5	36,6	36,7	36,9	37,1
Números Pontos	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Tempo (min)	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
Temperatura (°C)	37,4	37,4	37,5	37,6	37,7	37,7	37,7	37,7	37,8	37,9
Números Pontos	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Tempo (min)	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
Temperatura (°C)	38,0	38,0	38,0	38,0	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8

$$y_{\infty 40} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\infty i}$$

$$= \frac{1}{6}(37,7 + 37,7 + 37,7 + 37,7 + 37,7 + 37,7) = 37,7$$

o valor de K,

$$K_{40} = \frac{y_{\infty}}{A} = \frac{37,7}{40} = 0,94$$

Assim como no caso anterior, para determinar os parâmetros T e τ . Deve-se calcular a área A_0 , vista na Figura C.2.

Procede-se como no caso anterior para calcular a área A_0 , determina-se a área do retângulo de dimensões $KA = 37,7$ e $t_i = 98$. Em seguida, subtrai-se desse valor a área determinada pela curva dada por:

$$y_{40} = -0,00089x^2 + 0,16x + 30 \quad (\text{C.2})$$

$$A_0 = 37,7 \cdot 88 - \int_0^{88} -0,00089x^2 + 0,16x + 30 = 260,25$$

T + τ :

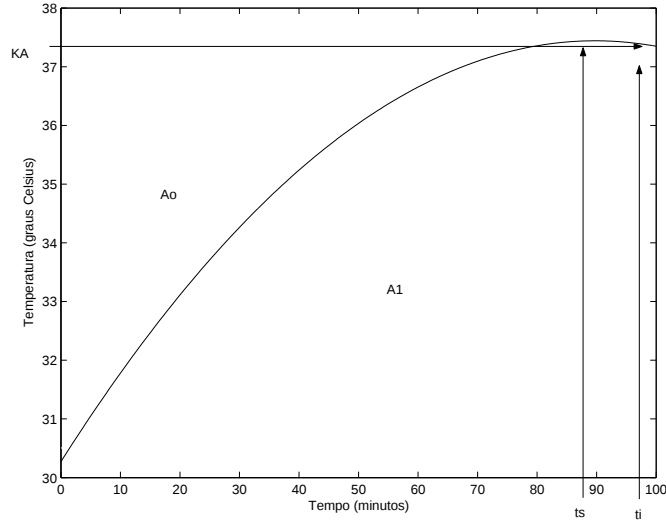


Figura C.2: Curva: temperatura do forno para a tensão de 40 volts.

$$T + \tau = \frac{260,25}{37,7} = 6,90$$

cálculo de A_1 :

$$A_1 = \int_0^3 -0,00089x^2 + 0,16x + 30 = 90,71$$

cálculo de τ ,

$$\tau_{40} = \frac{A_1 e}{y_\infty} = \frac{90,71 \cdot 2,72}{37,7} = 6,54$$

ara calcular o valor de T tem-se:

$$T_{40} = \frac{A_0}{y_\infty} - \tau = \frac{260,25}{37,7} - 6,54 = 0,36$$

C.3 Resultado para tensão de 60 volts

O forno é alimentado com um degrau de amplitude de 80 volts e faz-se a aquisição da resposta $y(t)$ =temperatura em graus *Celsius*. Os resultados obtidos estão contidos na Tabela C.3.

O instante t_s para a tensão de 60 volts é de 116 min. Como $t_i > t_s$. Escolhe-se t_i igual a 155 min. Então $y(t_i) = y_\infty$. O valor de y_∞ é:

Tabela C.3: Temperaturas do forno para tensão de 60 volts

Números Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Temperatura (°C)	38,0	38,0	38,3	38,7	39,2	39,7	40,3	40,6	41,4	41,9
Números Pontos	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tempo (min)	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Temperatura (°C)	42,5	43,1	43,6	44,1	44,6	45,2	45,8	46,3	46,8	47,1
Números Pontos	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tempo (min)	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
Temperatura (°C)	47,6	47,8	48,3	48,5	48,9	49,3	49,7	49,9	50,2	50,4
Números Pontos	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Tempo (min)	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
Temperatura (°C)	50,6	51,0	51,2	51,5	51,8	51,9	52,2	52,2	52,3	52,5
Números Pontos	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Tempo (min)	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
Temperatura (°C)	52,7	53,0	53,0	53,2	53,3	53,5	53,5	53,7	54,0	54,0
Números Pontos	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Tempo (min)	100	102	104	106	108	110	112	114	116	118
Temperatura (°C)	54,3	54,3	54,4	54,6	54,7	54,7	54,9	54,9	55,0	55,0
Números Pontos	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Tempo (min)	120	122	124	126	128	130	132	134	136	138
Temperatura (°C)	55,2	55,4	55,4	55,7	55,6	55,6	55,7	55,8	55,8	55,8
Números Pontos	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Tempo (min)	140	142	144	146	148	150	152	154	156	158
Temperatura (°C)	55,7	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8

