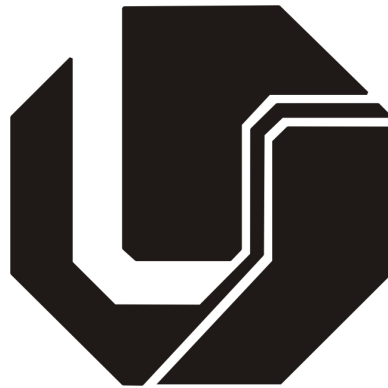


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

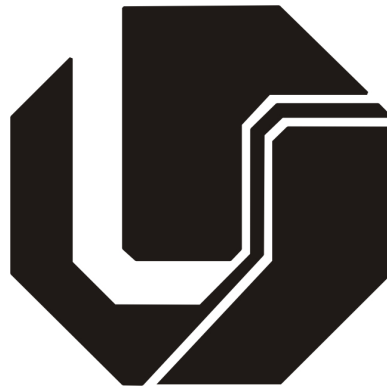


**CONTRIBUIÇÕES AO CONTROLE ELETRÔNICO
INTELIGENTE DE REGULADORES DE TENSÃO PARA
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM 13,8 KV**

RODRIGO RIMOLDI DE LIMA

**JULHO
2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**CONTRIBUIÇÕES AO CONTROLE ELETRÔNICO
INTELIGENTE DE REGULADORES DE TENSÃO PARA
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM 13,8 KV**

Dissertação apresentada por **Rodrigo Rimoldi de Lima** à
Universidade Federal de Uberlândia para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica aprovada em
20/07/2007 pela seguinte banca examinadora:

Prof. Geraldo C. Guimarães, Ph.D. – UFU (orientador)

Prof. Aloísio de Oliveira, Dr. – UFU

Prof. Adélio José de Moraes, Dr. – UFU

Prof. Edimar José de Oliveira, Dr. – UFJF

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- L732c Lima, Rodrigo Rimoldi de, 1980-
 Contribuições ao controle eletrônico inteligente de reguladores de tensão para sistemas de distribuição de energia em 13,8 kV / Rodrigo Rimoldi de Lima. - 2007.
 143 f. : il.
- Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
 Inclui bibliografia.
1. Energia elétrica - Distribuição - Teses. 2. Tiristores - Teses. I. Guimarães, Geraldo Caixeta. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.316

CONTRIBUIÇÕES AO CONTROLE ELETRÔNICO INTELIGENTE DE REGULADORES DE TENSÃO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM 13,8 KV

RODRIGO RIMOLDI DE LIMA

Dissertação apresentada por Rodrigo Rimoldi de Lima à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 20 de julho de 2007.

Prof. Geraldo C. Guimarães, Ph.D.
Orientador

Prof. Darizon A. de Andrade, Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

“Porque o Senhor dá sabedoria; da sua boca vem o conhecimento e a compreensão. Ele tem ajuda para os virtuosos; Ele é escudo para aqueles que vivem piedosamente. Para guardar o caminho do justo e proteger o caminho de Seus santos. Então compreenderás a verdade e a justiça, e todos os seus bons caminhos. Pois a sabedoria entrará em teu coração, e o conhecimento será agradável à tua alma. O discernimento te protegerá, e a prudência te guardará.”

Provérbios 2:6-11

*À minha querida esposa, Rejaine Alves de
Lima, e aos meus pais, Mauro e Rosângela.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, meu amado Senhor e supremo mestre, por sempre me munir de força, determinação, alegria, perseverança, inteligência e tantas outras coisas. Indubitavelmente, sem o Senhor eu não teria chegado até aqui.

À minha amada esposa e amiga, Rejaine Alves de Lima, pelo carinho, companheirismo e compreensão que me amparam e cativam dia após dia. Bem-aventurado sou eu por ter uma esposa como você.

