



Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

**Alexandre Viana Braga**

**Implementação de uma microcentral hidrelétrica com  
gerador de indução em operação isolada para atendimento de  
comunidades rurais**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de  
Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientadores: Angelo José Junqueira Rezek

Valberto Ferreira da Silva

Abril de 2015

Itajubá - MG



Ministério da Educação  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
Criada pela Lei nº 10435, de 24 de abril de 2002

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TESE DE DOUTORADO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA

Título da Tese: **“Implementação de uma micro central hidrelétrica com gerador de indução em operação isolada para atendimento de comunidades rurais.”**

Autor: **Alexandre Viana Braga**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A	
2ª	A	
3ª	A	
4º	A	
5º	A	
6º	A	
7º	A	

**A** - APROVADO: Se a Tese obtiver aprovação unânime da Comissão Examinadora.

**AC** - APROVADO CONDICIONAL: Quando a Comissão Examinadora entender que a Tese deva sofrer alterações de conteúdo ou conter resultados novos ou adicionais.

**RE** - REEXAME: Quando a Comissão Examinadora entender que a Tese, embora contendo contribuições relevantes, não tenha sido defendida adequadamente, ou deve sofrer modificações mais profundas. Caso em que o candidato terá mais uma única e última oportunidade para reestruturar a Tese se for o caso, e defendê-la novamente em um prazo não superior a 6 (seis) meses contados a partir da data da primeira defesa.

**R** - REPROVAÇÃO: Quando a Comissão Examinadora entender que a Tese não contém contribuições relevantes para a área do tema da Tese.

(\*) Este documento terá a validade de 90 (noventa) dias a contar da data da defesa da Tese.

Resultado Médio: Conceito: A, ou seja, APROVADO

Observações: ACATAR AS SUGESTÕES DA BANCA

Itajubá, 06 de abril de 2015.

Dr. Nery de Oliveira Junior  
1º Examinador – Nery Engenharia Ltda

Prof.ª Dr.ª Luana Medeiros Marangon Lima  
3ª Examinador – UNIFEI

Prof. Dr. José Manuel Esteves Vicente  
5º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Angelo Jose Junqueira Rezek  
7º Examinador (Orientador) – UNIFEI

Prof.ª Dr.ª Adriana Aparecida dos Santos Izidoro  
2ª Examinador – INATEL

Prof. Dr. Paulo Cesar Rosa  
4º Examinador – UNIFEI

Prof. Dr. Valberto Ferreira da Silva  
6º Examinador (Coorientador) – UNIFEI

# **Dedicatória**

Ao meu pai Alcides, à minha mãe Maria José e ao meu amor Josiane.

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por renovar minhas forças física, intelectual e espiritual para que eu, mais uma vez, tivesse a alegria da realização de um sonho. Agradeço aos meus professores orientadores Angelo José Junqueira Rezek e Valberto Ferreira da Silva, pela gentileza e pelo interesse que demonstraram por mim antes mesmo de ingressar no doutorado. Agradeço ao Ministério de Minas e Energia pelo uso da microcentral hidrelétrica na Fazenda Boa Esperança, onde funciona o Laboratório Avançado de microcentrais hidrelétricas pelo acordo entre a Universidade Federal de Itajubá através do Programa Luz para Todos. Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do Projeto de Pesquisa *Controle Digital Aplicado a gerador de indução isolado para atendimento de pequenas comunidades rurais*, TEC-APQ-00201-09, que permitiu o desenvolvimento desta tese. Agradeço à Prefeitura de Itajubá pelo suporte financeiro ao projeto. Agradeço à Alstom, localizada na cidade de Itajubá, no sul do Estado de Minas Gerais, Brasil, pela doação de dois Transformadores de Potencial; Agradeço à Magneti Marelli, pela doação de baterias, e também à Pneusul (localizada em Itajubá, Minas Gerais) pela doação de baterias da marca Motorlight. Estas baterias foram usadas no sistema de fechamento emergencial automático da comporta. Agradeço ao Sr. Luiz Carlos Bastos de Barros Reis, o proprietário da Fazenda Boa Esperança, pela sua recepção amigável da nossa equipe técnica. Agradeço, finalmente, a todos que cotribuíram para a realização desta tese.

# Resumo

A geração isolada em microcentrais hidrelétricas através de motor de indução funcionando como gerador tem sido objeto de intensa pesquisa devido ao fato deste tipo de máquina ser fácil de operar, ter manutenção simplificada, e também ter menor custo quando comparado à máquina síncrona, principalmente na faixa de 0,5 kW a 50 kW. Nesta tese uma única malha de controle de tensão de um gerador de indução, em gaiola de esquilo, foi implementada. O sistema opera isoladamente e tem potência de 30 kW. O sistema utiliza carga lastro controlada por uma placa eletrônica. A tensão gerada e a frequência são mantidos em seus valores nominais para aplicações típicas em áreas rurais. Para este propósito, um sistema de controle foi implementado, via tiristores em anti-paralelo. Testes foram feitos variando-se cargas para se obter as formas de onda de tensão na carga principal e na carga lastro. O desempenho da placa eletrônica de controle também foi testado para conexão e desconexão abruptas de carga. O sistema proposto mostrou-se eficiente e robusto no controle da tensão e da frequência do sistema isolado.

# Abstract

Isolated generation in micro hydroelectric power plant through the induction motor as generator has been the subject of extensive research due to the fact that this type of electrical machine is easy to operate, requires simplified maintenance, and has also a lower cost when compared to the synchronous machine, mainly in the range from 0,5kW to 50kW. In this thesis a single voltage control loop of an squirrel cage induction generator, in an isolated operation system, was implemented. The system operates in isolation and has 30kW of power. The system uses a ballast load controlled via a digital circuit board. The generated voltage and frequency are maintained in their nominal rated values for typical applications in rural areas. For this purpose, a control system has been implemented via anti-parallel thyristors. Tests were made with varying loads to obtain the voltage waveforms in the main load and ballast load. The electronic board of control was tested for performance under sudden connection and disconnection of loads. The proposed system proved to be robust and effective in controlling the voltage and the frequency of the isolated system.

# Sumário

<b>Dedicatória</b>	<b>1</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>8</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>11</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>12</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>14</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>15</b>
<b>2 A microcentral</b>	<b>17</b>
<b>3 O conversor CA-CA</b>	<b>21</b>
3.1 Controlador de potência de uma carga resistiva . . . . .	21
3.2 Cálculo da tensão e corrente nos tiristores para uma carga resistiva . . . . .	23
<b>4 O Sistema Proposto</b>	<b>25</b>
4.1 Princípio de funcionamento do sistema . . . . .	25
4.2 Sistema regulador de tensão do gerador . . . . .	26
4.3 Uma visão detalhada do sistema . . . . .	28
4.3.1 Componentes de potência do sistema . . . . .	28

4.3.2	Componentes do sistema de controle . . . . .	32
4.4	Medição elétrica . . . . .	35
<b>5</b>	<b>O Sistema de Proteção</b>	<b>37</b>
5.1	Relés de subtensão e sobretensão . . . . .	38
5.2	A Comporta . . . . .	40
5.3	Circuito de comando da comporta . . . . .	43
5.4	Carregador de baterias . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>Operação da Microcentral</b>	<b>58</b>
7.1	Manual de operação para a partida da microcentral . . . . .	61
7.2	Manual de operação para a parada da microcentral . . . . .	68
<b>8</b>	<b>Controle de carga por lógica binária</b>	<b>69</b>
8.1	Metodologia . . . . .	70
8.2	Análise e Resultados . . . . .	76
8.2.1	Ensaio sem controle de frequência . . . . .	77
8.2.2	Ensaio com controle de frequência . . . . .	78
8.3	Programação do microcontrolador . . . . .	80
<b>9</b>	<b>Conclusão</b>	<b>87</b>
	<b>Índice</b>	<b>93</b>

# Lista de Figuras

1.1	Princípio de funcionamento do sistema proposto . . . . .	16
2.1	Casa de máquinas . . . . .	18
2.2	Válvula de admissão de água para a turbina . . . . .	19
2.3	Grupo gerador . . . . .	19
2.4	Ventilador do gerador . . . . .	19
3.1	Conversor AC-AC alimentando uma carga resistiva . . . . .	22
3.2	Forma de onda da tensão sobre a carga resistiva . . . . .	23
3.3	Forma de onda da corrente da carga resistiva . . . . .	23
3.4	Forma de onda da tensão nos tiristores para carga resistiva . . . . .	24
3.5	Forma de onda da corrente nos tiristores para carga resistiva . . . . .	24
4.1	Diagrama unifilar do sistema proposto . . . . .	26
4.2	Diagrama de blocos com a malha fechada do sistema proposto . . . . .	28
4.3	Diagrama detalhado do sistema proposto . . . . .	29
4.4	Quadro de força e quadro de controle e proteção . . . . .	30
4.5	Banco de capacitores . . . . .	30
4.6	Piscina aquecida pelas resistências da carga lastro . . . . .	31
4.7	Conversor AC-AC com circuito <i>snubber</i> de proteção e ventilador . . . . .	31
4.8	Placa eletrônica SEMIKRON MP410T . . . . .	33
4.9	Quadro de controle e proteção . . . . .	33
4.10	Medição elétrica . . . . .	36

5.1	Circuito de <i>back-up</i> em corrente contínua . . . . .	38
5.2	Relé de subtensão . . . . .	39
5.3	Relé de sobretensão . . . . .	40
5.4	Esquema de ligações do relé de subtensão . . . . .	40
5.5	Esquema de ligações do relé de sobretensão . . . . .	41
5.6	Motor de corrente contínua para acionamento da comporta . . . . .	42
5.7	Redutor de velocidade acoplado ao motor CC . . . . .	42
5.8	Comporta instalada . . . . .	42
5.9	Circuito de comando da comporta . . . . .	44
5.10	Forma de onda do carregador de baterias . . . . .	46
5.11	Transformador e amperímetro do carregador de baterias . . . . .	46
5.12	Diodo do carregador de baterias . . . . .	47
5.13	Resistor tubular do carregador de baterias . . . . .	47
6.1	<i>Clamp</i> de corrente utilizado em conjunto com osciloscópio para oscilografia das formas de onda . . . . .	49
6.2	Tensão gerada para três situações de carga na fazenda . . . . .	51
6.3	Balanco de potência para três situações de carga na fazenda . . . . .	51
6.4	Velocidade e frequência para três situações de carga na fazenda . . . . .	52
6.5	Formas de onda no gerador de indução com baixa carga na fazenda . . . . .	52
6.6	Formas de onda no gerador de indução com alta carga na fazenda . . . . .	53
6.7	Formas de onda na carga principal com baixa carga na fazenda . . . . .	53
6.8	Formas de onda na carga principal com alta carga na fazenda . . . . .	54
6.9	Formas de onda na carga lastro com baixa carga na fazenda . . . . .	54
6.10	Formas de onda na carga lastro com alta carga na fazenda . . . . .	55
6.11	Formas de onda no banco de capacitores com baixa carga na fazenda . . . . .	55
6.12	Formas de onda no banco de capacitores com alta carga na fazenda . . . . .	56
6.13	Oscilografia mostrando a estabilidade da tensão gerada . . . . .	56
6.14	Carcaça do motor de indução que funciona como gerador . . . . .	57
6.15	Rotor em gaiola de esquilo do motor de indução que funciona como gerador . . . . .	57

7.1	Diagrama esquemático para operação . . . . .	59
7.2	Operação do circuito de comando da comporta . . . . .	60
7.3	Chaves do quadro de controle e proteção . . . . .	61
7.4	Voltímetro do barramento CC de 24 V . . . . .	62
7.5	Chave CH10 de acionamento do motor CC da comporta . . . . .	62
7.6	Chave CH12 que liga o gerador ao barramento de 200 V . . . . .	63
7.7	Chave CH13 que liga o barramento da carga lastro . . . . .	63
7.8	Chaves CH14 individuais de carga lastro . . . . .	64
7.9	Chaves CH15 dos bancos de capacitores . . . . .	64
7.10	Chave CH16 que liga o transdutor de tensão . . . . .	65
7.11	Chave CH17 da carga principal . . . . .	65
7.12	Chave CH18 que liga o primário do trafo isolador dos relés de sub e sobretensão	66
7.13	Chave CH6 que energiza a placa SEMIKRON MP410T, e chave CH7 que liga/desliga pulsos de gatilhamento dos tiristores . . . . .	67
7.14	Vista traseira do medidor digital KRON utilizado . . . . .	67
7.15	Chave CH1 (permissível) . . . . .	68
7.16	Voltímetro da carga lastro . . . . .	68
8.1	Diagrama de blocos para malha aberta . . . . .	70
8.2	Diagrama de blocos para malha fechada . . . . .	70
8.3	Grupo-gerador para experiência lógica binária . . . . .	71
8.4	Circuito eletrônico para controle de frequência . . . . .	73
8.5	Diagrama unifilar para a logica binaria . . . . .	75
8.6	Pinagem do microcontrolador ATMEGA8 . . . . .	78
8.7	Placa eletrônica para controle de frequência . . . . .	79
8.8	Relé de estado sólido . . . . .	79
8.9	Placa mantendo a frequência dentro da faixa ajustada (LED verde aceso) . . . . .	80
8.10	Forma da tensão na carga para o sistema com controle discreto de frequência . . . . .	81

# Lista de Tabelas

2.1	Dados de placa do grupo-gerador . . . . .	20
4.1	Descrição dos terminais da placa eletrônica . . . . .	34
4.2	Parametrização da placa eletrônica . . . . .	35
5.1	Dados de placa do relé de subtensão . . . . .	41
5.2	Dados de placa do relé de sobretensão . . . . .	41
5.3	Dados do motor de acionamento da comporta . . . . .	41
6.1	Operação da microcentral com baixa carga na fazenda . . . . .	50
6.2	Operação da microcentral com carga intermediária na fazenda . . . . .	50
6.3	Operação da microcentral com alta carga na fazenda . . . . .	51
8.1	Dados de placa do motor de indução para experiência com lógica binária . . . . .	72
8.2	Dados de placa da máquina primária para experiência com lógica binária . . . . .	72
8.3	Possíveis combinações para a carga lastro . . . . .	72
8.4	Medidas de tensão e frequência sem controle . . . . .	78
8.5	Medidas de tensão e frequência com controle . . . . .	80

# Lista de Símbolos

$i_{T1}$	Corrente instantânea do tiristor T1
$i_{T2}$	Corrente instantânea do tiristor T2
$p$	Potência dissipada na carga lastro
$Q$	Potência reativa
$R$	Resistência ôhmica da carga lastro
$u$	Tensão aplicada sobre a carga lastro no diagrama do sistema em malha fechada
$v$	Tensão do gerador de indução no diagrama do sistema em malha fechada
$v_r$	Tensão de realimentação representando a tensão do gerador de indução
$v_{cb}$	Tensão do carregador de baterias
$v_R$	Tensão instantânea aplicada sobre a carga resistiva
$v_{T1}$	Tensão instantânea no tiristor T1
$v_{T2}$	Tensão instantânea no tiristor T2
$v_t$	Tensão de realimentação representando a tensão do gerador de indução
$X$	Reatância indutiva
$i_{Ref}$	Corrente eficaz da carga resistiva
$i_{Rmed}$	Corrente média da carga resistiva

- $i_{Tmed}$  Corrente média em cada um dos tiristores
- $V_0$  Valor eficaz da fonte de tensão  $v_0(t)$
- $V_{0med}$  Valor médio da fonte de tensão  $v_0(t)$
- $V_{Ref}$  Tensão eficaz aplicada sobre a carga resistiva

# Lista de Abreviaturas e Siglas

BFT	Bomba Funcionando como Turbina
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CH	Chave
GI	Gerador de indução
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MIT	Motor de indução trifásico
NA	Contato Normalmente Aberto
NF	Contato Normalmente fechado
PI	Proporcional-Integral
Vcc	Tensão Contínua
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

# Capítulo 1

## Introdução

A geração isolada em uma microcentral hidrelétrica utilizando o motor de indução como gerador tem sido objeto de pesquisa [1, 2, 3].

O motor de indução é utilizado para este propósito devido ao fato deste tipo de máquina elétrica, ser fácil de operar, ter manutenção simplificada, e ter um custo menor quando comparada ao gerador síncrono na faixa de 0,5 kW a 50 kW [4].

Entretanto, o gerador de indução [5] não pode, por si mesmo, fornecer potência magnetizante. Para estabelecer seu campo magnético, ele absorve potência reativa de geradores síncronos (no caso de operação paralela), ou de capacitores (no caso de operação isolada).

No caso de uma central de operação isolada, conecta-se um banco de capacitores a fim de iniciar o processo de auto-excitação, para que o gerador de indução estabeleça sua tensão nominal a vazio e à frequência nominal. Contudo, quando as cargas são ligadas, o gerador de indução exigirá um nível mais alto de magnetização para converter potência mecânica em potência elétrica. Para compensar a inevitável queda de tensão, provocada pela entrada das cargas, um segundo banco de capacitores precisa ser conectado. Mas, quando as cargas são alteradas, para que a potência fornecida pelo gerador de indução supra a demanda, alguma forma de controle de velocidade é necessária.

O controle de velocidade é tradicionalmente realizado por meio do regulador mecânico de velocidade, similar àqueles usados em grandes centrais hidrelétricas, os quais são usados para regular o fluxo de água para a turbina à medida que a carga é alterada.

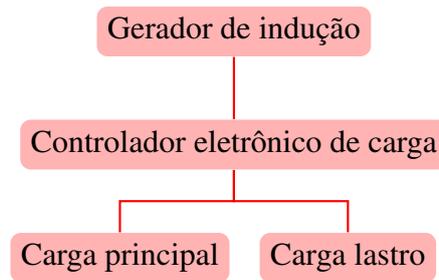


Figura 1.1: Princípio de funcionamento do sistema proposto

Contudo, para uma aplicação isolada de baixo custo, um regulador mecânico de velocidade é complexo e caro [6]. No caso de microcentrais hidrelétricas, uma opção atrativa é o controlador eletrônico de carga.

Mantendo-se uma carga aproximadamente constante para o grupo turbina-gerador, é possível a geração de uma tensão com frequência e amplitude estáveis. O princípio de funcionamento é mostrado na Figura 1.1.

O controlador eletrônico de carga compensa automaticamente a variação de carga principal, através da variação da potência dissipada em uma carga auxiliar, também chamada de carga lastro [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

O objetivo é manter constante a carga total atendida pelo gerador. Esta carga é composta pela somatória da carga principal, a qual é a própria carga local, com a carga lastro.

O controle da carga lastro pode ser implementado através de um inversor de frequência do tipo *Voltage Source Inverter*(VSI), o qual utiliza o *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) [1].

Porém, nesta tese, o controle de carga lastro é realizado com tiristores devido à robustez do tiristor comparada à do IGBT. O controle é realizado em corrente alternada, através de um conversor AC-AC. Controla-se o excesso de corrente desviado para a carga lastro, a fim de manter constante a corrente nos terminais do gerador de indução.

## Capítulo 2

### A microcentral

Em uma pesquisa, experimentou-se em laboratório um compensador estático de potência reativa do tipo *static var compensation* (SVC), em malha fechada, utilizando um método de otimização de reguladores [14] controlando-se apenas a tensão do gerador de indução [15]. Contudo, o principal objetivo desta tese é tornar possível a aplicação do gerador de indução em comunidades rurais, usando uma estrutura que mantenha estável a tensão e estreite a faixa de variação de frequência.

O controle realizado em malha fechada para um sistema com transistor mostrou-se mais robusto que o controle com duas malhas fechadas [16]. A contribuição desta tese, entretanto, é a de usar apenas uma malha, porém, robusta e com tiristor. A malha de controle de frequência não é necessária, uma vez que esta é mantida em uma faixa aceitável para aplicações em áreas rurais.

O sistema proposto nesta tese foi aplicado na microcentral hidrelétrica apresentada na Figura 2.1.

Nesta microcentral, não se usa um regulador mecânico de velocidade e sim um regulador eletrônico de carga. Isto significa que a válvula de admissão de água mostrada na Figura 2.2, de operação manual, localizada na tubulação forçada opera em uma posição fixa, sem necessidade de mão-de-obra para sua operação. Esta na partida da microcentral, sim, há necessidade de operação manual. Porém, uma vez atingindo o regime permanente, não há mais necessidade de intervenção para sua operação.



Figura 2.1: Casa de máquinas da microcentral

Nesta microcentral, a turbina acoplada ao gerador de indução é do tipo bomba funcionando como turbina(BFT) [18, 17]. Este grupo-gerador é apresentado na Figura 2.3. OS dados de placa do conjunto turbina-gerador são mostrados na Tabela 2.1. O gerador tem ventilação forçada através de um motor acoplado ao motor de indução, conforme mostra a Figura 2.4.