$$y_{\infty 60} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\infty i}$$

$$= \frac{1}{15} (55,8 + 55,8 + 55,8 + 55,8 + 55,8 + 55,8 + 55,8 + 55,8 + 55,8 + 55,8 + 55,8 +$$

$$55,8 + 55,8 + 55,8 + 55,7 + 55,6) = 27,18$$

o valor de K,

$$K_{60} = \frac{y_{\infty}}{A} = \frac{27,18}{60} = 4,53$$

Assim como no caso anterior, para determinar os parâmetros T e τ . Deve-se calcular as área A_0 , e A_1 vistas na Figura C.3.

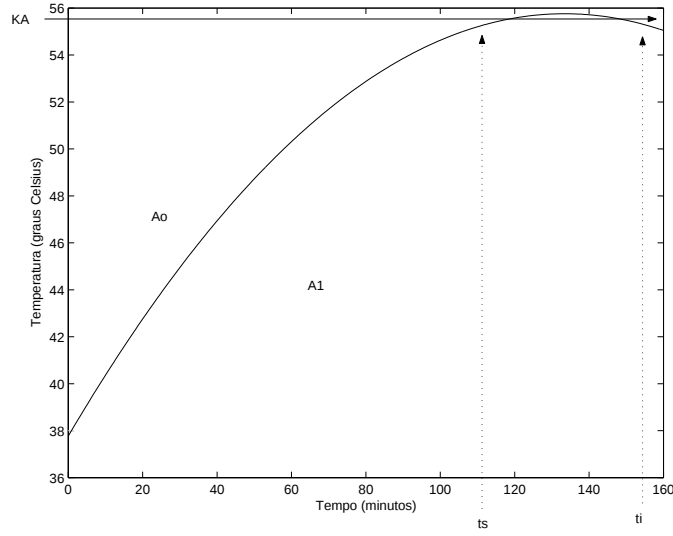


Figura C.3: Curva: temperatura do forno para a tensão de 60 volts.

Cálculo da área A_0 . A área do retângulo de dimensões $KA = 55,8$ e $t_i = 130$. Subtrai-se desse valor a área determinada pela curva:

$$y_{60} = -0,001x^2 + 0,27x + 38 \quad (C.3)$$

$$A_0 = 55,8 \cdot 155 - \int_0^{130} -0,001x^2 + 0,27x + 38 = 1.500,73$$

$T + \tau$,

$$T + \tau = \frac{1.500,73}{27,18} = 55,21$$

cálculo de A_1 :

$$A_1 = \int_0^{13} -0,001x^2 + 0,27x + 38 = 516,08$$

cálculo de τ :

$$\tau_{60} = \frac{A_1 e}{y_{\infty}} = \frac{516,08 \cdot 2,72}{27,18} = 3,57$$

para calcular o valor de T tem-se:

$$T_{60} = \frac{A_0}{y_{\infty}} - \tau = \frac{1500,73}{27,18} - 3,57 = 51,64$$

C.4 Resultado para tensão de 80 volts

O forno é alimentado com um degrau de amplitude de 80 volts e faz-se a aquisição da resposta $y(t)$ =temperatura em graus *Celsius*. Os resultados obtidos são os mostrados na Tabela C.4.