Aos meus pais, Mauro e Rosângela, pelo amplo e diversificado investimento ao longo de toda minha vida, e por jamais medirem esforços para que eu voe cada vez mais alto. As instruções que recebi desde criança são responsáveis por aquilo que sou hoje. Eu tenho orgulho de ser filho de vocês.

Aos meus irmãos, sogro e sogra, cunhada, cunhado e sobrinhos por fazerem parte da minha história de vida e das minhas conquistas.

Aos meus pastores e amigos, Rubén e Imel, pelas instruções e orações regadas sempre com muito carinho e devoção.

Ao coordenador dos projetos em que atuo, Aloísio de Oliveira, por ser instrumento de Deus na minha vida e por acreditar e confiar sempre no meu trabalho. Acima de tudo, trabalhar com o senhor tem sido uma experiência amplamente enriquecedora.

Ao meu orientador, Geraldo Caixeta Guimarães, pelo constante amparo e pela oportunidade a mim concedida. Seu profissionalismo e bom humor são inspiradores.

À Universidade Federal de Uberlândia, através da Faculdade de Engenharia Elétrica, por proporcionar uma formação diferenciada e o contato com um amplo e admirável universo. Um agradecimento especial a todos os professores que fizeram ou que ainda fazem parte, de alguma forma, da minha jornada pelos diversos conhecimentos compartilhados até aqui.

Aos amigos e colegas, pelos apoios concedidos de diversas formas e pelos agradáveis momentos compartilhados dentro e fora do ambiente de trabalho.

À CAPES, pelo investimento e subsídio financeiro.

RESUMO

Lima, R. R. de, Contribuições ao Controle Eletrônico Inteligente de Reguladores de Tensão para Sistemas de Distribuição de Energia em 13,8 kV, FEELT/UFU, Uberlândia, 2007, 125p.

O desenvolvimento proposto neste trabalho excede à operação convencional até então praticada por apresentar em seu dorso um circuito eletrônico microcontrolado que atua sobre a carga do sistema por intermédio de 09 taps de regulação (02 de abaixamento, 06 de elevação e o central) de modo totalmente independente e com grande velocidade de resposta, posto que a regulação foi procedida com tempo limite de 04 ciclos da rede elétrica. Cada estágio de regulação proporciona uma variação de 5% sobre o valor nominal da tensão entregue à carga, estabelecendo um amplo controle para valores entre 70% e 110% do sinal fornecido à mesma. A comunicação desta com o módulo de controle mencionado é feita através de tiristores (SCR's) com refrigeração a ar.

Palavras-chave:

Distribuição de energia, microcontrolador, regulador de tensão, tiristores.

ABSTRACT

Lima, R. R. de, Contributions to the Intelligent Electronic Control of Voltage Regulators for Systems of Energy Distribution in 13,8 kV, FEELT/UFU, Uberlândia, 2007, 125p.

The development considered in this work exceeds to the conventional operation until then practised by being based on a microcontrolled electronic circuit that acts on the load of the system for intermediary of 09 taps of regulation (02 of reduction, 06 of rise and the central office) in total independent way and with great speed of reply, rank that the regulation was proceeded in a time limit of 04 cycles of the electric net. Each step of regulation provides a 5% variation on the nominal value of the tension delivers to the load, establishing an ample control for values between 70% and 110% of the supplied signal the same one. The communication of this with the module of mentioned control is made through thyristors (SCR' s) with refrigeration air.