Esta microcentral, como um modelo que pode ser implementado por outras comunidades rurais, está localizada na Fazenda Boa Esperança [19]. Esta fazenda, 211 hectares [20], está situada na Serra da Mantiqueira, no município de Delfim Moreira, no sul do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Com uma demanda média de 13 kW, funcionando 24 horas por dia, durante 30 dias, ao custo do kWh estabelecido pela concessionária local em R\$ 0.25272 para a tarifa rural [21], a Fazenda Boa Esperança pode economizar mensalmente R\$2.365,00 com a instalação da microcentral.

O sistema inicialmente testado era com controle analógico. Entretanto, a fonte de tensão, o circuito de disparo dos tiristores e reguladores estavam em módulos separados, ocupando muito espaço no quadro de controle, tornando mais perigosa a operação da microcentral [22].



Figura 2.2: Válvula de admissão de água para a turbina



Figura 2.3: Grupo gerador

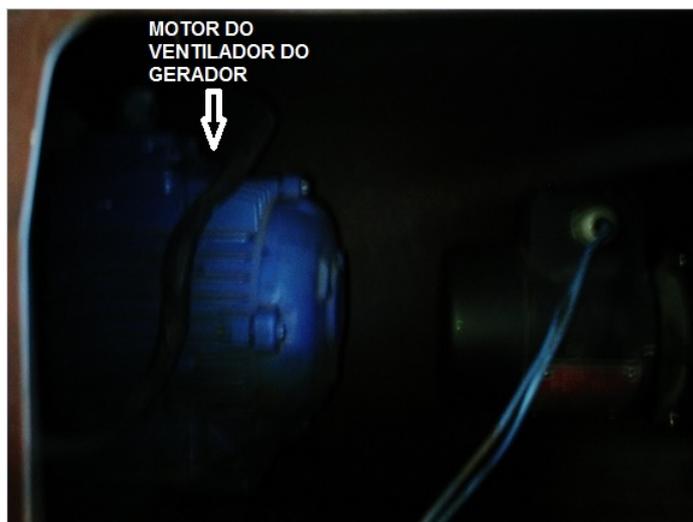


Figura 2.4: Ventilador do gerador

Tabela 2.1: Dados de placa do grupo-gerador

Bomba (funciona como turbina)	
Fabricante	KSB
Denominação	Meganorm 200-250
Vazão	745 $\frac{m^3}{h}$
Altura de elevação	15 mca
Velocidade	1750 RPM
Motor de indução (funciona como gerador)	
Fabricante	WEG
Tipo	Rotor em gaiola de esquilo
Potência	60 CV (45 kW)
Tensão	220 V/380 V/440 V
Corrente	146 A/84,5 A/73 A
Frequência	60 Hz
Velocidade	1780 RPM
Fator de Potência	87%
Rendimento	93,1%
Índice de proteção	IP55
Motor de ventilação forçada do gerador	
Fabricante	WEG
Tipo	MIT em gaiola
Potência	1 CV
Tensão	220 V/380 V
Corrente	3,02 A/1,75 A
Velocidade	1720 RPM
Fator de Potência	82%
Índice de proteção	IP55

# Capítulo 3

## O conversor CA-CA

Os conversores CA-CA em uma conexão em antiparalelo caracterizam-se por colocarem a carga em contato direto com a fonte, sem tratamento intermediário de energia [23].

Dois casos se distinguem notadamente em seu funcionamento de acordo com a aplicação: como interruptor propriamente dito, ou como controlador da potência da carga. Em ambos os casos o circuito funciona com um dos tiristores em condução, permanecendo o outro cortado e com polarização inversa, devido à queda de tensão direta do que se encontra em condução, ou com os dois cortados.

O tiristor que conduz o fará até que a corrente que passa por ele caia abaixo da corrente de manutenção (praticamente nula), momento em que o outro tiristor estará em condição de conduzir desde que a tensão no anodo seja positiva e suficiente para fazer circular uma corrente que seja superior à corrente de manutenção, após a aplicação do respectivo pulso de gatilhamento.

A tensão de saída possui a mesma frequência da rede CA, porém, o valor eficaz é controlado de acordo com o ângulo de disparo.

### 3.1 Controlador de potência de uma carga resistiva

A estrutura do conversor CA-CA alimentando uma carga resistiva é mostrada na Figura 3.1. A forma de onda da tensão sobre a carga é mostrada na Figura 3.2 e a forma de onda da corrente da carga é mostrada na Figura 3.3.

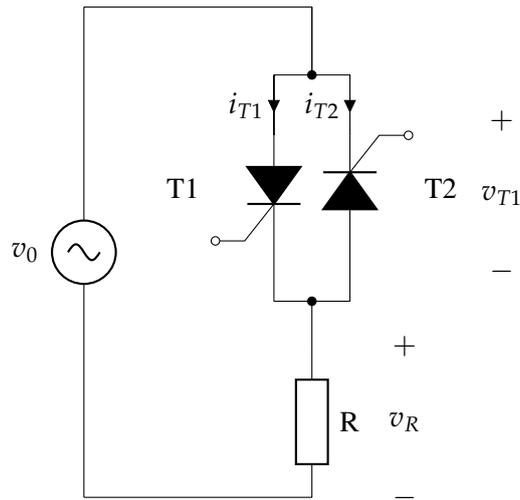


Figura 3.1: Conversor AC-AC alimentando uma carga resistiva

A tensão na carga será definida em função do intervalo de condução de cada tiristor. O tiristor T1 conduz desde  $\omega t = \alpha$ , instante do respectivo pulso de gatilhamento, até o instante em que a corrente se torna nula, o que corresponde ao instante em que  $\omega t = 180^\circ$ . O tiristor T2 irá conduzir desde o instante do novo disparo, isto é,  $\omega t = 180^\circ + \alpha$ , até  $\omega t = 360^\circ$ , quando a corrente torna-se nula novamente. Deste modo  $v_R(t) = v_0(t)$  para  $\alpha < 180^\circ$  e  $\alpha + 180^\circ < 360^\circ$ . O valor médio da tensão na carga é  $V_{0med} = 0$ . Como a forma de onda de tensão na carga é simétrica, pode-se afirmar que  $i_{Rmed} = 0$ .

$$V_{Ref} = V_0 \sqrt{\left[ \frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]} \quad (3.1.1)$$

Para um determinado ângulo  $\alpha$  pode-se calcular a tensão na carga em função do valor eficaz da tensão da rede CA, conforme a equação (3.1.1).

$$I_{Ref} = \frac{V_0}{R} \sqrt{\left[ \frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]} \quad (3.1.2)$$

A corrente eficaz na carga será determinada pela equação (3.1.2).

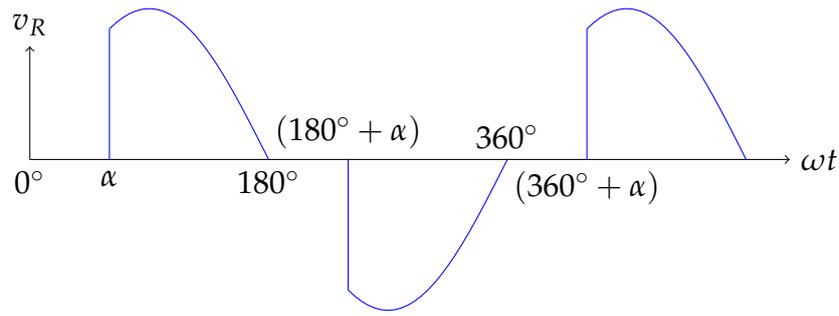


Figura 3.2: Forma de onda da tensão sobre a carga resistiva

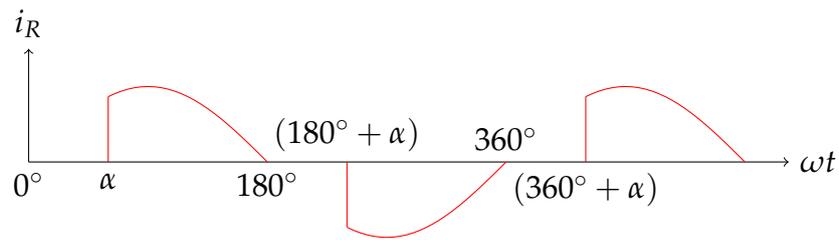


Figura 3.3: Forma de onda da corrente da carga resistiva

## 3.2 Cálculo da tensão e corrente nos tiristores para uma carga resistiva

A tensão no tiristor T1 será nula no intervalo de condução do tiristor T1, isto é no intervalo de  $\omega t = \alpha$  até o instante  $\omega t = \alpha + 180^\circ$ . Será nula também no intervalo de condução do tiristor T2, desde  $\omega t = 180^\circ + \alpha$  até  $\omega t = 360^\circ$ . Isto é

$$v_{T1}(t) = 0, \quad \alpha < \omega t < 180^\circ \quad (3.2.1)$$

$$v_{T2}(t) = 0, \quad 180^\circ + \alpha < \omega t < 360^\circ \quad (3.2.2)$$

A tensão no tiristor T1 será igual à tensão da fonte no intervalo  $0^\circ < \omega t < \alpha$ . Será nula também no intervalo de bloqueio do tiristor T2, isto é

$$v_{T1}(t) = v(t), \quad 0^\circ < \omega t < \alpha \quad (3.2.3)$$

$$v_{T2}(t) = v(t), \quad 180^\circ < \omega t < 180^\circ + \alpha \quad (3.2.4)$$

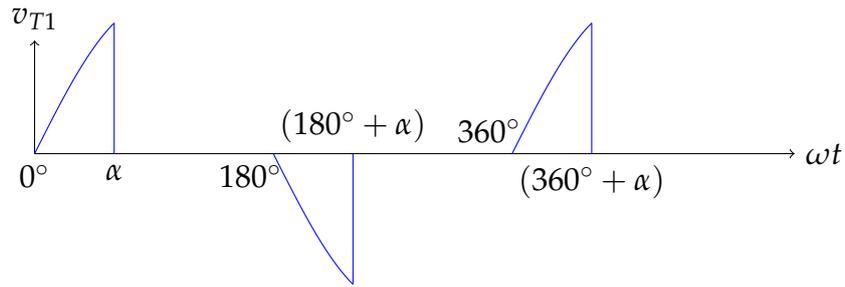


Figura 3.4: Forma de onda da tensão nos tiristores para carga resistiva

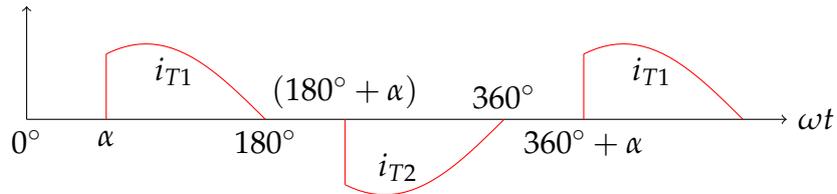


Figura 3.5: Forma de onda da corrente nos tiristores para carga resistiva

A tensão no tiristor T2 será simétrica em relação ao tiristor T1. A forma de onda da tensão no tiristor T1 é mostrada na Figura 3.4.

A corrente nos tiristores é expressa por

$$i_{T1}(t) = i_R, \quad \alpha < \omega t < 180^\circ \quad (3.2.5)$$

$$i_{T2}(t) = i_R, \quad 180^\circ + \alpha < \omega t < 360^\circ \quad (3.2.6)$$

A forma de onda de corrente nos tiristores é mostrada na Figura 3.5. A partir da Figura 3.5 a corrente média em um tiristor é calculada pela equação (3.2.1).

$$i_{Tmed} = \frac{\sqrt{2}V_0}{2\pi R} \int_{\alpha}^{\pi} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (3.2.7)$$

Portanto, a corrente média em um tiristor é expressa pela equação (3.2.2).

$$i_{Tmed} = \frac{\sqrt{2}V_0}{2\pi R} (1 + \cos \alpha) \quad (3.2.8)$$

# Capítulo 4

## O Sistema Proposto

O sistema proposto será mostrado através de seu princípio de funcionamento, de seu sistema de controle, e de uma visão detalhada mostrando seus componentes.

### 4.1 Princípio de funcionamento do sistema

O diagrama unifilar do sistema proposto é mostrado na Figura 4.1. O gerador de indução (GI) alimenta um barramento ao qual são conectados os bancos de capacitores, o conversor CA-CA, e o autotransformador. Os bancos de capacitores fornecerão a potência reativa para o gerador de indução. O conversor CA-CA formado por tiristores em conexão antiparalela alimenta o barramento em que a carga lastro está conectada. O autotransformador alimenta a carga principal, a qual é a própria carga da fazenda. O ângulo de disparo e os respectivos pulsos de gatilhamento para o conversor CA-CA são fornecidos por um placa digital reguladora. Esta placa recebe o sinal de realimentação de tensão através de um sistema transdutor de tensão.

Relés de subtensão e sobretensão supervisionam a tensão do gerador. Um transformador trifásico isolador conecta estes relés ao barramento do gerador. Estes relés são alimentados em 24 V por um barramento de corrente contínua. Caso ocorra uma situação de subtensão ou de sobretensão o sistema de *back-up* em corrente contínua permitirá o fechamento imediato da comporta hidráulica instalada na entrada da tubulação forçada. Esta comporta hidráulica é acionada por um motor de corrente contínua que também é alimentado pelo barramento de

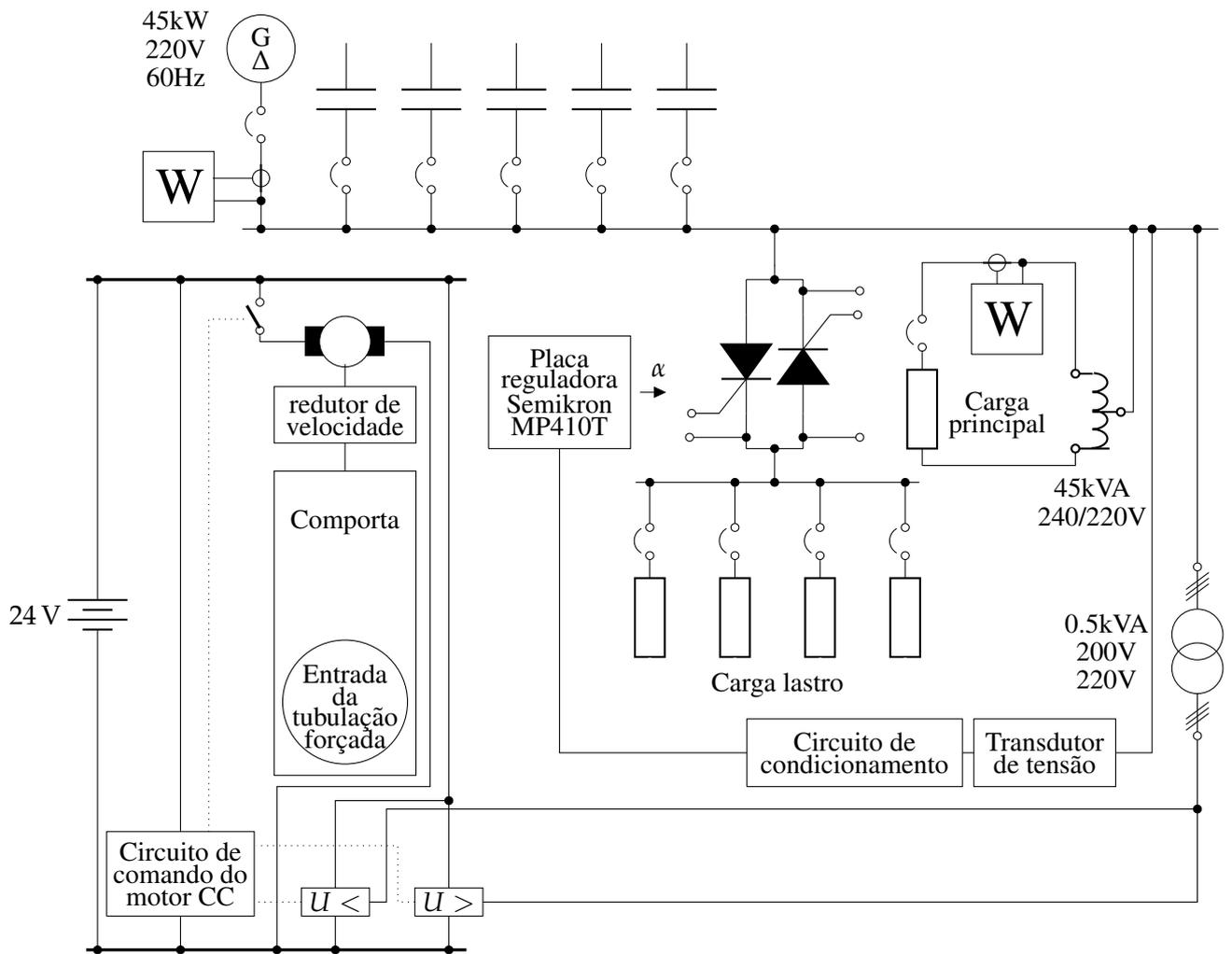


Figura 4.1: Diagrama unifilar do sistema proposto

24 V. Caso ocorra uma situação subtensão ou sobretensão os relés de subtensão e sobretensão comutam internamente um contato. O sinal de comutação deste contato é enviado para um circuito de comando, o qual também é alimentado pelo barramento de 24 V. O circuito de comando, por sua vez, aciona um contator que faz com que a tensão do barramento de 24 V chegue aos terminais do motor de corrente contínua e a comporta hidráulica se feche imediatamente.

## 4.2 Sistema regulador de tensão do gerador

O controle da tensão do gerador de indução é realizado através de uma malha fechada mostrada na Figura 4.2. Uma tensão de referência é estabelecida. Esta tensão de referência é

comparada com a tensão de realimentação obtida através do sistema transdutor de tensão. Esta comparação faz gerar um sinal de erro para o regulador PI interno à placa digital de controle. É possível linearizar a saída do dispositivo. O linearizador (interno à placa) faz a placa digital aplicar o ângulo de disparo  $\alpha$ . Este ângulo  $\alpha$  faz o conversor CA-CA aplicar a tensão  $u$  sobre a carga lastro. Com as variações da carga principal o valor da tensão  $u$  é alterado. Isto fará com que a potência dissipada na carga lastro  $p$  se altere. Por exemplo: se a carga principal aumentar, o transdutor de tensão percebe a queda da tensão do gerador de indução. Isto fará com que o sistema de controle aumente o ângulo de disparo  $\alpha$ , e conseqüentemente, a tensão  $u$  fornecida pelo conversor CA-CA diminua. Esta queda da tensão  $u$  faz a potência dissipada na carga lastro diminuir, pois conforme a equação (4.2.1)

$$p = \frac{u^2}{R} \quad (4.2.1)$$

Onde  $p$  é a potência dissipada em uma carga resistiva  $R$ , que é proporcional ao valor ao quadrado da tensão  $u$  aplicada sobre a mesma. A queda da tensão  $u$  faz cair o valor da potência dissipada na carga lastro, porém, o gerador "enxergará" uma carga aproximadamente constante.

Se, por sua vez, a carga principal diminuir, o transdutor de tensão percebe a elevação da tensão do gerador de indução. Isto fará com que o sistema de controle diminua o ângulo de disparo  $\alpha$ , e conseqüentemente a tensão  $u$  fornecida pelo conversor CA-CA aumenta. Esta queda da tensão  $u$  faz a potência dissipada na carga lastro aumentar, pois de acordo com a equação (4.2.1), a elevação da tensão  $u$  faz aumentar o valor da potência dissipada na carga lastro, porém, o gerador "enxergará" uma carga aproximadamente constante.

