

TESE

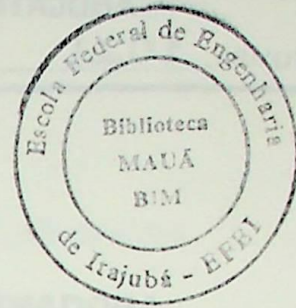
1021

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

*“Implementação de um Sistema de Acionamento
Controlado para a Máquina Síncrona
utilizando Reguladores Analógicos e Digitais”*

Karina Elias Barreto de Quinderé

ITAJUBÁ - Dezembro de 1999



Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**“IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE ACIONAMENTO
CONTROLADO PARA A MÁQUINA SÍNCRONA
UTILIZANDO REGULADORES ANALÓGICOS E DIGITAIS ”**

KARINA ELIAS BARRETO DE QUINDERÉ

Dissertação submetida à Escola Federal de Engenharia de Itajubá
como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Ângelo José Junqueira Rezek, Dr.

Co-Orientador: Prof. José Antônio Cortez, Dr.

Itajubá, 28 de dezembro de 1999



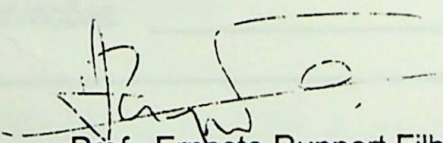
Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

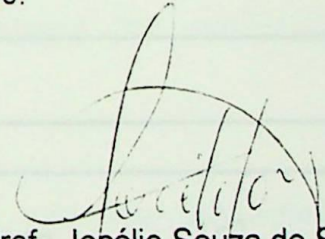
A N E X O I

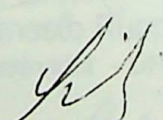
PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

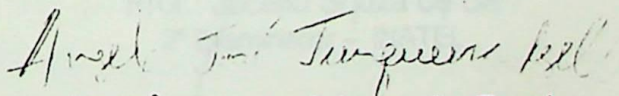
A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 353 de 28/12/99, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **“Implementação de um Sistema de Acionamento Controlado para a Máquina Síncrona, Utilizando Reguladores Analógicos e Digitais”** apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração Sistemas Elétricos de Potência**, satisfeitas as demais exigências regimentais, a **Karina Elias Barreto Quinderé**.

Itajubá, 28 de dezembro de 1999.


Prof. Ernesto Ruppert Filho
1º Examinador - UNICAMP


Prof. Jocélio Souza de Sá
2º Examinador - INATEL


Prof. José Antônio Cortez
3º Examinador - EFEI


Prof. Ângelo José Junqueira Rezek
4º Examinador - Orientador - EFEI



Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **“Implementação de um Sistema de Acionamento Controlado para a Máquina Síncrona, Utilizando Reguladores Analógicos e Digitais”**

Autor: **Karina Elias Barreto Quinderé**

JULGAMENTO

| Examinadores | Conceito | Rubrica |
|--------------|----------|---------|
| 1º | A+ | |
| 2º | A+ | |
| 3º | A+ | |
| 4º | A+ | |

Resultado Médio: Conceito: A+, ou seja, aprovada com distinção

Observações: _____

Itajubá, 28 de dezembro de 1999.

Prof. Ernesto Ruppert Filho
1º Examinador - UNICAMP

Prof. Jocélio Souza de Sá
2º Examinador - INATEL

Prof. José Antônio Cortez
3º Examinador - EFEI

Prof. Ângelo José Junqueira Rezek
4º Examinador - Orientador - EFEI

Agradecimentos

Ao Prof. Ângelo José Junqueira Rezek, pelo apoio, orientação, incentivo e amizade durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. José Antônio Cortez, pelas dicas e sugestões que contribuíram para o engrandecimento deste trabalho.

Aos funcionários e amigos da secretaria de Pós-Graduação , do Departamento de Eletrotécnica e do Laboratório de Eletrotécnica da EFEI, pela prestatividade e apoio durante o curso de Pós-Graduação.

Ao querido amigo e companheiro João Rodolfo Del Ducca Cunha, pela ajuda em todos os momentos.

A todos aqueles que colaboraram anonimamente na realização deste trabalho.

À EFEI, à CAPES e ao povo brasileiro pelo suporte material e financeiro.

À Fapemig projeto proc. TEC 2917/98 ao qual está vinculada esta dissertação (Implementação e avaliação de reguladores digitais em acionamentos elétricos).

À minha família, que sempre apoiou em todas investidas.

A DEUS.

Sumário

| | |
|--|------|
| Sumário | i |
| Lista de Figuras | iv |
| Lista de Tabelas | viii |
| Resumo | ix |
| Abstract | x |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Motivação | 1 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 1.2.1. Objetivos Gerais | 2 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos | 2 |
| 1.3. Organização do Trabalho | 2 |
| 2. Ponte Conversora CA-CC | 3 |
| 2.1. Introdução | 3 |
| 2.2. Análise da Ponte Conversora CA-CC | 3 |

“ Quando amamos e acreditamos no fundo de nossa alma, em algo, nos sentimos mais fortes que o mundo, e somos tomados de uma serenidade que vem da certeza de que nada poderá vencer nossa fé. Esta força estranha faz com que sempre tomemos decisão certa, na hora e, quando atingimos nosso objetivo, ficamos surpresos com nossa própria capacidade.”

Paulo Coelho

Sumário

| | |
|--|-------------|
| Sumário | i |
| Lista de Figuras | iv |
| Lista de Tabelas | viii |
| Resumo | ix |
| Abstract | x |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação. | 1 |
| 1.2 Objetivos. | 2 |
| 1.2.1 Objetivo Geral. | 2 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos. | 3 |
| 1.3 Organização do Trabalho. | 3 |
| 2 Ponte Conversora CA-CC e Inversora Controlada a Seis Pulsos | 5 |
| 2.1 Introdução. | 5 |
| 2.2 Análise da Ponte Conversora CA-CC Controlada de | |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| | Seis Pulsos | 6 |
| | 2.2.1 Considerações Iniciais. | 6 |
| | 2.2.2 Equacionamento para a Ponte Conversora de Seis Pulsos | 7 |
| | 2.2.2.1 Ponte Conversora Controlada $\alpha = 30^\circ$ | 9 |
| | 2.2.3 Análise da Ponte Conversora Funcionando Como Inversora. | 12 |
| 3 | Sistema de Disparo do Retificador e Inversor do Acionamento Controlado | 14 |
| | 3.1 Introdução. | 15 |
| | 3.2 Sistema Implementado. | 16 |
| | 3.3 Transformador Especial Delta Zigue-Zague. | 19 |
| 4 | Acionamento Controlado Analógico de Uma Máquina Síncrona | 22 |
| | 4.1 Equacionamento e Diagrama de Blocos do Motor | 23 |
| | 4.2 Estratégia de Controle. | 31 |
| | 4.2.1 Escolha e Ajuste dos Reguladores. | 33 |
| | 4.3 Resultados Experimentais. | 41 |
| | 4.4 Simulação. | 46 |
| 5 | Controle Digital | 49 |
| | 5.1 Aquisição e Conversão de Dados. | 49 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------------|--|-----------|
| 5.2 | Projeto do Controle Discreto no Tempo. | 53 |
| 5.3 | Resultados Experimentais. | 57 |
| 6 | Conclusão | 60 |
| Anexo A | Programa de Implementação para o Acionamento Controlado de uma Máquina Síncrona Utilizando Reguladores PI | 63 |
| Anexo B | Ilustração da Montagem Prática em Laboratório | 73 |
| Anexo C | Circuito de Disparo do Sistema do Retificador e Inversor do Acionamento Controlado | 81 |
| | Referências Bibliográficas | 83 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Ponte conversora a seis pulsos. | 6 |
| 2.2 | Grandezas da ponte conversora. | 8 |
| 2.3 | Formas de onda para ponte retificadora controlada $\alpha = 30^\circ$ | 11 |
| 2.4 | Estrutura experimental implementada mostrando as pontes retificadora e inversora a seis pulsos | 12 |
| 2.5 | Formas de onda da ponte inversora $\alpha = 120^\circ$ | 13 |
| 3.1 | Sistema experimental implementado. | 16 |
| 3.2 | Sistema de disparo tipo rampa implementado. | 17 |
| 3.3 | Ponte totalmente controlada utilizada. | 17 |
| 3.4a | Geração de rampa para velocidade nominal. | 18 |
| 3.4b | Geração de rampa para metade da velocidade nominal | 18 |
| 3.5a | Transformador Dz6 (180°), diagrama de conexões. | 20 |
| 3.5b | Transformador Dz6 (180°), diagrama de fasores. verificação do D.A. | 21 |
| 4.1 | Representação da parte mecânica e do circuito elétrico da armadura do motor síncrono. | 24 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------|--|----|
| 4.2 | Diagrama de blocos da parte mecânica da máquina síncrona..... | 26 |
| 4.3 | Diagrama de blocos equivalente do circuito da armadura da máquina síncrona. | 28 |
| 4.4 | Diagrama de blocos completo da máquina em “pu” ... | 31 |
| 4.5 | Malha de regulação de corrente. | 34 |
| 4.6 | Diagrama de blocos da malha de regulação de velocidade. | 37 |
| 4.7 | Velocidade e corrente quando ocorre um distúrbio na carga (torque): (1)Velocidade,(2)Corrente. | 42 |
| 4.8 | Velocidade e corrente quando ocorre um degrau positivo na referência da velocidade da máquina. | 42 |
| 4.9 | Velocidade e corrente durante a partida da máquina. . | 43 |
| 4.10 | Tensões no retificador e inversor para a máquina a vazio. | 43 |
| 4.11 | Tensões no retificador e inversor com carga nominal. . | 44 |
| 4.12 | Tensão e corrente na fase <i>a</i> da máquina síncrona a vazio. | 44 |
| 4.13 | Tensão e corrente na fase <i>a</i> da máquina síncrona com carga. | 45 |
| 4.14 | Acionamento completo. | 45 |
| 4.15 | Reguladores e filtros. | 46 |
| 4.16 | Resposta de velocidade e corrente a um degrau unitário, motor síncrono com carga nominal. | 47 |
| 4.17 | Diagrama completo do acionamento do motor síncrono utilizando retificador e inversor, simulação em MATLAB – Simulink. | 47 |

LISTA DE FIGURAS

- 5.1 Diagrama esquemático do controle digital em malha fechada de um máquina síncrona através de retificador e inversor.50
- 5.2 Diagrama esquemático e formas de onda demonstrativas da atuação do amostrador e do extrapolador de ordem zero (ZOH).54
- 5.3 Método de aproximação por integração trapezoidal. . . 55
- 5.4 Resposta a um degrau positivo e negativo da corrente (1) e velocidade(2) para $T_n = 0.8[s]$ 58
- 5.5 Resposta a um degrau positivo e negativo da (1) Corrente (1) e Velocidade (2) para $T_n = 0.46[s]$ 58
- 5.6 Velocidade e corrente durante a partida da máquina.59
- otimização para o sistema. 38
- Ajuste dos parâmetros dos reguladores realizados na aplicação dos métodos de otimização em função da linearidade, do módulo e da simetria. 39
- Índices de desempenho para a simulação da resposta a degrau para o sistema controlado. 48

Resumo

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Taps dos enrolamentos do secundário. | 20 |
| 4.1 | Dados nominais do motor síncrono utilizado. | 33 |
| 4.2 | Escolha do tipo de controlador e método adequado de otimização para o sistema. | 38 |
| 4.3 | Ajuste dos parâmetros dos reguladores resultantes da aplicação dos métodos da otimização em função da linearidade, do módulo e da simetria. | 39 |
| 4.4 | Índices de desempenho para a simulação da resposta a degrau para o sistema controlado. | 48 |

Resumo

O principal objetivo deste trabalho é o estudo do controle de velocidade em malha fechada para o acionamento de um motor síncrono. Para tal, foram implementados em laboratório o controle analógico e digital, tendo como principal interesse o estudo desse último.

No estudo do controle analógico de malha fechada, o motor síncrono sobreexcitado é alimentado pelo inversor por comutação natural, uma das vantagens desta implementação. A técnica de disparo usada foi um sensor de tensão no terminal da máquina empregando o circuito integrado TCA 780 (Icotron-Siemens). Os reguladores PI foram dimensionados pelo método de otimização simétrica e introduzidos no sistema utilizando amplificadores operacionais.

Para o estudo do controle digital, são apresentados os conceitos básicos de controle com enfoque voltado para o projeto em questão e finalmente, é feita a implementação do controle digital para a obtenção do controle de velocidade com intuito de mostrar por experimentação e visualização os resultados obtidos. São utilizados para tal compensadores digitais PI introduzidos computacionalmente no sistema através de equações recursivas e utilizando o método de aproximação por integração trapezoidal, com programação C++.

Palavras-chave: Acionamento, controle, simulação.

IMPLEMENTATION OF A DRIVE SYSTEM CONTROLLED TO A SYNCHRONOUS MACHINE USING ANALOGICAL AND DIGITAL REGULATORS

Abstract

The main subject of this work is the speed control study in closed loop for a synchronous motor drive. For that, analogical and digital controllers were implemented in laboratory, having as a main interest the study of the digital control.

In the analogical control study in closed loop the, overexcited synchronous motor is fed by natural commutation, one of advantages of this implementation. The firing technique used was a voltage sensor in the machine terminal using the dedicated integrated circuit TCA 780 (Icotron-Siemens). The PI regulators have been obtained using the symmetrical optimization method and incorporated in the system by operational amplifiers.

For the digital control study, the basic concepts of control focusing the mentioned project are presented and finally, the digital control implementation for obtaining the speed control is done, in order to show the obtained results by experimentation and visualization. For that PI regulators are used and introduced through the computer in the system by recursive equations using trapezoidal integration and programming in software C++.

Key-words: drive system, control, simulation.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O controle digital é uma área da tecnologia que surgiu com o aparecimento e a evolução dos computadores digitais, dos microprocessadores e da microeletrônica. Logo que os microcomputadores começaram a se difundir, apresentando contínua melhoria de qualidade e custos cada vez mais baixos, percebeu-se que a utilização de computadores como controladores de máquinas, processos e outros sistemas dinâmicos representaria um enorme avanço na área de controle automático.

Além disso o controle digital proporciona grande flexibilidade na implementação de funções de controle e nas eventuais modificações e expansões dos sistemas desenvolvidos. Esta é a principal vantagem sobre os tradicionais circuitos de controle analógicos (contínuos), cujas configurações são rigidamente definidas e portanto não oferecem flexibilidade. O controle de sistemas dinâmicos com computadores digitais está se tornando mais e mais comum a cada dia.

Nesse caso particular, uma das motivações para escolher o estudo do motor síncrono, foi pelo fato de ter como uma de suas vantagens não necessitar de comutador mecânico além de possuir um custo menor de aquisição e manutenção do que o motor de corrente contínua.

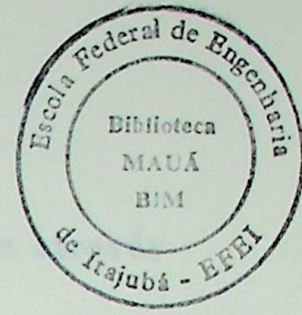
1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Inicialmente, os acionamentos controlados eram feitos em sua maioria empregando a máquina de corrente contínua devido à facilidade de seu controle. Posteriormente, com a evolução tecnológica da eletrônica de potência os acionamentos empregando inversores de frequência e motor de indução trifásico predominaram no mercado devido ao custo relativamente menor. Atualmente, a utilização da máquina síncrona vem sendo bem aceita, dando-se alguma ênfase também ao emprego da máquina síncrona de ímã permanente.

O objetivo geral desta dissertação é o de mostrar os controles analógico e digital para a máquina síncrona, considerando as características de funcionamento da mesma.

No controle digital de máquinas existe freqüentemente o problema de estabilidade do sistema sugerindo portanto o cálculo exato das constantes de tempo através do método de otimização simétrica para tal. Neste sentido, foi desenvolvido um ambiente computacional de caráter didático que permite a experimentação deste tipo de abordagem.



1.2.2 Objetivos Específicos

Para atender o objetivo geral mencionado anteriormente são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Descrever a ponte conversora CA-CC e inversora de seis pulsos, enfatizando os aspectos que devem ser considerados.
- Realizar o estudo dos reguladores de corrente e velocidade, visando implementar o controle analógico da máquina síncrona.
- Executar o controle analógico de velocidade em malha fechada para o acionamento da máquina síncrona.
- Desenvolver um ambiente computacional, utilizando uma placa de aquisição de dados e linguagem C++ com a finalidade de realizar o controle digital para o acionamento da máquina síncrona e garantir a estabilidade do sistema .

1.3 Organização do trabalho

Para atender aos objetivos mencionados anteriormente esta dissertação está estruturada conforme discriminado a seguir.

No capítulo 2 são apresentadas as pontes conversora e inversora controladas a seis pulsos e também várias formas de ondas para um ângulo de disparo $\alpha = 30^\circ$.

No capítulo 3 é apresentado o sistema de disparo do retificador e inversor do acionamento controlado para a máquina síncrona.

O capítulo 4 apresenta a implementação para o controle analógico de velocidade em malha fechada para o acionamento do motor síncrono, as formas de onda para a velocidade e corrente do

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

controle e por último é verificado uma simulação realizada através do programa Matlab 4.2, para termos de comparação.

No capítulo 5 apresenta-se a implementação do controle digital para o acionamento do motor síncrono, com os resultados obtidos.

O capítulo 6 apresenta os resultados comparativos dos controles analógico e digital e suas conclusões.

E por último, em anexo, são mostrados o programa de implementação para o acionamento controlado do motor síncrono utilizando reguladores PI, montagem prática visualizada através de fotos obtidas em laboratório do departamento de eletrotécnica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá e o circuito de disparo da ponte.

2.1 Introdução

O termo conversor é considerado um termo geral para qualquer dispositivo conversor de potência, através de dispositivos eletrônicos de potência. Ele permite, por exemplo, o fluxo de energia do lado de tensão alternada para o lado de tensão contínua, ou vice-versa. Pelo termo de conversor ou de chave de tensão de saída de um conversor é possível também determinar a tensão de saída em função de tensão de entrada. Por exemplo, conversor de seis pulsos que faz com que o sinal de saída é igual a sete, considerando o período de condução.

O conversor controlado permite a variação de tensão de saída por intermédio da alteração do ângulo de disparo dos tiristores. Esta propriedade possibilita a utilização ampla dos conversores controlados nos sistemas de controle de máquinas elétricas.

Os alimentadores empregados pela retificação são os tiristores

em SCE's (retificador controlado de ripple).

A construção de conversor de um tiristor part outro não é
impossível, pois existe sempre uma relação equivalente entre
a tecnologia de conversor e o sistema CA de suprimento.

Capítulo 2. Ponte conversora é ligada a rede CA de
suprimento de energia por intermédio de um transformador. A
relação equivalente de rede entre a do transformador e

Pontes Conversora CA-CC e

Inversora Controladas a Seis Pulsos

2.1 Análise da Ponte Conversora CA-

CC Controlada a Seis Pulsos

2.1 Introdução

O termo conversor é considerado um termo geral para
descrever qualquer dispositivo conversor de potência, através de
dispositivos eletrônicos de potência. Ele permite, por exemplo, o
fluxo de energia do lado de corrente alternada para o lado de
corrente contínua ou vice-versa. Pelo número de pulsos
caracteriza-se os ripples da tensão de saída de um conversor, e
pode também determinar a tensão de saída em função da tensão de
entrada. Por exemplo, conversor de seis pulsos quer dizer que o
ripple de saída é igual a seis, considerando o período de entrada.

O conversor controlado permite a variação da tensão de saída
por intermédio da alteração do ângulo de disparo dos tiristores.
Esta propriedade possibilita a utilização ampla dos conversores
controlados nos sistemas de controle de máquinas elétricas.

Os elementos responsáveis pela retificação são os tiristores

ou SCR's (retificador controlado de silício).

A comutação de corrente de um tiristor para outro não é instantânea, pois existirá sempre uma reatância equivalente entre os terminais do conversor e o sistema CA de suprimento.

Normalmente a ponte conversora é ligada à rede CA de suprimento de energia por intermédio de um transformador. A reatância equivalente da rede junto a do transformador é responsável pelo efeito conhecido como sobreposição "overlap", o qual exercerá também influência sobre a tensão de saída da ponte.

2.2 Análise da Ponte Conversora CA-CC Controlada a Seis Pulsos

2.2.1 Considerações Iniciais

A figura 2.1 ilustra a ponte conversora a seis pulsos totalmente controlada.