Tabela C.4: Temperaturas do forno para tensão de 80 volts

Números Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Temperatura (°C)	55,8	56,0	56,0	57,0	57,4	57,5	57,9	58,9	59,7	60,4
Números Pontos	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tempo (min)	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Temperatura (°C)	61,2	62,3	62,9	63,7	64,0	64,8	65,5	65,9	66,4	66,9
Números Pontos	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tempo (min)	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
Temperatura (°C)	67,6	68,2	68,4	69,0	69,4	70,1	70,3	70,8	71,2	71,7
Números Pontos	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Tempo (min)	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
Temperatura (°C)	72,1	72,4	72,7	72,9	73,1	73,7	73,8	74,2	74,2	74,4
Números Pontos	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Tempo (min)	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
Temperatura (°C)	74,6	74,7	75,1	75,0	75,2	75,4	75,5	75,7	75,8	76,2
Números Pontos	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Tempo (min)	100	102	104	106	108	110	112	114	116	118
Temperatura (°C)	76,2	76,4	76,5	76,4	76,7	76,8	76,9	77,2	77,0	77,1
Números Pontos	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Tempo (min)	120	122	124	126	128	130	132	134	136	138
Temperatura (°C)	77,2	77,4	77,3	77,3	77,3	77,4	77,7	77,7	77,7	77,8
Números Pontos	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Tempo (min)	140	142	144	146	148	150	152	154	156	158
Temperatura (°C)	78,8	77,9	78,0	78,2	78,4	78,4	78,7	78,9	79,4	79,9
Números Pontos	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Tempo (min)	160	162	164	166	168	170	172	174	176	178
Temperatura (°C)	79,9	80,3	80,5	80,8	80,9	81,1	81,1	81,1	81,1	81,1

O instante t_s para a tensão de 80 volts é de 166 min. Como $t_i > t_s$. Escolhe-se t_i igual a 178 min. Assim $y(t_i) = y_\infty$. O valor de y_∞ é:

$$y_{\infty 80} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\infty i}$$

$$= \frac{1}{7}(80,8 + 80,9 + 81,1 + 81,1 + 81,1 + 81,1 + 81,1) = 81,03$$

o valor de K,

$$K_{80} = \frac{y_{\infty}}{A} = \frac{81,03}{80} = 1,01$$

Assim como no caso anterior, para determinar os parâmetros T e τ . Deve-se calcular as área A_0 , e A_1 vistas na Figura C.4.

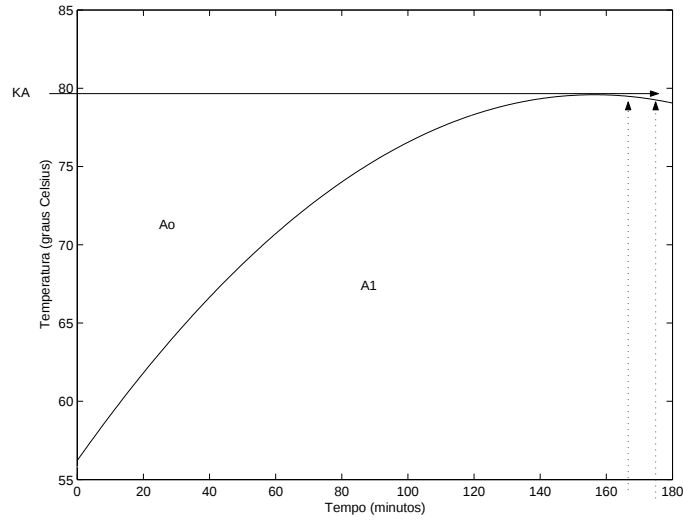


Figura C.4: Curva: temperatura do forno para a tensão de 60 volts.

Cálculo da área A_0 . A área do retângulo de dimensões $KA = 81,1$ e $t_i = 178$. Subtrai-se desse valor a área determinada pela curva:

$$y_{80} = -0,00096x^2 + 0,3x + 56 \quad (C.4)$$

$$A_0 = 81,1 \cdot 178 - \int_0^{178} -0,00096x^2 + 0,3x + 56 = 1.519,93$$

T + τ :

$$T + \tau = \frac{1.519,93}{81,03} = 18,75$$

cálculo de A_1 :

$$A_1 = \int_0^{178} -0,00096x^2 + 0,3x + 56 =$$

cálculo de τ :

$$\tau_{80} = \frac{A_1 e}{y_{\infty}} = \frac{457,44 \cdot 2,72}{81,03} = 15,53$$

cálculo de T:

$$T_{80} = \frac{A_0}{y_{\infty}} - \tau = \frac{1519,93}{81,03} - 15,35 = 3,40$$

C.5 Resultado para tensão de 100 volts

O forno é alimentado com um degrau de amplitude de 100 volts e faz-se a aquisição da resposta $y(t)$ =temperatura em graus *Celsius*. Os resultados obtidos são os mostrados na Tabela C.5.