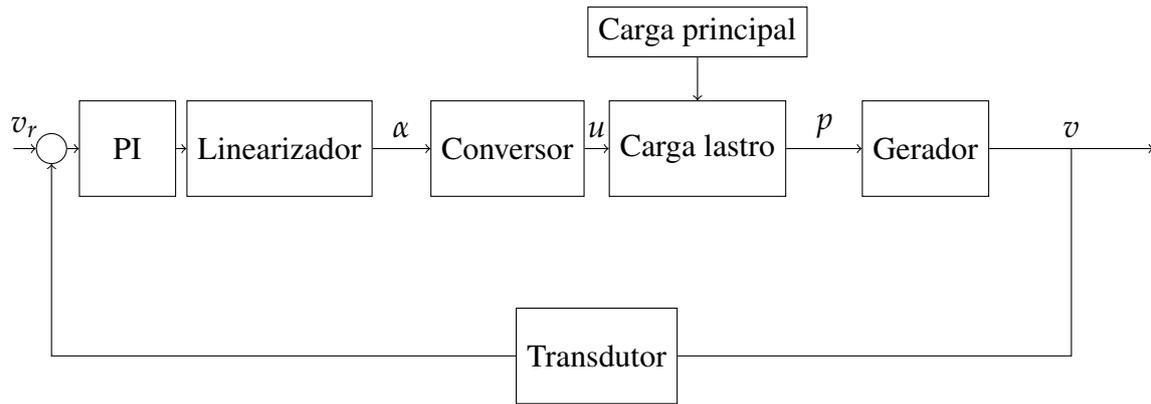


Figura 4.2: Diagrama de blocos com a malha fechada do sistema proposto

## 4.3 Uma visão detalhada do sistema

### 4.3.1 Componentes de potência do sistema

A Figura 4.3 mostra o diagrama esquemático do sistema proposto. Neste diagrama são mostrados o banco de capacitores, a carga lastro, a ponte de tiristores para controlar a carga lastro, e, finalmente, o autotransformador. Todos estes dispositivos estão em paralelo com os terminais de saída do gerador de indução.

A Figura 4.4 mostra dois quadros elétricos no interior da casa de máquinas da microcentral. O quadro à direita é o de força, nele estão instalados os bancos de capacitores, a ponte de tiristores, e o autotransformador. O quadro à esquerda é o de controle e proteção.

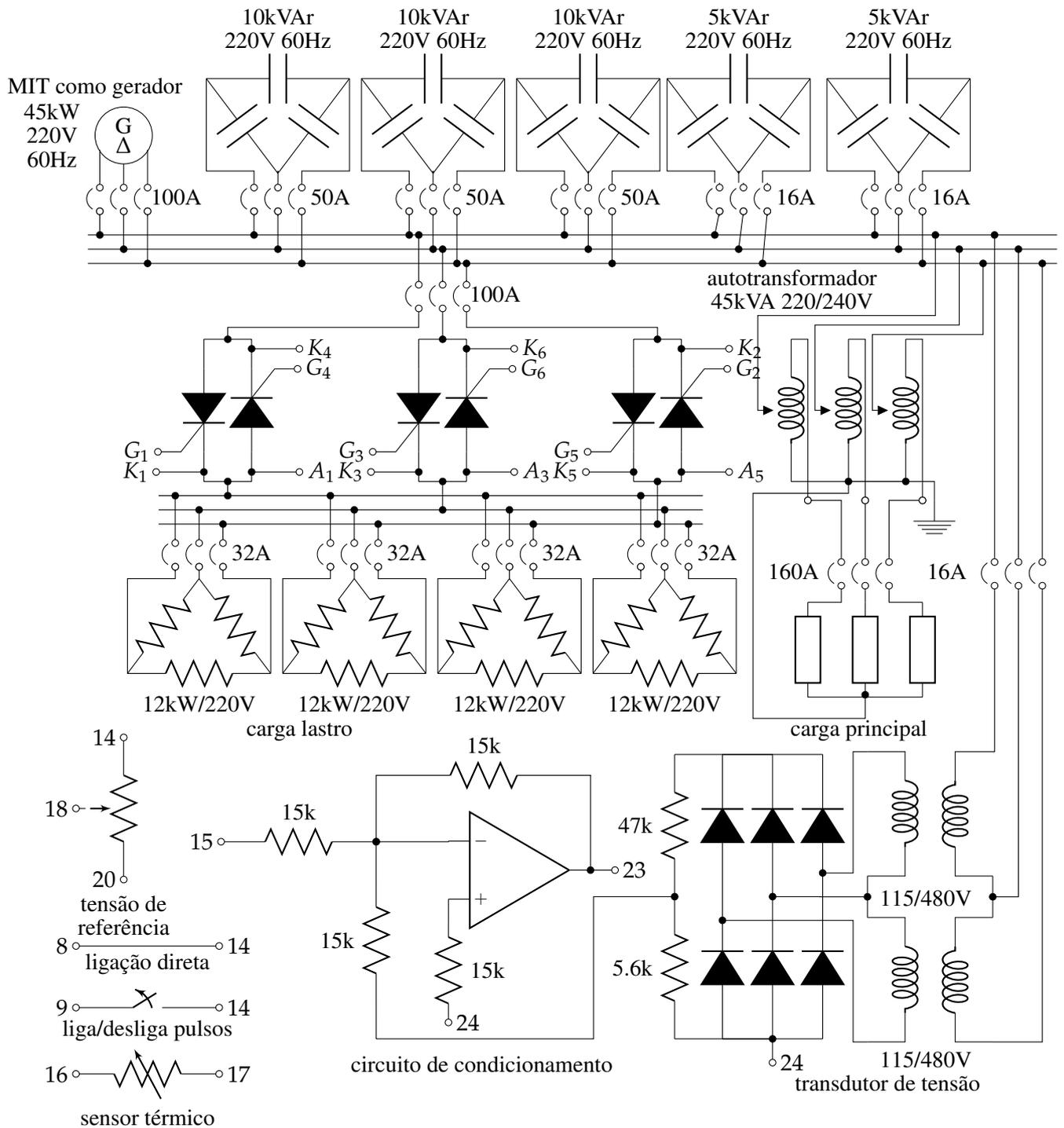
#### O banco de capacitores

O banco de capacitores em 220 V é formado pelo conjunto de três bancos de 10 kvar e dois bancos de 5 kvar, totalizando 40 kvar. Eles são mostrados na Figura 4.5. Como os bancos de capacitores são conectados em delta e alimentados em 200 V (uma vez que os mesmos estão conectados aos terminais do gerador de indução) este valor de acordo com a equação (4.3.1)

$$Q = \frac{U^2}{X} \quad (4.3.1)$$

deve ser multiplicado por  $(200/220)^2$ .

Resultando em um valor total de potência reativa para os bancos de capacitores de 33 kvar.



OBS: Os terminais A<sub>1</sub>, A<sub>3</sub>, A<sub>5</sub>, K<sub>1</sub>, G<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, G<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, G<sub>3</sub>, K<sub>4</sub>, G<sub>4</sub>, K<sub>5</sub>, G<sub>5</sub>, K<sub>6</sub>, G<sub>6</sub> e os pinos 8,9, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 23, 24(terra) são da placa Semikron MP410T

Figura 4.3: Diagrama esquemático do sistema proposto



Figura 4.4: Quadro de força (direita) e quadro de controle e proteção (esquerda)



Figura 4.5: Banco de capacitores

Os bancos de capacitores são mostrados na Figura 4.5.

### **O autotransformador**

O primário do autotransformador de 45 kW com relação de transformação 220/240V, disponibiliza um neutro para alimentar as cargas da fazenda, uma vez que estas podem ser alimentadas em 127 V ou 220 V.

### **A carga lastro**

A carga lastro é formada com resistores de imersão totalizando o valor máximo de potência de imersão de 48 kW. Estes resistores de imersão aquecem a água de uma piscina indexpiscina térmica, mostrada na Figura 4.6.

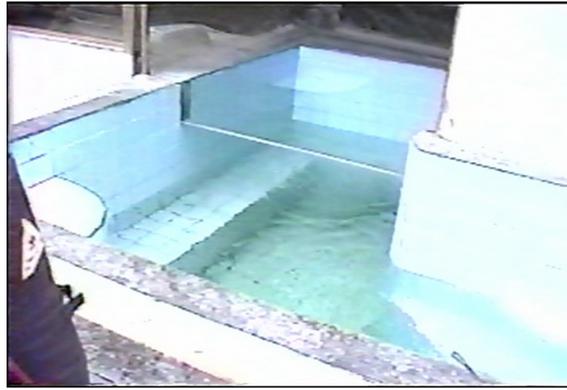


Figura 4.6: Piscina aquecida pelas resistências da carga lastro

A potência dissipada nas resistências da carga lastro é proporcional ao quadrado do valor da tensão aplicada sobre ela. Por este motivo, controlando-se a tensão aplicada sobre a carga lastro, consegue-se o controle de potência dissipada na mesma.

### O conversor CA-CA

O conversor AC-AC trifásico utilizado para controlar a carga lastro é constituído em cada fase por dois tiristores em anti-paralelo. Os tiristores, são fabricados pela AEGIS. Seus valores nominais de tensão e corrente são 1200 V e 160 A. O circuito snubber de proteção dos tiristores é composto por componentes RC (R em série com C) por fase em paralelo com os terminais anodo-catodo dos tiristores. Os valores utilizados são os seguintes: para R 100  $\Omega$  e 25 W; e para C 0,47  $\mu$ F e 630 V. A Figura 4.7 mostra o conversor AC-AC utilizado.

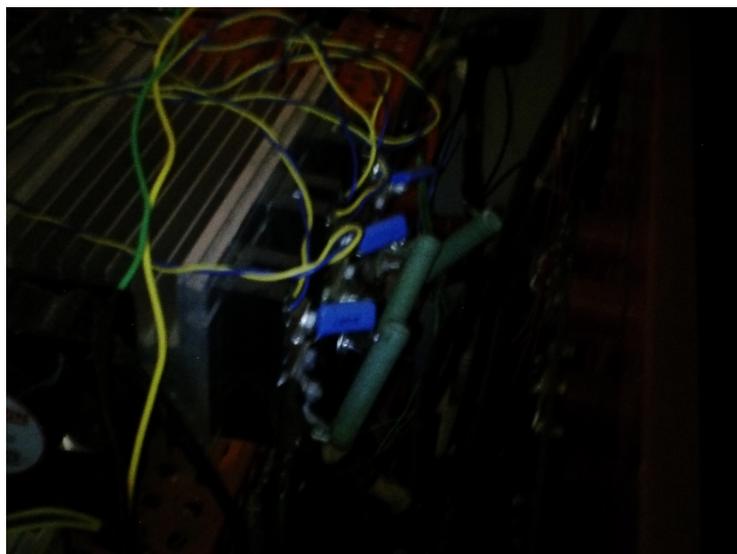


Figura 4.7: Conversor AC-AC com circuito *snubber* de proteção e ventilador

Quando os tiristores têm ângulo de disparo  $180^\circ$ , o valor eficaz da tensão aplicada sobre a carga lastro é nulo. Esta tensão é gradualmente aumentada pelo decréscimo do ângulo de disparo. O valor eficaz da tensão aplicada sobre a carga lastro é máximo quando o ângulo de disparo for  $0^\circ$ . Desta forma, o gerador de indução "enxerga" uma carga aproximadamente constante, com controle da tensão. A frequência desta tensão varia em um intervalo aceitável para cargas típicas em propriedades rurais.

### **4.3.2 Componentes do sistema de controle**

Os componentes do sistema de controle são mostrados na Figura 4.3. Eles são, basicamente, o circuito de referência de tensão, o circuito do transdutor de tensão, o circuito de condicionamento da tensão e a placa eletrônica de controle para disparo dos tiristores.

Os terminais numerados a placa eletrônica de controle da Figura 4.3 são descritos na Tabela 4.1.

O ganho do regulador digital embutido na placa, descrito na linha 25 da Tabela 4.2, foi ajustado experimentalmente em 0.05. A constante de tempo, descrita na linha 26 da Tabela 4.2, também experimentalmente, foi ajustada em 40 ms.

#### **A placa digital reguladora**

Devido à necessidade por compactação e simplificação da operação, optou-se pelo controle digital com reguladores digitais contidos em apenas uma placa eletrônica. Esta placa, fabricada pela SEMIKRON, modelo MP410T, permite que o arranjo dos equipamentos se torne bem mais compacto. Ela é mostrada na Figura 4.8. Em conjunto com outros dispositivos ela é mostrada no quadro de controle e proteção da Figura 4.9. A parametrização desta placa é apresentada na Tabela 4.2.

A placa SEMIKRON MP410T controla o ângulo de disparo dos tiristores, desde  $0^\circ$  (quando a carga lastro é máxima) até  $180^\circ$  (quando a carga lastro é nula).

Uma fonte de 5 V alimenta o circuito de referência de tensão através do terminal 14 da placa eletrônica. O valor da tensão de referência é ajustado, através de um potenciômetro conectado aos terminais 14, 18 e 20. O valor ajustado da tensão de referência é disponibilizado no terminal



Figura 4.8: Placa eletrônica SEMIKRON MP410T



A/B	Barramento positivo/negativo
C	Placa SEMIKRON MP410T
D/E	Contator para descida/subida da comporta
F	Relés de subtensão e de sobretensão
G e H	Baterias de 12 V

Figura 4.9: Quadro de controle e proteção

18. O valor da tensão de referência é ajustado, através de um potenciômetro conectado aos terminais 14, 18 e 20. O valor ajustado da tensão de referência é disponibilizado no terminal 18.

### O transdutor de tensão

A realimentação para a placa eletrônica é a tensão de saída do transdutor de tensão. Este transdutor é composto por dois transformadores de potencial, uma ponte retificadora a diodos, e um divisor de tensão. Os transformadores de potencial estão na configuração delta aberto. O secundário destes transformadores alimentam uma ponte retificadora trifásica a diodos, em configuração Graetz.

Os terminais de saída desta ponte chegam, então, ao divisor de tensão, o qual é formado por dois resistores em série, sendo o primeiro de 47 k $\Omega$  e o segundo de 5,6 k $\Omega$ .

Antes de chegar à placa eletrônica, o sinal de realimentação, que representa a tensão nos

terminais do gerador de indução, precisa passar pelo circuito de condicionamento, mostrado na Figura 4.3.

Tabela 4.1: Descrição dos terminais da placa eletrônica SEMIKRON MP410T

Terminal	Nome	Descrição
1	+10	Fonte de tensão 10 V para as saídas 3 a 5
2	VCC	Fonte de tensão 5 V para as saídas 3 a 5
3	LIM	<i>Display</i> de limitação
4	F_RAMP	<i>Display</i> de funcionamento
5	INH1_OUT	<i>Display</i> de inibição
6	GND	Terra para as saídas 3 to 5
7	INH1_IN	Entrada inibitória
8	TERMO	Entrada do Termostato
9	START_STOP	Entrada partida/parada
10	POT_KEY	Entra-se com o valor de Referência através de um potenciômetro ou teclado. Na Configuração STARTER desativa-se o modo ENERGY SAVE.
11	GND	Terra para as entradas de 1 a 4
12	RS485+	Terminal positivo do barramento RS485
13	RS485-	Terminal negativo do barramento RS485
14	+5	Fonte de tensão +5V
15	-5	Fonte de tensão -5V
16	CON_IN_TEMPE	Entrada para o sensor de temperatura
17	AGND	Terra para o sensor de temperatura
18	IN_0_5	Entrada do valor de referência 0 V a 5 V
19	IN_0_10	Entrada do valor de referência 0 V a 10 V
20	AGND	Terra para o valor de referência
21	INT1+	Terminal positivo do diferencial analógico de entrada de corrente
22	INT1-	Terminal negativo do diferencial analógico de entrada da corrente
23	START_STOP	Entrada de Partida/parada
24	AGND	Terra para entrada analógica de tensão
25	L1	Entrada analógica de corrente para o transformador de corrente
26	L2	Entrada analógica de corrente para o transformador de corrente
27	COM	Comum para entrada analógica de corrente para o transformador de corrente

## O circuito de condicionamento

O sinal do transdutor de tensão (que sai do divisor de tensão) entra no circuito de condicionamento como  $v_t$ , sai deste como  $v_t - 5$ , e finalmente, é conduzido para o terminal 23 da placa.

Tabela 4.2: Parametrização da placa eletrônica SEMIKRON MP410T

Nm	Nome(Abreviatura no <i>Display</i> )	Valor[Unidade]
0	LOCAL_REMOTE(LR)	0(0=local)( <i>default</i> )
1	ADRESS(Ad)	1( <i>default</i> )
2	CONFIGURATION9(CF)	2(2=W3C)
3	PHASEDIFFERENCE(DY)	0°( <i>default</i> )
4	AUTO_MANUAL(Am)	0(0=auto)
5	PEAK(P)	66.0%( <i>default</i> )
6	TIME_PEAK(PS)	0 s( <i>default</i> )
7	PEDESTAL(D)	66.0%( <i>default</i> )
8	RAMP_UP(RU)	0 s( <i>default</i> )
9	RAMP_DOWN(Rd)	0 s
10	LIM_INTENSITY(CL)	0
11	MAX_INTENSITY(Cm)	0
12	AL_TEMPERATURE(HL)	0=não( <i>default</i> )
13	CON_TEMPERATURE(Hm)	0
14	AL_FAILURE_PHASE(PA)	00=não( <i>default</i> )
15	AL_FAILURE_THYRISTORS(SA)	0=não( <i>default</i> )
16	ENERGY_SAVING(ES)	0
17	REGULATING MODE(Rm)	1(1=tensão)
18	LINEAR(LI)	1(1=sim)
19	REFERENCE VALUE(E)	16.0%
20	KP_INTENSITY(PC)	não utilizado
21	TI_INTENSITY(IC)	não utilizado
22	TD_INTENSITY(DC)	não utilizado
23	LIM_VOLTAGE(VL)	1(1=sim)
24	MAX_VOLTAGE(Vm)	99.9%
25	KP_VOLTAGE(PV)	0.05
26	TI_VOLTAGE(IV)	0,04 s
27	TD_VOLTAGE(DV)	0.0
28	INPUT_INTENSITY(CI)	00( <i>default</i> )
29	BURST	5pulsos( <i>default</i> )

O uso do circuito de condicionamento de tensão se justifica pelo fato da placa SEMIKRON MP410T ser projetada para receber o sinal de realimentação como 5 V subtraído da tensão do transdutor.

## 4.4 Medição elétrica

A medição das grandezas elétricas do gerador e da carga principal é realizada através de medidore digital KRON. A Figura 4.10 mostra o medidor do gerador e o medidor da carga



Figura 4.10: Medição elétrica. Esquerda: Medição do gerador, Direita: Medição da carga principal.

principal. O medidor do gerador está instalado na porta esquerda do quadro de potência, enquanto o medidor da carga principal na porta direita. Estes medidores recebem a tensão através de ligação direta às fases do gerador e às fases da carga principal, respectivamente. A corrente chega aos terminais do medidor Kron através transformadores de corrente nas fases do gerador e nas fases da carga principal, respectivamente. O neutro necessário para a conexão dos medidores KRON vem do autotransformador. A Figura 4.10 mostra um momento em que o medidor do gerador indica 15,2 kW, enquanto o medidor carga principal indica 7,62 kW. Isto está em conformidade com o sistema proposto, pois o gerador sempre "enxergará" uma carga maior que a carga principal. Pois o que o gerador "enxerga" é a soma da carga principal com a carga lastro. Neste momento, a medição da carga lastro seria a diferença entre a potência ativa entregue pelo gerador (15,2 kW) e a potência ativa da carga principal (7,62 kW), isto é, 7,58 kW.

# Capítulo 5

## O Sistema de Proteção

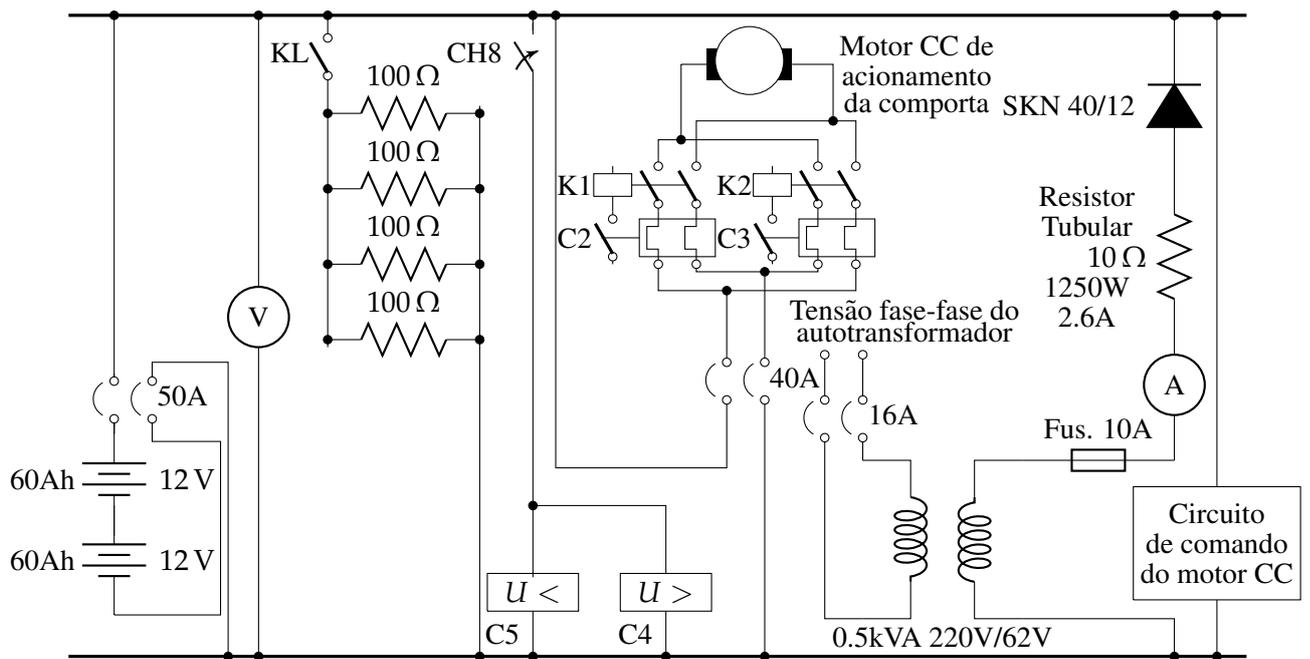
Uma das contribuições deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de proteção de baixo custo [24] para uma microcentral hidrelétrica a gerador de indução. Este sistema é composto por um circuito de *back-up* em corrente contínua, mostrado na Figura 5.1.