Keywords:

Energy distribution, microcontroller, voltage regulator, thyristors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de <i>voltage sag</i>	2
Figura 1.2 – Exemplo de <i>voltage swell</i>	3
Figura 1.3 – Características em regime permanente de transformador ferorrressonante	7
Figura 1.4 – Conjunto motor-gerador	9
Figura 1.5 – Configurações comuns do compensador estático	10
Figura 1.6 – Elevação da tensão no alimentador devido aos capacitores <i>shunt</i> (a) e série (b)	11
Figura 1.7 – Esquema básico de operação de um restaurador dinâmico de tensão	13
Figura 1.8 – Esquema de um tipo de regulador de tensão em degraus	15
Figura 2.1 – Visão geral das unidades do regulador de tensão	23
Figura 2.2 – Exemplos de correções pretendidas para o valor RMS da tensão na carga	24
Figura 2.3 – Arranjo magnético do regulador de tensão	26
Figura 2.4 – Ilustração do RT tipo A implementado	27
Figura 2.5 – Controle eletrônico inteligente do RT	28
Figura 2.6 – Placa do módulo de leitura RMS	29
Figura 2.7 – Esquema ilustrativo do cálculo do valor RMS ciclo a ciclo	29
Figura 2.8 – Placa do módulo decisório	31
Figura 2.9 – Módulo do <i>drive</i> de isolamento produzido pela Varixx	32
Figura 2.10 – Visão interna do módulo do <i>drive</i> de isolamento	33
Figura 2.11 – Placa V.IOT9.01 desenvolvida para interfaceamento ótico	34
Figura 2.12 – Placa VOX6A para multiplexação dos sinais de disparo	34
Figura 2.13 – Formas de onda aplicadas no <i>gate</i>	35

Figura 2.14 – Módulo disparador dos tirtistores	36
Figura 2.15 – Arranjo físico dos tiristores na constituição dos tap's	36
Figura 2.16 – Conexão das chaves de um tap com os módulos do <i>drive</i>	37
Figura 2.17 – Esquema elétrico de uma chave (módulo) para os 2 semiciclos (+ e -).....	37
Figura 2.18 – Esquema da estrutura física de cada módulo	38
Figura 2.19 – Módulo de chaves estáticas.....	38
Figura 3.1 – Diagrama esquemático do módulo de leitura RMS	43
Figura 3.2 – Representação do TP.....	44
Figura 3.3 – Esquema de funcionamento do comparador ativo	46
Figura 3.4 – Respostas obtidas para o comparador ativo	47
Figura 3.5 – Circuito retificador de precisão de onda completa.....	47
Figura 3.6 – Respostas obtidas para o retificador de precisão de onda completa	48
Figura 3.7 – Pinagem do PIC18F2525	49
Figura 3.8 – Esquema do processo de conversão A/D do MCU	51
Figura 3.9 – Exemplo de procedimento de digitalização em 3 bits	52
Figura 3.10 – Erro tolerado durante a digitalização da tensão do retificador.....	53
Figura 3.11 – Medição do período de conversão A/D.....	53
Figura 3.12 – Medição do período de cálculo RMS (logo após a conversão A/D).....	56
Figura 3.13 – Desvio entre as leituras do mlutímetro e do PIC (sem ajustes)	57
Figura 3.14 – Aproximação entre as leituras após ajustes do caso A.....	61
Figura 3.15 – Aproximação entre as leituras após ajustes do caso B.....	63
Figura 3.16 – Aproximação entre as leituras após ajustes do caso C.....	65
Figura 3.17 – Aproximação entre as leituras após ajuste médio	67
Figura 3.18 – Faixas de atuação do RT em relação à resolução nº 505 da ANEEL	69
Figura 3.19 – <i>Software</i> de aquisição dos dados do módulo de leitura RMS	70