Tabela C.5: Temperaturas do forno para tensão de 100 volts

Números Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Temperatura (°C)	81,6	82,3	82,7	83,2	84,2	85,1	86,1	86,8	87,4	88,7
Números Pontos	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tempo (min)	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Temperatura (°C)	89,3	90,3	91,4	92,3	92,6	92,6	93,5	94,0	95,4	96,1
Números Pontos	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tempo (min)	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
Temperatura (°C)	97,1	97,5	97,9	98,6	98,9	99,3	100,0	100,5	100,8	101,2
Números Pontos	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Tempo (min)	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
Temperatura (°C)	101,8	102,0	102,1	102,5	103,1	103,5	103,5	103,9	103,9	103,9

O instante t_s para a tensão de 100 volts é de 62 min. Como $t_i > t_s$. Escolhe-se t_i igual a 68 min. Assim $y(t_i) = y_{\infty}$. O valor de y_{∞} é:

$$y_{\infty 100} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\infty i}$$

$$= \frac{1}{9}(102,0+102,1+102,5+103,1+103,5+103,5+103,9+103,9+103,9) = 103,15$$

O valor de K,

$$K_{100} = \frac{y_{\infty}}{A} = \frac{103,15}{100} = 1,03$$

Assim como no caso anterior, para determinar os parâmetros T e τ . Deve-se calcular as área A_0 , e A_1 vistas na Figura C.5.

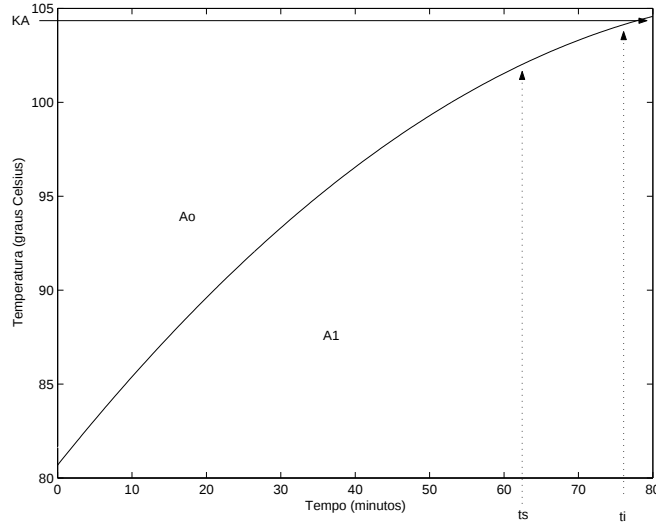


Figura C.5: Curva: temperatura do forno para a tensão de 100 volts.

Cálculo da área A_0 . A área do retângulo de dimensões $KA = 103,9$ e $t_i = 68$. Subtrai-se desse valor a área determinada pela curva:

$$y_{100} = -0,0024x^2 + 0,49x + 81 \quad (C.5)$$

$$A_0 = 103,9 \cdot 68 - \int_0^{68} -0,0024x^2 + 0,49x + 81 = 6.389,34$$

$T + \tau$:

$$T + \tau = \frac{6.384,34}{103,15} = 61,94$$

cálculo de A_1 :

$$A_1 = \int_0^{22} -0,0024x^2 + 0,49x + 81 = 1.892,1$$

cálculo de τ :

$$\tau_{100} = \frac{A_1 e}{y_\infty} = \frac{1.892,1 \cdot 2,72}{103,15} = 49,89$$

cálculo de T,

$$T_{100} = \frac{A_0}{y_\infty} - \tau = \frac{6.389,34}{103,15} - 49,89 = 12,05$$

C.6 Resultado para tensão de 120 volts

O forno é alimentado com um degrau de amplitude de 120 volts e faz-se a aquisição da resposta $y(t)$ =temperatura em graus *Celsius*. Os resultados são mostrados na Tabela C.6.