O objetivo do sistema de proteção é detectar situações de subtensão ou de sobretensão. Caso ocorra uma destas situações, é necessário providenciar o imediato fechamento da comporta localizada na entrada da tubulação forçada.

Uma situação de subtensão pode acontecer, por exemplo, na ocorrência de chuvas, quando o canal de adução é carregado com folhas e pequenos galhos de árvores os quais entopem as grades de retenção. Quando isto acontece, o fluxo água diminui bastante, fazendo diminuir a rotação da turbina, e, conseqüentemente, a tensão nos terminais do gerador, resultando em uma subtensão.

Existem na fazenda motores de indução trifásicos que se queimariam caso fossem submetidos a grandes períodos de subtensão, sendo necessário providenciar o fechamento imediato da comporta na entrada da tubulação forçada.

Uma situação de sobretensão pode ocorrer, por exemplo, se a placa eletrônica SEMIKRON MP410T danificar-se, ou se houver alguma falha no circuito de controle da carga lastro. Se isto acontecer, o conjunto turbina-gerador pode acelerar, fazendo com que a tensão gerada aumente substancialmente, causando uma sobretensão no barramento. Se isto ocorrer, para evitar danos mecânicos ao conjunto turbina-gerador, a comporta na entrada da tubulação forçada precisa ser



K1	Contato normalmente aberto do contator de fechamento da comporta
K2	Contato normalmente aberto do contator de abertura da comporta
SKN 40/12	Diodo do carregador de bateria

Figura 5.1: Circuito de *back-up* em corrente contínua

também fechada imediatamente.

## 5.1 Relés de subtensão e sobretensão

Foram instalados relés temporizados analógicos trifásicos, fabricados pela Ward Eletro Eletrônica Ltda, modelos UMX-321 para sobretensão, e modelo UMX-320 para subtensão [25].

Optou-se pela escolha destes relés por eles serem indicados para proteção e supervisão trifásicas de motores e sistemas de distribuição de força, por possuírem atuação temporizada e ajustável, baixo consumo, sinalização de atuação ou de funcionamento normal, e ajuste único para as três fases.

O circuito de medição destes relés é isolado contra surtos ou componentes contínuas da tensão de entrada e possuem proteção contra sobretensões da tensão auxiliar. Estes relés comparam a tensão medida com um valor pré-ajustado, que é função da tensão nominal do



Figura 5.2: Relé de subtensão

relé. Se qualquer uma das tensões de fase medida for inferior ou superior ao valor pré-ajustado, serão comutados contatos auxiliares por meio de um relé auxiliar de saída. A alimentação dos circuitos eletrônicos destes relés é feita em corrente contínua. A sinalização de operação ou condição normal é feita através de um diodo emissor de luz (LED). Em condições normais, o relé de saída fica desenergizado. Um LED indicativo vermelho permanece apagado, acendendo-se somente quando for atuado por falha da tensão de medição.

De acordo com o fabricante, a faixa de regulagem de tensão do relé de subtensão é de 0,5 pu a 1 pu, e a do relé de sobretensão é de 1 pu a 1,5 pu. A precisão deste ajuste de tensão é de  $\pm 5\%$ . Na microcentral o relé de subtensão está ajustado em 0,85 pu e o relé de sobretensão em 1,15 pu.

Quanto à faixa de regulagem de temporização, de acordo com o fabricante, a do relé de subtensão é de 0,5 s a 10 s, e a do relé de sobretensão também é de 0,5 s a 10 s. A precisão de ajuste de temporização é de  $\pm 5\%$ . Na microcentral o relé de subtensão está ajustado em 5 s, e o relé de sobretensão está ajustado também em 5 s.

A Figura 5.4 apresenta o diagrama de conexões do relé de subtensão e a Tabela 5.1 apresenta os seus dados de placa. A Figura 5.5 apresenta o diagrama de conexões do relé de sobretensão e a Tabela 5.2 apresenta os seus dados de placa. A Figura 4.9 mostra o quadro elétrico onde estes relés estão instalados. A Figura 5.2 mostra o relé de subtensão e a Figura 5.3 mostra o relé de sobretensão.

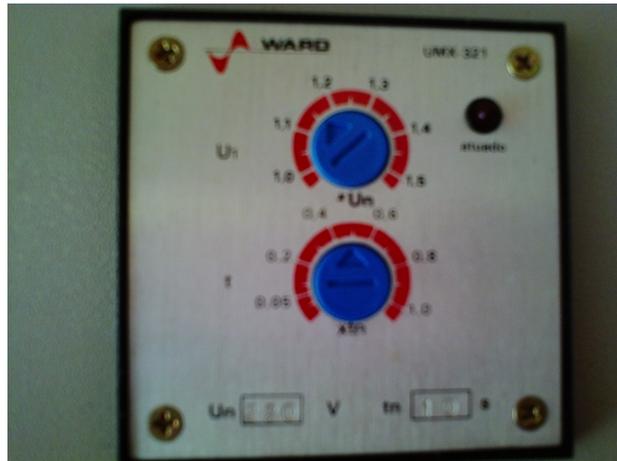


Figura 5.3: Relé de sobretensão

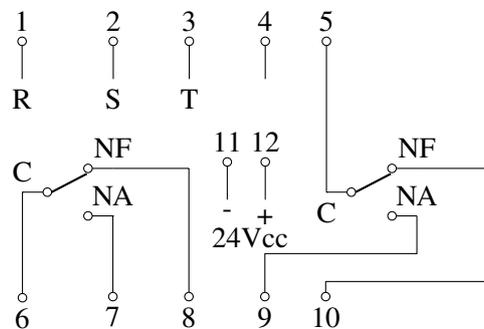


Figura 5.4: Esquema de ligações do relé de subtensão

## 5.2 A Comporta

A Figura 5.8 mostra a comporta. Um motor de corrente contínua de 24 V é o responsável por fechar a comporta. A Figura 5.7 mostra o motor de corrente contínua em fase de montagem da comporta. A Tabela 5.3 mostra os dados deste motor CC. A tensão de 24 V que alimenta este motor é fornecida por baterias.

Tabela 5.1: Dados de placa do relé de subtensão

Fabricante	Ward
Denominação	UMX-320
Tipo	Mínima tensão trifásico temporizado com tensão auxiliar externa
Tensão nominal	220 V - 60 Hz
Alimentação auxiliar	24Vcc
Número de contatos	2 NAF
Capacidade dos contatos	10 A 250 V - 60 Hz
Data de fabricação	05/2010

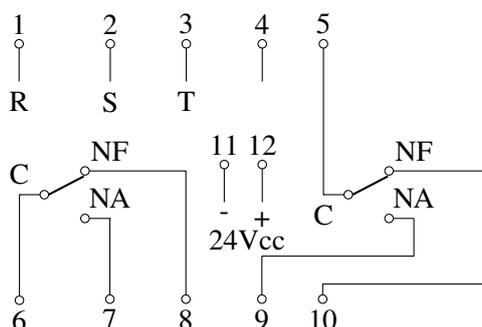


Figura 5.5: Esquema de ligações do relé de sobretensão

Tabela 5.2: Dados de placa do relé de sobretensão

Fabricante	Ward
Denominação	UMX-321
Tipo	Máxima tensão trifásico temporizado com tensão auxiliar externa
Tensão nominal	220 V - 60 Hz
Alimentação auxiliar	24Vcc
Número de contatos	2 NAF
Capacidade dos contatos	10 A 250 V - 60 Hz
Data de fabricação	08/2010

Tabela 5.3: Dados do motor de acionamento da comporta

Fabricante	Bosch
Tensão de armadura	24 V
Potência	750 W
Corrente de armadura	35 A
Velocidade	3250 RPM
Conjugado	150 N cm
Conjugado máximo	1100 N cm
IP Proteção	IP10
Peso	3,8 kg

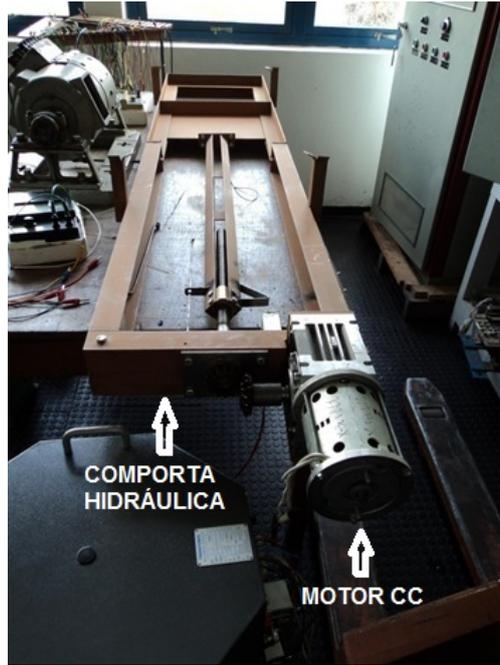


Figura 5.6: Motor de corrente contínua para acionamento da comporta

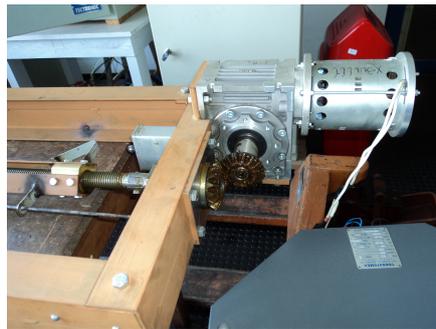


Figura 5.7: Redutor de velocidade acoplado ao motor CC

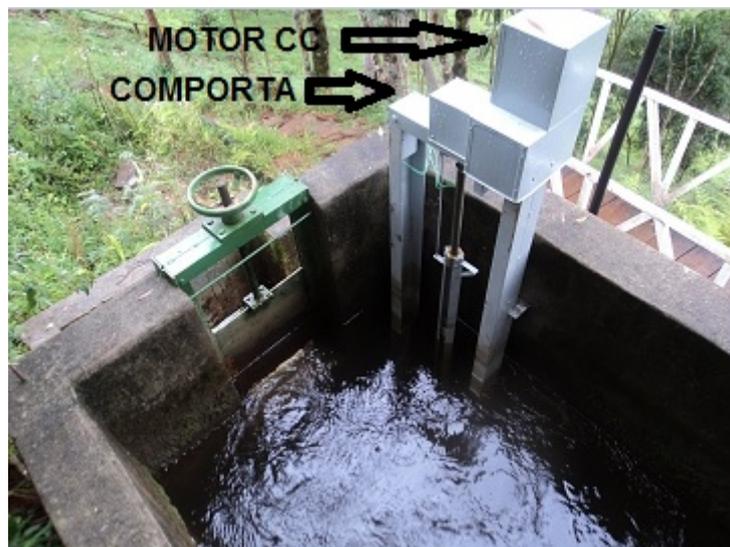


Figura 5.8: Comporta instalada na entrada da tubulação forçada

### 5.3 Circuito de comando da comporta

Um circuito de comando para o acionamento da comporta foi implementado. Este circuito de comando da comporta é mostrado na Figura 5.9. Ele funciona da seguinte maneira:

Na presença de sobretensão, o contato normalmente aberto de relé de sobretensão, C4, é fechado. Se for o caso de uma subtensão, o contato normalmente aberto do relé de subtensão, C5, é quem é fechado.

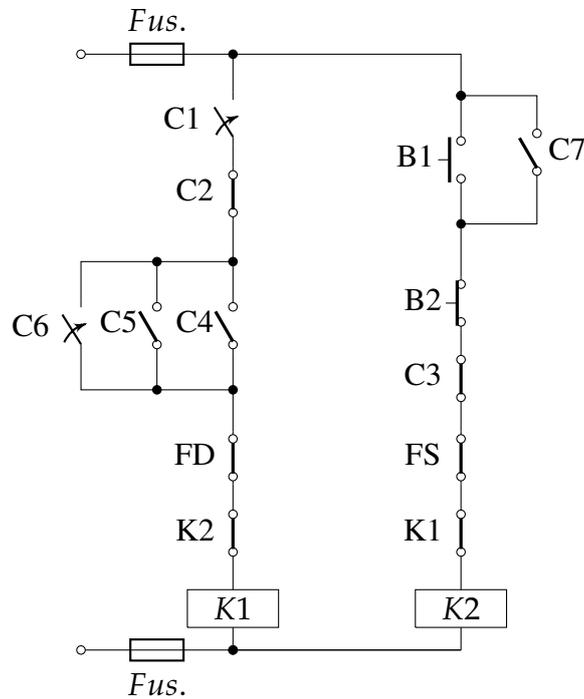
A bobina do contactor K1c é energizada, ligando-se, assim, o motor CC a fim de fechar completamente a comporta, até que o contato fim de curso de descida seja tocado, o que significa o estado de fechamento total da comporta. A abertura do contato de fim de curso de descida abre o circuito e desliga o contactor K1c, e, assim, o motor de corrente contínua é desligado. Quando a comporta é fechada, a geração é interrompida. Entretanto, pode ser possível, normalizar a tensão depois disso.

Para abrir a comporta, pressiona-se a botoeira normalmente aberta B1, isto faz ligar o contactor K2c, ligando-se, assim, o motor CC a fim de abrir a comporta até que contato de fim de curso de subida seja tocado, o que significa o estado de abertura total da comporta. A abertura do contato de fim de curso de subida abre o circuito e desliga o contactor K2c, e, assim, o motor CC é desligado.

No circuito de comando da comporta também existe a chave *bypass* C6 [26]. Isto permite o funcionamento manual do acionamento da comporta no caso de falha nos relés, testes ou quaisquer outras necessidades.

### 5.4 Carregador de baterias

As baterias precisam sempre estar carregadas para providenciar o funcionamento do motor CC de 24 V quando necessário. Com esta finalidade implementou-se um carregador de baterias para mantê-las sempre carregadas. Este carregador é formado, basicamente, de um transformador monofásico de 0,5 kVA com um diodo em seu secundário. Um diodo apenas é usado para que



#### Legenda

K1c	Bobina do contator para fechamento da comporta
K2c	Bobina do contator para abertura da comporta
K1	Contato NF de K1c (Intertravado com K2)
K2	Contato NF de K1c (Intertravado com K1)
B1	Botoeira para ligar motor de acionamento de abertura da comporta (Botão vermelho)
B2	Botoeira para desligar motor de acionamento de abertura da comporta (Botão verde)
C1	Chave permissível
C2	Contato do relé térmico do contator de fechamento da comporta K1c
C3	Contato do relé térmico do contator de abertura da comporta K2c
C4	Contato do relé de sobretensão
C5	Contato do relé de subtensão
C6	Chave <i>bypass</i>
C7	Contato de selo do contator de abertura da comporta K2c
FD	Contato do fim de curso de descida da comporta
FS	Contato do fim de curso de subida da comporta
Fuse	Fusível

Figura 5.9: Circuito de comando da comporta

as baterias sejam carregadas ciclo a ciclo. Isto é possível através da retificação de meia onda mostrada na Figura 5.10. Ou seja, no primeiro semiciclo de meia onda de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  as baterias são carregadas. No segundo semiciclo  $180^\circ$  a  $360^\circ$  as baterias são descarregas através da carga formada pelos quatro resistores em paralelo. Cada resistor desta carga é de  $100 \Omega$ .

O valor médio da tensão do carregador de baterias entregue ao barramento de corrente contínua é calculado a partir da Figura 5.10. O valor de pico da tensão de carregamento é dado pela equação (5.4.1)

$$v_{med} = \frac{v_{pico}}{\pi} \quad (5.4.1)$$

O valor da tensão do secundário do transformador de alimentação do carregador de baterias é calculado a partir do valor pleno de duas baterias de 12 V em série. Isto é, uma bateria de 12 V plenamente carregada apresenta 13,5 V em seus terminais. Duas baterias em série terão, portanto, 27 V em seus terminais.

Um transformador de alimentação que tenha em seu secundário a tensão eficaz de 62 V terá como valor de pico o valor eficaz multiplicado por  $\sqrt{2}$ . De acordo com a equação (5.4.1) o carregador fornecerá aos terminais do barramento de corrente contínua o seguinte valor de tensão:

$$v_{med} = \frac{62\sqrt{2}}{\pi} = 28$$

Ou seja, 28 V é aproximadamente o valor da tensão de duas baterias de 12 V em série plenamente carregadas.

Uma resistência ôhmica tubular de  $10 \Omega$  com potência de 1250 W e corrente permanente de 2,6 A limita a corrente do carregador de bateria. Esta corrente com valor aproximado de 2,5 A é a soma da corrente absorvida pela bateria no primeiro semiciclo com a corrente que é consumida pela carga da bateria no segundo semiciclo. Conforme dados do fabricante Eletron Resistências Ltda, o resistor tubular é do tipo fita ajustável vitrificado e tem como elemento resistivo Níquel-cromo, com tolerância ôhmica  $\pm 10\%$ . Suas dimensões são: comprimento 370 mm, diâmetro externo 58 mm e diâmetro interno 44 mm.

A Figura 5.11 mostra três transformadores: o da esquerda é o isolador para a placa Semikron MP410T, o do meio é do carregador de baterias, e o da direita é para supervisão da tensão do gerador de indução através dos relés de subtensão e sobretensão. O carregador de baterias tem o resistor tubular mostrado na Figura 5.13, o diodo na Figura 5.12, e o amperímetro na Figura 5.11.



Figura 5.10: Forma de onda do carregador de baterias



Figura 5.11: Transformador (centro) e amperímetro do carregador de baterias

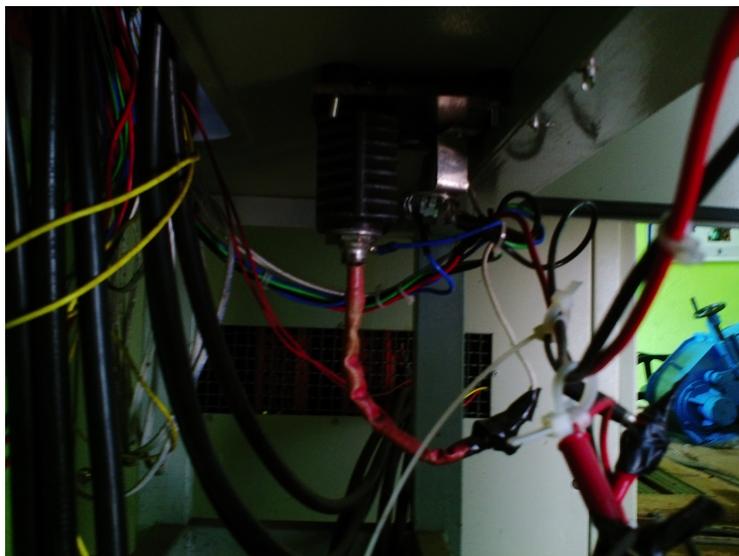


Figura 5.12: Diodo do carregador de baterias



Figura 5.13: Resistor tubular do carregador de baterias

# Capítulo 6

## Resultados Experimentais

Os valores obtidos de quantidades para uma determinada posição de abertura da válvula de admissão de água instalada na tubulação forçada são mostrados na Tabela 6.1, na Tabela 6.2, e na Tabela 6.3.

O instrumento para medir corrente é um *Clamp* de corrente do tipo mostrado na Figura 6.1.

A operação da fazenda foi estudada em algumas condições de carga. Na Tabela 6.1 a fazenda está com 6,8 kW, considerada uma baixa condição de carga. Na Tabela 6.2 a fazenda está com 13 kW, considerada uma condição de carga normal ou intermediária. E, finalmente, na Tabela 6.3 a fazenda está com 20,5 kW, considerada uma alta condição de carga.