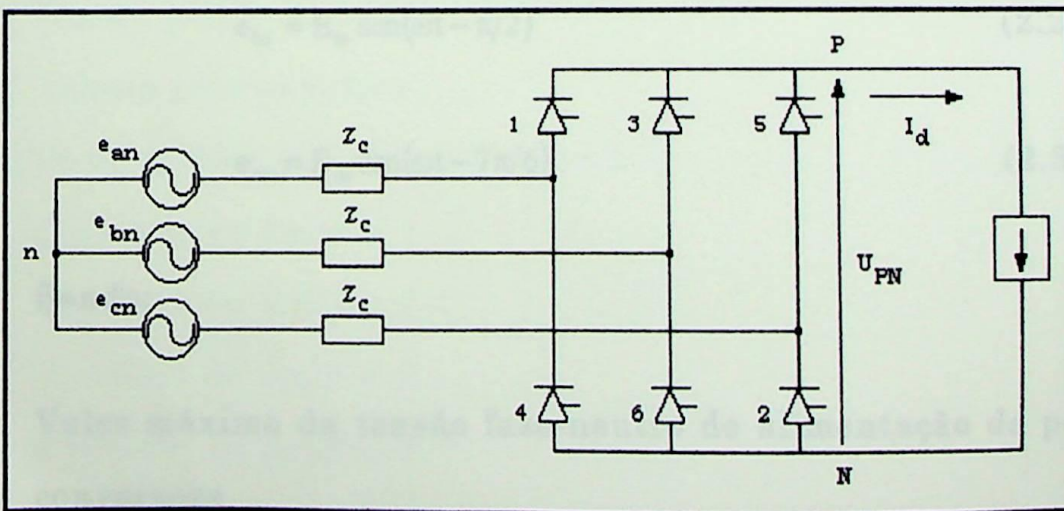


Figura 2.1: Ponte conversora a seis pulsos

CAPÍTULO 2. PONTES CONVERSORA E INVERSORA CONTROLADAS A SEIS PULSOS

Onde na figura 2.1 tem-se:

- e_{an} ; e_{bn} ; e_{cn} : Tensões de alimentação da ponte conversora
 x_d : Reatância do indutor de alisamento
 Z_c : Impedância de comutação
 I_d : Corrente no lado CC considerada perfeitamente alisada e constante
 U_{PN} : Tensão de saída da ponte (tensão na carga)

2.2.2 Equacionamento para a Ponte Conversora a Seis Pulsos

Os números que aparecem juntos aos tiristores representam a ordem com que os mesmos são disparados. As tensões de alimentação da ponte conversora são dadas pelas equações:

$$e_{an} = E_m \text{sen}(\omega t + \pi/6) \quad (2.1)$$

$$e_{bn} = E_m \text{sen}(\omega t - \pi/2) \quad (2.2)$$

$$e_{cn} = E_m \text{sen}(\omega t - 7\pi/6) \quad (2.3)$$

Sendo:

- E_m : Valor máximo da tensão fase-neutro de alimentação da ponte conversora

CAPÍTULO 2. PONTES CONVERSORA E INVERSORA CONTROLADAS A SEIS PULSOS

A seguir são apresentadas as formas de onda da ponte conversora para um ângulo de disparo $\alpha = 30^\circ$. Os pulsos de disparo são aplicados aos tiristores possibilitando a entrada em condução dos mesmos.

A figura 2.2 ilustra as grandezas da ponte conversora.

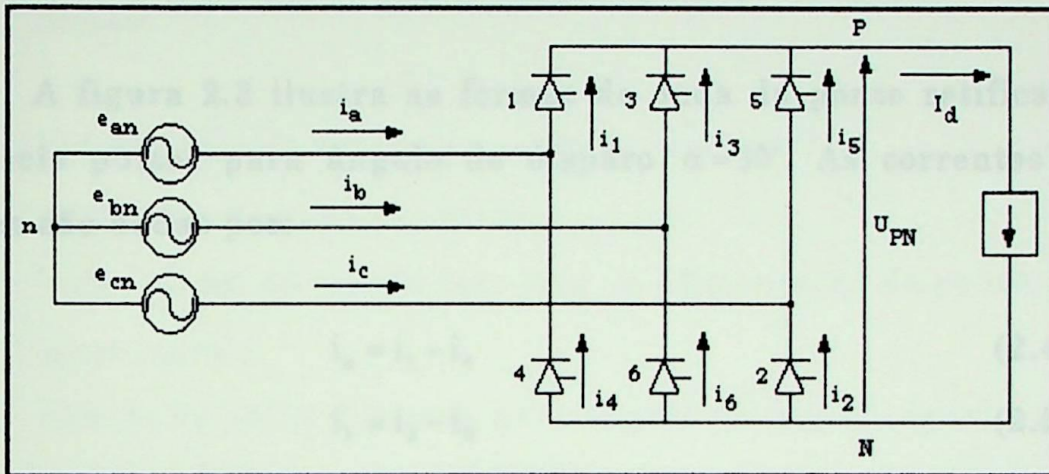


Figura 2.2: Grandezas da ponte conversora

Onde na figura 2.2 :

U_{PN} : Tensão pólo positivo pólo negativo

U_{Pn} : Tensão pólo positivo

U_{Nn} : Tensão pólo negativo

U_{AC_1} : Tensão anodo-catodo no tiristor 1

i_1 : Corrente no tiristor 1

i_2 : Corrente no tiristor 2

i_3 : Corrente no tiristor 3

i_4 : Corrente no tiristor 4

i_5 : Corrente no tiristor 5

i_6 : Corrente no tiristor 6

**CAPÍTULO 2. PONTES CONVERSORA E INVERSORA
CONTROLADAS A SEIS PULSOS**

i_a : Corrente na fase a de alimentação na ponte conversora

i_b : Corrente na fase b de alimentação na ponte conversora

i_c : Corrente na fase c de alimentação na ponte conversora

I_d : Corrente contínua na saída da ponte

2.2.2.1 Ponte conversora controlada $\alpha = 30^\circ$

A figura 2.3 ilustra as formas de onda da ponte retificadora de seis pulsos para ângulo de disparo $\alpha = 30^\circ$. As correntes nas fases são dadas por:

$$i_a = i_1 - i_4 \tag{2.4}$$

$$i_b = i_3 - i_6 \tag{2.5}$$

$$i_c = i_5 - i_2 \tag{2.6}$$

O valor médio da corrente em cada tiristor é dado por:

$$I_m = \frac{I_d}{3} \tag{2.7}$$

Sendo:

I_d : Corrente contínua na saída da ponte.

O valor eficaz da corrente é dado por:

$$I_{rms} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \tag{2.8}$$

O valor médio de tensão na saída da ponte é dado por:

**CAPÍTULO 2. PONTES CONVERSORA E INVERSORA
CONTROLADAS A SEIS PULSOS**

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{LL} \cos \alpha \quad (2.9)$$

$$U_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{LL} \quad (2.10)$$

$$U_d = U_{do} \cos \alpha \quad (2.11)$$

Sendo:

U_d : Valor médio da tensão na saída da ponte

α : Ângulo de disparo do tiristor 1

E_{LL} : Valor eficaz da tensão fase-fase de alimentação da ponte
conversora

U_{do} : Tensão de saída da ponte para ângulo de disparo igual a zero
graus

Também pode-se escrever:

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{LN} \cos \alpha \quad (2.12)$$

Sendo:

E_{LN} : Tensão fase neutro de alimentação da ponte conversora

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos \alpha \quad (2.13)$$

E_m : Valor máximo da tensão fase neutro de alimentação da ponte
conversora

CAPÍTULO 2. PONTES CONVERSORA CA-CC INVERSORA CONTROLADAS A SEIS PULSOS

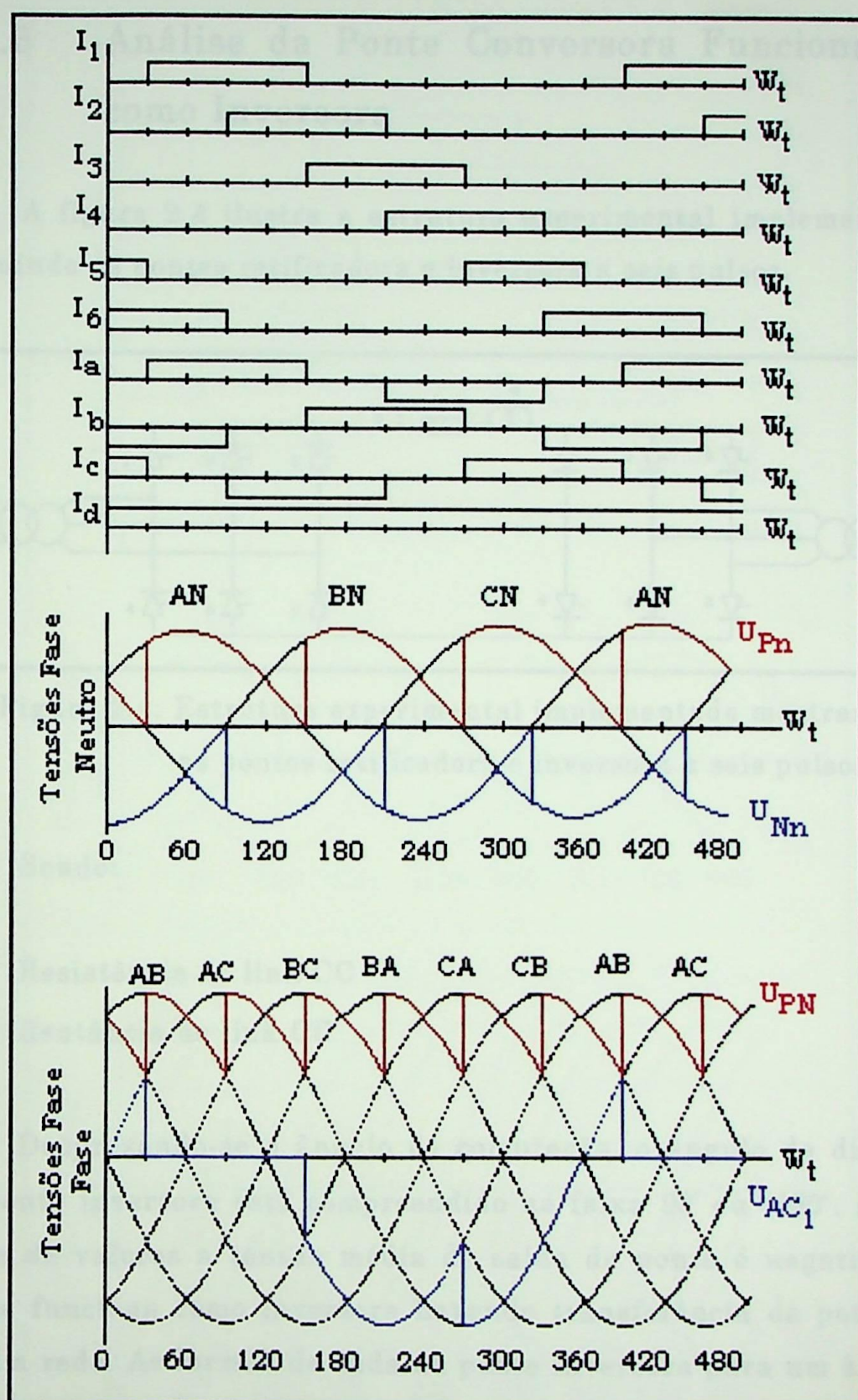


Figura 2.3: Formas de onda para ponte retificadora controlada

$$\alpha = 30^\circ$$

2.2.3 Análise da Ponte Conversora Funcionando como Inversora

A figura 2.4 ilustra a estrutura experimental implementada incluindo as pontes retificadora e inversora a seis pulsos.

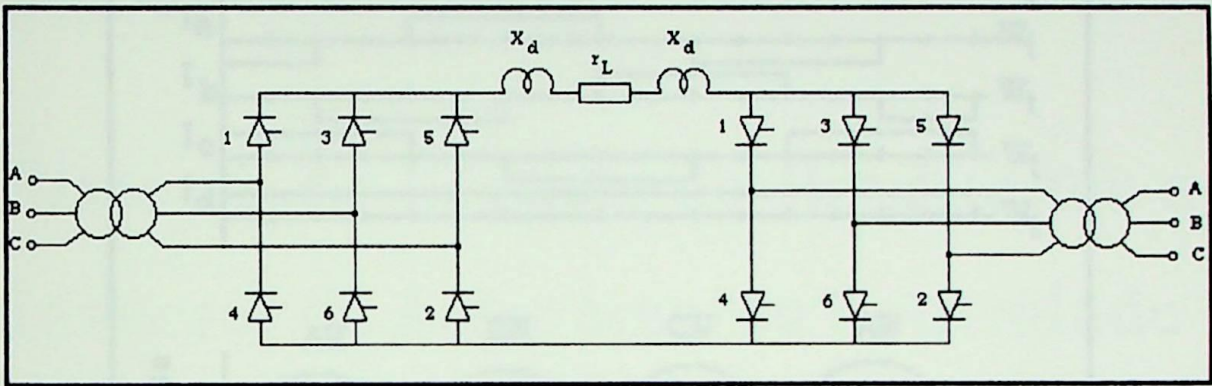


Figura 2.4: Estrutura experimental implementada mostrando as pontes retificadora e inversora a seis pulsos

Sendo:

r_L : Resistência do link CC

X_d : Reatância do link CC

Desprezando-se o ângulo de comutação, o ângulo de disparo da ponte inversora está compreendido na faixa $90^\circ < \alpha < 180^\circ$. Nesta faixa de valores a tensão média de saída da ponte é negativa. A ponte funciona como inversora havendo transferência de potência para a rede. As formas de onda da ponte inversora para um ângulo de disparo $\alpha = 120^\circ$ são apresentadas a seguir.

CAPÍTULO 2. PONTES CONVERSORA CA-CC INVERSORA CONTROLADAS A SEIS PULSOS

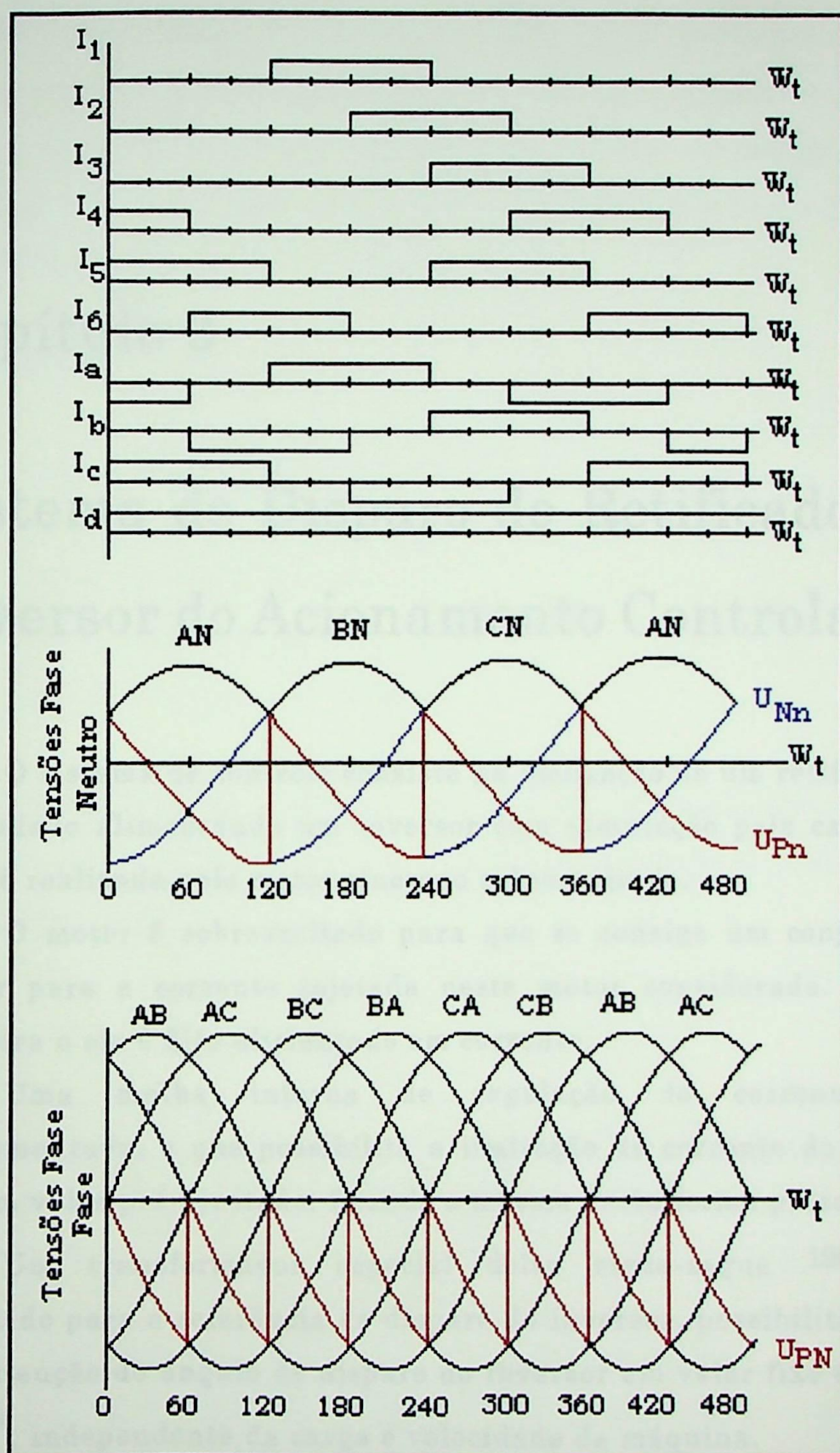


Figura 2.5: Formas de onda da ponte inversora $\alpha = 120^\circ$

Capítulo 3

Sistema de Disparo do Retificador e Inversor do Acionamento Controlado

O sistema de controle consiste na utilização de um retificador controlado alimentando um inversor com comutação pela carga, a qual é realizada pelo motor síncrono sobreexcitado.

O motor é sobreexcitado para que se consiga um conjugado maior para a corrente injetada neste motor considerado. Desta maneira o ele é dito alimentado em corrente.

Uma malha interna de regulação de corrente foi implementada, o que possibilita a limitação de corrente do motor em um valor pré-ajustado, ficando o mesmo desta forma protegido.

Um transformador especial delta zigue-zague 195° foi utilizado para a referência de disparo do inversor, possibilitando a manutenção do ângulo de disparo do inversor em valor fixo e igual a 165° , independente da carga e velocidade da máquina.

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE DISPARO DO RETIFICADOR E INVERSOR DO ACIONAMENTO CONTROLADO

Como o torque é aproximadamente igual a $M=K \cdot \phi \cdot I \cdot \cos\alpha$, quanto maior $\cos\alpha$ menor será a corrente para produzir o mesmo conjugado. Assim, com 165° deixou uma margem de comutação de 15° , a qual foi suficiente para que se conseguisse a comutação do inversor utilizado no acionamento proposto.

Sendo:

- M: Torque desenvolvido pelo motor
- K: Constante de proporcionalidade
- ϕ : Fluxo do motor síncrono
- I_{DC} : Corrente no link CC
- α : Ângulo de disparo do inversor

Porém, via de regra, geralmente em acionamentos, esta margem de comutação é de 30° e o ângulo de disparo máximo seria portanto $\alpha = 150^\circ$.

3.1 Introdução

O motor síncrono sobreexcitado possibilita o fornecimento de potência reativa, podendo mesmo corrigir o fator de potência do sistema, sendo este um dos métodos utilizados na indústria. O inversor é comutado pelo motor síncrono utilizando para tal um sensor de tensão na saída da máquina. O sensor de tensão foi implementado com o circuito integrado TCA 780 da Icotron/Siemens e para a referência de tensão foi utilizado um transformador defasador delta zigue-zague $\Delta/Z-195^\circ$.

3.2 Sistema Implementado

A figura 3.1 ilustra o sistema implementado, onde tem-se I_{DC} , já definido e L_d , onde:

L_d : Indutância do indutor de alisamento

O transformador de sincronismo fornece as tensões de referência para que os pinos 5 dos circuitos integrados TCA 780 sejam adequadamente alimentados. No caso do inversor, o transformador especial de sincronismo $\Delta/Z-195^\circ$ possibilita o funcionamento do inversor com ângulo de disparo α igual a 165° , subtraídos os trinta graus necessários à referência. A figura 3.2 ilustra o circuito de disparo tipo rampa implementado.