Figura 3.20 – Diagrama lógico do <i>decoder</i> CD74HCT4514	71
Figura 3.21 – Fluxograma operacional do módulo de leitura RMS	74
Figura 3.22 – Diagrama esquemático do módulo decisório	77
Figura 3.23 – Transdutor de corrente empregado na monitoração da corrente na carga	79
Figura 3.24 – Modelo do filtro PF implementado no projeto	80
Figura 3.25 – Curva de resposta em frequência do filtro PF	81
Figura 3.26 – Simulações computacionais do circuito de filtragem do sinal do TC	82
Figura 3.27 – Retificação do sinal filtrado do TC	83
Figura 3.28 – Fluxograma operacional do módulo decisório	87
Figura 4.1 – Sistema de regulação proposto para os testes em BT	92
Figura 4.2 – Elevação de tensão em 10%	94
Figura 4.3 – Elevação de tensão em 20%	94
Figura 4.4 – Elevação de tensão em 30%	94
Figura 4.5 – Abaixamento da tensão em 5%	95
Figura 4.6 – Abaixamento da tensão em 10%	95
Figura 4.7 – Elevação de tensão em 5%	96
Figura 4.8 – Elevação de tensão em 10%	96
Figura 4.9 – Elevação de tensão em 15%	96
Figura 4.10 – Elevação de tensão em 20%	97
Figura 4.11 – Elevação de tensão em 25%	97
Figura 4.12 – Elevação de tensão em 30%	97
Figura 4.13 – Abaixamento da tensão em 5%	98
Figura 4.14 – Abaixamento da tensão em 10%	98
Figura 4.15 – Elevação de tensão em 5%	99
Figura 4.16 – Elevação de tensão em 10%	99

Figura 4.17 – Elevação de tensão em 15%.....	100
Figura 4.18 – Elevação de tensão em 20%.....	100
Figura 4.19 – Elevação de tensão em 25%.....	100
Figura 4.20 – Elevação de tensão em 10%.....	101
Figura 4.21 – Detalhe do corte da tensão na carga e posterior re-inserção em zero	102
Figura 4.22 – Elevação de tensão em 5%.....	103
Figura 4.23 – Elevação de tensão em 5%.....	105
Figura 4.24 – Elevação de tensão em 10%.....	106
Figura 4.25 – Elevação de tensão em 15%.....	107
Figura 4.26 – Elevação de tensão em 20%.....	108
Figura 4.27 – Elevação de tensão em 25%.....	109
Figura 4.28 – Elevação de tensão em 30%.....	110
Figura 4.29 – Abaixamento da tensão em 5%.....	111
Figura 4.30 – Abaixamento da tensão em 10%.....	112
Figura 4.31 – Curva ITIC	113
Figura 4.32 – Estrutura montada para os ensaios em média tensão	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Relação entre as leituras do multímetro e do PIC (sem ajustes).....	56
Tabela 3.2 – Leituras do PIC após ajustes do caso A.....	60
Tabela 3.3 – Leituras do PIC após ajustes do caso B.....	62
Tabela 3.4 – Leituras do PIC após ajustes do caso C.....	64
Tabela 3.5 – Leituras do PIC após ajuste médio	66
Tabela 3.6 – Valores RMS de regulação em baixa (BT) e média tensão (MT)	69
Tabela 3.7 – Tabela verdade de mapeamento do CD74HCT4514	72

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1- Considerações Iniciais.....	1
1.2- Estado da Arte	5
1.2.1- Transformadores Ferorressonantes	7
1.2.2- Sistemas UPS On-line	8
1.2.3- Conjuntos Motor-Gerador	8
1.2.4- Compensadores Estáticos.....	9
1.2.5- Capacitores <i>Shunt</i>	10
1.2.6- Capacitores Série.....	11
1.2.7- Restauradores Dinâmicos de Tensão	12
1.2.8- Reguladores de Tensão (RT's) - Série	13
1.2.9- Reguladores de Tensão em Degraus	15

1.3- As Contribuições desta Dissertação.....	16
---	-----------

1.4- Estrutura da Dissertação	17
--	-----------

CAPÍTULO II

A TECNOLOGIA DO RT COM CONTROLE ELETRÔNICO INTELIGENTE (CEI)

2.1- Considerações Iniciais.....	19
---	-----------

2.2- Histórico	21
-----------------------------	-----------

2.3- Visão Geral do TDI	22
--------------------------------------	-----------

2.3.1- Bloco 01: RT com 09 Degraus	25
--	----

2.3.2- Bloco 02: Unidade de Controle do TDI	28
---	----

<i>a) Módulo de Leitura RMS</i>	<i>28</i>
---------------------------------------	-----------