Nota-se que há um decréscimo de carga lastro quando há aumento de carga na fazenda. A tensão na carga principal varia de 221 V para 222 V. A tensão nos terminais do gerador de indução altera-se de 202 V para 203 V. Estes valores são aproximadamente constantes.

Apesar de tanto a tensão 200 V na entrada do autotransformador, que é a tensão gerada, quanto a tensão de 220 V na saída do autotransformador, que é a a tensão na carga principal, permanecerem aproximadamente constantes, a frequência altera-se em uma faixa bem estreita, isto é, de 63,5 Hz para 58,4 Hz. Esta variação de frequência é tolerável para a grande variedade de cargas existentes no meio rural.

Os gráficos da Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 mostram os resultados das Tabelas 6.1, 6.2, e 6.3.

As Figuras 6.5 a 6.12 mostram as oscilogramas deste ensaio com uma ponte atenuadora de 100X, e clamp de corrente AC de 200 A com escala  $10 \frac{mV}{A}$ . A tensão é mostrada no canal 1,



Figura 6.1: *Clamp* de corrente utilizado em conjunto com osciloscópio para oscilografia das formas de onda

em azul. A corrente no canal 2, em amarelo. Exceto no caso da Figura 6.7, onde o clamp de corrente AC é de 200 A com escala  $100 \frac{mV}{A}$ .

A Figura 6.5 e a Figura 6.6 mostram as formas de onda da tensão fase-neutro e a corrente de linha na fase A do gerador de indução quando há 6,8 kW e 20,5 kW de carga principal respectivamente. Nota-se que a corrente está adiantada em relação à tensão gerada, devido à natureza capacitiva da carga, por causa da presença dos bancos de capacitores, os quais fornecem a potência reativa para a operação do gerador de indução.

A Figura 6.7 e a Figura 6.8 mostram as formas de onda da tensão fase-neutro e a corrente de linha na fase A da carga principal quando há 6,8 kW e 20,5 kW de carga principal aproximadamente respectivamente. Nota-se que a corrente da carga principal está quase em fase com a tensão gerada devido à natureza resistiva predominante da carga da fazenda.

A Figura 6.9 e a Figura 6.10 mostram as formas de onda da tensão fase-fase e a corrente de linha na fase A da carga lastro. A Figura 6.9 foi registrada em uma situação baixa carga principal e alta carga lastro: 6,8 kW e 18,4 kW respectivamente. A Figura 6.10 foi registrada em uma situação de alta carga principal e baixa carga lastro: 20,5 kW e 7,3 kW, respectivamente. Comparando-se a Figura 6.10 com a Figura 6.9 pode ser visto que há uma redução na tensão aplicada à carga lastro.

A Figura 6.11 e a Figura 6.12 mostram as formas de onda da tensão fase-fase e a corrente de linha na fase A do banco de capacitores quando há 6,8 kW e 20,5 kW de carga principal

Tabela 6.1: Operação da microcentral com baixa carga na fazenda: 6,8 kW

	Gerador	Carga da fazenda	Carga lastro
Potência ativa[kW]	25,2	6,8	18,4
Potência reativa[kvar]	20,2	0,44	
Tensão[V]	202	221	115
Corrente de linha[A]	90	18,0	
Fator de potência	0,77	1,00	
Frequencia[Hz]	63,5		
Velocidade do eixo[RPM]	1900		

Tabela 6.2: Operação da microcentral com carga intermediária na fazenda: 13 kW

	Gerador	Carga da fazenda	Carga lastro
Potência ativa[kW]	26,2	13,0	13,2
Potência reativa[kvar]	21,2	0,104	
Tensão[V]	202	220	100
Corrente de linha[A]	96,5	34,5	
Fator de potência	0,78	1,00	
Frequencia[Hz]	62,1		
Velocidade do eixo[RPM]	1870		

respectivamente. Nota-se a natureza não-senoidal da corrente do banco de capacitores.

A Figura 6.13 mostra o registro da saída do transdutor de tensão para saída abrupta de carga principal e entrada abrupta de carga principal de 7 kW. Nota-se a perfeita regulação de tensão. Era justamente este o desejo da implementação do controle de tensão através da variação de carga lastro.

O sistema proposto mostrou-se satisfatório, uma vez que a microcentral funcionou ininterruptamente de 5 de setembro de 2012 até meados de março de 2014, ou seja, aproximadamente um ano e meio continuamente. Não houve falha nos tiristores durante este período. Depois deste período a microcentral parou para manutenção. Este período de manutenção era necessário, pois desde o início da operação desta microcentral o motor ainda não passara por uma manutenção. A Figura 6.14 mostra a carcaça do gerador de indução em manutenção. A Figura 6.15 mostra o rotor em gaiola do gerador.

Tabela 6.3: Operação da microcentral com alta carga na fazenda: 20,5 kW

	Gerador	Carga da fazenda	Carga lastro
Potência ativa[kW]	27,8	20,5	7,3
Potência reativa[kvar]	24,5	0,094	
Tensão[V]	203	222	70
Corrente de linha[A]	104	53,5	
Fator de potência	0,76	1,00	
Frequencia[Hz]	58,4		
Velocidade do eixo[RPM]	1770		

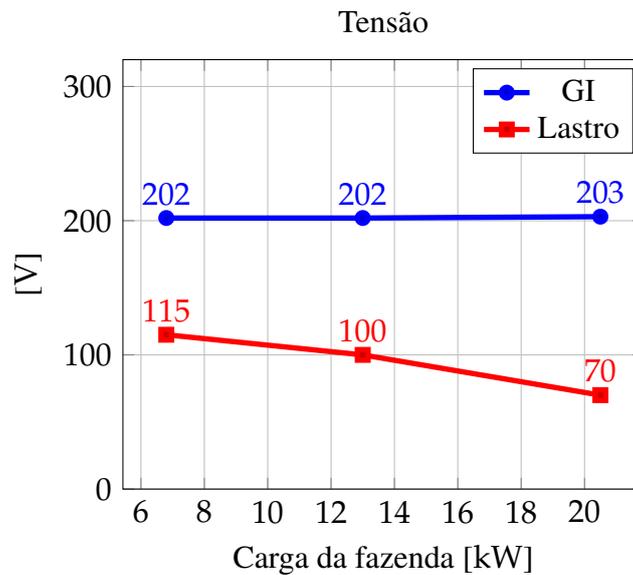


Figura 6.2: Tensão gerada para três situações de carga na fazenda

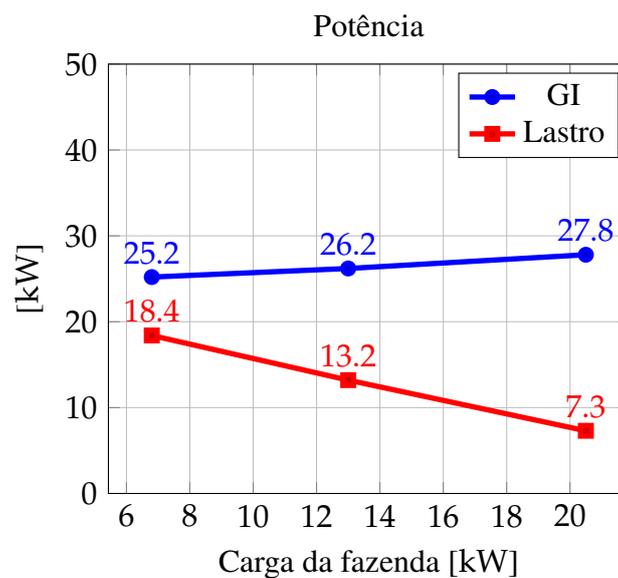


Figura 6.3: Balanço de potência para três situações de carga na fazenda

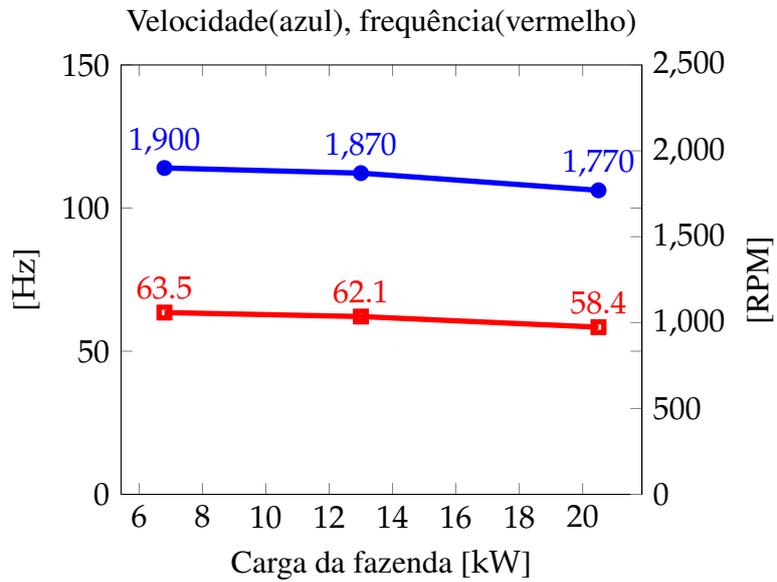
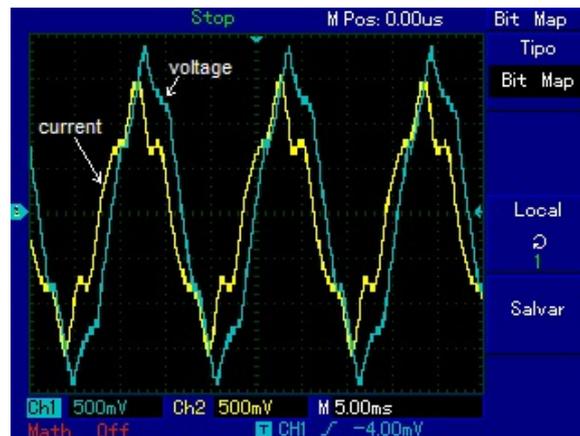
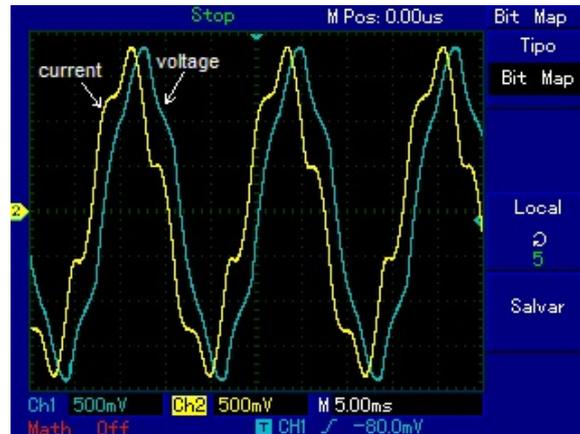


Figura 6.4: Velocidade e frequência para três situações de carga na fazenda



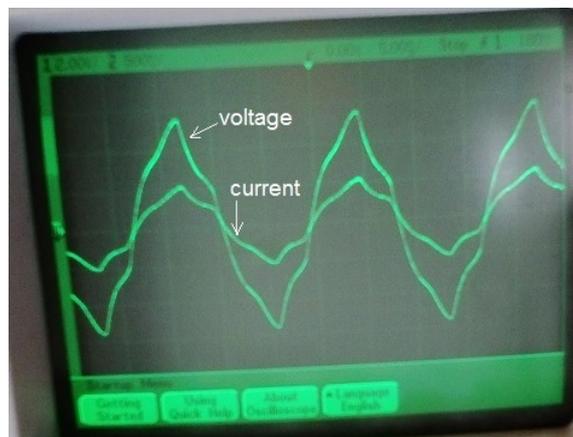
Tensão ( <i>voltage</i> ) fase-neutro	azul	$50 \frac{V}{div}$
Corrente ( <i>current</i> ) de linha	amarelo	$50 \frac{A}{div}$

Figura 6.5: Formas de onda no gerador de indução com baixa carga na fazenda: 6,8 kW



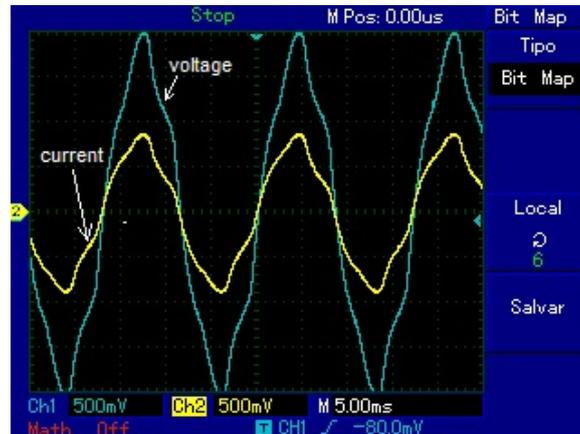
Tensão ( <i>voltage</i> ) fase-neutro	azul	$50 \frac{V}{div}$
Corrente ( <i>current</i> ) de linha	amarelo	$50 \frac{A}{div}$

Figura 6.6: Formas de onda no gerador de indução com alta carga na fazenda: 20,5 kW



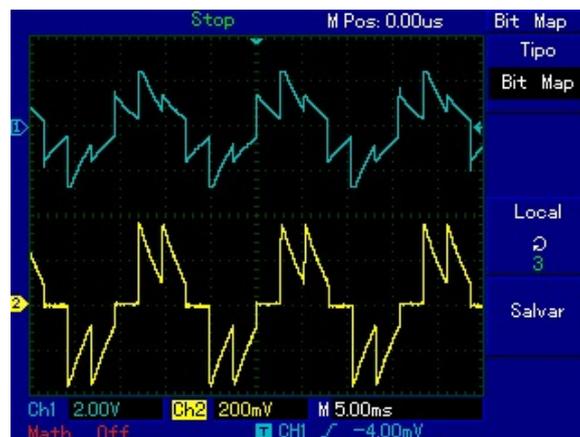
Tensão( <i>voltage</i> ) fase-neutro		$200 \frac{V}{div}$
Corrente( <i>current</i> ) de linha		$15 \frac{A}{div}$

Figura 6.7: Formas de onda na carga principal com baixa carga na fazenda: aproximadamente 6,8 kW



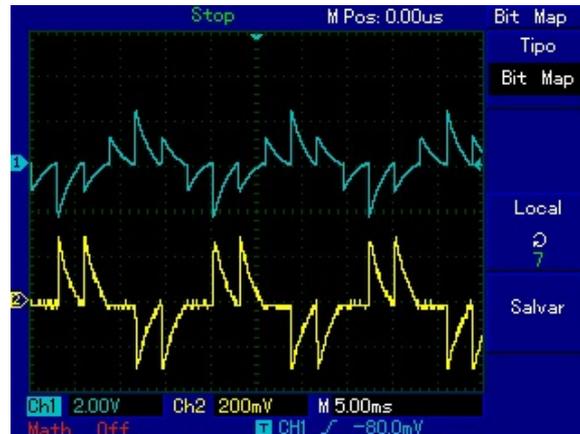
Tensão ( <i>voltage</i> ) fase-neutro	azul	$50 \frac{V}{\text{div}}$
Corrente ( <i>current</i> ) de linha	amarelo	$50 \frac{A}{\text{div}}$

Figura 6.8: Formas de onda na carga principal com alta carga na fazenda: 20,5 kW



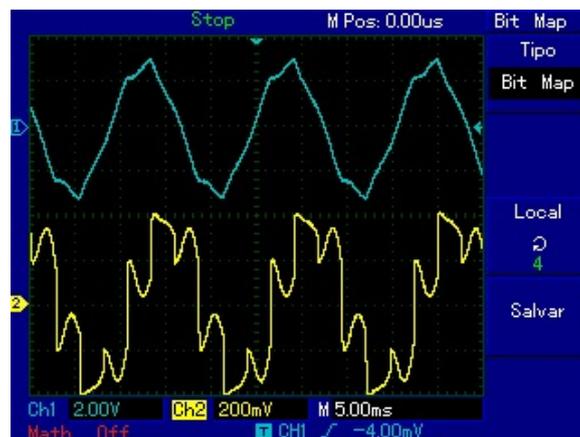
Tensão fase-fase	acima	azul	$200 \frac{V}{\text{div}}$
Corrente de linha	abaixo	amarelo	$20 \frac{A}{\text{div}}$

Figura 6.9: Formas de onda no carga lastro com baixa carga na fazenda: 6,8 kW



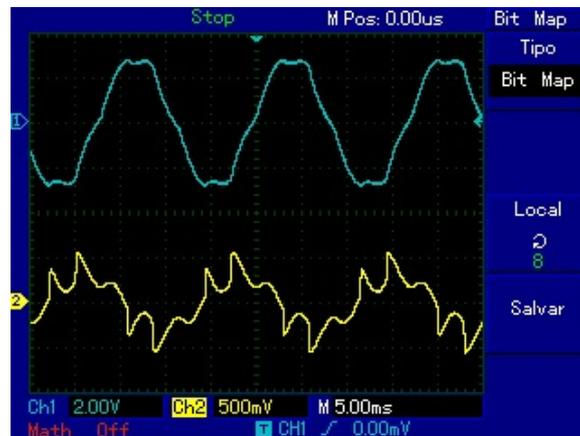
Tensão fase-fase	acima	azul	$200 \frac{V}{div}$
Corrente de linha	abaixo	amarelo	$20 \frac{A}{div}$

Figura 6.10: Formas de onda no carga lastro com alta carga na fazenda: 20,5 kW



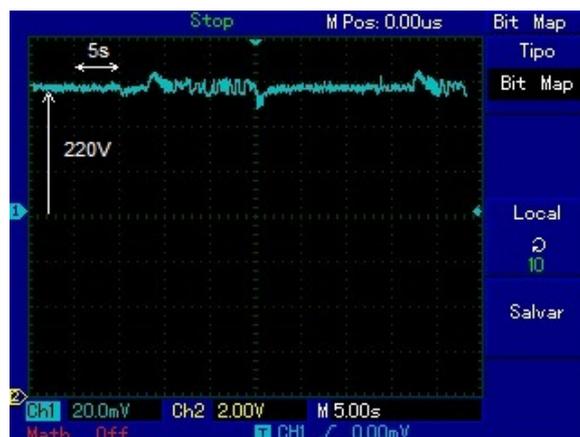
Tensão fase-fase	acima	azul	$200 \frac{V}{div}$
Corrente de fase	abaixo	amarelo	$50 \frac{A}{div}$

Figura 6.11: Formas de onda no banco de capacitores com baixa carga na fazenda: 6,8 kW



Tensão fase-fase	acima	azul	$200 \frac{V}{div}$
Corrente de fase	abaixo	amarelo	$50 \frac{A}{div}$

Figura 6.12: Formas de onda no banco de capacitores com alta carga na fazenda: 20,5 kW



Escala	$73,3 \frac{V}{div}$
--------	----------------------

Figura 6.13: Oscilografia mostrando a estabilidade da tensão gerada



Figura 6.14: Carcaça do gerador de indução em manutenção



Figura 6.15: Rotor(*squirrel cage*) do gerador de indução em manutenção

## Capítulo 7

# Operação da Microcentral

Um manual de operação da microcentral foi implementado para utilização do próprio pessoal da fazenda. A operação do sistema proposto nesta tese é possível de ser realizada por mão-de-obra não especializada, desde que os procedimentos no manual de operação descrito neste capítulo sejam rigorosamente seguidos. Basicamente, este manual descreve o procedimento de partida e o procedimento de parada da microcentral.

A Figura 7.1 mostra o diagrama esquemático geral com as chaves que devem ser manuseadas, identificadas com as iniciais CH, para a operação da microcentral.

A Figura 7.2 mostra o circuito de comando juntamente com o circuito de *back-up* em corrente contínua, para o acionamento da comporta. Todas as chaves que devem ser manuseadas são identificadas também com as iniciais CH para a operação da microcentral.