Tabela C.6: Temperaturas do forno para tensão de 120 volts

Números Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Temperatura (°C)	104,8	107,9	110,3	112,4	113,9	115,0	116,3	117,2	117,6	118,3
Números Pontos	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tempo (min)	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Temperatura (°C)	119,8	119,8	120,3	120,7	121,1	121,8	122,0	122,3	122,6	123,1
Números Pontos	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tempo (min)	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
Temperatura (°C)	123,3	123,7	123,6	123,9	124,0	124,1	124,4	124,4	124,5	124,2
Números Pontos	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Tempo (min)	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
Temperatura (°C)	125,0	125,3	125,0	125,1	125,4	125,4	125,3	125,4	125,4	125,4

O instante t_s para a tensão de 120 volts é de 46 min. Como $t_i > t_s$. Escolhe-se t_i igual a 60 min. Assim $y(t_i) = y_\infty$. O valor de y_∞ é:

$$y_{\infty 120} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\infty i}$$

$$= \frac{1}{10}(125,0+125,3+125,0+125,1+125,4+125,3+125,4+125,4+125,4) = 112,73$$

O valor de K,

$$K_{120} = \frac{y_{\infty}}{A} = \frac{112,73}{120} = 0,94$$

Assim como no caso anterior, para determinar os parâmetros T e τ . Deve-se calcular as áreas A_0 , e A_1 vistas na Figura C.6.

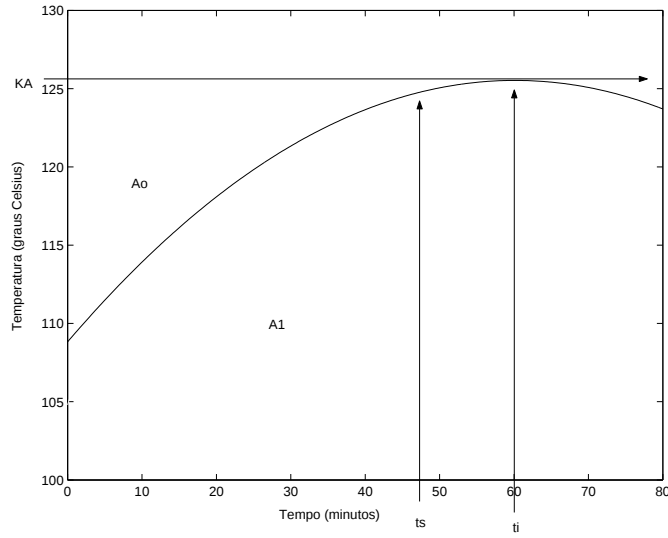


Figura C.6: Curva: temperatura do forno para a tensão de 120 volts.

Cálculo da área A_0 . A área do retângulo de dimensões $KA = 125,4$ e $t_i = 60$. Subtrai-se desse valor a área determinada pela curva:

$$y_{120} = -0,0046x^2 + 0,56x + 110 \quad (C.6)$$

$$A_0 = 125,4 \cdot 60 - \int_0^{60} -0,0046x^2 + 0,56x + 110 = 247,20$$

$T + \tau$:

$$T + \tau = \frac{247,20}{112,73} = 2,19$$

cálculo de A_1 :

$$A_1 = \int_0^{0.7} -0,0046x^2 + 0,56x + 110 = 77,14$$

cálculo de τ :

$$\tau_{120} = \frac{A_1 e}{y_\infty} = \frac{77,14 \cdot 2,72}{112,73} = 1,86$$

cálculo de T,

$$T_{120} = \frac{A_0}{y_\infty} - \tau = \frac{247,20}{112,73} - 1,86 = 0,83$$

C.7 Resultado para tensão de 140 volts

O forno é alimentado com um degrau de amplitude de 140 volts e faz-se a aquisição da resposta $y(t)$ =temperatura em graus *Celsius*. Os resultados obtidos são os mostrados na Tabela C.7.

Tabela C.7: Temperaturas do forno para tensão de 140 volts

Números Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Temperatura (°C)	125,1	125,2	126,2	126,8	128,2	129,1	130,1	131,5	132,6	134,1
Números Pontos	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tempo (min)	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Temperatura (°C)	134,7	136,4	137,5	138,7	139,6	140,5	141,3	142,1	142,8	143,7
Números Pontos	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tempo (min)	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
Temperatura (°C)	144,3	145,0	145,5	146,0	146,8	147,4	148,4	149,9	149,0	149,7
Números Pontos	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Tempo (min)	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
Temperatura (°C)	150,2	150,6	151,1	151,1	151,1	151,5	151,5	152,3	151,9	152,3
Números Pontos	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Tempo (min)	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
Temperatura (°C)	152,3	152,1	152,1	152,3	152,3	152,3	152,3	152,3	152,3	152,3

O instante t_s para a tensão de 140 volts é de 72 min. Como $t_i > t_s$. Escolhe-se t_i igual a 78 min. Assim $y(t_i) = y_\infty$. O valor de y_∞ é:

$$\begin{aligned}
 y_{\infty 140} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\infty i} \\
 &= \frac{1}{13} (152,3 + 151,9 + 152,3 + 152,3 + 152,1 + 152,1 +
 \end{aligned}$$

$$152,3 + 152,3 + 152,3 + 152,3 + 152,3 + 152,3 + 152,3) = 152,23$$

o valor de K,

$$K_{140} = \frac{y_{\infty}}{A} = \frac{152,23}{140} = 1,08$$

Assim como no caso anterior, para determinar os parâmetros T e τ , deve-se calcular as áreas A_0 , e A_1 vistas na Figura C.7.