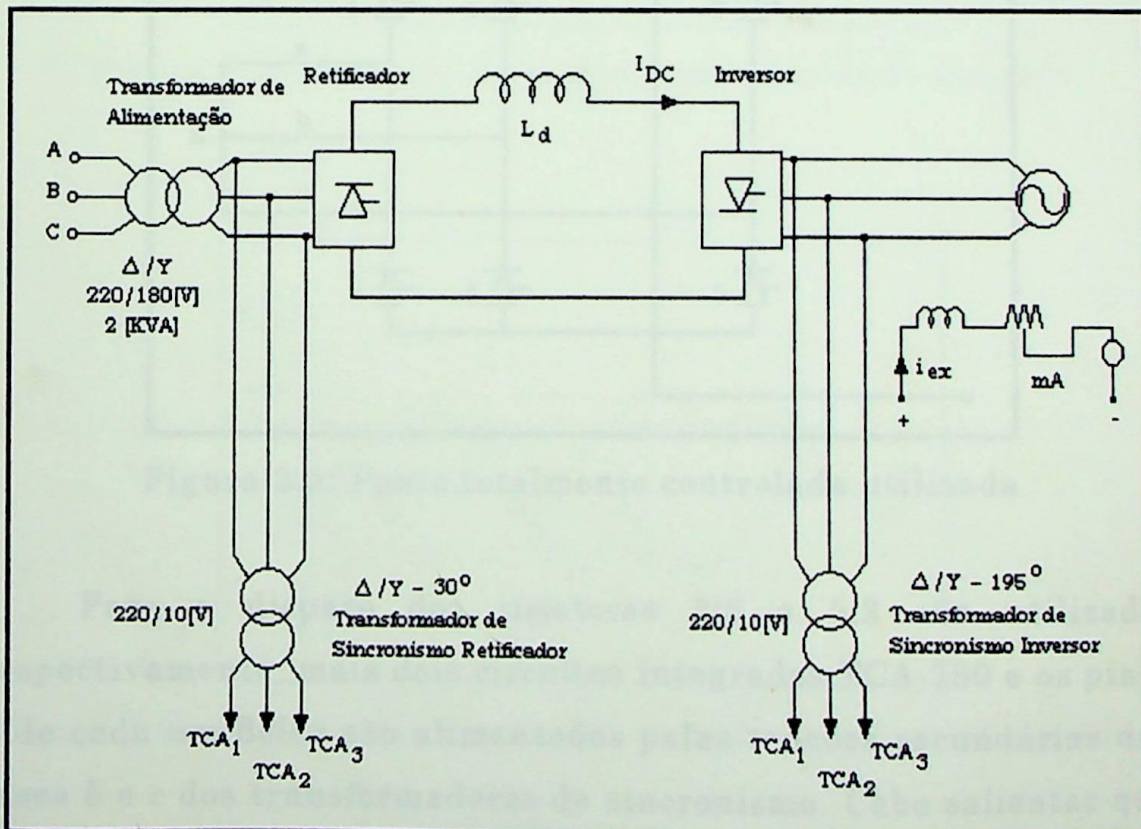


Figura 3.1: Sistema experimental implementado

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE DISPARO DO RETIFICADOR E INVERSOR DO ACIONAMENTO CONTROLADO

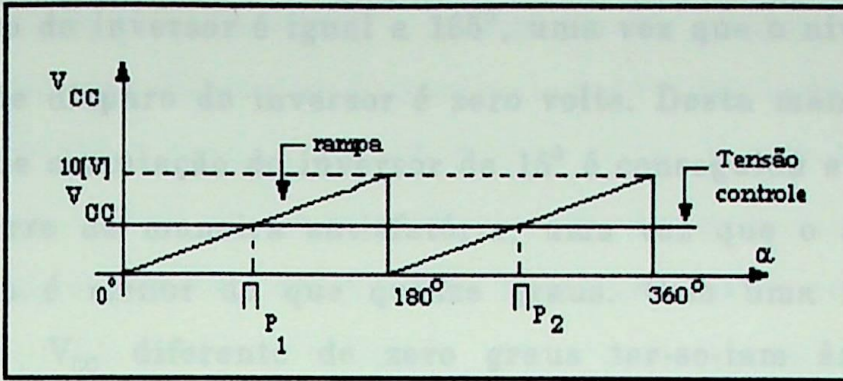


Figura 3.2: Sistema de disparo tipo rampa implementado

A interseção do nível V_{CC} com a rampa produz os pulsos P1 e P2 para o disparo dos tiristores 1 e 4 conforme mostrado na figura 3.3.

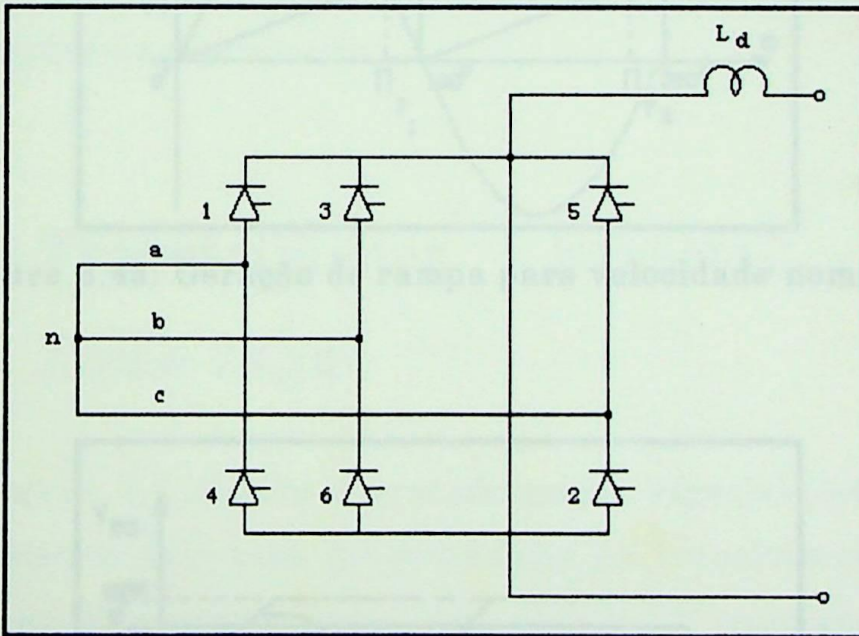


Figura 3.3: Ponte totalmente controlada utilizada

Para o disparo dos tiristores 3;6 e 5;2 são utilizados respectivamente, mais dois circuitos integrados TCA-780 e os pinos 5 de cada um deles são alimentados pelas tensões secundárias das fases *b* e *c* dos transformadores de sincronismo. Cabe salientar que o ângulo de disparo do retificador é variável, ao passo que o ângulo

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE DISPARO DO RETIFICADOR E INVERSOR DO ACIONAMENTO CONTROLADO

de disparo do inversor é igual a 165° , uma vez que o nível V_{CC} do sistema de disparo do inversor é zero volts. Desta maneira, uma margem de comutação do inversor de 15° é conseguida e o disparo deste ocorre de maneira satisfatória, uma vez que o ângulo de comutação é menor do que quinze graus. Com uma tensão de referência V_{CC} diferente de zero graus ter-se-iam ângulos de disparo diferentes para o inversor conforme mostrado nas figuras 3.4a e 3.4b.

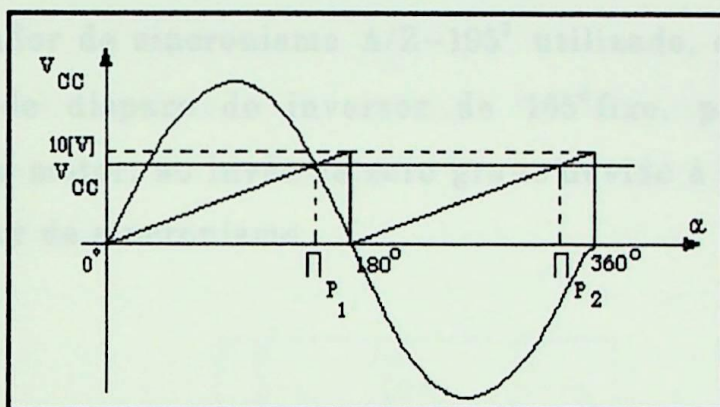


Figura 3.4a: Geração de rampa para velocidade nominal

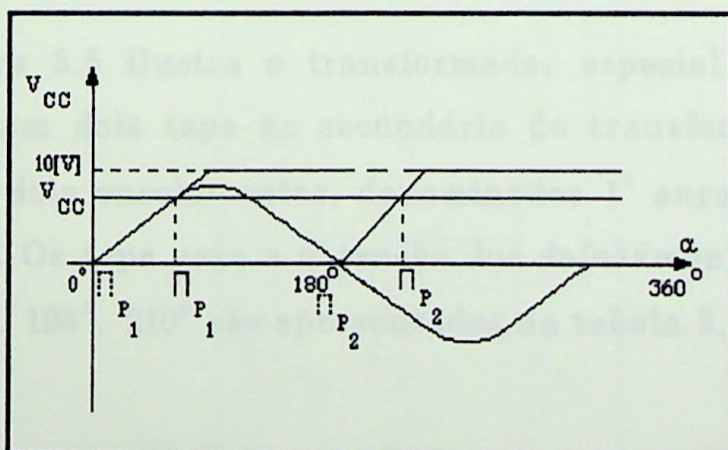


Figura 3.4b: Geração de rampa para metade da velocidade nominal

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE DISPARO DO RETIFICADOR E INVERSOR DO ACIONAMENTO CONTROLADO

Como se pôde observar, a inclinação da rampa é a mesma para velocidades diferentes da nominal, então, ter-se-ia problema na geração dos pulsos. Para um mesmo nível V_{CC} mostrado nas figuras 3.4a e 3.4b ter-se-iam ângulos de disparos distintos; na figura 3.4a, α é maior do que 90° e na figura 3.4b menor do que 90° . Este problema foi solucionado, com o deslocamento da tensão V_{CC} para zero volts, e os pulsos produzidos são mostrados de maneira pontilhada na figura 3.4b. Desta maneira, tem o circuito TCA 780 funcionando como um detetor de zero (zero crossing). Com o transformador de sincronismo $\Delta/Z-195^\circ$ utilizado, corresponde a um ângulo de disparo do inversor de 165° fixo, para qualquer velocidade do motor, ao invés de zero graus devido à defasagem do transformador de sincronismo.

3.3 Transformador Especial Delta Zigue-Zague

A figura 3.5 ilustra o transformador especial delta zigue-zague. Existem dois taps no secundário do transformador que é composto de dois enrolamentos, denominados 1° enrolamento e 2° enrolamento. Os taps para a obtenção dos defasamentos angulares de 165° , 180° , 195° , 210° são apresentados na tabela 3.1 a seguir.

Figura 3.5a: Transformador Delta (180°), diagrama de enrolamentos

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE DISPARO DO RETIFICADOR E INVERSOR DO ACIONAMENTO CONTROLADO

| Defasamento Angular | TAP 1º Enrolamento | TAP 2º Enrolamento |
|---------------------|--------------------|--------------------|
| 165° | 141,42%N | 51,76%N |
| 180° | 100%N | 100%N |
| 195° | 51,76%N | 141,42%N |
| 210° | 0%N | 173,21%N |

Tabela 3.1: Taps dos enrolamentos do secundário

Onde:

N: Número de espiras para obtenção do defasamento angular 180°. (Este número define também a relação de transformação do transformador).

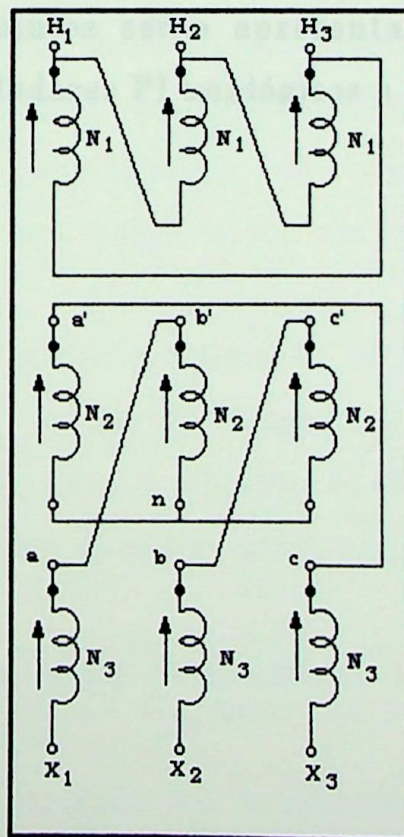


Figura 3.5a: Transformador Dz6 (180°), diagrama de conexões

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE DISPARO DO RETIFICADOR E INVERSOR DO ACIONAMENTO CONTROLADO

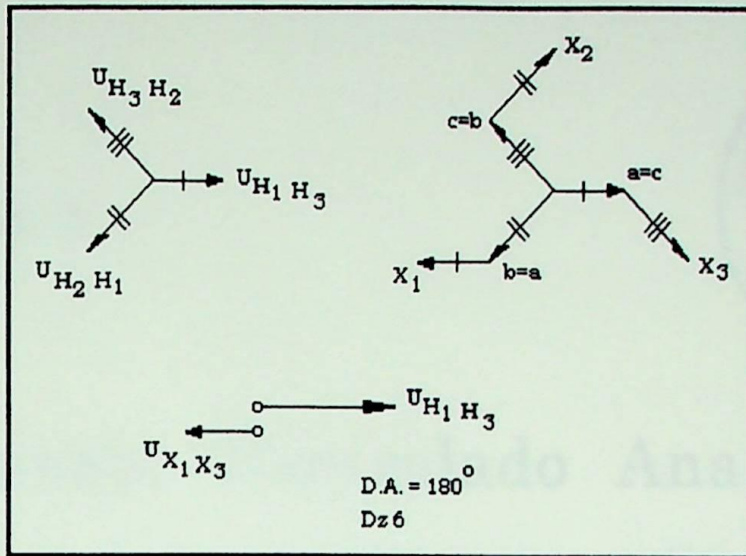
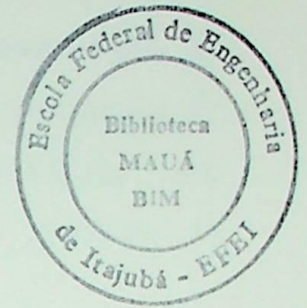


Figura 3.5b: Transformador Dz6 (180°), diagrama de fasores.
Verificação do D.A.

No anexo C verifica-se o circuito de disparo completo do sistema do retificador e inversor do acionamento controlado.

Nos capítulos seguintes serão apresentados os circuitos de controle utilizando reguladores PI analógicos e digitais.

Capítulo 4



Acionamento Controlado Analógico de Uma Máquina Síncrona

Este capítulo apresenta o acionamento controlado analógico para a máquina síncrona, incluindo todo o equacionamento, metodologia de escolha e ajuste dos reguladores utilizados.

A máquina síncrona funcionando como motor é utilizada devido a algumas características importantes, como por exemplo, velocidade constante, possibilidade de correção do fator de potência e também ao seu baixo custo em relação ao motor de corrente contínua.

Para a partida do motor síncrono foi utilizado uma máquina de corrente contínua, devido à disponibilidade existente no laboratório, inicialmente para a partida funcionou como motor e logo após a partida como gerador para carregamento do motor síncrono.

Como desvantagem deste acionamento tem o fato de que o torque do motor é pulsante.

O acionamento controlado em malha fechada de um motor síncrono sobreexcitado pode ser feito com eficiência por um circuito

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

constituído de uma ponte retificadora e uma ponte inversora a tiristores devendo apresentar bom desempenho na regulação de velocidade e limitação de corrente durante a partida, variações de carga e outros transitórios. Para isto é necessário um dimensionamento adequado dos reguladores e das malhas de controle de velocidade e corrente.

Para este acionamento a faixa de controle do motor foi de 800[RPM] a 1400[RPM], pois fora deste limite a máquina síncrona perdia a capacidade de comutar o inversor. Considerando que quando modificada a referência de velocidade alterava-se também o ângulo de disparo do retificador havendo por conseguinte uma modificação da corrente no link CC para aceleração (aumento da corrente) ou desaceleração (diminuição da corrente) do motor síncrono. A frequência do inversor varia diretamente proporcional à rotação do motor síncrono.

Neste capítulo, inicialmente serão calculados os ganhos e constantes de tempo do sistema e em seguida dimensionados os controladores para regulação de velocidade e corrente.

4.1 Equacionamento e Diagrama de Blocos do Motor

A representação do circuito da armadura do motor síncrono sobreexcitado bem como da parte mecânica está ilustrada na figura 4.1.

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

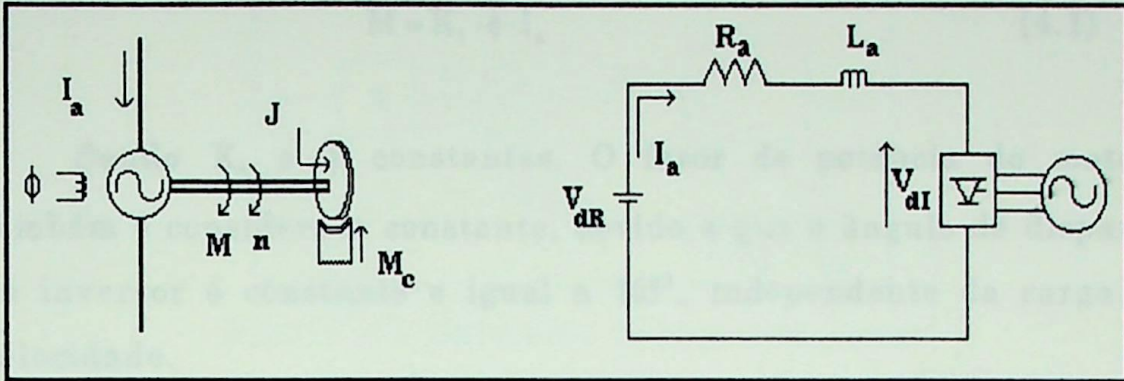


Figura 4.1: Representação da parte mecânica e do circuito elétrico da armadura do motor síncrono

Onde:

- V_{dr} : Tensão CC de saída do retificador
- V_{di} : Tensão CC de saída do inversor
- L_a : Indutância total (incluindo máquina refletida para o lado CC e indutor do link CC)
- R_a : Resistência total (incluindo máquina refletida para o lado CC e indutor do link CC)
- ϕ : Fluxo do motor
- I_a : Corrente de armadura
- M : Conjugado motor
- M_c : Torque de carga ou conjugado resistente
- B : Conjugado acelerante ($B = M - M_c$)
- J : Momento de inércia (motor + carga)
- n : Velocidade (RPM)
- ω : Rotação (Rad/s)

As principais relações entre as grandezas da parte mecânica são:

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

$$M = K_1 \cdot \phi \cdot I_a \quad (4.1)$$

Sendo K_1 e ϕ constantes. O fator de potência do motor também é considerado constante, devido a que o ângulo de disparo do inversor é constante e igual a 165° , independente da carga e velocidade.

$$B = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4.2)$$

E:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n \quad (4.3)$$

Substituindo as equações (4.1) e (4.3) em (4.2) e reajustando-as:

$$n = \frac{n_N}{M_n} \cdot \frac{M_n}{J \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n_N} \cdot \int B \cdot dt \quad (4.4)$$

Pôde-se definir a constante de tempo de aceleração T_H como:

$$T_H = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{J \cdot n_N}{M_n} \quad (4.5)$$

Esta constante de tempo pode ser interpretada como sendo o tempo necessário para o motor atingir a velocidade nominal partindo do repouso, quando o mesmo é acelerado por intermédio de um conjugado resultante igual ao conjugado nominal do motor.

A figura 4.2 ilustra o diagrama de blocos referente à parte mecânica do motor.

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

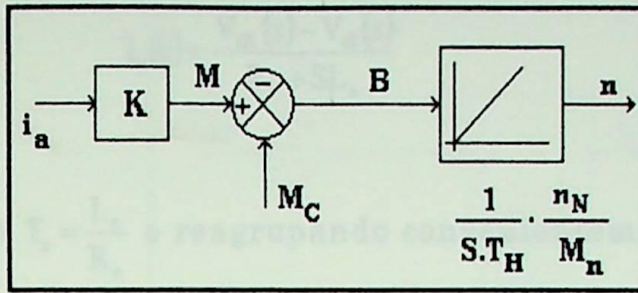


Figura 4.2: Diagrama de blocos da parte mecânica da máquina síncrona

Definindo em valores “pu” as grandezas corrente, conjugado de carga, conjugado acelerante, rotação e conjugado motor, tem-se:

$$\frac{I_a}{I_N} = i_a \quad (\text{pu})$$

$$\frac{M_C}{M_n} = m_C \quad (\text{pu})$$

$$\frac{n}{n_N} = n_u \quad (\text{pu})$$

$$\frac{M}{M_n} = m \quad (\text{pu})$$

Para o circuito da armadura:

$$V_{dR} = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + V_{df} \quad (4.6)$$

E aplicando transformada de Laplace na equação (4.6):

$$V_{dR}(s) = R_a I_a(s) + sL_a I_a(s) + V_{df}(s)$$

$$V_{dR}(s) - V_{df}(s) = I_a(s) \cdot [R_a + sL_a]$$

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

$$I_a(s) = \frac{V_{dR}(s) - V_{dI}(s)}{R_a + sL_a} \quad (4.7)$$

Definindo $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ e reagrupando convenientemente, resulta:

$$I_a(s) = \frac{V_{dR}(s) - V_{dI}(s)}{1 + sT_a} \cdot \frac{1}{R_a}$$

$$\frac{I_a}{I_N} \times I_N = \frac{V_{dR}(s) - V_{dI}(s)}{R_a} \times \frac{V_N}{V_N} \times \frac{1}{1 + sT_a}$$

$$\frac{I_a}{I_N} = \frac{V_{dR}(s) - V_{dI}(s)}{V_N \cdot R_a} \times \frac{V_N}{I_N} \times \frac{1}{1 + sT_a} \quad (4.8)$$

$$\frac{I_a}{I_N} = \frac{V_{dR} - V_{dI}}{V_N} \times \frac{V_N}{R_a \cdot I_N} \times \frac{1}{1 + sT_a}$$

Definindo em valores "pu" as grandezas corrente da armadura e as tensões V_{dR} e V_{dI} :

$$i_a = \frac{I_a}{I_N} \quad (\text{pu})$$

$$v_{dR} = \frac{V_{dR}}{V_N} = e \quad (\text{pu})$$

$$v_{dI} = \frac{V_{dI}}{V_N} = u \quad (\text{pu})$$

Fazendo $v_i = \frac{V_N}{R_a I_N}$ pode apresentar o diagrama de blocos das grandezas elétricas da armadura conforme a figura 4.3.