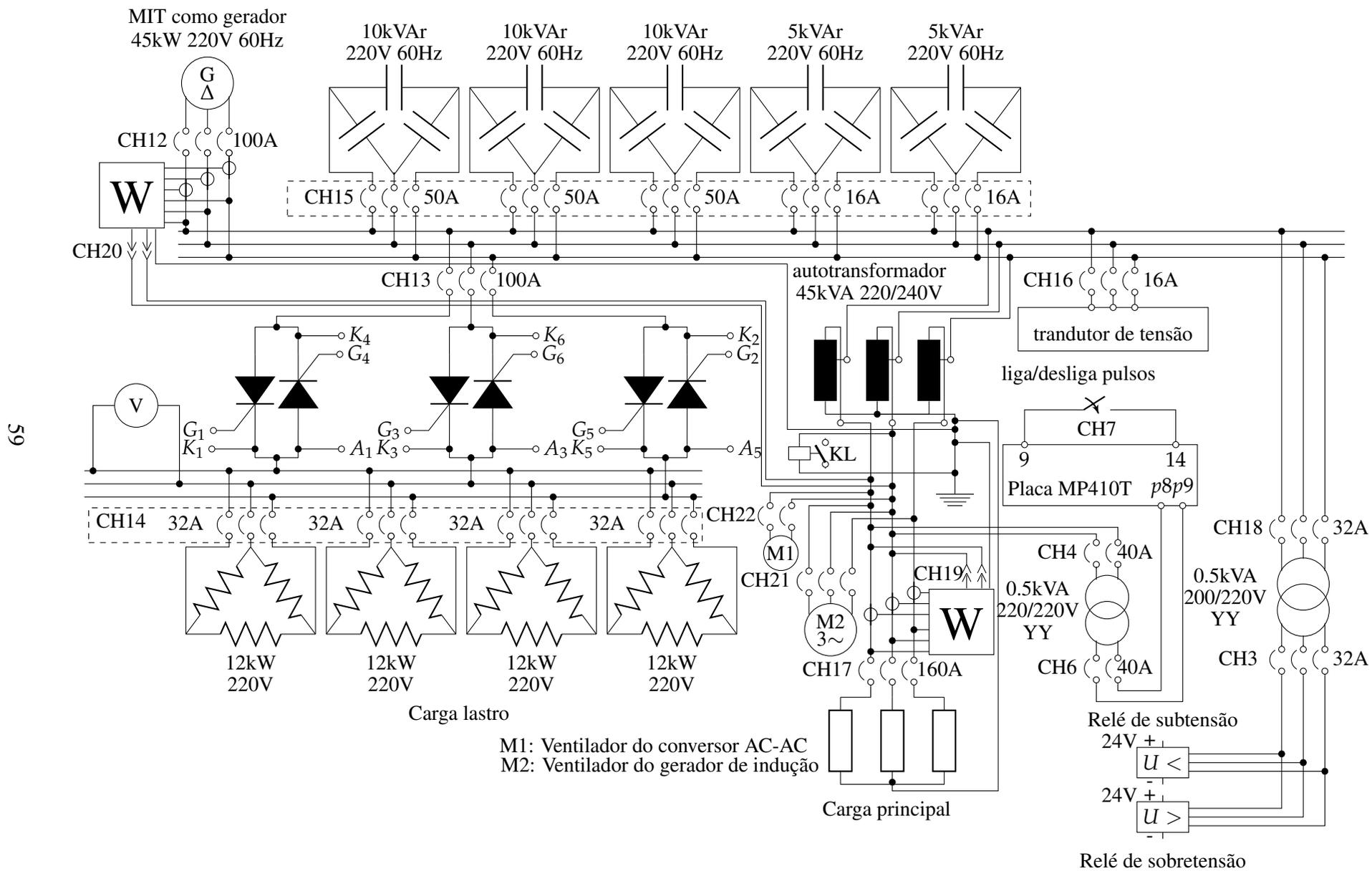


Figura 7.1: Diagrama esquemático para operação do sistema proposto

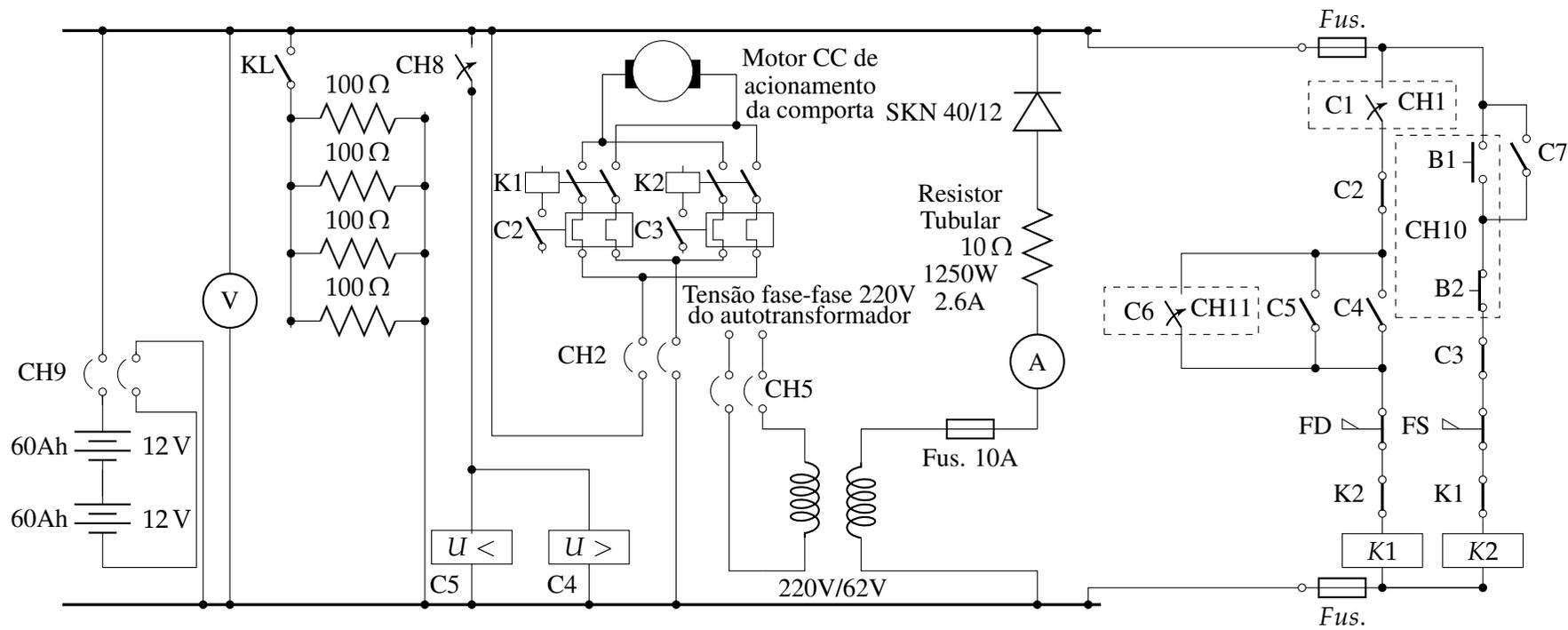


Figura 7.2: Operação do circuito de comando da comporta

## 7.1 Manual de operação para a partida da microcentral

1. Verificar se todas as chaves das Figuras 7.1 e 7.2 estão desligadas.
2. Ligar a chave CH9 (que energiza o barramento CC de 24 V). Ver Figura 7.2..



2	Chave CH2 do circuito do motor de acionamento da comporta
3	Chave CH3 do circuito dos relés de subtensão e sobretensão
4	Chave CH4 do circuito do primário do transformador isolador da placa SEMIKRON MP410T
5	Chave CH5 do circuito do carregador de baterias

Figura 7.3: Chaves do quadro de controle e proteção

3. Certificar-se de que a válvula de água na tubulação forçada (válvula mostrada na Figura 2.2) esteja fechada.
4. Certificar-se de que a comporta esteja aberta. Caso a comporta esteja fechada, realizar os itens (a) e (b) seguintes. Caso a comporta esteja aberta, passar para o procedimento do item 5.
  - (a) Ligar a chave CH2. Ver Figura 7.2. É a chave com número 2 mostrada na Figura 7.3.
  - (b) Ligar a chave CH10 pressionando o botão vermelho (B1). A chave CH10 é mostrada na Figura 7.5. O voltímetro da bateria indicará uma queda de tensão, devido ao motor de acionamento da comporta ter sido ligado. Este voltímetro é mostrado na Figura 7.4

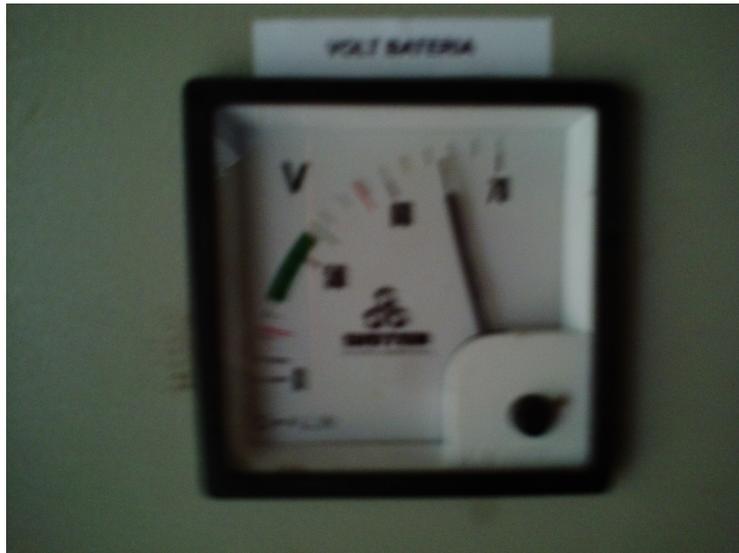


Figura 7.4: Voltímetro do barramento CC de 24 V



Figura 7.5: Chave CH10 de acionamento do motor CC da comporta

5. Ligar a chave CH12 (qu liga o gerador de indução ao barramento de 200 V). Ver Figura 7.1. É a chave mostrada na Figura 7.6. Neste momento a chave CH17 (que liga a carga principal) deverá estar desligada.
6. Ligar chave CH13 (que liga a carga lastro através do conversor AC-AC). Ver Figura 7.1. É a chave mostrada na Figura 7.7.
7. Ligar chaves CH14 (que ligam individualmente a carga lastro). Ver Figura 7.1.
8. Ligar as chaves CH15 (que liga individualmente os bancos de capacitores). São as chaves mostradas na Figura 7.9.



Figura 7.6: Chave CH12 que liga o gerador ao barramento de 200 V

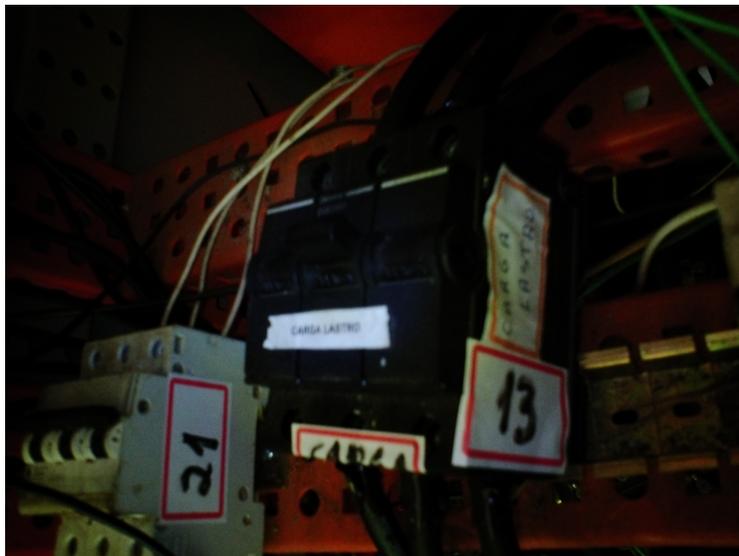


Figura 7.7: Chave CH13 que liga o barramento da carga lastro

9. Ligar a chave CH16 (que liga o transdutor de tensão). Ver Figura 7.1. É a chave mostrada na Figura 7.10
10. Abrir lentamente a válvula de água na tubulação forçada.
11. Estabilizar a tensão na carga principal em 250 V e 260 V, não se importando com a frequência.
12. Ligar a chave CH17 (que liga a carga principal). Ver Figura 7.1. É a chave mostrada na Figura 7.11.

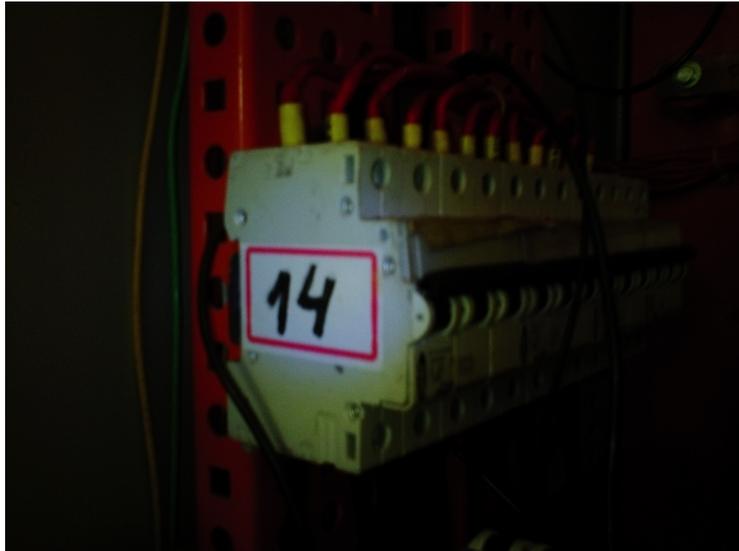


Figura 7.8: Chaves CH14 individuais de carga lastro



Figura 7.9: Chaves CH15 dos bancos de capacitores

13. Com alguma carga principal, por exemplo, dois ou três chalés da fazenda, ajustar a tensão em 210 V.
14. Ligar a placa eletrônica apenas com 210 V. Não ligar esta placa com mais de 210 V.
  - (a) Ligar a chave CH18 (que liga o primário do transformador isolador dos relés de subtensão e sobretensão). Ver Figura 7.1.
  - (b) Ligar a chave CH4 (que liga o primário do transformador isolador da placa eletrônica Semikron MP410T). Ver Figura 7.1. É a chave com número 4 mostrada na Figura



Figura 7.10: Chave CH16 que liga o transdutor de tensão



Figura 7.11: Chave CH17 da carga principal

7.3.

(c) Ligar a chave CH7 (que libera os pulsos de gatilhamento dos tiristores através da placa eletrônica Semikron MP410T). Ver Figura 7.1. É a chave com número 7 mostrada na Figura 7.13.

(d) Ligar a chave CH6 (que alimenta a placa eletrônica Semikron MP410T). É a chave com número 6 mostrada na Figura 7.13. Aparece o número 23,6, mas pode variar de 21 a 26 no *display* da placa. Ver Figura 7.1.

15. Ligar os plugues CH19 e CH20 do medidor digital KRON da carga principal e do gerador



Figura 7.12: Chave CH18 que liga o primário do trafo isolador dos relés de sub e sobretensão respectivamente). Estes plugues são do tipo mostrado na Figura 7.14.

16. .

(a) Ligar a chave CH3 (que permite a supervisão da tensão do gerador de indução através dos relés de subtensão e sobretensão). Ver Figura 7.1. É a chave com número 3 mostrada na Figura 7.3.

(b) Ligar a chave CH8 (que alimenta os relés de subtensão e sobretensão com com tensão do barramento CC de 24V). Ver Figura 7.2.

(c) Ligar a chave CH1 (chave permissível). Ver Figura 7.2. É a chave mostrada na Figura 7.15.

17. Ligar a chave CH21 (que liga o motor de ventilação forçada do gerador). Este motor é mostrado na Figura 2.4. Ver Figura 7.1. A chave CH21 é a chave com número 21 mostrada na Figura 7.7.

18. Ligar a chave CH22 (que liga o ventilador do conversor AC-AC mostrado na Figura 4.7). Ver Figura 7.1.

19. Abrir a válvula de água até que o voltímetro da carga lastro indique a presença de carga lastro(70 V é suficiente). Este voltímetro é mostrado na Figura 7.16. A tensão na carga

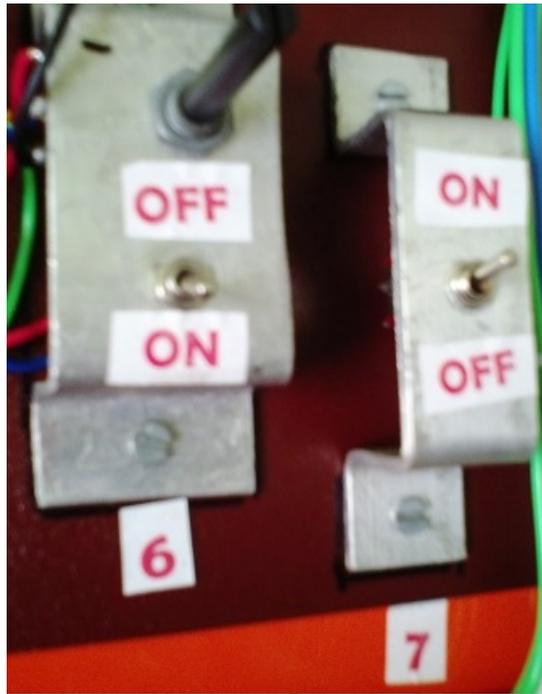


Figura 7.13: Chave CH6 que energiza a placa SEMIKRON MP410T, e chave CH7 que liga/desliga pulsos de gatilhamento dos tiristores

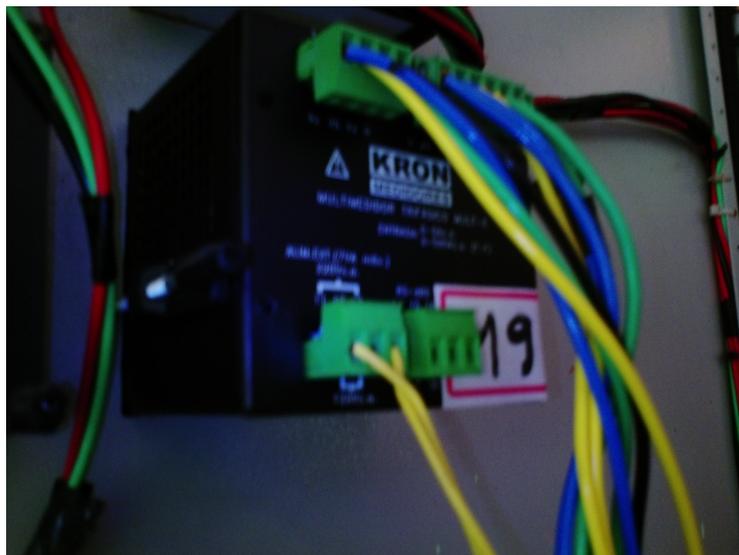


Figura 7.14: Vista traseira do medidor digital KRON utilizado

principal não pode passar de 240 V. Depois da entrada da carga lastro a tensão na carga principal se estabelece em 220 V. A frequência pode chegar até 62 Hz.

20. Ligar a chave CH5 (liga o carregador de bateria). Ver Figura 7.2. É a chave com número 5 mostrada na Figura 7.3.



Figura 7.15: Chave CH1 (permissível)



Figura 7.16: Voltímetro da carga lastro

## 7.2 Manual de operação para a parada da microcentral

1. Desligar a chave CH1 (chave permissível) Ver Figura 7.2.
2. Fechar a válvula de água manual na tubulação forçada.
3. Desligar as chaves do quadro de controle e proteção principalmente a chave CH9 (que desenergiza o barramento CC de 24 V). Ver Figura 7.2.
4. Desligar as chaves do quadro de potência. Ver Figura 7.1.

# Capítulo 8

## Controle de carga por lógica binária

Este capítulo apresenta um estudo para a solução do problema de estabilidade da frequência em regime permanente de um gerador de indução conectado a uma carga, utilizando um controle por lógica binária [27, 28]. O fluxo de potência ativa na carga tem influência na frequência de tensão gerada pela máquina. Para garantir que a frequência permaneça constante frente a variações de cargas, será usada uma carga lastro, cuja potência será controlada pela lógica binária.

Um sistema de controle consiste em um dispositivo ou um conjunto de dispositivos que comandam o comportamento de um sistema qualquer. Dois tipos de controle podem ser definidos: controle em malha aberta e controle em malha fechada.

No controle em malha aberta, o sinal de entrada é pré-fixado ou pré-programado e as respostas do sistema não influenciam no comportamento do controle. A Figura 8.1 representa o diagrama básico de um sistema de controle em malha aberta.

Já no sistema de controle em malha fechada, a ação do controle é dependente da saída. Deste modo, a saída é constantemente monitorada e seu valor é comparado com o sinal de entrada ou referência, gerando um erro ou desvio. Este processo é feito através de uma malha de realimentação da saída para a entrada. O dispositivo que utiliza o sinal de erro para determinar ou calcular o sinal de controle a ser aplicado ao processo é chamado de controlador ou compensador. A Figura 8.2 representa o diagrama básico de um sistema de controle em malha fechada.