<i>b) Módulo Decisório</i>	<i>30</i>
----------------------------------	-----------

2.3.3- Bloco 03: Módulo do Drive de Isolamento	31
--	----

<i>a) Placa de Interface Óptica para MT (Sub-bloco 03i).....</i>	<i>33</i>
--	-----------

<i>b) Módulo Multiplexador de Sinal Óptico (Sub-bloco 03ii)</i>	<i>34</i>
---	-----------

<i>c) Módulo Disparador dos Tiristores (Sub-bloco 03iii)</i>	<i>35</i>
--	-----------

2.3.4- Bloco 04: Módulo das Chaves Estáticas	36
--	----

2.4- Considerações Finais.....	39
---------------------------------------	-----------

CAPÍTULO III

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE ELETRÔNICO

3.1- Considerações Iniciais.....	40
---	-----------

3.2- Módulo de Leitura RMS.....	43
--	-----------

3.2.1- Visão Geral.....	43
-------------------------	----

3.2.2- Estrutura de <i>Hardware</i>	44
---	----

a) <i>Transformador de Potencial (TP)</i>	44
---	----

b) <i>Comparador Ativo</i>	45
----------------------------------	----

c) <i>Retificador de Onda Completa</i>	47
--	----

d) <i>Microcontrolador</i>	49
----------------------------------	----

e) <i>Decoder</i>	70
-------------------------	----

3.2.3- Estrutura de <i>Firmware</i>	73
---	----

3.3- Módulo Decisório	77
------------------------------------	-----------

3.3.1- Visão Geral.....	77
-------------------------	----

3.3.2- Estrutura de <i>Hardware</i>	78
---	----

<i>a) Transformador de Potencial (TP)</i>	78
<i>b) Transdutor de Corrente (TC)</i>	78
<i>c) Comparador Ativo</i>	80
<i>d) Filtro Passa-faixa (PF)</i>	80
<i>e) Retificador de Onda Completa</i>	83
<i>f) Microcontrolador</i>	84
3.3.3- Estrutura de <i>Firmware</i>	86
3.4- Considerações Finais	90

CAPÍTULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA APLICAÇÃO DO CEI

4.1- Considerações Iniciais	91
4.2- Ensaios em Baixa Tensão (BT)	91
4.2.1- Ensaio de Impacto sobre a Carga	93
<i>a) Primeiro Ensaio: 02 Lâmpadas em Série</i>	93
<i>b) Segundo Ensaio: 01 Osciloscópio Digital</i>	95
<i>c) Terceiro Ensaio: 01 Computador (Desktop)</i>	98

<i>d) Quarto Ensaio: 01 Motor de Indução Monofásico</i>	<i>101</i>
4.2.2- Ensaio de Avaliação da Comutação	102
4.2.3- Ensaio de Avaliação da Tensão RMS	104
4.3- Ensaaios em Média Tensão (MT)	115
4.4- Considerações Finais.....	116

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Conclusões.....	117
------------------------	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências Bibliográficas	121
---	------------

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O enfoque principal do estudo de qualidade da energia está direcionado à compreensão e tratamento das perturbações que podem ocorrer em um dado sistema elétrico. Tais perturbações normalmente respondem por falhas operacionais ou mesmo pelo mau funcionamento de equipamentos inseridos na rede em virtude das oscilações na tensão, corrente e/ou frequência nominal. Os efeitos destas variações podem ser sentidos em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária.

Estes problemas vêm se agravando rapidamente em todo o mundo por diversas razões, dentre as quais, destacam-se:

- Instalação cada vez maior de cargas não-lineares. O crescente interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorções harmônicas, podendo levar o sistema a condições de ressonância;
- Maior sensibilidade dos equipamentos aos efeitos aos distúrbios de curta duração.