CAPÍTULO 4 ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

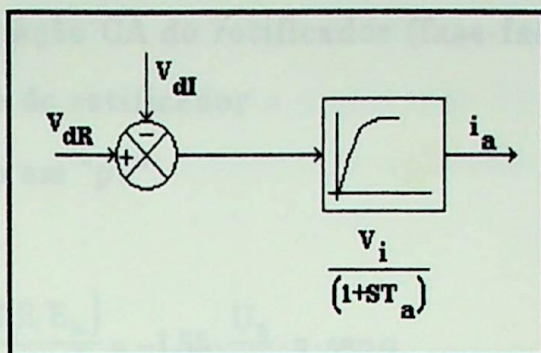


Figura 4.3: Diagrama de blocos equivalente do circuito da armadura da máquina síncrona

Sendo que:

$$i_a = (v_{dR} - v_{dI}) \cdot \frac{v_i}{1 + ST_a} \quad (4.9)$$

Onde:

V_N : V_{dR} nominal

I_N : I_a nominal

I_a : Corrente no link CC

Substituindo:

$$V_{dR} = E \quad (4.10)$$

$$V_N = E_N \quad (4.11)$$

$$E = 1,35 \cdot U_2 \cdot \cos \alpha \quad (4.12)$$

$$\frac{dE}{d\alpha} = -1,35 \cdot U_2 \cdot \text{sen} \alpha \quad (4.13)$$

Onde:

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

U_2 : Tensão de alimentação CA do retificador (fase-fase) (V)

α : Ângulo de disparo do retificador

α_u : Ângulo de disparo em "pu"

$$\frac{d(E/E_N)}{d(\alpha/\pi)} = -1,35 \cdot \frac{U_2}{E_N} \cdot \pi \cdot \text{sen } \alpha \quad (4.14)$$

Em valores "pu":

$$\frac{d(e)}{d(\alpha_u)} = -1,35 \cdot \frac{200}{187} \cdot \pi \cdot \text{sen } \alpha \quad (4.15)$$

Onde os valores de U_2 e E_N foram medidos em laboratório.

Definindo $V_S \rightarrow$ ganho estático do conversor, tem para $\alpha = 90^\circ$ o ganho máximo:

$$V_{S1} = \left| \frac{de}{d\alpha_u} \right|_{\alpha=90^\circ} = 4,53 \quad (4.16)$$

Para $\alpha = 46^\circ$, tem-se o ganho mínimo para a corrente nominal:

$$V_{S2} = \left| \frac{de}{d\alpha_u} \right|_{\alpha=46^\circ} = 3,26 \text{ (nominal)} \quad (4.17)$$

Assim, o ganho estático médio do conversor é igual a:

$$V_S = 3,90 \quad (4.18)$$

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

A constante v_i pode ser interpretada como o fator multiplicador da corrente nominal para a obtenção da corrente com rotor bloqueado, quando tensão nominal é aplicada à armadura, sendo calculada por:

$$v_i = \frac{E_N}{R_a I_N} = \frac{187}{3,72 \cdot 4} = 12,57 \quad (4.19)$$

Isto conduz a obtenção do ganho total V_{Sia} :

$$V_{Sia} = v_s \cdot v_i \quad (4.20)$$

$$V_{Sia} = 3,90 \cdot 12,57 = 49,02$$

$$V_{Sia} = 49,02 \quad (4.21)$$

O fator $\frac{v_i}{1+ST_a}$ pode ser considerado como elemento retardador de 1ª ordem.

A determinação da constante de tempo T_a pode ser feita medindo-se a indutância L_a e a resistência R_a do circuito da armadura. Deve-se levar em consideração a indutância de alisamento incluída em série com o circuito de armadura.

$$T_a = \frac{L_d + 2L_m}{R_d + 2R_m} \quad (4.22)$$

Sendo:

L_m : Indutância de eixo direto da máquina por fase

L_d : Indutância do indutor de alisamento

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

R_m : Resistência de eixo direto da máquina por fase

R_d : Resistência do indutor de alisamento

Tem-se que:

$$L_a = L_d + 2L_m \tag{4.23}$$

$$R_a = R_d + 2R_m \tag{4.24}$$

Logo,

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} \tag{4.25}$$

O diagrama de blocos completo da máquina, incluindo o circuito da armadura e a parte mecânica está apresentado na figura 4.4 .

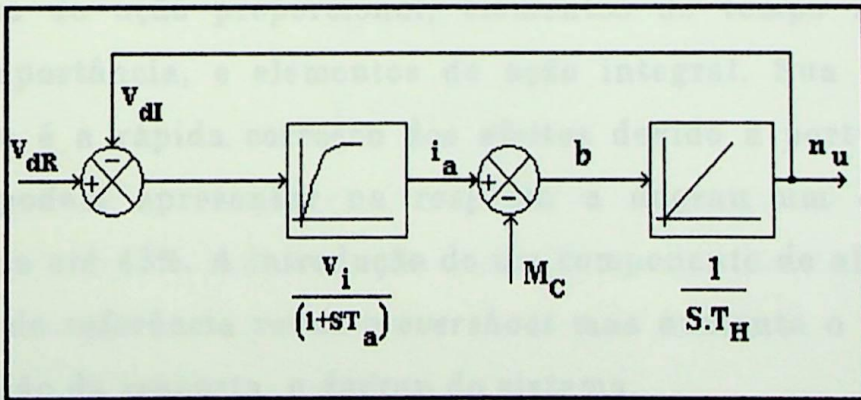


Figura 4.4: Diagrama de blocos completo da máquina em “pu”

4.2 Estratégia de Controle

A estratégia utilizada para a escolha e ajuste dos parâmetros dos reguladores é baseada no método de otimização simétrica [2].

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

A otimização da malha de controle é baseada na relação existente entre as diversas constantes de tempo que aparecem no sistema, de forma a determinar as características do controlador mais apropriado. Para um sistema que não apresenta nenhum elemento de ação integral é indicado o método de otimização em função do módulo (OM), que se deriva da acomodação do módulo da resposta de frequência no valor unitário para a maior margem de frequências possíveis. Desta forma, permite-se a correção rápida do efeito de um degrau de referência de forma a garantir um desempenho com relação de amortecimento de $\xi=0.707$ e *overshoot* de $M_0=4\%$ aproximadamente, sem apresentar oscilações significativas. No entanto, a correção do efeito de uma perturbação é lenta.

O método de otimização em função da simetria (OS) é indicado para sistemas que apresentam elementos retardadores, elementos de ação proporcional, elementos de tempo morto de pouca importância, e elementos de ação integral. Sua principal vantagem é a rápida correção dos efeitos devido a perturbações. Porém, podem apresentar na resposta a degrau um *overshoot* elevado de até 43%. A introdução de um componente de alisamento do sinal de referência reduz o *overshoot* mas aumenta o tempo de acomodação da resposta a degrau do sistema.

A otimização em função da linearidade (OL) somente tem sentido nos casos em que o *overshoot* deve ser nulo, embora com resposta muito lenta, e em que a correção dos efeitos das perturbações é de importância secundária.

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

4.2.1 Escolha e Ajuste dos Reguladores

Os dados do motor síncrono sobreexcitado estão apresentados na tabela 4.1 a seguir.

| | |
|----------------------------------|-------------------|
| Fabricante | Equacional |
| Tensão de alimentação | $V = 230[V]$ |
| Potência nominal | $P_N = 2[KVA]$ |
| Velocidade nominal | $n_N = 1800[RPM]$ |
| Corrente armadura nominal | $I_N = 5[A]$ |

Tabela 4.1: Dados nominais do motor síncrono utilizado

As constantes T_H e T_a foram obtidas em laboratório e equivalem a:

$$T_H = 1,2[s]$$

$$T_a = 54,5[ms]$$

O critério utilizado para a escolha da constante de tempo do circuito de disparo foi de acordo com [2], sendo que este valor é variável na faixa correspondente ao tempo de 0[ms] a 3[ms] (1/6 ciclo), então o valor adotado foi de:

$$T_{SS} = 2,5[ms] \quad (4.26)$$

Utilizando um transdutor de corrente constituído de uma ponte a diodos alimentada pelo lado trifásico através de TC's, e incluindo um filtro, a escolha para a constante do filtro é adotado

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

sabendo que uma ponte a diodos com 6 pulsos na tensão de saída, sendo que cada pulso tem duração de aproximadamente 3[ms], e o valor recomendado é a metade do tempo de ondulação [2], obtida pela equação (4.27).

$$T_g = 1,5[\text{ms}] \text{ (adotado)} \quad (4.27)$$

A malha de regulação de corrente completa é apresentada na figura 4.5.

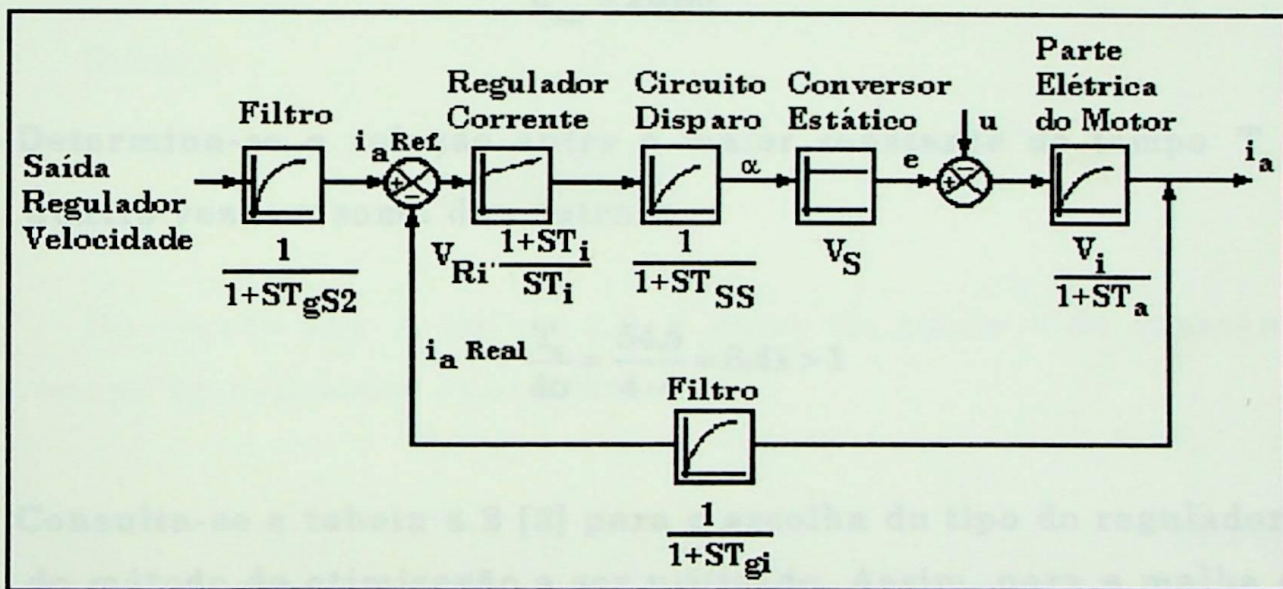


Figura 4.5: Malha de regulação de corrente

Aplicando a metodologia de otimização e controle proposta por FROHR;ORTTENBURGER (1986) [2], as constantes de tempo podem ser divididas em grandes e pequenas constantes de tempo, sendo uma grande constante de tempo maior que 4 vezes o somatório das demais. A constante T_a pode ser considerada uma grande constante de tempo de retardo. A escolha do tipo de regulador a ser utilizado obedece à seguinte metodologia:

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

- Calcula-se a soma das pequenas constantes de tempo σ e o ganho direto V_{Sia} .

$$\sigma = T_{SS} + T_{gi}$$

$$\sigma = 4[\text{ms}]$$

$$V_{Sia} = v_s \cdot v_i$$

$$V_{Sia} = 3,90 \cdot 12,57 = 49,02$$

$$V_{Sia} = 49,02$$

- Determina-se a relação entre a maior constante de tempo T_a e quatro vezes a soma das outras.

$$\frac{T_a}{4\sigma} = \frac{54,5}{4 \cdot 4} = 3,41 > 1$$

- Consulta-se a tabela 4.2 [2] para a escolha do tipo do regulador e do método de otimização a ser utilizado. Assim, para a malha de corrente, o sistema apresenta uma grande constante de tempo de retardo, dada por T_a e a relação $T_a/4\sigma > 1$. Assim, o regulador requerido é do tipo PI (Proporcional Integral), e deve apresentar um método de otimização simétrica (OS). As constantes de tempo de alisamento de sinal (T_{gs2}) e a constante de tempo equivalente de otimização (T_e) devem estar no intervalo $(0,4\sigma)$ e $(2,4\sigma)$ respectivamente.

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

O valor da constante de tempo de alisamento de sinal, para o filtro do valor de referência para a malha de corrente pode ser obtida pela equação 4.28.

$$T_{gS2} = 4 \cdot \sigma \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{T_a}{4 \cdot \sigma} - 1\right)} \right] \quad (4.28)$$

$$T_{gS2} = 4 \cdot 4 \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{54,50}{4 \cdot 4} - 1\right)} \right]$$

Então :

$$T_{gS2} = 14,55[\text{ms}]$$

De acordo com a tabela 4.3, o valor do ganho e da constante de tempo do regulador equivalem a:

$$V_{Ri} = \frac{T_a}{2 \cdot V_{Sia} \cdot \sigma} \quad (4.29)$$

$$V_{Ri} = \frac{54,50}{2 \cdot 49,02 \cdot 4}$$

$$T_i = 4 \cdot \sigma \cdot \frac{T_a}{T_a + 3 \cdot \sigma} \quad (4.30)$$

$$T_i = 4 \cdot 4 \cdot \frac{54,50}{54,50 + 4 \cdot 4}$$

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

Portanto o valor do ganho e da constante de tempo do regulador respectivamente são:

$$V_{Ri} = 0,14$$

$$T_i = 13,11[\text{ms}]$$

De acordo com [2], a constante de tempo equivalente de otimização da malha de corrente, incluindo o regulador e o filtro de referência é dada por:

$$T_e = 2 \cdot \sigma + \frac{1}{2} \cdot T_{gS2} \tag{4.31}$$

$$T_e = 15[\text{ms}] \tag{4.32}$$

Com estes últimos dados obtidos, é possível obter a malha de regulação de velocidade conforme a figura 4.6 .

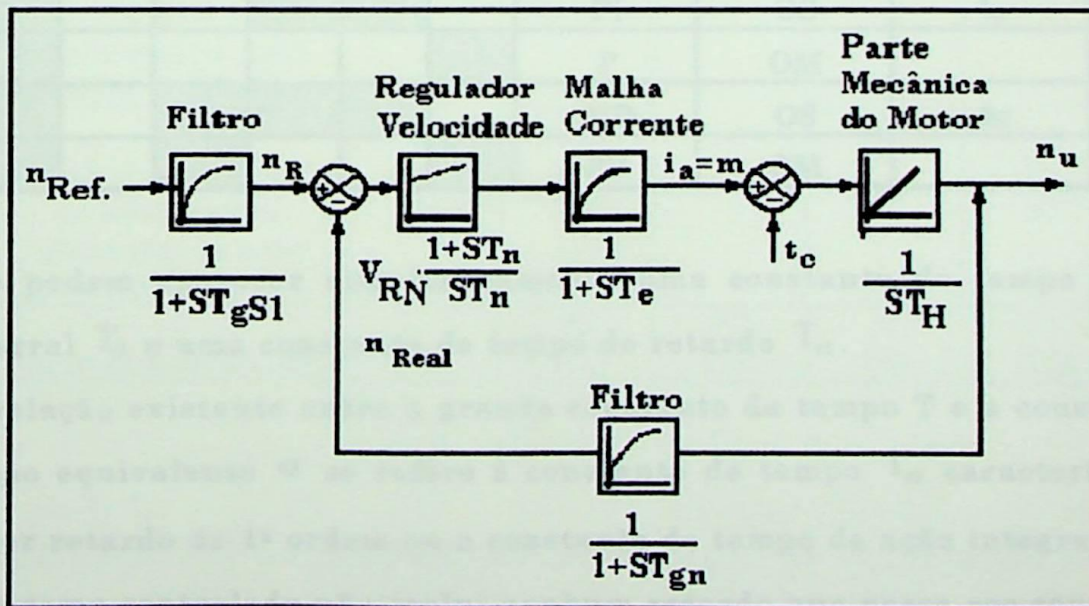


Figura 4.6: Diagrama de blocos da malha de regulação de velocidade

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

Tabela 4.2: Escolha do tipo de controlador e método adequado de otimização para o sistema [2]

| Grandes constantes de tempo (1) | | | Relação entre a grande constante e as pequenas constantes de tempo (2) | | | Controlador requerido | | Constante de tempo de alisamento do sinal (4) | Constante de tempo equivalente do sistema |
|-------------------------------------|-------------------------------|--------|--|----|-----|-----------------------|------------|---|---|
| Constante de tempo de ação integral | Constante de tempo de retardo | | <1 | >1 | >>1 | Ação do controlador | Otimização | | |
| T_0 | Tr_1 | Tr_2 | | | | | | T_{gs} | T_e |
| | (3) | | | | | I | OM | | 2σ |
| | | | | | | PI | OM | | 2σ |
| | | | | | | PI | OS | $0...4\sigma$ | $2 \dots 4\sigma$ |
| | | | | | | P | OM | | 2σ |
| | | | | | | PID | OM | | 2σ |
| | | | | | | PID | OS | $0...4\sigma$ | $2 \dots 4\sigma$ |
| | | | | | | PD | OM | | 2σ |
| | | | | | | PI | OS | 4σ | 4σ |
| | | | | | | P | OM | | 2σ |
| | | | | | | PID | OS | 4σ | 4σ |
| | | | | | | PD | OM | | 2σ |

- (1) Não podem aparecer simultaneamente uma constante de tempo de ação integral T_0 e uma constante de tempo de retardo T_{r1} .
- (2) A relação existente entre a grande constante de tempo T e a constante de tempo equivalente σ se refere à constante de tempo T_{r1} característica do maior retardo de 1ª ordem ou a constante de tempo de ação integral T_0 .
- (3) O sistema controlado não inclui nenhum retardo que possa ser considerado como grande.
- (4) Constante de tempo do elemento de filtragem da entrada do sistema.

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

Tabela 4.3: Ajuste dos parâmetros dos reguladores resultantes da aplicação dos métodos da otimização em função da linearidade, do módulo e da simetria [2]

| Otimização | Ajuste dos parâmetros do controlador | | | | |
|--|--------------------------------------|---|-----------|---|---|
| | T_I | T_n | T_V | V_R | |
| | | | | Sem elementos de ação integral no sistema | Com elementos de ação integral no sistema |
| OL Otimização em função da linearidade | $4V_{S\sigma}$ | T_{r1} | T_{r2} | $\frac{T_{r1}}{4V_{S\sigma}}$ | ... |
| OM Otimização em função do módulo | $2V_{S\sigma}$ | T_{r1} | | $\frac{T_{r1}}{2V_{S\sigma}}$ | |
| OS Otimização em função da simetria sem elementos de ação integral no sistema | ... | $\frac{4\sigma \cdot T_{r1}}{(T_{r1} + 3\sigma)}$ | | ... | |
| OS Otimização em função da simetria com elementos de ação integral no sistema | ... | 4σ | | $\frac{T_0}{2\sigma}$ | |
| Ação do controlador | I | PI PID | PD PID | P PD | PI PID |

INÍCIO

Um filtro foi adicionado ao transdutor de velocidade devido à ondulação da tensão de saída do tacogerador. A constante de tempo adotada foi:

começo aqui

tudo

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

$$T_{gn} = 100[\text{ms}] \quad (4.33)$$

Para esta malha de regulação de velocidade, a escolha do tipo de regulador utilizado obedece ao mesmo procedimento utilizado para a malha de regulação de corrente.