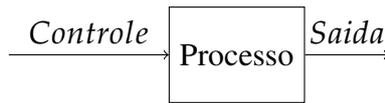


Figura 8.1: Diagrama de blocos para malha aberta

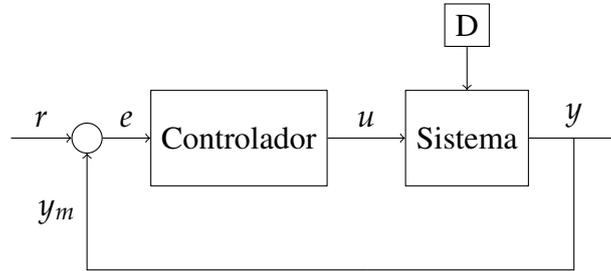


Figura 8.2: Diagrama de blocos para malha fechada

## 8.1 Metodologia

A carga principal é um elemento que tem como finalidade a absorção da energia gerada, exercendo a função para a qual foi projetada, gerando trabalho das mais diversas formas, calor, movimento, iluminação, etc. Já a carga lastro é projetada para absorver energia gerada, porém, com a finalidade de manter a potência ativa vista pelo gerador sempre constante.

Para o sistema de geração utilizou-se um gerador de indução assíncrono acionado por um motor de corrente contínua, que tem velocidade controlada por tiristores. A Figura 8.3 mostra as máquinas utilizadas para o sistema de geração. A Tabela 8.1 mostra os dados de placa do motor de indução, funcionando como gerador. A Tabela 8.2 mostra os dados da máquina primária que aciona o gerador de indução.

O controle de frequência foi feito por um sistema de malha fechada, conforme a Figura 8.2. O sistema coleta informações da frequência gerada pela máquina e compara com um valor de referência. De acordo com o valor do desvio, o controlador atua com o objetivo de corrigi-lo, enviando sinais lógicos binários para chaves estáticas tiristorizadas, aumentando ou diminuindo a potência ativa absorvida pela carga lastro, conforme a necessidade.



Figura 8.3: Grupo-gerador para experiência com lógica binária

O número de arranjos de cargas define a quantidade de combinações possíveis para a potência total absorvida pela carga lastro, conforme a equação (8.1.1), onde  $n$  é o número de arranjos de carga disponível.

$$numcombinacoes = 2^n \quad (8.1.1)$$

Usaram-se, neste projeto, quatro arranjos trifásicos de lâmpadas para a carga lastro, com suas potências distribuídas de acordo a expressão (8.1.2).

$$P_a = \frac{P_t - \sum_{i=a+1}^n P_i}{2^a - 1} \quad (8.1.2)$$

Partindo de uma potência trifásica total de 600 W, encontrou-se a potência para cada arranjo da carga lastro, cujos resultados foram para  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$  320 W, 160 W, 80 W e 40 W respectivamente.

A carga lastro foi formada por quatro arranjos trifásicos de lâmpadas, sendo cada um formado por uma combinação de lâmpadas de modo a formar cargas de potência trifásica de 45 W, 75 W, 141 W e 300 W.

Tabela 8.1: Dados do motor de indução para experiência com lógica binária

Potência	1,2 CV
Tensão	220 V
Corrente nominal	3,6 A
Frequência	60 Hz
Velocidade	1740 RPM

Tabela 8.2: Dados da máquina primária para experiência com lógica binária

Tipo	Motor CC
Potência	1,7 kW
Tensão de armadura	220 V
Corrente de armadura	7,72 A
Velocidade	1500 RPM
Corrente de campo máxima	0,6 A

Tabela 8.3: Possíveis combinações para a carga lastro

Número decimal	Número binário			
	45 W	75 W	141 W	300 W
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

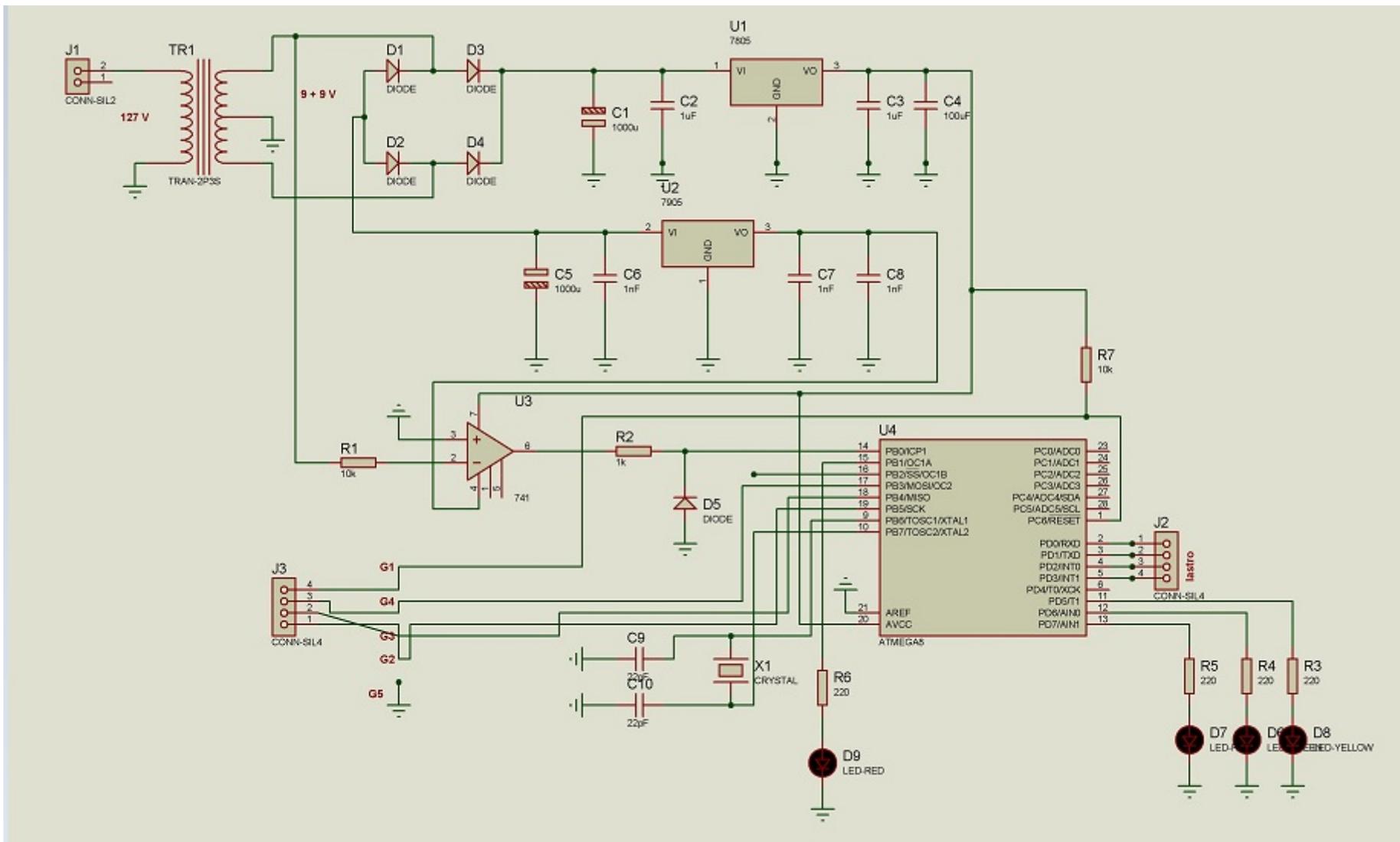


Figura 8.4: Circuito eletrônico para controle de frequência

Inicialmente foi ajustado o microprocessador para realizar cada variação de carga em um tempo de 500 ms, já que era esperada uma resposta rápida da frequência com a variação de carga.

O uso de lâmpadas como carga lastro foi escolhida para obter um resultado visual do controle. As potências foram limitadas aos valores comerciais disponíveis. Na prática, podem-se usar resistores e obter quaisquer valores de potência.

A contagem binária se dá conforme mostra a Tabela 8.3. Um valor zero (0) indica que o conjunto de lâmpadas está desligado e um (1) que elas estão ligadas. Como pode ser observado, há quinze combinações possíveis para a carga lastro.

A lógica do controlador foi escrita em um microcontrolador AVR ATMEGA8. Trata-se de um microcontrolador de 8 bits, com baixo consumo e com capacidade de executar uma instrução por ciclo de *clock* devido à conexão direta com seus 32 registradores gerais e com uma frequência de funcionamento numa faixa de 0 MHz a 10 MHz. Para a inserção do microcontrolador, montou-se o circuito eletrônico mostrado na Figura 8.4, em uma placa de circuito impresso. Realizou-se também sua simulação no software Proteus.

Um transformador 220 V/±9V recebe a onda de tensão diretamente dos terminais do gerador. Este sinal, através de uma ponte retificadora de quatro diodos e reguladores de tensão de +5V e -5V, geram dois sinais de corrente contínua, um de +5V e outro de -5V, usados para alimentar o microcontrolador e o amplificador operacional 741.

O mesmo sinal alternado de 9 V do secundário do transformador é também enviado ao circuito do amplificador operacional 741, que transforma a onda senoidal em uma onda quadrada de mesma frequência e sem a parte negativa. Esta onda é enviada para o pino 14 do microcontrolador.

A programação do microcontrolador foi feita na linguagem Pascal. Através de um contador de 16 bits com frequência de *clock* de 10 MHz dividido por 64, o sinal de entrada é comparado com o sinal do *clock*, que vai avançando sua contagem sempre que o sinal de entrada estiver no seu valor de “alto”. A frequência da tensão é dada pela expressão (8.1.3), com uma precisão de 0,1 Hz.

$$Freq = \frac{10000000}{\text{valor} - \text{do} - \text{contador}} \quad (8.1.3)$$

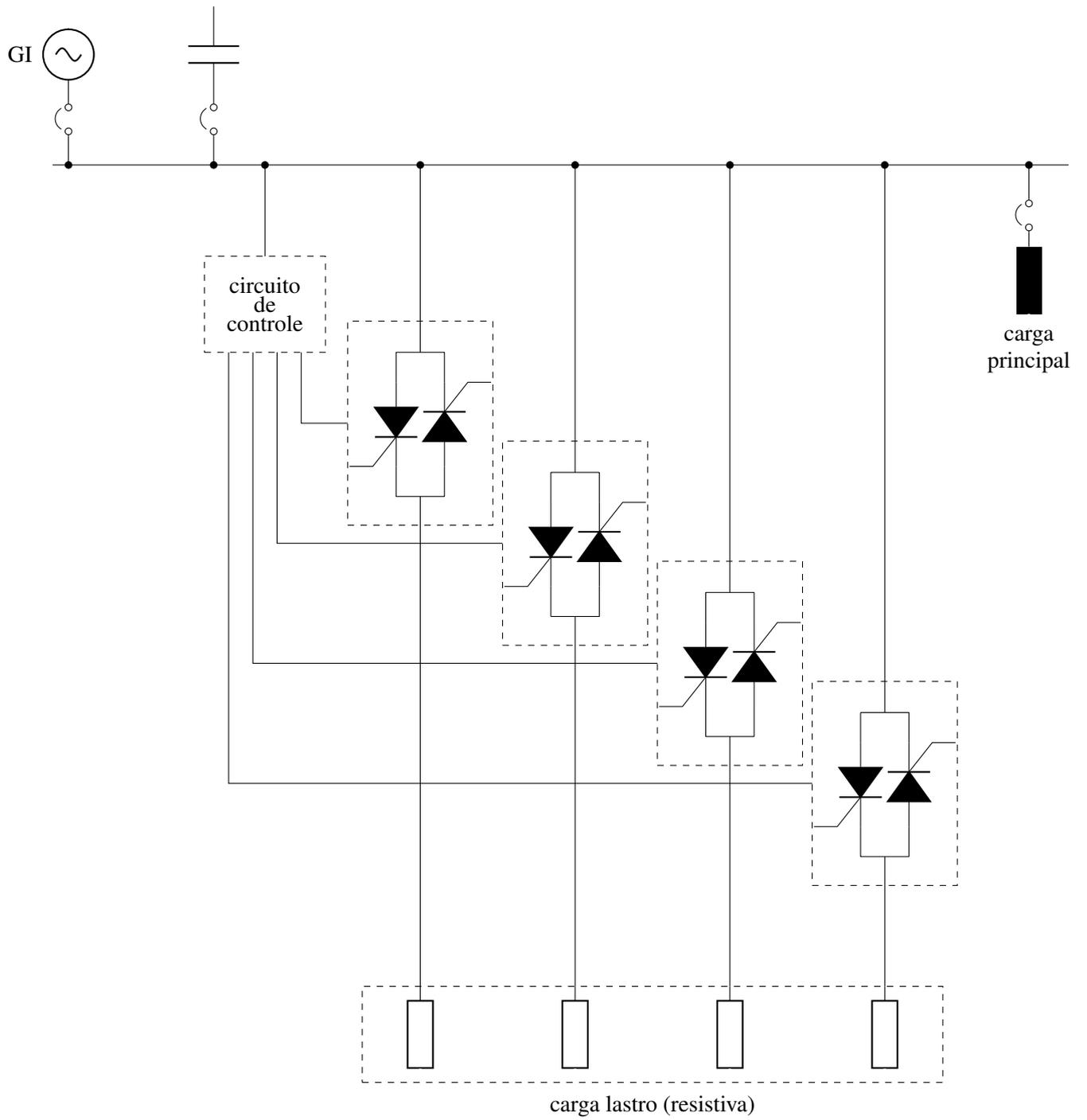


Figura 8.5: Diagrama unifilar para a lógica binaria

Onde valor do contador é o valor da contagem do contador.

O valor de frequência é então comparado com um intervalo de referência. Se a frequência lida estiver acima da faixa de frequência especificada, um sinal lógico 1 é enviado a uma das chaves estáticas, ligando a carga lastro de 45 W. Se na próxima leitura de frequência for constatado um valor ainda maior do que o intervalo especificado, um novo sinal lógico 1 é enviado para a chave estática correspondente a carga de 75 W e um sinal 0 (zero) para a chave estática da carga de 45 W (ver Tabela 8.3). Este processo repete-se até que a frequência esteja dentro do intervalo de referência. Os LED's ligados aos pinos 11, 12 e 13 sinalizam a condição atual do sistema. O LED vermelho indica uma frequência acima do intervalo especificado, o LED amarelo uma frequência abaixo do intervalo especificado e o LED verde uma frequência dentro do intervalo de referência. A Figura 8.7 mostra a placa montada com o circuito da Figura ??.

Por fim, montou-se o sistema completo para o estudo e verificação do sistema de controle, como ilustrado na Figura 8.5. As chaves trifásicas representam os relés de estado sólido ou chaves estáticas, que são componentes eletrônicos totalmente em estado sólido, ou seja, não possuem elementos mecânicos ou qualquer tipo de peça móvel. A utilização destes dispositivos elimina a utilização de contadores mecânicos, que se desgastam ao longo do tempo. A Figura 8.8 mostra um dos relés de estado sólido utilizados no sistema.

## 8.2 Análise e Resultados

Verificou-se o funcionamento das chaves estáticas conectando a chave entre a rede elétrica e uma carga trifásica composta por lâmpadas ligadas em delta. Ao aplicar um sinal de tensão contínua de +5V em seu terminal de entrada, verificou-se a energização das lâmpadas.

A Figura 8.6 mostra a pinagem do microncontrolador ATMEGA8.

Os primeiros testes foram realizados a fim de verificar o funcionamento do sistema de controle e ajustar seus parâmetros.

Inicialmente, o controle foi ajustado para manter a frequência na faixa 59,5 Hz a 60,5 Hz.

Porém, não foi possível operar o gerador com esta frequência sem que a tensão se elevasse muito, uma vez que o sistema não dispunha de uma malha de controle de tensão, apenas controle de frequência. Ajustou-se, então, o sistema para uma frequência próxima a 54 Hz com uma faixa de variação permissível de  $\pm 1$  Hz.

Ao realizar os primeiros testes com o sistema de controle observou-se certa instabilidade no sistema. Quando parte da carga principal era retirada, o sistema de controle atuava, acionando as cargas lastros de acordo com as combinações binárias da Tabela 8.3. Porém, em alguns ensaios o sistema não conseguia encontrar uma combinação e se manter nela, e outras vezes, observou-se variações muito bruscas na tensão da carga, fazendo com que o sistema de controle desligasse.

Tais instabilidades podem ser resultados do tempo ajustado entre cada variação binária, da faixa de ajuste da frequência de referência e ainda da inexistência de uma malha de controle de tensão.

Com intuito de diminuir tais instabilidades foram feitas alterações no controle, elevando o intervalo de tempo entre cada variação da carga lastro, de 500 ms para 2 s, e reduzindo a frequência da tensão aplicada à carga, de modo a ficar mais próxima ao valor de ajuste (54 Hz).

Realizaram-se então duas análises a fim de verificar o controle de frequência: um ensaio sem controle e um ensaio com controle.

### **8.2.1 Ensaio sem controle de frequência**

Para o ensaio sem controle ajustou-se o sistema de geração para carga plena com uma frequência e tensão próximas a 54 Hz e 220 V. Foram feitos vários chaveamentos da carga e verificado os valores de tensão e frequência para cada uma, sendo os dados exibidos na tabela 8.4.

Pode ser observado na Tabela 8.4 que a frequência e a tensão variam significativamente com a mudança de carga.

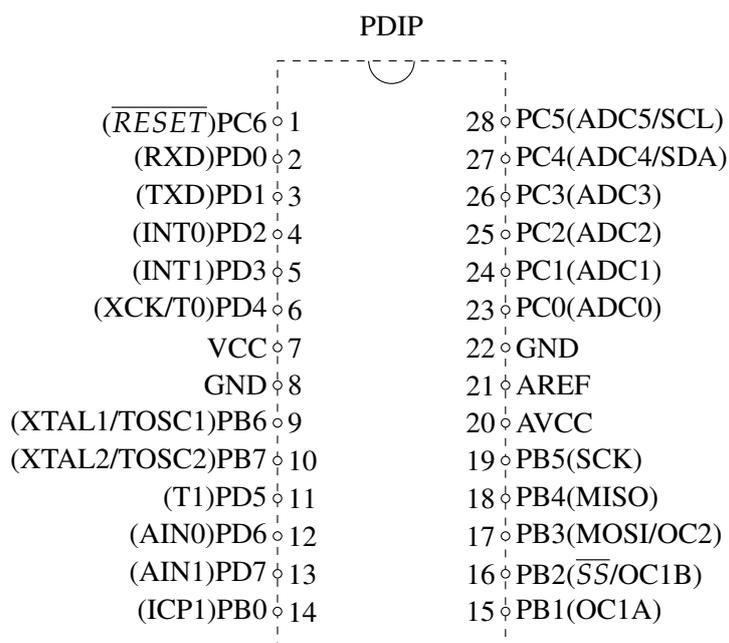


Figura 8.6: Pinagem do microcontrolador ATMEGA8

Tabela 8.4: Medidas de tensão e frequência sem controle

	Carga[W]	Tensão[V]	Frequência[Hz]
Plena carga	650	213,30	54,35
	550	224,45	54,59
	500	233,40	54,07
	450	245,00	55,25
Sem carga	0	269,15	56,56

### 8.2.2 Ensaio com controle de frequência

Do mesmo modo, para o ensaio com controle, ajustou-se o sistema de geração para carga plena com uma frequência e tensão próximas a 54 Hz e 220 V. Foram feitos vários chaveamentos da carga principal, verificando o controle por meio da carga lastro, e anotado os valores de tensão e frequência para cada uma, sendo os dados exibidos na Tabela 8.5 .

Como pode ser observado na Tabela 8.5, no sistema com controle, a frequência se mantém praticamente constante, havendo uma pequena variação entre as variações de carga.

A Figura 8.9 mostra a placa eletrônica mantendo a frequência dentro da faixa ajustada (LED verde aceso).

A variação da tensão também é reduzida em comparação ao sistema sem controle, porém ainda é uma variação significativa. Esta variação de tensão deve-se ao fato de não haver uma malha para controle de tensão para o sistema.

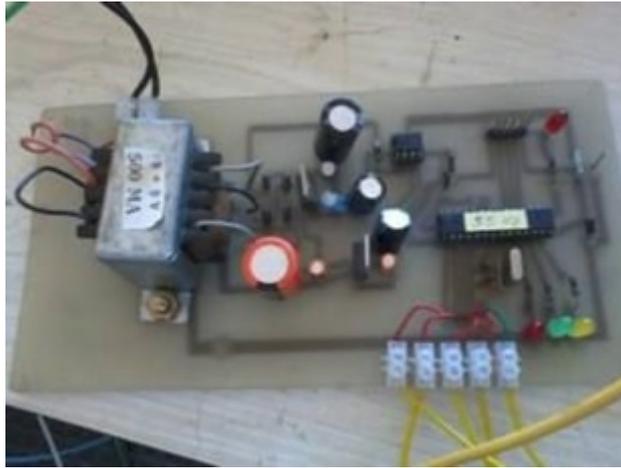


Figura 8.7: Placa eletrônica para controle de frequência



Figura 8.8: Relé de estado sólido

Outra solução viável para o problema da estabilidade da frequência é por meio de um controle contínuo, onde o sistema de controle atue no ângulo de disparo de tiristores em antiparalelo para aumentar ou diminuir a potência absorvida pela carga lastro.