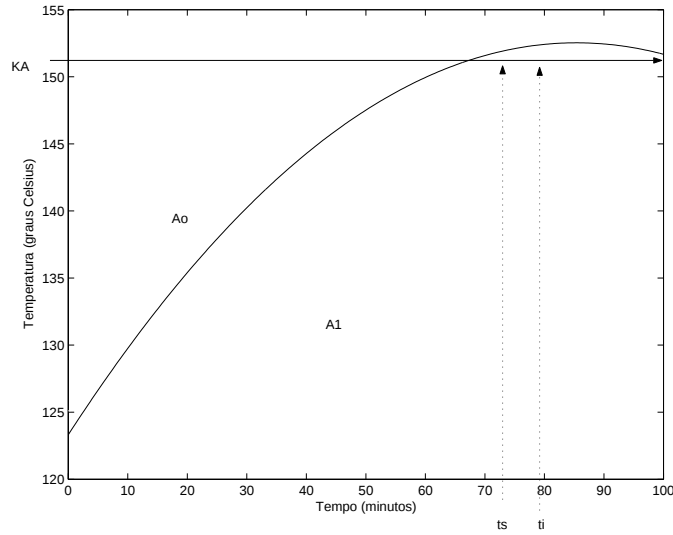


Figura C.7: Curva: temperatura do forno para a tensão de 140 volts.

Cálculo da área A_0 . A área do retângulo de dimensões $KA = 152,3$ e $t_i = 78$. Subtrai-se desse valor a área determinada pela curva:

$$y_{140} = -0,004x^2 + 0,68x + 120 \quad (C.7)$$

$$A_0 = 152,3 \cdot 78 - \int_0^{78} -0,004x^2 + 0,68x + 120 = 1.083,58$$

T + τ :

$$T + \tau = \frac{1.083,58}{152,23} = 7,12$$

cálculo de A_1 :

$$A_1 = \int_0^{2,4} -0,004x^2 + 0,68x + 120 = 289,94$$

cálculo de τ :

$$\tau_{140} = \frac{A_1 e}{y_\infty} = \frac{289,94 \cdot 2,72}{152,23} = 5,18$$

cálculo de T ,

$$T_{140} = \frac{A_0}{y_\infty} - \tau = \frac{1.083,58}{152,23} - 5,18 = 1,93$$

C.8 Resultado para tensão de 160 volts

O forno é alimentado com um degrau de amplitude de 160 volts e faz-se a aquisição da resposta $y(t)$ =temperatura em graus *Celsius*. Os resultados obtidos são os mostrados na Tabela C.8.

Tabela C.8: Temperaturas do forno para tensão de 160 volts

Números Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Temperatura (°C)	152,1	153,1	153,7	154,5	156,0	156,8	158,1	159,0	160,0	162,0
Números Pontos	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tempo (min)	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Temperatura (°C)	163,0	163,9	165,2	165,2	167,3	168,2	169,7	170,3	170,9	172,0
Números Pontos	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tempo (min)	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
Temperatura (°C)	172,3	172,0	173,2	174,1	174,9	174,4	175,6	175,3	175,9	176,7
Números Pontos	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Tempo (min)	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
Temperatura (°C)	176,4	176,4	177,9	177,9	178,8	178,2	178,8	178,8	178,8	178,8

O instante t_s para a tensão de 160 volts é de 56 min. Como $t_i > t_s$. Escolhe-se t_i igual a 64 min. Assim $y(t_i) = y_\infty$. O valor de y_∞ é:

$$y_{\infty 160} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{\infty i}$$

$$= \frac{1}{7}(177,9 + 178,8 + 178,2 + 178,8 + 178,8 + 178,8 + 178,8) = 178,58$$

o valor de K,

$$K_{160} = \frac{y_{\infty}}{A} = \frac{178,58}{160} = 1,12$$

Assim como no caso anterior, para determinar os parâmetros T e τ , deve-se calcular as áreas A_0 , e A_1 vistas na Figura C.8.