- Calcula-se a soma das pequenas constantes de tempo σ' e o ganho direto V_{Sia} .

Então, para as pequenas constantes de tempo da malha do regulador de velocidade tem-se:

$$\begin{aligned} \sigma' &= T_e + T_{gn} \\ \sigma' &= 115[\text{ms}] \end{aligned} \quad (4.34)$$

- Determina-se a relação $T_H/4 \cdot \sigma'$.

$$\frac{T_H}{4 \cdot \sigma'} = 2,61 > 1 \quad (4.35)$$

- Consulta-se a tabela 4.3 para a escolha do tipo de regulador a ser utilizado.

Assim, o sistema apresenta uma grande constante de tempo de ação integral T_H , sendo a relação $T_H/4\sigma' > 1$. Então, o regulador requerido é do tipo PI, e deve apresentar um método de otimização simétrica (OS). As constantes de tempo de alisamento (T_{gs1}) e equivalente de otimização (T_e) se necessárias seriam ambas no valor de $4\sigma'$.

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

$$T_{gs1} = T_c = 4\sigma' = 460[\text{ms}] \quad (4.36)$$

De acordo com tabela 4.4, o valor do ganho e da constante de tempo equivalem as seguintes equações:

$$V_{RN} = \frac{T_H}{2 \cdot \sigma'} \quad (4.37)$$

$$T_n = 4 \cdot \sigma' \quad (4.38)$$

Substituindo valores obtém-se:

$$V_{RN} = 5,22 \cong 5 \quad (4.39)$$

$$T_n = 460[\text{ms}] \quad (4.40)$$

até aqui

FINAL

4.3 Resultados Experimentais

Os sinais de corrente e velocidade do motor, bem como os sinais de entrada e saída dos reguladores, foram registrados usando um osciloscópio de memória.

Na ^{a seguir} figura 4.7 são verificados a velocidade e a corrente no link CC na ocorrência de um distúrbio na carga, no qual, pode-se observar que ocorreu uma pequena queda na velocidade estabilizando-se rapidamente. Sendo a corrente no link CC de 1[A] e na ocorrência do distúrbio atingindo um valor de 2[A], ou seja, dobrou-se o conjugado de carga com relação ao conjugado inicial a vazio.

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

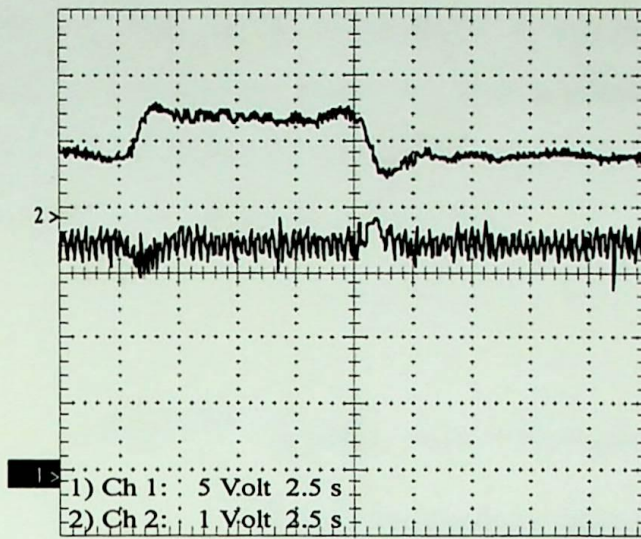


Figura 4.7: Velocidade e corrente quando ocorre um distúrbio na carga (torque): (1)Velocidade, (2)Corrente.

o seguir

Na figura 4.8 tem-se a velocidade e a corrente no link CC quando ocorre um degrau na referência de velocidade da máquina, sendo este valor inicialmente 1000[RPM] e com a ocorrência do degrau 1360[RPM].

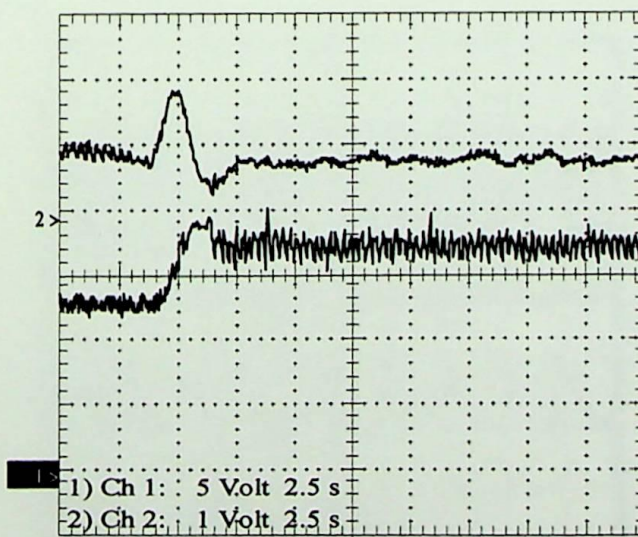


Figura 4.8: Velocidade e corrente quando ocorre um degrau positivo na referência da velocidade da máquina

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

Na figura 4.9 tem-se a velocidade e corrente durante a partida da máquina, podendo observar a comutação natural pelo inversor, ou seja, partindo com máquina auxiliar até o ponto em que a máquina começa a comutar o inversor.

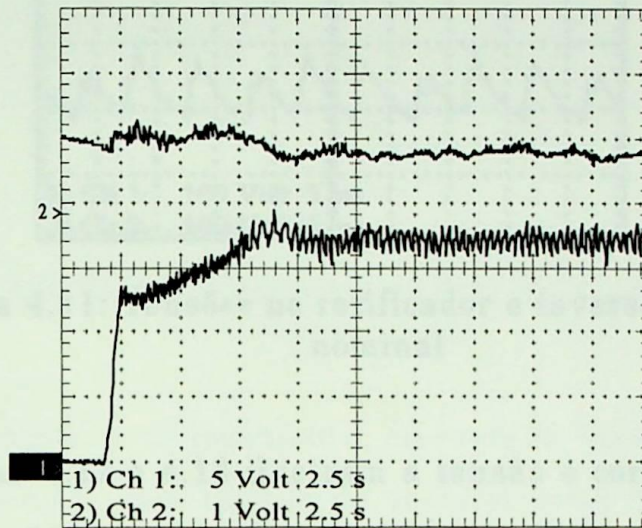


Figura 4.9: Velocidade e corrente durante a partida da máquina

As figuras 4.10 e 4.11 ilustram as tensões na saída do retificador e inversor, para a máquina a vazio e com carga nominal respectivamente.

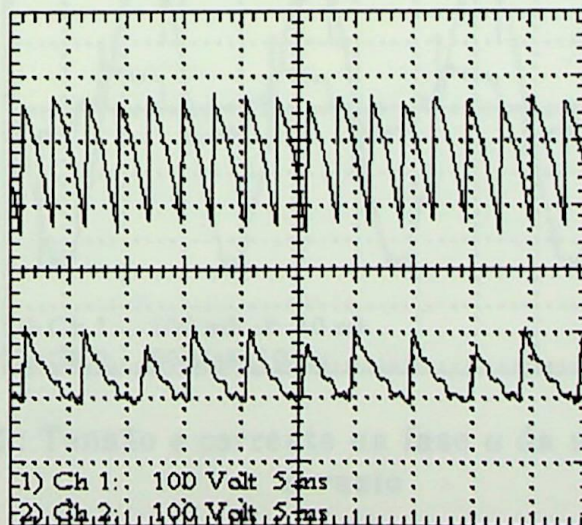


Figura 4.10: Tensões no retificador e inversor para a máquina a vazio

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

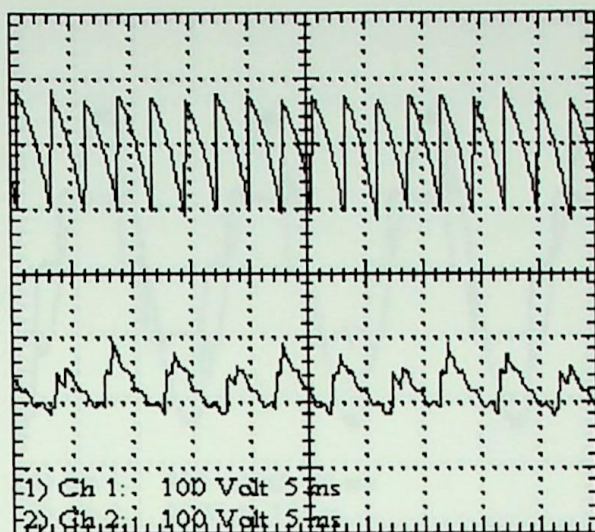


Figura 4.11: Tensões no retificador e inversor com carga nominal

As figuras 4.12 e 4.13 ilustram a tensão e corrente na fase α da máquina, para operação a vazio e com carga nominal respectivamente.

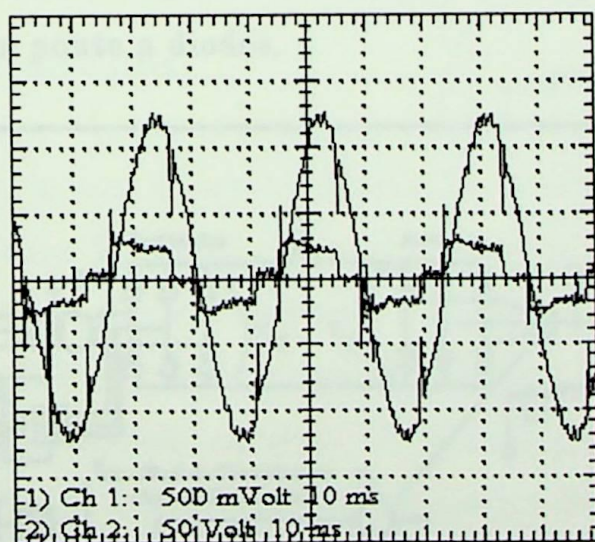


Figura 4.12: Tensão e corrente na fase α da máquina síncrona a vazio

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

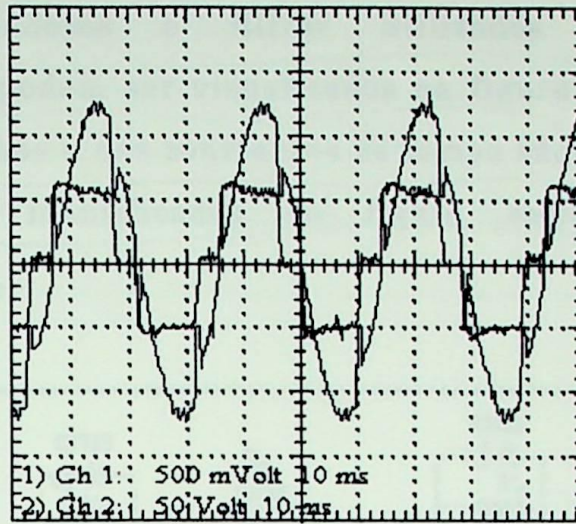


Figura 4.13: Tensão e corrente na fase *a* da máquina síncrona com carga

Considerando o acionamento controlado analógico de uma máquina síncrona, a implementação deste sistema de controle pode ser ilustrado como na figura 4.14, onde estão identificados os TC's, a ponte retificadora e inversora, o motor síncrono e de corrente contínua, o tacogerador, o circuito de disparo, o regulador de velocidade e a ponte a diodos.

Figura

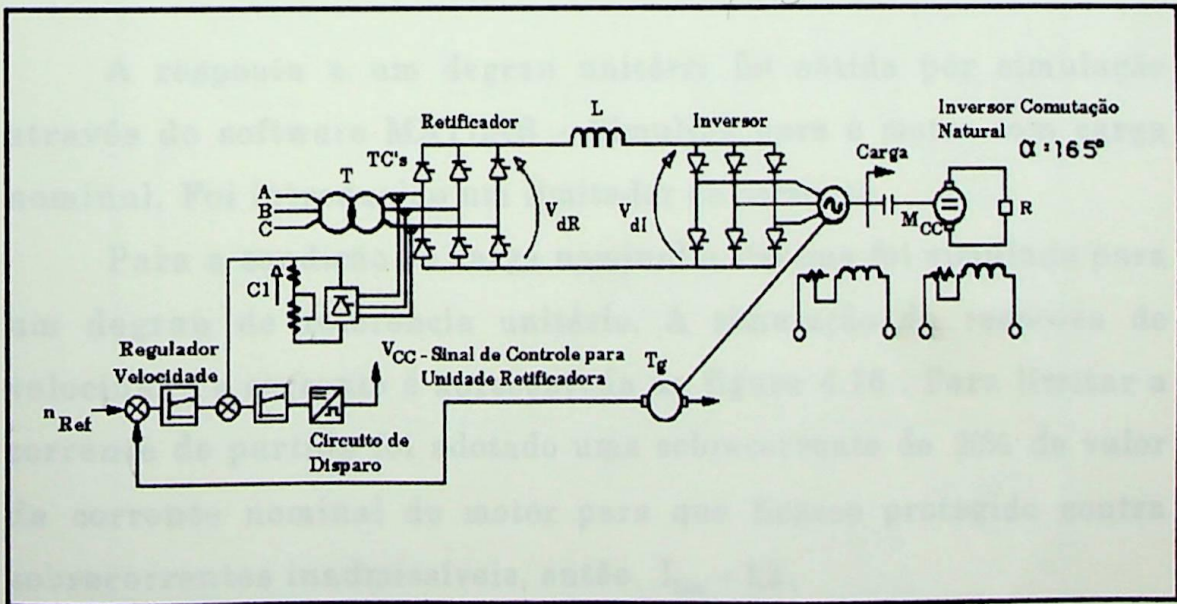


Figura 4.14: Acionamento completo

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

Os reguladores e filtros utilizados também nesta implementação podem ser visualizados na figura 4.15, no qual os ajustes dos ganhos e das constantes de tempo são feitos através de potenciômetros identificados na figura como R'_{q1} e $RM'2$ respectivamente.

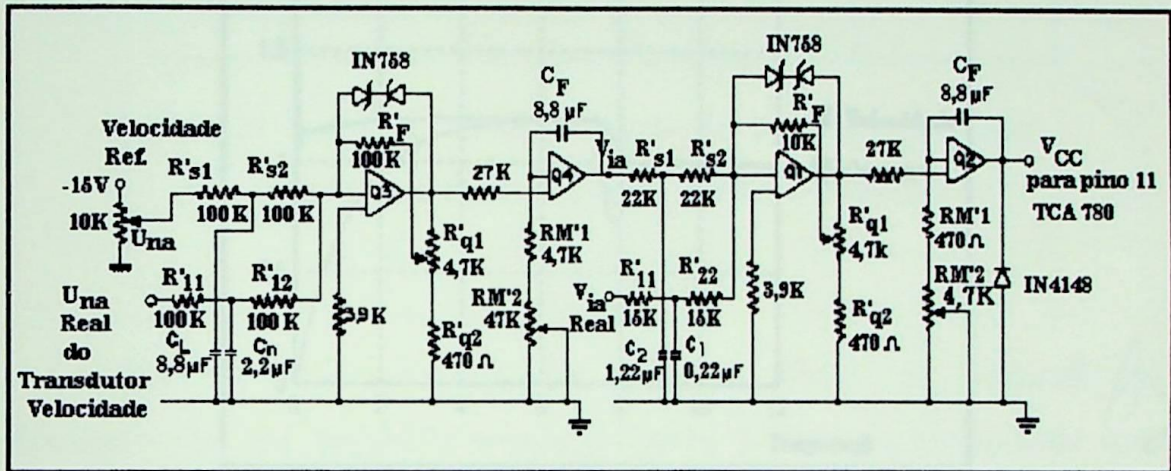


Figura 4.15: Reguladores e filtros

4.4 Simulação

A resposta a um degrau unitário foi obtida por simulação através do software MATLAB – Simulink para o motor com carga nominal. Foi introduzido um limitador de corrente.

Para a condição de carga nominal o sistema foi simulado para um degrau de referência unitário. A simulação da resposta de velocidade e corrente é apresentada na figura 4.16. Para limitar a corrente de partida foi adotado uma sobrecorrente de 20% do valor da corrente nominal do motor para que ficasse protegido contra sobrecorrentes inadmissíveis, então, $I_{Lim} = 1,2$.

A malha completa de simulação é mostrada na figura 4.17.

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

A análise da simulação e dos índices de desempenho permitem verificar a eficiência do método de otimização e estratégia de controle utilizados, viabilizando sua aplicação em sistemas de acionamentos controlados de motores síncronos.

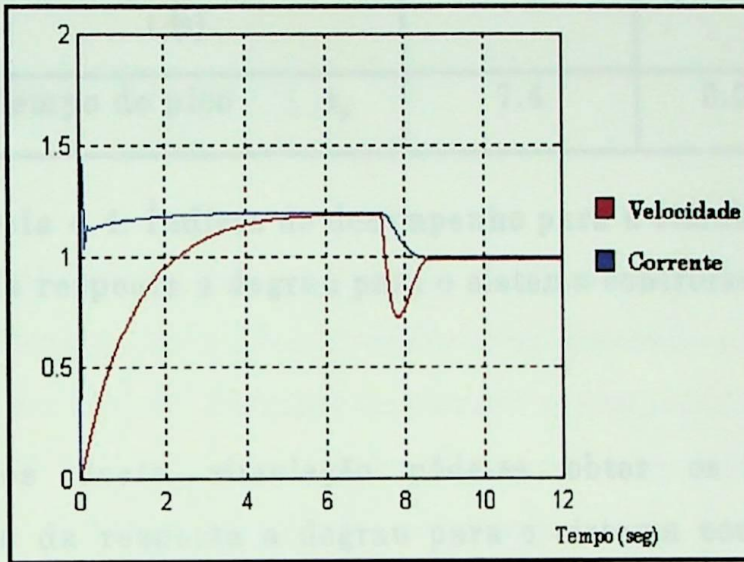


Figura 4.16: Resposta de velocidade e corrente a um degrau unitário - Motor síncrono com carga nominal

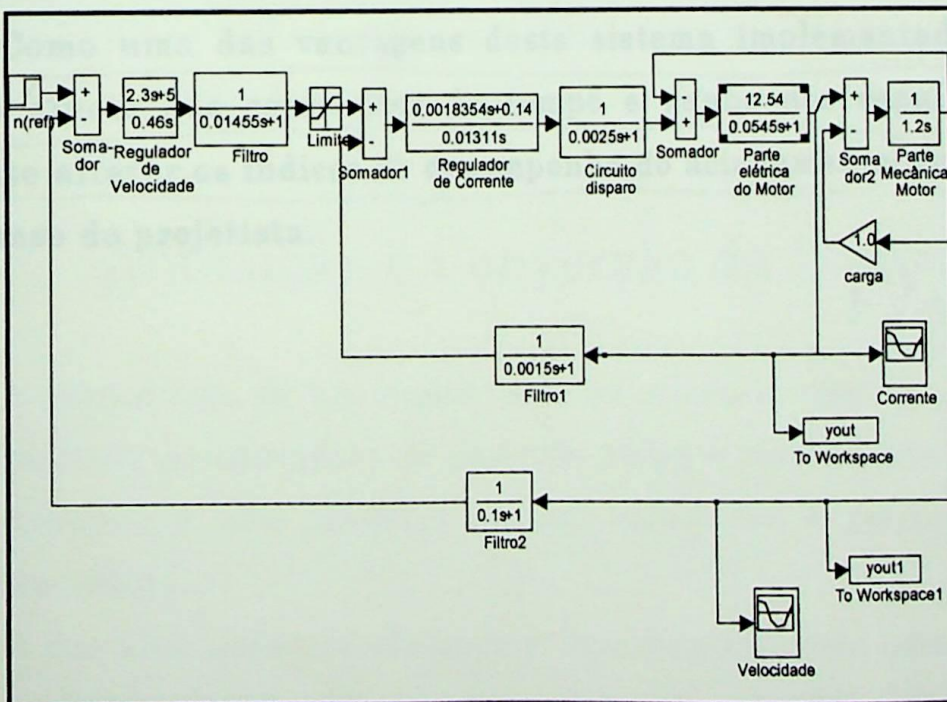


Figura 4.17: Diagrama completo do acionamento do motor síncrono utilizando retificador e inversor MATLAB-Simulink

CAPÍTULO 4. ACIONAMENTO CONTROLADO ANALÓGICO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

| Índices de desempenho | Velocidade | Corrente |
|-------------------------------|------------|----------|
| Tempo de subida t_r (s) | 1.8 | 0.03 |
| <i>Overshoot</i> $M_0\%$ | 19.6 | 46.5 |
| Tempo de acomodação t_s (s) | 8.2 | 8.5 |
| Tempo de pico t_p | 7.4 | 0.06 |

Tabela 4.4: Índices de desempenho para a simulação de resposta a degrau para o sistema controlado

Através desta simulação pôde-se obter os índices de desempenho da resposta a degrau para o sistema controlado que estão apresentados na tabela 4.4, onde se observa que o *overshoot* elevado de corrente na partida é instantâneo e imediatamente limitado no valor da corrente limite, como desejado.