Também foi implementado um controle contínuo em laboratório, onde se observou uma injeção de corrente com componentes harmônicas no sistema.

Para o sistema de controle discreto, foi observada a tensão aplicada à carga por meio de um osciloscópio. Através da forma de onda apresentada na Figura 8.10 pode-se notar a uma tensão praticamente sem harmônicos.

A forma de onda praticamente livre de harmônicos deve-se ao fato dos tiristores das chaves estáticas conduzirem com ângulo  $0^\circ$ , ou seja, só há dois estados para as chaves: ligado ou desligado.

Tabela 8.5: Medidas de tensão e frequência com controle

	Carga[W]	Tensão[V]	Frequência[Hz]
Plena carga	650	201,00	54,35
	550	210,45	54,45
	500	216,00	54,55
	450	214,5	54,38
Sem carga	0	228,55	54,59



Figura 8.9: Placa mantendo a frequência dentro da faixa ajustada (LED verde aceso)

### 8.3 Programação do microcontrolador

O texto a seguir é o código-fonte em linguagem Pascal da programação do microcontrolador.

```
//
// 22/08/2013 Versao 54 Hz
// RC int 8MHZ
//
program Int_ICP1;
uses ;
// LCD module connections
var LCD_RS : sbit at PORTC3_bit;
var LCD_EN : sbit at PORTC2_bit;
```

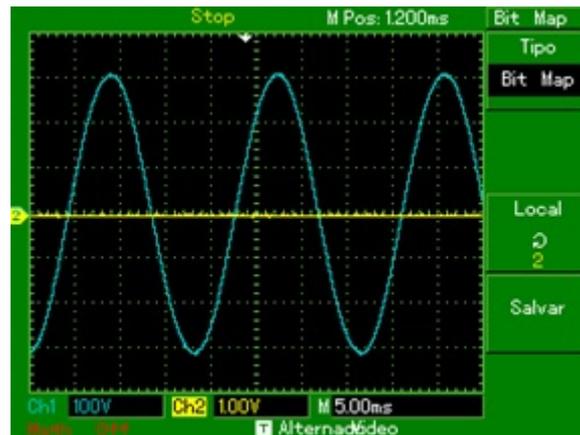


Figura 8.10: Forma da tensão na carga para o sistema com controle discreto de frequência

```

var LCD_D4 : sbit at PORTB2_bit;
var LCD_D5 : sbit at PORTB3_bit;
var LCD_D6 : sbit at PORTB4_bit;
var LCD_D7 : sbit at PORTB5_bit;

var LCD_RS_Direction : sbit at DDC3_bit;
var LCD_EN_Direction : sbit at DDC2_bit;
var LCD_D4_Direction : sbit at DDB2_bit;
var LCD_D5_Direction : sbit at DDB3_bit;
var LCD_D6_Direction : sbit at DDB4_bit;
var LCD_D7_Direction : sbit at DDB5_bit;

// End LCD module connections

var
    txt2,txt3 : string[3];
    txt1      : string[5];
    freq_st   : string[9];
    lastro,i,j,l,h,led,
    led567,saida,soma : Byte;
    conta,freq      : word;

procedure Int_ICP1(); iv IVT_ADDR_TIMER1_CAPT; ics ICS_AUTO;
begin

```

```

tcnt1h:=0;
tcnt1l:=0;
L:=icr1L;
H:=icr1H;
conta:=H*256+L
end;
Procedure Delay1;
begin
  for i:=1 to 10 do
    begin
      delay_ms(250);
      asm
        WDR      //reseta wdog
      end;
    end;
  end;
end;
begin
  DDRB.1:=1;    // PORTB.1 como saída (LED PISCA)
  DDRD:=$FF;    // Porta D toda como saída
                // PB0-PB3 bits lastro,
                // PB4 bit reservado
                // PB5 Freq > 61 Hz
                // PB6 Freq na faixa ok
                // PB7 Freq < 59 Hz

// End LCD module connections
var
  txt2,txt3    : string[3];
  txt1         : string[5];
  freq_st      : string[9];

```

```

    lastro,i,j,l,h,led,
    led567,saida,soma      : Byte;
    conta,freq             : word;
procedure Int_ICP1(); iv IVT_ADDR_TIMER1_CAPT; ics ICS_AUTO;
begin
    tcnt1h:=0;
    tcnt1l:=0;
    L:=icr1L;
    H:=icr1H;
    conta:=H*256+L
end;
Procedure Delay1;
begin
    for i:=1 to 10 do
    begin
        delay_ms(250);
        asm
            WDR      //reseta wdog
        end;
    end;
end;
begin
    DDRB.1:=1;      // PORTB.1 como saída (LED PISCA)
    DDRD:=$FF;      // Porta D toda como saída
                    // PB0-PB3 bits lastro,
                    // PB4 bit reservado
                    // PB5 Freq > 55 Hz
                    // PB6 Freq na faixa ok
                    // PB7 Freq < 53 Hz

```

```

tccr1b.7:=1; //noise filter
tccr1b.6:=0; //Pino ICP1 (14 pb0) trigger descida
tccr1b.2:=0; // 001 divide por 1
tccr1b.1:=1; // 010 divide por 8
tccr1b.0:=1; // 011 divide por 64
tmsk.5:=1; //habilita pino14
sreg.7:=1; //libera interrupcoes
portd.5:=1;
portd.6:=1;
portb.1:=1;
delay_ms(1000); // Tempo de inicialização do lcd
portd.5:=0;
portd.6:=0;
portd.7:=0;
portb.1:=0;
Lcd_Init(); // Initialize LCD
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
LCD_Out(2,1,'REG. CARGA');
lastro:=0;
asm
    WDR //reseta wdog
end;
wdtcr:=%00011000; // habilita Wdog e seta contagem
wdtcr:=%00001101; // time out: 500 ms
repeat soma:=lastro.3*53+lastro.2*27+lastro.1*13+lastro.0*7;
    ByteToStr(soma,txt1);
    txt1:=txt1+'%';
    LCD_Out(2,12,txt1);

```

```

//freq[hz]=clock/(conta*presaler)
freq:=125000*10/conta; // Cristal 8 mhz
//freq:=156250*10/conta; // Cristal 10 mhz
if freq>1000 then freq:=999;
if freq<100 then freq:=100;
i:=freq div 10;
j:=freq-i*10;
bytetostr(i,txt2);
bytetostr(j,txt3);
ltrim(txt2);
ltrim(txt3);
freq_st:=txt2+'.'+txt3+'Hz';
LCD_Out(1,1,freq_st);
led567:=%01000000;
if freq<500 then //591
begin
  if lastro>0 then lastro:=lastro-1;
  led567:=%10000000;
  delay1;
end;
  if freq>530 then //609
begin
  if lastro<15 then lastro:=lastro+1;
  led567:=%00100000;
  delay1;
end;
saida:=lastro or led567;

// if freq>600 then saida:=saida or %00100000;

```

```
                // if freq<600 then saida:=saida and %11011111;
portd:=saida;
led:= led xor 1;
portb.1:=led;
delay_ms(100);
asm
    WDR    //reseta wdog
end;
until false;
end.
```

# Capítulo 9

## Conclusão

O sistema de geração que utiliza motor de indução funcionando como gerador proposto nesta tese implementado na microcentral hidrelétrica de uma propriedade rural no sul do Estado de Minas Gerais, apresentou resultados satisfatórios, com estabilidade da tensão gerada como resposta a distúrbios na tensão, o que ocorre quando a carga da fazenda varia. O uso de apenas uma malha de controle de tensão tornou possível manter estável a tensão nos terminais do gerador de indução. Quanto à frequência, em uma situação de alta carga na fazenda a frequência era 58,4 Hz, enquanto que em uma situação de baixa carga na fazenda 63,5 Hz. Isto significa que a frequência manteve-se em uma faixa de  $-1,6$  Hz a 3,5 Hz em torno de seu valor nominal 60 Hz. Esta faixa de variação de frequência é tolerável para cargas no meio rural.

A redução no tamanho do módulo de disparo dos tiristores permitiu a operação ininterrupta da microcentral, ao longo de um ano e meio, sem emprego de mão-de-obra especializada. Durante este período nenhum tiristor falhou. Isto prova que o sistema proposto nesta tese é robusto e confiável. Esta redução no tamanho do módulo de disparo foi propiciada pelo uso da placa SEMIKRON MP410T, a qual é uma placa comercial de prateleira. O controle simples e eficiente através do uso de apenas uma malha de tensão também foi decisivo para que mão-de-obra não especializada pudesse operar a microcentral.

Uma instalação rural que requer mão-de obra especializada pode tornar inviável a implementação do sistema proposto nesta tese devido ao custo social envolvido com a falta de mão-de-obra qualificada. Desde que haja suficiente treinamento, a operação do sistema pode ser realizada

pelo proprietário da fazenda ou até mesmo por um trabalhador rural. Um manual de operação simples e eficiente descrito no capítulo 7 tem sido usado para este propósito.

Uma sugestão para uma futura pesquisa é que ao invés de carga lastro controlada por tiristores, como que é utilizada nesta tese, que causa o aparecimento de harmônicos no sistema, é a possibilidade do emprego de uma técnica de lógica binária de chaveamento, ou seja, um controle discreto de carga. Trabalho, aliás, que já foi realizado em laboratório, como descrito no Capítulo 8. Com esta técnica de lógica binária aplicada a sistemas de geração isolados constatou-se a dificuldade em se obter uma frequência na tensão gerada estável em frequência em torno de 60 Hz, pois a tensão aumenta muito neste caso. Por causa disto, os ensaios com lógica binária foram feitos em 54 Hz. O sistema de controle utilizando lógica binária e chaves estáticas mostrou-se eficaz em relação a um sistema chaveado com contatores mecânicos por não apresentar desgastes ao longo do tempo. Outra vantagem desse sistema foi a não introdução de correntes harmônicas em relação a um sistema de controle contínuo, que atua no ângulo de disparo de tiristores para controlar a frequência. O controle utilizado atua apenas na frequência, havendo variações na tensão durante os ensaios. Sendo assim, pode-se pensar na utilização de um controle de tensão em paralelo com o de frequência, de modo a aumentar a qualidade da energia gerada.

Como continuação deste trabalho, pretende-se implementar um sistema de controle similar, empregando também lógica binária, mas com controle de tensão, ao invés de controle de frequência, este tipo de controle a ser implementado é mais adequado para utilização em gerador de indução em operação isolada.

Emfim, estudou-se o desenvolvimento de um sistema de controle digital de tensão e frequência simples para aplicação em pequenos aproveitamentos de microcentrais hidrelétricas do meio rural. O objetivo foi atingido empregando placa dedicada disponível no comércio, empregando tecnologia de fácil disseminação. Além disso, também foi desenvolvido um sistema de fechamento emergencial da comporta para evitar danos mecânicos ao grupo gerador e sobretensões inadmissíveis nos terminais do gerador. Em microcentrais hidrelétricas via-de-regra não existe sistema de fechamento emergencial de comporta. A análise de custo comparando o sistema proposto nesta tese com o sistema tradicional com regulador mecânico de velocidade é realizada em [24].

# Referências

- [1] C.P. Ion e C. Marinescu. «Autonomous micro hydro power plant with induction generator». Em: *Renewable Energy* 36.8 (2011), pp. 2259–2267. ISSN: 0960-1481. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.028>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111000504>.
- [2] I. Șerban e C. Marinescu. «Aggregate load-frequency control of a wind-hydro autonomous microgrid». Em: *Renewable Energy* 36.12 (2011), pp. 3345–3354. ISSN: 0960-1481. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.012>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111002382>.
- [3] B. Singh, S. S. Murth e S. Gupta. «An Improved Electronic Load Controller for Self-excited Induction Generator in Micro-Hydel». Em: *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE*. 2003, pp. 2741–2746. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2003.1280681>. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1280681>.
- [4] J. M. Chapallaz, J. D. Ghali e P. Eichenberger. *Manual on Induction Motors Used As Generators*. Vol. 10. Vieweg e Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1990.
- [5] A. J. J. Rezek. *Fundamentos básicos de máquinas elétricas, teoria e ensaios*. Itajubá, Brasil: Synergia e Acta, 2011.
- [6] M. Godoy Simões e Felix A. Farret. *Integration of Alternative Source of Energy: design and analysis with induction generators*. 2nd. Boca Raton: CRC Press, 2008, p. 315.

- [7] A. V. Braga et al. «Controle digital aplicado a gerador de indução isolado para atendimento de pequenas comunidades rurais.» Em: *PCH Notícias & SHP News (atual hidro & hydro)* 50 (2011), pp. 29–34.
- [8] A. V. Braga et al. «Controle digital de carga lastro para operação isolada de gerador de indução para aplicação no meio rural». Em: *VII Conferência de Centrais Hidrelétricas*. 2011.
- [9] A. V. Braga et al. «Controle digital aplicado a gerador de indução, operação isolada para utilização no meio rural». Em: *VIII Conferência de Centrais Hidrelétricas*. 2012.
- [10] A. V. Braga et al. «Controle digital aplicado a gerador de indução, operação isolada para utilização no meio rural». Em: *10th IEEE/IAS Conference in Industry Applications(INDUSCON)*. 2012. URL: <http://www.eletrica.ufpr.br/anais/induscon/2012/Data/iREP1588.pdf>.
- [11] A. V. Braga et al. «Aplicação de gerador de indução, operação isolada para utilização no meio rural». Em: *VIII Seminário de Meio Ambiente e Energias Renováveis(SEMEAR)*. 2013.
- [12] A. C. Fernandes et al. «Propostas de geração de energia elétrica, operação isolada, para máquina síncrona de imã permanente, utilizando carga lastro, com regulação de tensão e regulação de frequência». Em: *1º Seminário de Recursos Naturais, Sustentabilidade e Tecnologias Ambientais*. Itajubá, Acta. 2014.
- [13] A. V. Braga et al. «Small-hydro Floodgate Automation using Induction Generator in Isolated Operation». Em: *Mechanical and Automation Engineering (MAE), 2nd International Conference on Advances on*. 2015. ISBN: 978-1-63248-045-3. DOI: <http://dx.doi.org/10.15224/978-1-63248-045-3-41>.
- [14] F. Fröhr e F. Orttenger. *Introduction to Electronic Control*. (in Spanish). Spain: Marcombo S. A., 1986.
- [15] A. V. Braga. «Modelagem, ajuste e implementação de um sistema de controle de tensão para o gerador de indução». Tese de mestrado. Universidade Federal de Itajubá, 2002. URL: <http://saturno.unifei.edu.br/bim/0031621.pdf>.

- [16] J. K. Chatterjee e P. J. Chauhan. «Single-loop vs two-loop voltage and frequency control of isolated SEIG based RECS». Em: *Energy, Automation, and Signal (ICEAS), 2011 International Conference on*. 2011, pp. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAS.2011.6147090>. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6147090>.
- [17] A. N. C. Viana. *Bombas funcionando como turbinas*. Itajubá, Brasil: Synergia e Acta, 2011.
- [18] Mariano Arriaga. «Pump as turbine – A pico-hydro alternative in Lao People’s Democratic Republic». Em: *Renewable Energy* 35.5 (2010), pp. 1109–1115. ISSN: 0960-1481. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.022>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109003863>.
- [19] Fazenda Boa Esperança. Mapa de localização, acessado em: 2-outubro-2014. 2014. URL: [www.fazendaboa.com/site/como/](http://www.fazendaboa.com/site/como/).
- [20] KSB. «Hydropower from pumps-as-turbines». Em: *World Pumps* 2012.1 (2012), pp. 14–15. ISSN: 0262-1762. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0262-1762\(11\)70393-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0262-1762(11)70393-5). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262176211703935>.
- [21] CEMIG. acessado em: 26-fevereiro-2015. 2015. URL: [http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores\\_de\\_tarifa\\_e\\_servicos.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx).
- [22] A. J. J. Rezek et al. «Operação do gerador de indução com controle de tensão e frequência». Em: *VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas*. 2008.
- [23] I. Barbi. *Eletrônica de Potência*. Edição do autor. Florianópolis, 2000, p. 217.
- [24] A.V. Braga et al. «Isolated induction generator in a rural Brazilian area: Field performance tests». Em: *Renewable Energy* 83 (2015), pp. 1352–1361. ISSN: 0960-1481. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.057>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115300215>.

- [25] WARD. acessado em: 2-outubro-2014. 2014. URL: [www.ward.com.br/umx310.html](http://www.ward.com.br/umx310.html).
- [26] T. L. Daher. *Automação da comporta superior do projeto energia de baixo custo –BFT/MIG (bomba funcionando como turbina/motor de indução funcionando como gerador) – Fazenda Boa Esperança*. Rel. téc. Relatório de pesquisa de iniciação científica, PIBIC FAPEMIG 2011/2012. Universidade Federal de Itajubá, 2012.
- [27] G. R. Marques et al. «Controle de Frequência do Gerador de Indução em operação isolada, utilizando lógica binária». Em: *hidro & hydro- PCH Notícias & SHP News* 61.2 (2014), pp. 8–14. ISSN: 1676-0220. URL: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/hidro-hydro-61-pag-08a14.pdf>.
- [28] G. R. Marques et al. «Frequency Control of Induction Generator in Isolated Operation Using Binary Logic». Em: *Mechanical and Automation Engineering (MAE), 2nd International Conference on Advances on*. 2015. ISBN: 978-1-63248-045-3. DOI: <http://dx.doi.org/10.15224/978-1-63248-045-3-42>.

# Índice

- AEGIS, 31
- amplificador operacional 741, 74
- anti-paralelo, 31
- aplicação isolada de baixo custo, 16
- auto-excitação, 15
- autotransformador, 28, 30
  
- banco de capacitores, 15, 28
- baterias, 40
- bomba funcionando como turbina (BFT), 18
  
- campo magnético, 15
- canal de adução, 37
- carga lastro, 16, 28, 76
- carga principal, 16
- casa de máquinas, 28
- caso de falha nos relés, 43
- chave da carga principal, 63
- chave permissível, 66, 68
- chaves estáticas, 76
- circuito de comando da comporta, 40
- circuito de condicionamento, 34
- circuito de disparo, 18
- circuito de referência, 32
- compensador estático, 17
- componentes do sistema de controle, 32
- comporta, 37
- conexões do relé de sobretensão, 39
- conexões do relé de subtensão, 39
- constante de tempo, 32
- contribuição desta tese, 17
- contribuições deste trabalho, 37
- controlador eletrônico de carga, 16
- controle analógico, 18
- controle de velocidade, 15
- conversor AC-AC, 16, 31
- conversores CA-CA, 21
  
- demanda, 15
- demanda média, 18
- diagrama esquemático, 28
- diagrama unifilar, 25
- divisor de tensão, 33
  
- Ensaio com controle de frequência, 78
- Ensaio sem controle de frequência, 77
- Estado de Minas Gerais, 18
  
- faixa de variação de frequência, 17
- Fazenda, 18

ganho do regulador, 32  
gerador de indução, 15  
gerador síncrono, 15  
harmônicos, 79  
inversor de frequência, 16  
lógica binária, 69  
método de otimização de reguladores, 17  
mão-de obra especializada, 87  
magnetização, 15  
malha aberta, 69  
malha de controle de frequência, 17  
malha fechada, 17, 69  
manual de operação da microcentral, 58  
manutenção, 15, 50  
medidor digital KRON, 66  
microcentral hidrelétrica, 17  
microcontrolador AVR ATMEGA8, 74  
motor de corrente contínua, 39  
motor de indução como gerador, 15  
onda quadrada, 74  
operação da microcentra, 18  
operação isolada, 15  
operação paralela, 15  
parametrização, 32  
placa eletrônica, 32  
ponte de tiristores, 28  
ponte retificadora, 33  
potência dissipada, 31  
potência elétrica, 15  
potência magnetizante, 15  
potência mecânica, 15  
potência reativa, 15, 28  
programação do microcontrolador, 74, 80  
queda de tensão gerada, 15  
realimentação, 35  
regulador mecânico, 15, 17  
relés de estado sólido, 76  
resistores de imersão, 30  
rotor em gaiola, 50  
SEMIKRON, 32, 35  
Serra da Mantiqueira, 18  
sistema de proteção, 37  
sistema proposto, 28  
sobretensão, 37  
tensão nominal a vazio, 15  
tiristor, 17  
transdutor de tensão, 32  
transistor, 17  
tubulação forçada, 17  
turbina, 15  
válvula de água manual, 61, 68  
válvula de admissão, 17  
WARD, 38