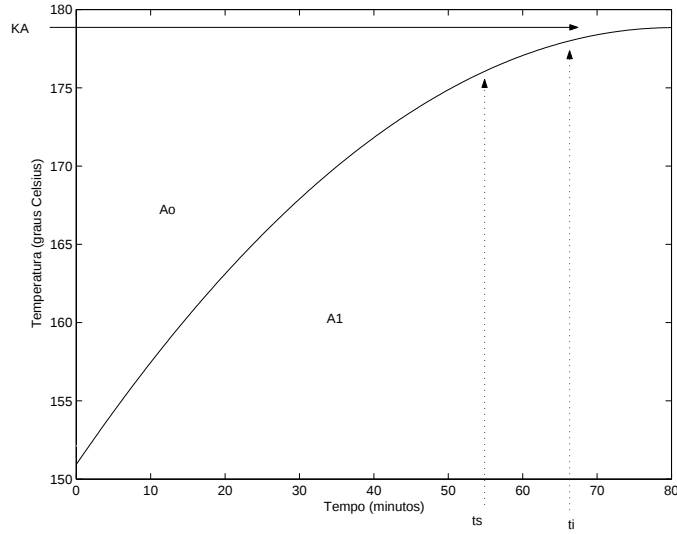


Figura C.8: Curva: temperatura do forno para a tensão de 160 volts.

Cálculo da área A_0 . A área do retângulo de dimensões $KA = 178,8$ e $t_i = 64$. Subtrai-se desse valor a área determinada pela curva:

$$y_{160} = -0,0043x^2 + 0,7x + 150 \quad (C.8)$$

$$A_0 = 178,8 \cdot 64 - \int_0^{64} -0,0043x^2 + 0,7x + 150 = 785,34$$

T + τ :

$$T + \tau = \frac{785,34}{178,58} = 4,39$$

cálculo de A_1 :

$$A_1 = \int_0^{1.5} -0,0043x^2 + 0,7x + 150 = 225,78$$

cálculo de τ :

$$\tau_{160} = \frac{A_1 e}{y_\infty} = \frac{225,78 \cdot 2,72}{178,58} = 3,43$$

cálculo de T,

$$T_{160} = \frac{A_0}{y_\infty} - \tau = \frac{785,34}{178,58} - 3,43 = 0,96$$

Referências Bibliográficas

- Astrom, Karl J. e Hagglund, Tore (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. International Society for Measurement and Con, 2 Sub edition.
- Athans, Michael and L. Peter Falb (1966). *Optimal Control- An Introduction to the Theory and Its Applications*. McGRAW-Hill Book Company .
- Basilio, J. C. e Moreira, M. V. (2004). State-space parameter identification in a second control laboratory. *IEEE Transactions on Education* **47**(2), 204–210.
- Basilio, J. C., Manhães R. R. e Rolim L. G. B. (2002). Controle de temperatura de um forno elétrico a resistência utilizando a função pid de um controlador lógico programável. *Anais do 14º Congresso Brasileiro de Automática - Natal - Brasil*. pp. 2184–2189.
- e B. Wittenmark, K. Astron (1990). *Computer Controlled Systems: Theory and Design*. 2nd ed ed.. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Franklin, Gene F., J.T. David Powell and Michael L. Workman (1990). *Digital Control of Dynamic Systems*. 2nd ed ed.. Publishing Company, New York.
- Horacek, Petr (2000). Laboratory experiments for control theory courses: A survey. *annual reviews in control*. **24**(24), 151–162.
- J.Spanos, Jiangxin Wang; Costas (2002). Real-time furnace modeling and diagnostics. **15**(4), 393–403.
- Ogata, Katsuhiko (1995). *Discret-time Control System*. 2nd ed ed.. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

-
- Rashid, M. H. (1998). *Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications*. New-Jersey, Prentice-Hall.
- Sintotski, A., D.K. Hammer and O. Van Rosmalen (2001). *Formal Platform-Independent Design of Real-Time Systems*. Eindhoven University of Technology.
- Steen, S. J. Sharkey; D. J. Brookfield; W. M. (1991). Software for real time temperature control. *International Conference on Software Engineering for Real Time Systems* pp. 93–97.