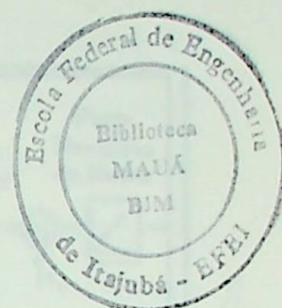
Como uma das vantagens deste sistema implementado tem que o ajuste das constantes de tempo e ganho dos reguladores permite alterar os índices de desempenho do acionamento conforme interesse do projetista.

FINAL

flexibilidade e utilização de circuitos de controle de sistemas digitais. A implementação em software, embora mais lenta, está permitindo a partir de 1980 a utilização de computadores pessoais para controle de sistemas.

Capítulo 5

Controle Digital



A flexibilidade na utilização associada às vantagens de menores custos e dimensões, permite uma elevação no número de aplicações utilizando microprocessadores e computadores digitais em sistemas de controle. Embora ocorra uma degradação de desempenho pela introdução da amostragem, esta desvantagem é amplamente superada pela gama considerável de compensadores que podem ser realizados digitalmente.

Introduziu-se uma placa de aquisição de dados e um PC em substituição aos tradicionais reguladores constituídos de circuitos utilizando amplificadores operacionais.

5.1 Aquisição e Conversão de Dados

A introdução de um computador ou microprocessador digital para realizar as operações de controle, torna o sistema controlado mais versátil e com menores custos, associados à melhoria da precisão obtida.

O controle pode ser efetuado computacionalmente através de programação e utilização de uma placa de aquisição de dados adequada além de conversores A/D e D/A. A malha de controle de

velocidade e limitação de corrente de armadura da máquina síncrona foi implementada em laboratório, conforme mostra a figura 5.1 utilizando o cartão PCL-711B da Advantech Co.

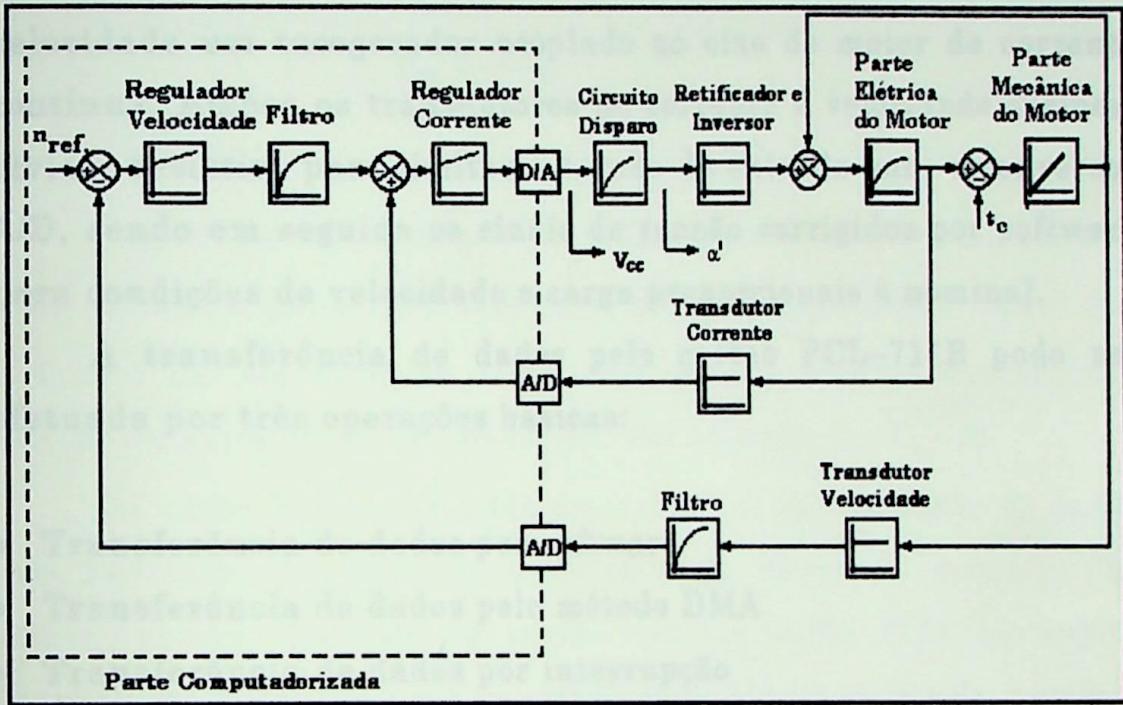


Figura 5.1 : Diagrama esquemático do controle digital em malha fechada de um máquina síncrona através de retificador e inversor

A placa PCL-711B PC-Multilab Card é um cartão de aquisição de dados que inclui conversão A/D, com resolução de 12 bits, possui 8 canais de entrada, programáveis para faixas de entrada de $\pm 5V$, $\pm 2.5V$, $\pm 1.25V$, etc., com tempo de conversão de até $25\mu s$. A conversão D/A, com resolução de 12 bits, possui apenas um canal de saída, tempo de acomodação de $30\mu s$, e faixas de saída de 0 a $\pm 5V$ ou 0 a $\pm 10V$.

Foram utilizados dois canais de entrada, para conversão A/D, correspondendo aos sinais de realimentação de velocidade e corrente, e um canal de saída, para o sinal de controle V_{cc} .

O transdutor de corrente é um sensor Hall e o transdutor de velocidade um tacogerador acoplado ao eixo do motor de corrente contínua. Ambos os transdutores de corrente e velocidade incluem divisor resistivo para limitar a tensão de entrada para o conversor A/D, sendo em seguida os sinais de tensão corrigidos por software para condições de velocidade e carga proporcionais à nominal.

A transferência de dados pelo cartão PCL-711B pode ser efetuada por três operações básicas:

- Transferência de dados por software
- Transferência de dados pelo método DMA
- Transferência de dados por interrupção

Os métodos DMA e por interrupção são mais rápidos já que o processador está mais voltado para suas aplicações enquanto as transferências de dados é efetuada ao fundo. A transferência de dados por software no entanto torna-se mais rápida e fácil se a transferência de dados é simples, envolvendo pequeno número de leituras.

Pelo método de transferência de dados por software os dados são transferidos para um *buffer* "A" enquanto esperam por um pulso de *trigger*, para que seja efetuada uma outra conversão. O processo continua até que seja efetuado o número de conversões especificado.

CAPÍTULO 5. CONTROLE DIGITAL

No caso considerado, os pulsos de *trigger* controlam o tempo entre as amostragens nos canais 0 e 1, sendo ajustados em função da frequência de conversão F_{AD} (pacer rate) pela seguinte relação:

$$F_{AD} = \frac{2 \cdot 10^6}{C_1 \cdot C_2} \quad (5.1)$$

O ajuste é efetuado por programação e adotando valores a C_1 e C_2 de forma que o intervalo entre as amostragens seja menor que o tempo de amostragem τ adotado para o sistema específico e dentro da capacidade do conversor. Foi adotado $C_1 = C_2 = 10$.

Os dados amostrados são armazenados em um *buffer* de dados com tamanho ajustado de 2 bytes a 64 Kbytes de memória. Se estiver sendo utilizado um cartão com um *buffer* FIFO (do inglês *First Input First Output*), o mínimo tamanho do *buffer* de memória depende da frequência de amostragem, podendo ser calculado pela seguinte equação:

$$n \geq \frac{50}{(1000/f) - 1,3} \quad (5.2)$$

Onde:

N: Número de conversões no *buffer* de memória

F: Frequência de amostragem em Khz.

Foi adotado um *buffer* de dados de 10 amostras o que equivale a 20 bytes.

Tudo

5.2 Projeto do Controle Discreto no Tempo

A placa de aquisição de dados inclui o amostrador (sampler) e o extrapolador de ordem zero ou ZOH (*zero-order hold*), elementos essenciais de um sistema discreto. Num amostrador convencional, uma chave se abre para admitir um sinal de entrada a cada τ segundos, sendo τ o tempo de amostragem. Em geral, o tempo de amostragem deve ser suficientemente pequeno de forma que os dados entre estes instantes discretos possam ser aproximados por simples interpolação. Em aplicações práticas, o tempo de amostragem deve ser muito menor em comparação com a constante de tempo mais significativa da planta, e é ajustado conforme o tempo de execução do programa. O extrapolador de ordem zero, mais simples elemento de retenção, converte o sinal amostrado em um trem de pulsos aproximando-o a um sinal contínuo, de forma que este permaneça constante entre dois instantes consecutivos de amostragem. O diagrama de blocos equivalente e as formas de onda demonstrativas da atuação do amostrador e extrapolador de ordem zero são apresentados na figura.5.2 .

Sendo:

- $X(t)$: Sinal analógico de entrada
- $X(KT)$: Sinal amostrado
- $Y(t)$: Sinal discreto gerado pelo ZOH

tudo

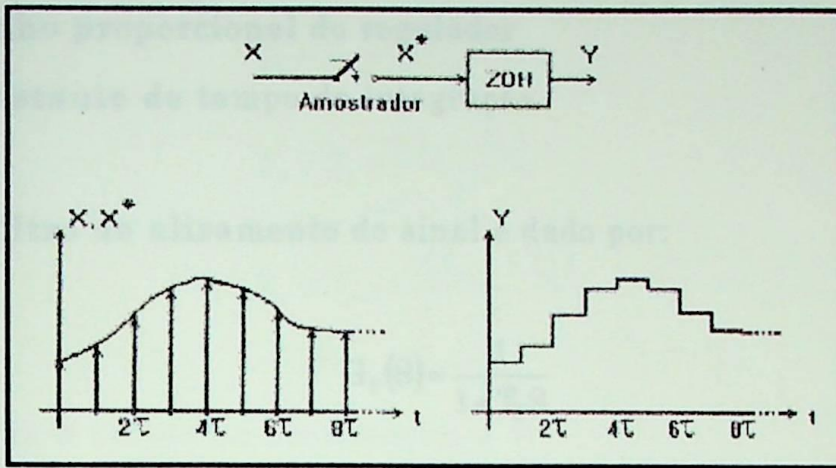


Figura 5.2 : Diagrama esquemático e formas de onda demonstrativas da atuação do amostrador e do extrapolador de ordem zero (ZOH)

O critério adotado para ajuste do tempo de amostragem é $\tau < \mathfrak{S}$, sendo \mathfrak{S} a menor constante de tempo do sistema. É Sugerido um ajuste em $\tau \cong 0.1\mathfrak{S}$. Para uma melhor performance, o tempo de execução do programa deve ser o menor possível mas deve atender ao critério de ajuste do tempo de amostragem. Foi adotado $\tau = 0,3[\text{ms}]$.

Os reguladores dimensionados pelo método de otimização em função da simetria são introduzidos computacionalmente no sistema.

Os reguladores PI convencionais têm a seguinte forma:

$$G_c(S) = V_R \left(1 + \frac{1}{T_I S} \right) \quad (5.3)$$

Sendo:

G_c : Função de transferência do regulador

tudo

CAPÍTULO 5. CONTROLE DIGITAL

V_R : Ganho proporcional do regulador

T_I : Constante de tempo de integração

O filtro de alisamento de sinal é dado por:

$$G_F(S) = \frac{1}{1 + T_F S} \quad (5.4)$$

Onde:

G_F : Função de transferência do filtro

T_F : Constante de tempo do filtro

Os compensadores e filtros digitais são introduzidos no sistema através de equações recursivas aplicando o método de aproximação trapezoidal, conforme ilustrado na figura 5.3 .

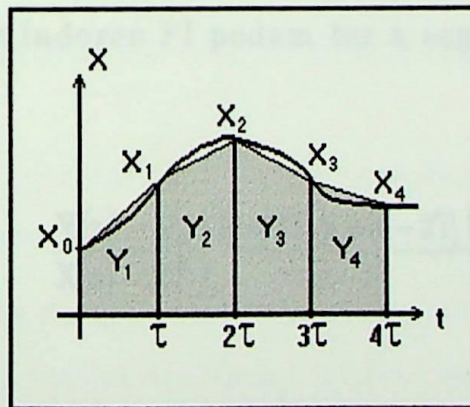


Figura 5.3: Método de aproximação por integração trapezoidal

Pelo método da integração trapezoidal, tem que:

trudo

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= Y_0 + \frac{\tau(X_0 + X_1)}{2} \\
 Y_2 &= Y_1 + \frac{\tau(X_1 + X_2)}{2} \\
 Y_n &= Y_{n-1} + \frac{\tau(X_{n-1} + X_n)}{2}
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

Onde o tempo de amostragem é τ .

Aplicando transformada Z,:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\tau(z+1)}{2(z-1)}
 \tag{5.6}$$

Pode-se então fazer a seguinte aproximação:

$$Z\left[\frac{1}{s}\right] = \frac{\tau(z+1)}{2(z-1)}
 \tag{5.7}$$

Assim, os reguladores PI podem ter a seguinte representação discreta no tempo:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{V_R}{2T_I} \left[\frac{(\tau + 2T_I)z + (\tau - 2T_I)}{(z-1)} \right]
 \tag{5.8}$$

E, na forma de equação recursiva:

$$Y(k) = Y(k-1) + \left(\frac{V_R \tau}{2T_I} + V_R \right) X(k) + \left(\frac{V_R \tau}{2T_I} - V_R \right) X(k-1)
 \tag{5.9}$$

Para os filtros digitais:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\tau(z+1)}{(\tau+2T_F)z + (\tau-2T_F)} \quad (5.10)$$

E, na forma de equação de recursiva:

$$Y(k) = \frac{\tau}{(2T_F + \tau)} [X(k) + X(k-1)] + \frac{(2T_F - \tau)}{(\tau + 2T_F)} Y(k-1) \quad (5.11)$$

O programa de implementação em linguagem C++ efetua as funções de controle, comanda a transferência de dados e as conversões A/D e D/A, controlando a velocidade e corrente da máquina. O programa inclui ainda temporização, diagnóstico de falha e ajuste de parâmetros *on-line*.

O programa completo de simulação para o acionamento utilizando reguladores PI é apresentado no Anexo A.

ati aqui

5.3 Resultados Experimentais

O sistema foi projetado para o acionamento de um motor síncrono de KW, 1800 RPM, 220V e corrente nominal $I_N = 5[A]$.

A ilustração da montagem prática é apresentada no Anexo B.

Os parâmetros foram ajustados *on-line* de forma a melhorar a resposta dinâmica do sistema.

A corrente limite foi ajustada computacionalmente para $I_{Lim} = 10$ em todos os casos.

As figuras 5.4 e 5.5 ilustram a corrente do link CC (forma de onda superior) e velocidade da máquina (forma de onda inferior)

quando degraus positivo e negativo no conjugado da carga são aplicados, onde a variação do valor da corrente é de 1[A] para 2[A]. Os valores de T_n ajustados foram respectivamente $T_n = 0.8[s]$ e $T_n = 0.46[s]$.

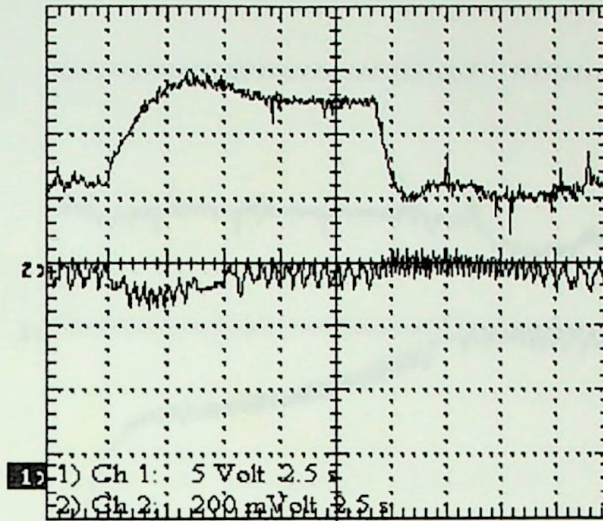


Figura 5.4: Resposta a um degrau positivo e negativo corrente(1) e velocidade(2) para $T_n = 0.8[s]$

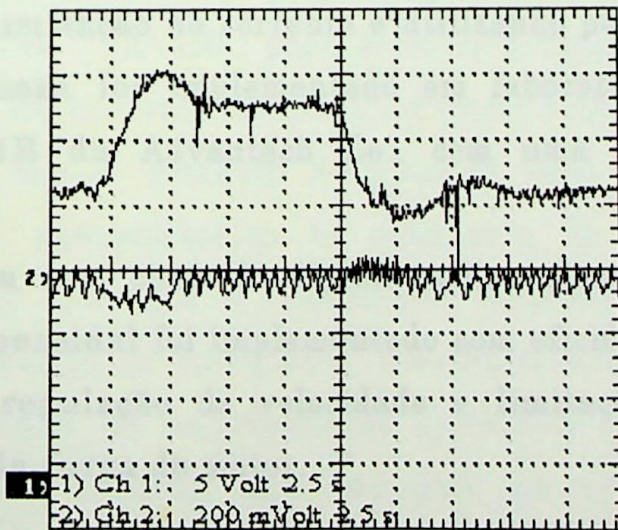


Figura 5.5: Resposta a um degrau positivo (1) Corrente, (2) Velocidade para $T_n = 0.46[s]$

A figura 5.6 ilustra a corrente do link CC e velocidade da máquina, na partida feita com o auxílio de máquina auxiliar igual ao controle analógico.

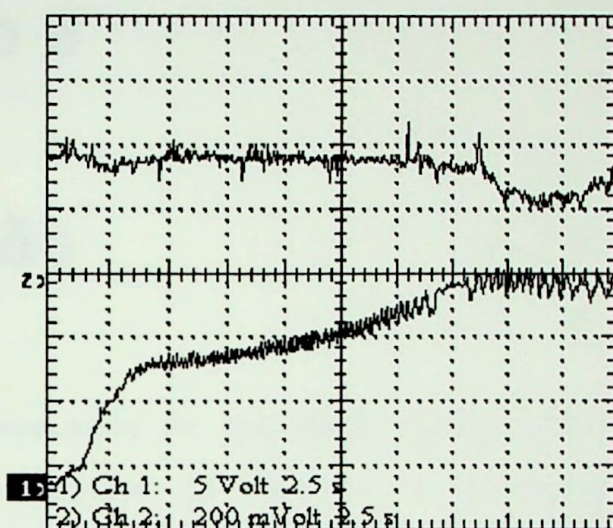


Figura 5.6: Velocidade e corrente durante a partida da máquina

O controle de velocidade em malha fechada de uma máquina síncrona com limitação de corrente e utilizando ponte retificadora e ponte inversora foi implementado em laboratório através da placa PCL-711B da Advantech Co., com uma boa precisão e dinâmica.

O sistema com controle digital utilizando aproximação por integração trapezoidal foi implementado com eficiência na prática, apresentando regulação de velocidade e limitação de corrente, independente da carga do motor.

Capítulo 6

Conclusão

Esta dissertação de mestrado apresentou uma proposta de implementação prática do controle de velocidade e limitação de corrente para os motores síncronos, utilizando retificador e inversor.

No controle analógico foi implementado um circuito de disparo do retificador e do inversor, ambos utilizando o circuito integrado dedicado TCA 780. Utilizou-se o transformador especial delta zigue-zague $\Delta/Z-195^0$, para fornecer a tensão de referência para o disparo do inversor. Possibilitou desta forma, a variação da velocidade do motor síncrono de maneira fácil e eficiente por intermédio do potenciômetro de referência de velocidade. Os reguladores de corrente e velocidade implementados para a alteração da tensão do retificador, possibilitaram a regulação de velocidade quando da ocorrência de distúrbios no conjugado de carga. Para tal utilizou uma máquina de corrente contínua funcionando como gerador, acoplada no mesmo eixo da máquina síncrona. A partida do motor síncrono foi feita também por esta máquina de corrente contínua que, neste caso, funcionou como motor.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO

Em termos de comparação observou que para o mesmo degrau aplicado (observar figuras 4.7 e 5.5 do controle analógico e digital respectivamente), o tempo de estabilização da velocidade do controle analógico é de aproximadamente 2[s] e do controle digital aproximadamente 2,5[s], assim, o controle analógico respondeu ligeiramente com mais rapidez.

Dentre as tecnologias de controle implementadas destaca-se a eficiência e flexibilidade do acionamento proposto no capítulo 5. O controle digital implementado com reguladores PI introduzidos através de equações recursivas e utilizando o método de aproximação por integração trapezoidal apresentou-se com boa precisão e dinâmica, similares aos observados no controle analógico, independente da carga no motor.

Como desvantagem, o controle analógico necessita às vezes de substituições de componentes da placa de regulação dependendo dos ganhos e constantes de tempo do sistema, já o controle digital é mais versátil pois basta apenas digitar os valores desses ganhos e constantes de tempo sendo que a variação desses parâmetros pode ser feita on-line, entretanto o controle analógico é de custo inferior.

*Proposta
A parte fuzzy*

Como trabalho futuro, é sugerido a implementação do acionamento utilizando controle fuzzy.

O tema investigado neste trabalho produziu até o momento o artigo publicado citado a seguir, apresentado em dois congressos sendo um internacional e outro nacional, que podem servir como possíveis referências para quem desejar dar continuidade ao trabalho:

CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO

- Quinderé, K. E. B.; Rezek, A. J. J.; Abreu, J.P.G.; Silva, V. F.; Côrtes, A. J.; Vicente, J. M. E.; Almeida, A. T. L. "A Simple Regulators Optimization Method for a Thyristorized Controlled Synchronous Motor Drive System". 3rd International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, July 8-9, 1999, University of Patras, Greece.
- Quinderé, K. E. B.; Rezek, A. J. J.; Abreu, J.P.G.; Silva, V. F.; Côrtes, A. J.; Vicente, J. M. E.; Almeida, A. T. L. "A Simple Regulators Optimization Method for a Thyristorized Controlled Synchronous Motor Drive System". The 5th Brazilian Power Electronics Conference, 19 a 23 de setembro, 1999, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.

Por fim, vale salientar que as considerações finais de cada capítulo adicionam-se às apresentadas, concluindo dessa forma, o trabalho aqui apresentado.

ANEXO A - PROGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO PARA O
ACIONAMENTO CONTROLADO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA
UTILIZANDO REGULADORES PI

Anexo A

Programa de Implementação para o Acionamento Controlado de uma Máquina Síncrona Utilizando Reguladores PI

ANEXO A. PROGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO PARA O
ACIONAMENTO CONTROLADO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA
UTILIZANDO REGULADORES PI

```
/*  
  
*****  
* Programa : Acionamento Tiristorizado da máquina síncrona *  
* Descrição : Controle digital para acionamento de uma máquina *  
*             síncrona utilizando o cartão PCL-711B *  
* Versão    : 10 *  
* Data      : 01/05/99 *  
*****  
  
*/  
  
/* Inclusão de Diretivas */  
  
#include <stdio.h>  
#include <conio.h> /* Aceita diretivas, incluindo códigos */  
#include <stdlib.h> /* de fontes de outros */  
#include <dos.h> /* programas ou diretórios. */  
#include <timer.h>  
  
/* Declaração de Variáveis Globais */  
  
extern "C" pcl711(int, unsigned int *); /* Inclui função "pcl711" definida  
inteiro, sem sinal em um módulo separado utilizando  
linguagem "C" */  
unsigned int param[60]; /* Definição de um vetor de dados -  
array - que formam a tabela de  
parâmetros inteiros e s/ sinal */  
unsigned int datain[10], dataout[10]; /* Buffer de 10 dados inteiros +  
para conversão */  
unsigned int far * datin, * datout; /* Endereço do buffer de dados acima  
- pointer - tipo inteiro e longo:  
2 palavras c/ range de 1Mbyte */  
int tecla,i; /* Variáveis de leitura do teclado  
e numero de canais */
```


ANEXO A. PROGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO PARA O
ACIONAMENTO CONTROLADO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA
UTILIZANDO REGULADORES PI

```
/* Variáveis pontos flutuantes do controle */
float nRef=0.8, nReal=0.0, ne=nRef;
float ne_1=0.1, nReal_1=0.0;
float iRef=1.0, iR=1.0, ie=-1.0, iReal=0.0, Ilim=1.0, iRefer=1.0;
float iRef_1=1.0, iR_1=1.0, ie_1=-1.0, iReal_1=0.0, iRefer_1=1.0;
float Tn=0.46, Tgs2=0.015, Ti=0.013;
float VRn=5.0, VRi=0.14, Vcc=0.9, Vcc_1=0.9, Vcontr=0.9;
float a1, a2, b1, b2, b3, b4, T=0.003;
float DataBuf[3];

/* Declaração de variáveis void - significa que não retorna um valor */
void conv_ad(void);
void conv_da(void);
void control(void);
void controll(void);
void control2(void);
void teclado(void);

/* Conversão AD - Tabela de parâmetros */

void conv_ad()
{
    unsigned int i;
    /* Pointer - Espaço de memória - Variável que contém um endereço
    que, normalmente , é endereço de outra variável. */
    datin = datain; /* Atribui ao pointer datin o valor
    equivalente ... variável datain */
    param[0] = 0; /* Número do cartão */
    param[1] = 0x220; /* Endereço de Base I/O */
    /* Frequência de amostragem = Frequência de base do cartão/(C1 * C2) */
    /* 2M / (10 * 10) = 20 KHz */
    param[5] = 10; /* Divisor constante pacer C1 */
    param[6] = 10; /* Divisor constante pacer C2 */
    param[7] = 0; /* Modo Trigger, 0 : pacer trigger
    Permite funções D/I */
    /* Offset do Buffer , o endereço de memória (buffer) onde os dados
    serão guardados. Segmento , o comprimento do buffer de dados */
    param[10] = FP_OFF(datin); /* Offset do Buffer A do A/D */
    param[11] = FP_SEG(datin); /* Segmento do Buffer A do A/D */
}
```


ANEXO A. PROGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO PARA O
ACIONAMENTO CONTROLADO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA
UTILIZANDO REGULADORES PI

```
param[12] = 0;          /* Endereço do Buffer B (não usado)*/
param[13] = 0;          /* Segmento- Não usado, setar em 0 */
/* A conversão A/D envolve dois canais de entrada, canal 1 - corrente,
   e canal 0 - velocidade, com valores em pu ajustados em +/- 5 V */
param[14] = 2;          /* Número de conversões A/D      */
param[15] = 0;          /* Canal de início da conversão A/D*/
param[16] = 1;          /* Canal de parada da conversão A/D*/
param[17] = 0;          /* Ganho dos canais, 0 : +/- 5V  */

/* Indicação de falha na conversão A/D */

pcl711(3, param);      /* Func. 3 : Inicialização do Hardware */
if (param[45] != 0) { /* Se parâmetro 45 diferente de 0, fazer: */
    clrscr();          /* Limpar a tela */
    printf("\n FALHA NA INICIALIZAÇÃO DO DRIVER !"); /*
Imprimir */

    getch();           /* Mostrar a tela de saída */
    exit(1);           /* Fecha o loop e sai com status 1 - Erro */
}

pcl711(4, param);      /* Func 4 : Inicialização do conversor A/D*/
if (param[45] != 0) {
    clrscr();
    printf("\n FALHA NA INICIALIZAÇÃO DO A/D !");
    getch();
    exit(1);
}

pcl711(5, param);      /* Func 5 : Verificação número conversões A/D*/
if (param[45] != 0) {
    clrscr();
    printf("\n FALHA NO SOFTWARE DE TRANSFERÊNCIA DE
DADOS A/D !");
    getch();
    exit(1);
}
```


ANEXO A. PROGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO PARA O
 ACIONAMENTO CONTROLADO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA
 UTILIZANDO REGULADORES PI

```

        /* Conversões A/D */

for (i = 0; i < param[14]; i++) /* Dados amostrados - canais 0 e 1 */
{
    DataBuf[i] = datain[i] & 0xFFF;
    /* Coleta de dados para o buffer no endereço 0xFFF
    (os três primeiros dígitos hexadecimais podem ser zerados pois o
    restante , suficiente p/ suportar 4096 dígitos binários ) */
    DataBuf[i] = ((5.0 - (-5)) * DataBuf[i] / 4096) + (-5);
    /* Conversão para que o sinal de tensão seja disponível para
    aplicação nas equações recursivas de controle
    (5 - (-5)) : Faixa de entrada A/D (-5V to 5V)
    4096       : Faixa da escala do A/D - 12 bit
    DataBuf    : Dado de entrada do A/D
    (-5)       : Início da escala do A/D "-5" V
    */
}
    /* Leitura da tensão de realimentação para a malha de velocidade
    e de corrente, sob condições de velocidade e carga nominal */
    /* Conversão do sinal de velocidade - correção para pu */
nReal=(DataBuf[0]/0.8);

/* Conversão do sinal de corrente - correção para pu */
iReal=(DataBuf[1]/1.0);
}

        /* Controle */

/* Equações Recursivas para efetuar funções de controle */

void control()
{
    /* Adotado tempo de amostragem T */

a1=T/((2*Tgs2)+T);
    /*Tgs2= Constante de tempo do filtro */
a2=((2*Tgs2)-T)/(T+(2*Tgs2));
b1=VRn+((VRn*T)/(2*Tn)); /* VRn= Ganho do regulador de velocidade*/
    /* Tn= Constante de tempo do reg. velocidade */
b2=((VRn*T)/(2*Tn))-VRn;
}
    
```


**ANEXO A. PROGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO PARA O
ACIONAMENTO CONTROLADO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA
UTILIZANDO REGULADORES PI**

```
b3=VRi+((VRi*T)/(2*Ti)); /* VRi= Ganho do regulador de corrente */
/* Ti= Constante de tempo do reg. de corrente*/
b4=((VRi*T)/(2*Ti))-VRi;
tecla=0;}
```

/* Regulador de Velocidade */

```
void control1()
{
    iRef=(b1*ne)+(b2*ne_1)+iRef_1; /* nreal= Realimentação de
velocidade*/
    iRef_1=iRef; /* nRef= Veloc. refer. após filtro */
    ne_1=ne; /* ne= Erro de velocidade */
/* iRef= Corrente ref. - Saída
regulador de velocidade */

/* Filtro da Corrente de Referência */

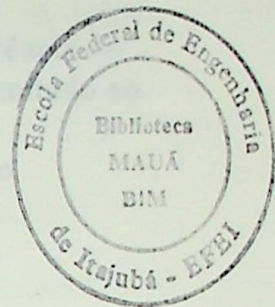
iRefer=iRef;
iR=a1*(iRefer+iRefer_1)+a2*iR_1; /* Sendo: */
iR_1=iR; /* iR= Corrente refer. após filtro */
iRefer_1=iRefer; /* iRef= Corrente referência */
if(iR>=Ilim) iR=Ilim;
if(iR<=-Ilim) iR=-Ilim; /* Limitação da corrente de referência*/
}
```

/* Regulador de Corrente */

```
void control2()
{
/* Sendo: */
Vcc=(b3*ie)+(b4*ie_1)+Vcc_1; /* ireal= realimentação de corrente*/
Vcc_1=Vcc; /* iR= Corrente ref. após filtro */
ie_1=ie; /* ie= Erro corrente- Ent. regulador */
if(Vcc>0.9) Vcontr=0.9;
if(Vcc<0.1) Vcontr=0.1; /* Limitação da tensão de controle */
if(Vcc<=0.9 && Vcc>=0.1) Vcontr=Vcc;
}
```

/* Alteração nos parâmetros do sistema */

```
void teclado()
{
```



ANEXO A. PROGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO PARA O
ACIONAMENTO CONTROLADO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA
UTILIZANDO REGULADORES PI

```
    if (kbhit()) tecla=getch(); /* Se for pressionada alguma tecla, */
                                /* abrir a tela de saída */
/* O acionamento destas teclas de subrotina, permitem ajuste on-line de
parâmetros do sistema, com o ajuste sendo mostrado na tela de saída */

    /* Teclas "s" e "d" atuando na valor da velocidade de referência */
    if (tecla==115 && nRef<1.0) nRef=nRef+0.05; /* Ajuste limitado ao
*/
    if (tecla==100 && nRef>0.06) nRef=nRef-0.05; /* intervalo
0<nRef<1 */

    /* Teclas "f" e "v" atuando no ganho VRn */
    if (tecla==102 && VRn<40.0) VRn=VRn+0.1;
    if (tecla==118 && VRn>0.2) VRn=VRn-0.1;

    /* Teclas "g" e "b" atuando na constante de tempo Tn */
    if (tecla==103 && Tn<5.000) Tn=Tn+0.05;
    if (tecla==98 && Tn>0.06) Tn=Tn-0.05;

    /* Teclas "h" e "n" atuando no ganho VRi */
    if (tecla==104 && VRi<10.0) VRi=VRi+0.5;
    if (tecla==110 && VRi>0.6) VRi=VRi-0.5;

    /* Teclas "j" e "m" atuando na constante de tempo Ti */
    if (tecla==106 && Ti<1.000) Ti=Ti+0.005;
    if (tecla==109 && Ti>0.006) Ti=Ti-0.005;

    /* Teclas "k" e "l" atuando na corrente limite Ilim */
    if (tecla==107 && Ilim<4.0) Ilim=Ilim+0.1;
    if (tecla==108 && Ilim>1.0) Ilim=Ilim-0.1;

}

/* Conversão D/A - Tabela de Parâmetros */

void conv_da()
{
```


*ANEXO A. PROGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO PARA O
ACIONAMENTO CONTROLADO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA
UTILIZANDO REGULADORES PI*

```

    datout=dataout;          /* Atribui ao pointer datout o valor
                             equivalente ... variável dataout */
    param[0]=0;              /* Número do cartão */
    param[1]=0x220;         /* Endereço de base I/O */
    /* Offset do Buffer , o endereço de memória (buffer) onde os dados
    serão guardados. Segmento , o comprimento do buffer de dados
    */
    param[20] = FP_OFF(datout); /* Offset do buffer A dados saída D/A
    */
    param[21] = FP_SEG(datout); /* Segmento do buffer A dados saída
    D/A */
    param[22] = 0;          /* Endereço do Buffer B saída(não usado) */
    param[23] = 0;          /* Segmento saída- Não usado, setar em 0 */
    param[24] = 1;          /* Número de conversões D/A */
    param[25] = 0;          /* Canal de inicio da conversão D/A */
    param[26] = 0;          /* Canal de parada da conversão D/A */
    /* Indicação de falha na conversão D/A */

    pcl711(3, param);      /* Func 3 : Inicialização do hardware */
    if (param[45] != 0) { /* Se parâmetro 45 diferente de 0, fazer: */
        clrscr();          /* Limpar a tela */
        printf("\n FALHA NA INICIALIZAÇÃO DO DRIVER !"); /*
    Imprimir */
    }

    getch();              /* Mostrar a tela de saída */
    exit(1);              /* Fecha o loop e sai com status 1 - Erro */
}
    pcl711(12, param);    /* Func 12: Inicialização do conversor D/A */
    if (param[45] != 0) {
        clrscr();
        printf("\n FALHA NA INICIALIZAÇÃO DO D/A !");
        getch();
        exit(1);
    }
    pcl711(13, param);    /* Func 13: Verificação número conversões
    D/A*/
    if (param[45] != 0) {
        clrscr();
        printf("\n FALHA NO SOFTWARE DE TRANSFERÊNCIA
    DE DADOS D/A !");
        getch();
        exit(1);
    }
}

```


*ANEXO A. PROGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO PARA O
ACIONAMENTO CONTROLADO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA
UTILIZANDO REGULADORES PI*

```

/* Conversão para que o sinal de tensão de saída das
equações recursivas de controle em pu ocupe um espaço
de endereço do buffer de dados de saída. */
dataout[0]=(4095*Vcontr);
}

/* Programa principal */

void main(void) /* Garante que as variáveis globais não retornam valores
*/
{
/* Declaração de variáveis */
int xx=0; /* Inicializa o número de interações em 0 */
Timer t; /* Contador de tempo "t" */
asm cli; /* Admite inclusão de uma função da linguagem assembler -
função cli */
do{ xx++; /* Incrementa 1 no número de interações */
t.reset(); /* Reseta o temporizador "t" */
t.start(); /* Inicia a temporização */
conv_ad(); /* Efetua a subrotina de conversão A/D */
/* Condição para efetuar as equações de
controle - sinal de realimentação maior que o
ruído normal */
if(nReal>0.08)
{control();
teclado();} /* Efetua a subrotina que inspeciona o acionamento de tecla
*/

ne=nRef-nReal;
if(iR<Ilim && iR>-Ilim) controll1();
if(iR==Ilim && ne<0.0) controll1();
if(iR==-Ilim && ne>0.0) controll1();

if (iReal>0.08)
{ie=iReal-iR;
if(Vcc_1<0.9 && Vcc_1>0.1)control2();
if(Vcc_1>0.9 && ie<0.0) control2();
if(Vcc_1<0.1 && ie>0.0) control2();}
```


*ANEXO A. PROGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO PARA O
ACIONAMENTO CONTROLADO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA
UTILIZANDO REGULADORES PI*

```
if (iReal<0.08)
Vcc=Vcc_1;

conv_da(); /* Efetua a subrotina de conversão D/A */

if (xx==100) /* Imprime na tela resultados instantâneos cada 100
                interações */
    {xx=0;

        clrscr();
        printf("\nVRn= %1.3f Tn= %1.4f VRi= %1.3f Ti= %1.4f", VRn, Tn,
VRi, Ti);
        printf("\nTempo gasto: %fs ", T);
        printf("\ncanal[%3d] = % 1.3f (pu) canal[%3d] = % 1.3f (pu)", 0,
nReal, 1, iReal);
        printf("\n nRef= %1.2f Vcontr= %1.2f iR= %1.4f ie= %1.2f", nRef,
Vcontr, iR, ie);
        printf("\n Said.R.Veloc= %1.3f Said.R.Corr= %1.3f", iRef, Vcc);
        /* %1.4f V, significa, real, em 1 campo, com 4 dígitos decimais, em "V".
        %3d significa, inteiro, em 3 campos. */
    }

t.stop(); /* Termina a temporização */
T=t.time(); /* Consideramos o tempo de amostragem c/ valor inicial
T=0.003 s. Se o tempo de execução do programa "t" , maior que "T",
necessário tentar reduzi-lo. Se "t" e menor fazemos T=t.*/

if (kbhit()) tecla=getch(); /* Admite alteração dos parâmetros on-line */
    }
while(tecla!=27); /* Interrupção do programa pela tecla ESC */
asm sti; /* Admite inclusão de uma função da linguagem assembler -
função sti */
    }
```


Anexo B

Montagem Prática em Laboratório

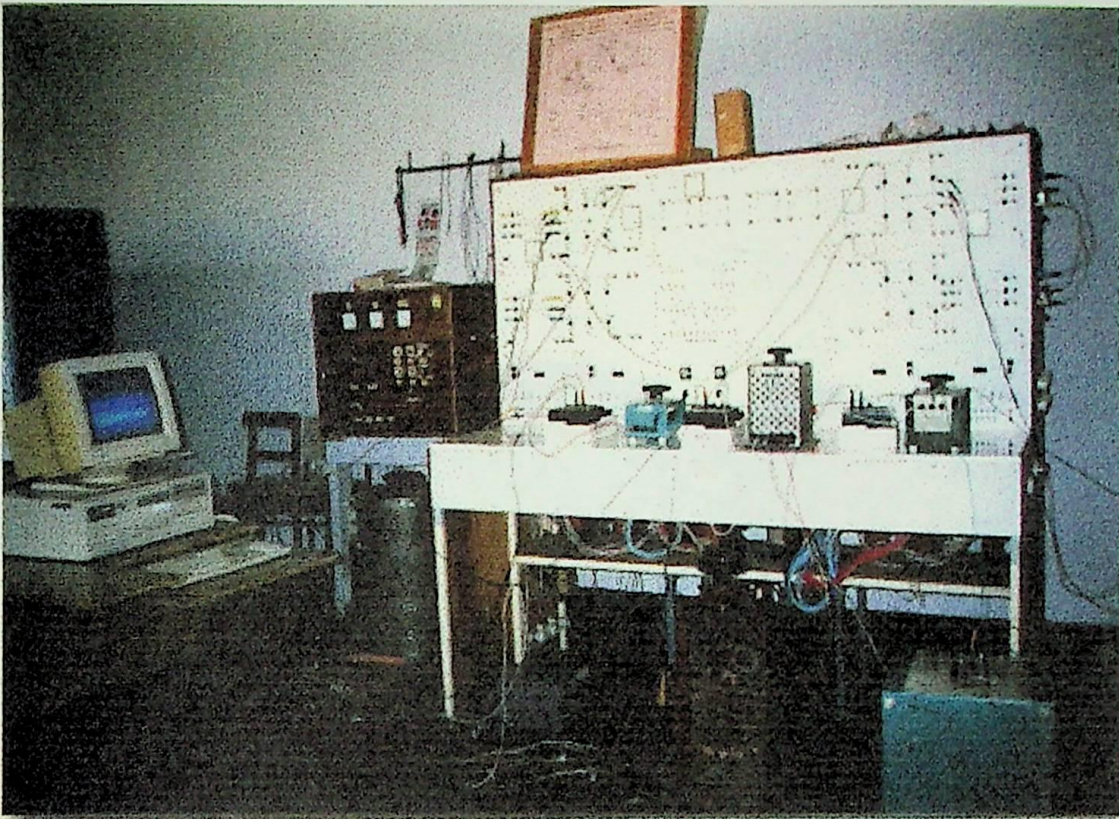


Figura B.1: Montagem do acionamento

Identificação das partes constituintes:

- Visão geral da bancada de laboratório utilizada.
- Bancada de trabalho.
- PC (*personal computer*), incluindo placa de aquisição de dados, placa de bornes de entrada e programa de implementação em C++.
- Reguladores analógicos.
- Ponte retificadora e inversora.

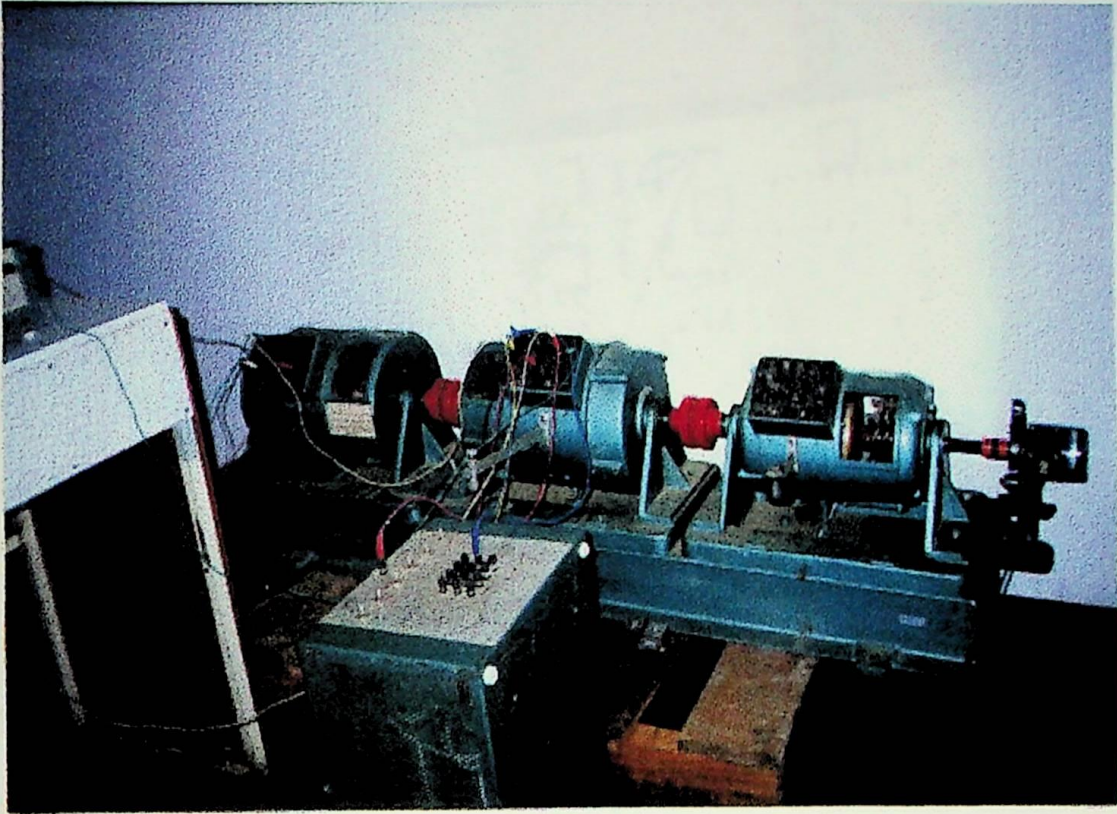


Figura B.2: Motor síncrono e carga

Identificação das partes constituintes:

- Motor síncrono .
- Máquina auxiliar inicialmente para partida do motor e em seguida funcionando como gerador.
- Tacogerador acoplado no mesmo eixo do motor.
- Carga resistiva.

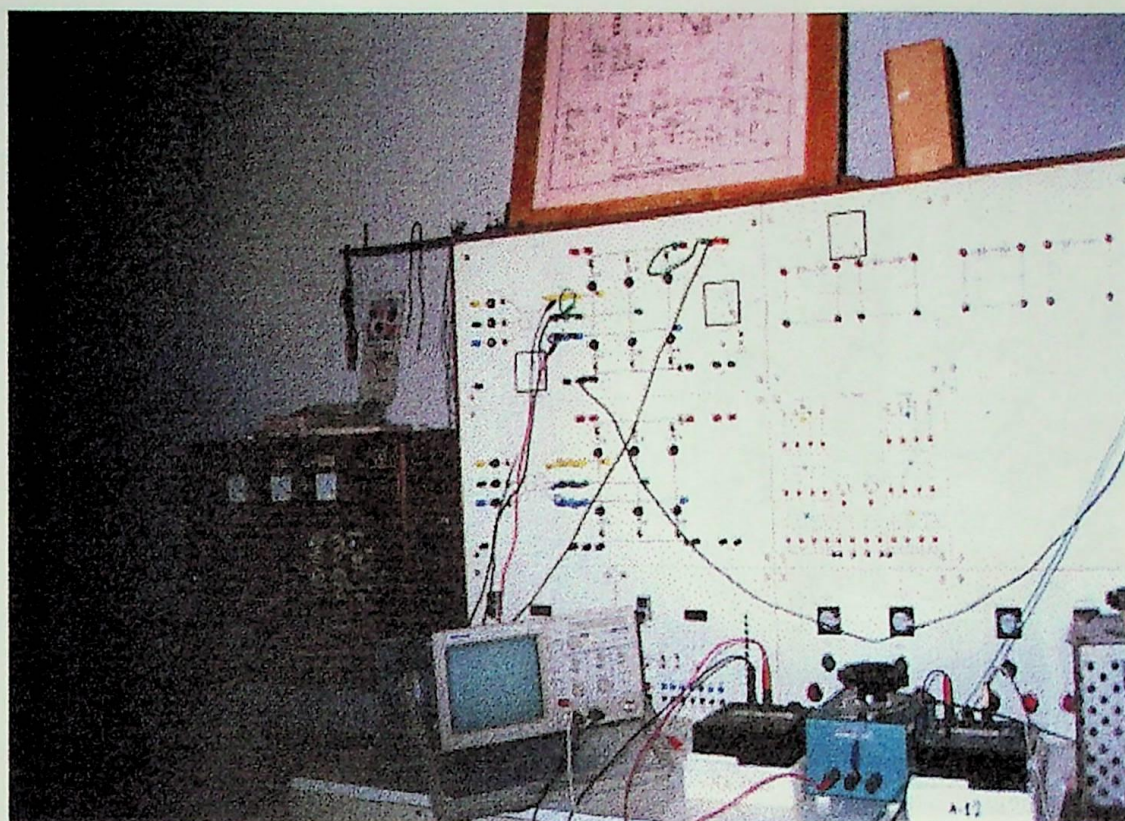


Figura B.3: Registro através de um osciloscópio de memória

Identificação das partes constituintes:

- Osciloscópio digital TDS 340 Tektronix.
- Ponte retificadora tiristorizada.
- Reostato de campo e amperímetros.



Figura B.4: Reguladores analógicos e PC utilizado

Identificação das partes constituintes:

- Reguladores analógicos.
- PC 486 (*personal computer*).

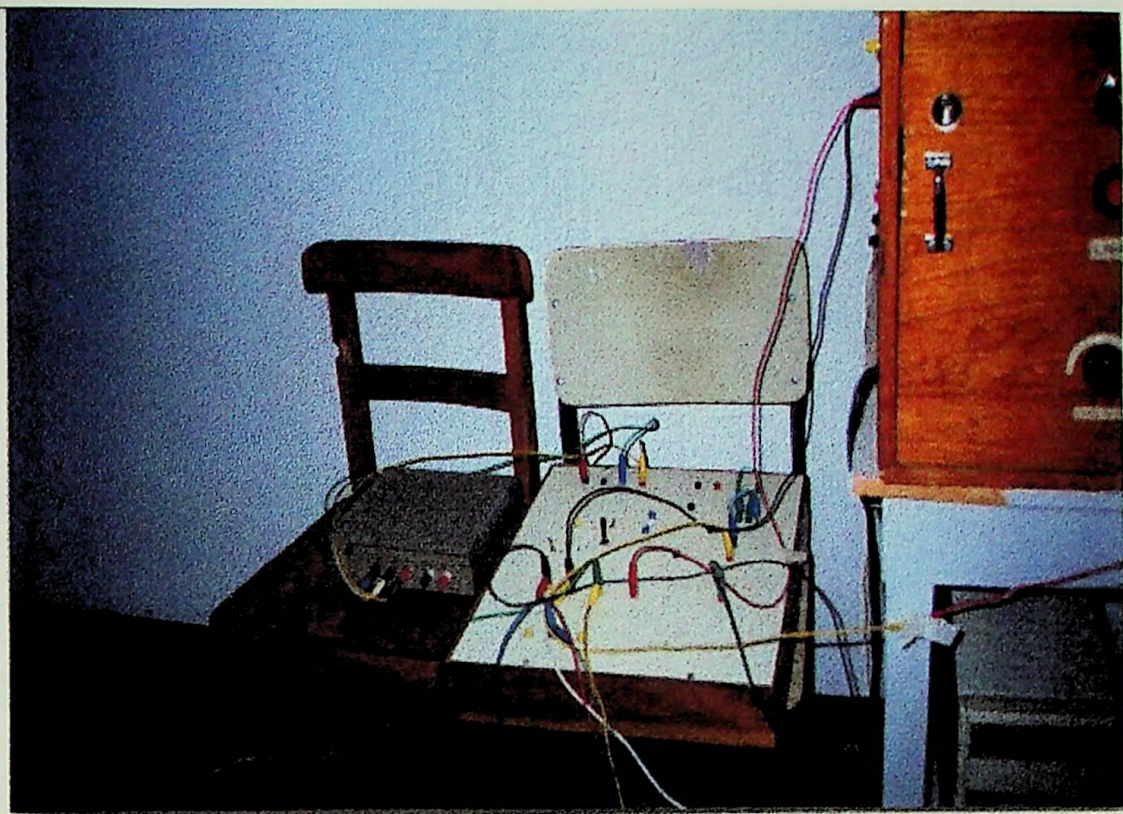


Figura B.5: Sensor Hall

Identificação das partes constituintes:

- Sensor Hall de corrente montado na caixa branca.
- Fonte de alimentação ($\pm 12V$).

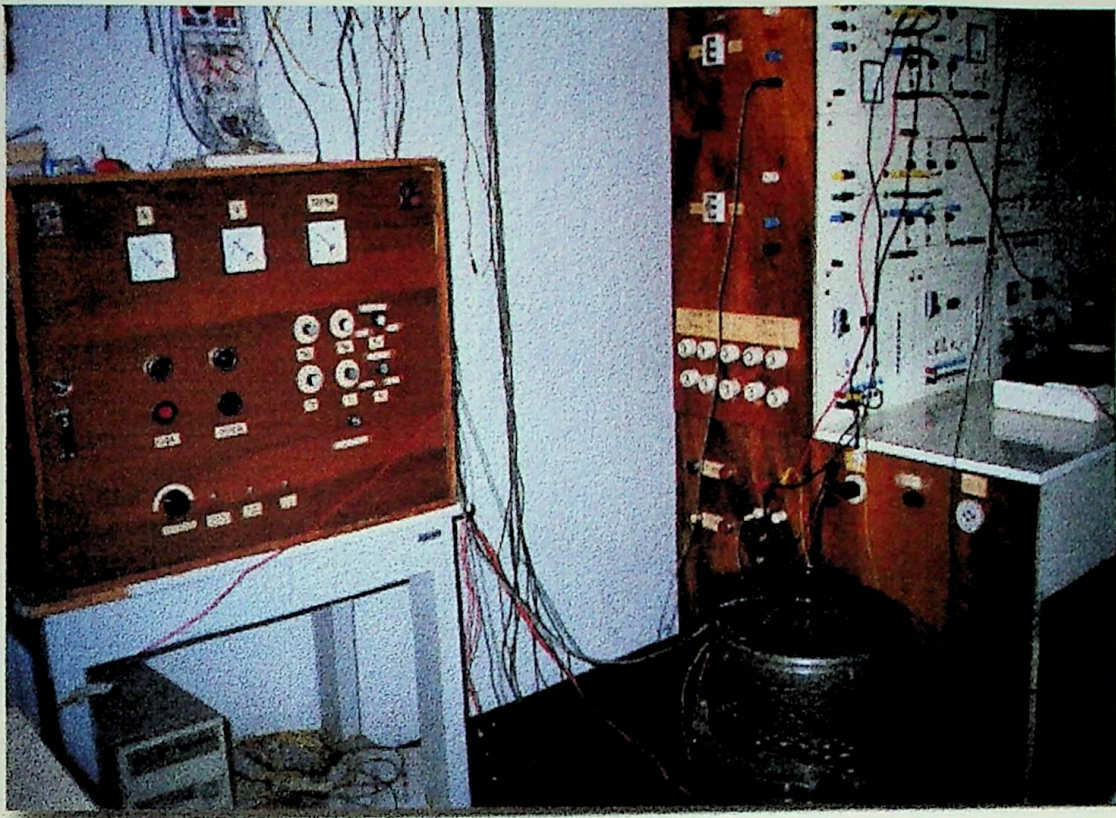


Figura B.6: Reguladores analógicos e vista lateral da bancada de acionamento

Identificação das partes constituintes:

- Reguladores analógicos, onde os ajustes dos ganhos e constantes de tempo tanto do regulador de corrente como o de velocidade são realizados por intermédio de potenciômetros do painel frontal.
- Vista do painel lateral da bancada de acionamento.
- Varivolt trifásico.

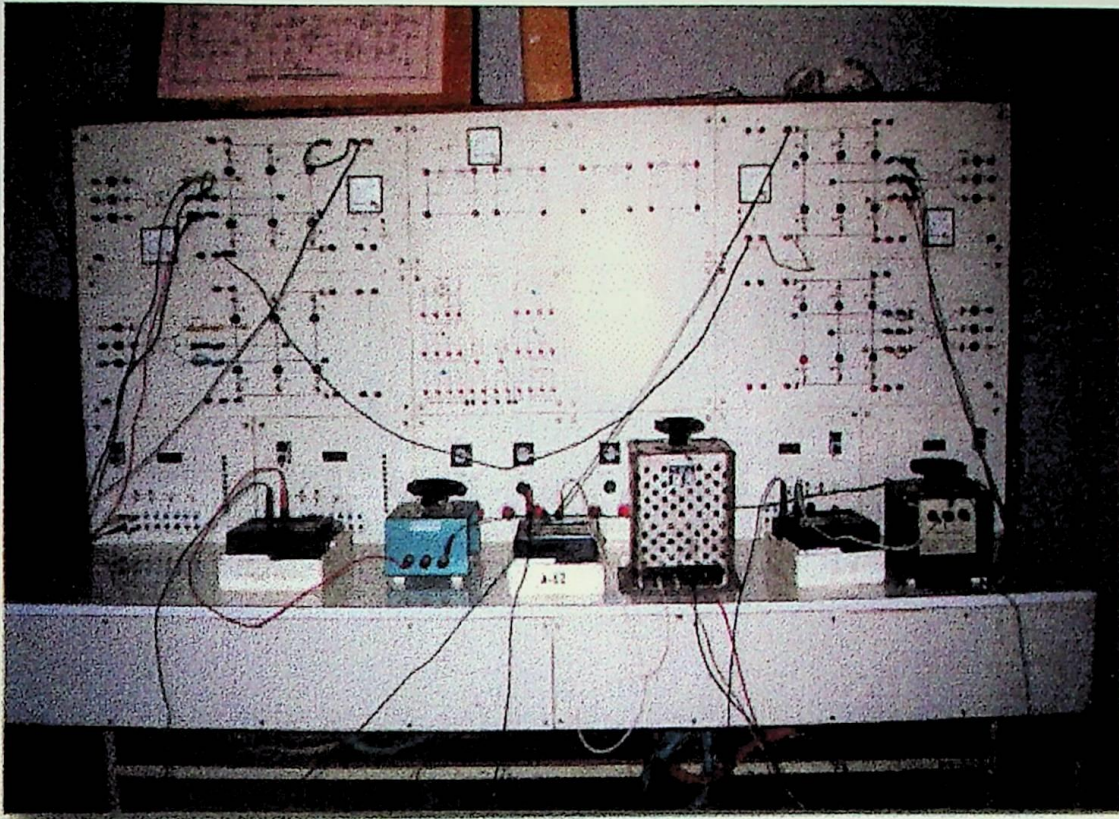


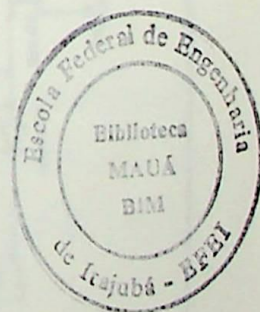
Figura B.7: Painel frontal da bancada de acionamento

Identificação das partes constituintes:

- Ponte retificadora tiristorizada.
- Ponte inversora tiristorizada.
- Amperímetros.
- Reostato de partida.
- Reostato de campo.

Anexo C

Circuito de Disparo do Sistema do Retificador e Inversor do Acionamento Controlado



Referências Bibliográficas

- [1] Abreu, J.P.G.; Rezek, A.J.J.; Coan, R.J.P. "Phase Shift Transformer $0 \rightarrow 360^\circ$ by Using Tap's with Constant Voltage (in Portuguese), *Proceedings VI CBA*, Vol.II, pg. 670-674, Belo Horizonte(MG), 1986.
- [2] F. Fröhr & F. Orttenburger "Introduccion al Control Electronico" Siemens, Marcombo S/A, Barcelona, 1986.
- [3] Rezek, A. J. J.; Rodrigues, M. S.; Miranda, V. A.M.; Oliveira, V.A.; Cassula, A.M.; Costa Jr., R.A .Torres, A. Z.. "Design and Simulation of a Controlled DC Drive" (in portuguese), *Proceedings of 2nd International Seminar on Electrical Machines and Controlled Drives - II SIMEAR, Abinne Tec 91*, EPUSP, São Paulo, SP-Brasil, vol. 3, pp. 141-160, May.1991.
- [4] Assis, W. O. "Projeto e Implementação do Acionamento Controlado para Máquina de Corrente Contínua Através de Chopper". Dissertação de Mestrado, EFEI, Itajubá/MG, 1997.
- [5] Quinderé, K. E. B.; Rezek, A. J. J.; Abreu, J.P.G.; Silva, V. F.; Cortez, A. J.; Vicente, J. M. E.; Almeida, A. T. L."A

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Simple Regulators Optimization Method for a Thyristorized Controlled Synchronous Motor Drive System". *3rd International Symposium on Advanced Eletromechanical Motion Systems*, July 8-9, 1999, University of Patras, Greece.
- [6] Quinderé, K. E. B.; Rezek, A. J. J.; Abreu, J.P.G.; Silva, V. F.; Cortez, A. J.; Vicente, J. M. E.; Almeida, A. T. L."A Simple Regulators Optimization Method for a Thyristorized Controlled Synchronous Motor Drive System". *The 5th Brazilian Power Eletronics Conference*, 19 a 23 de setembro, 1999, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- [7] Almeida, José Luis Antunes. "Eletrônica de Potência", Ed. Érica, São Paulo/SP, 1986.
- [8] Lander, Cyril W.. "Eletrônica Industrial, Teoria e Aplicações". Editora McGraw-Hill Ltda, São Paulo, 1988.
- [9] Ogata, K.. "Projeto de Sistemas Lineares de Controle com MATLAB". Ed. Prentice-Hall do Brasil Ltda., Rio de Janeiro/RJ, 1996.
- [10] Rezek, A. J. J.; A. J. J.; Abreu, J.P.G.; Silva, V. F.; Cortez, A. J.; Vicente, J. M. E.; Almeida, A. T. L.; Silva, L. E. B.; Nakashima, K.; Pereira, C. A. G.; Rodrigues, N.A.; Jirchik, O.; Oliveira, N. Jr.. "Um Sistema de Controle de Velocidade em Malha Fechada para o Acionamento do Motor Síncrono Utilizando um Transformador Especial". Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá/MG, Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [11] Advantech Corporation Co.. "PCL-711-PC Multilab Card - User's Manual". Taiwan, Aug, 1993.

- [12] D'Azzo, J. J.; Houpis, C. H.. "Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares". Ed. Guanabara Dois S. A., Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 1978.

- [13] Rezek, A. J. J.. "Análise em Regime Permanente e Transitório de um Sistema de Conversão de Energia Elétrica AC/DC". Dissertação de mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá/MG, junho, 1986.