As variações de tensão de curta duração (VTCD's), foco principal dos estudos de controle aqui desenvolvidos, podem ser caracterizadas por variações instantâneas, momentâneas ou temporárias. Geralmente, tais variações de tensão são ocasionadas pela energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou mesmo por intermitências nas conexões dos cabos de um dado sistema. Dependendo do local da falha e das condições vigentes, o resultado pode ser um afundamento temporário da tensão (*sag* ou *voltage sag*), uma sobretensão temporária (*swell* ou *voltage swell*) ou mesmo a completa interrupção do sistema elétrico.

O *voltage sag* é caracterizado, segundo a norma IEEE Std 1159 (1995) [1], como um decréscimo de 0,1 a 0,9 *pu* no valor RMS da tensão, cuja duração pode variar entre meio ciclo e 1 minuto. Em conformidade à mesma norma, o *voltage swell* perfaz-se como um acréscimo de tensão da ordem de 1,1 a 1,8 *pu* e mesma duração do *sag*. As figuras 1.1 e 1.2 ilustram os referidos fenômenos.

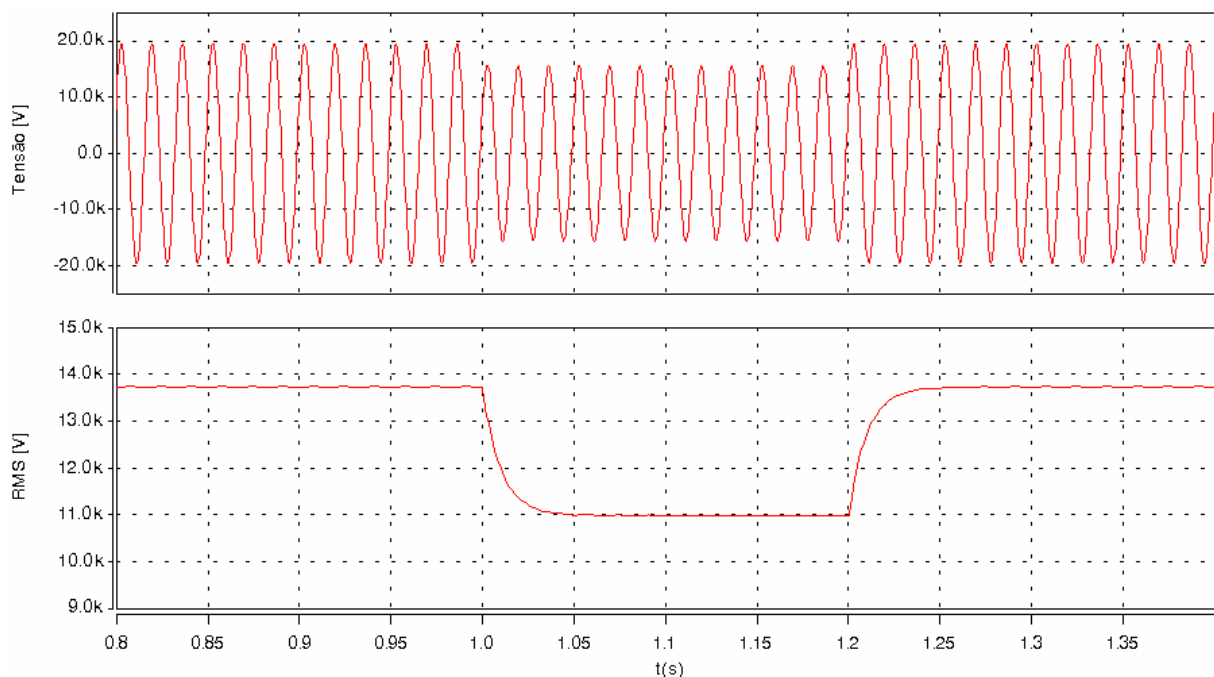


Figura 1.1 - Exemplo de *voltage sag*.

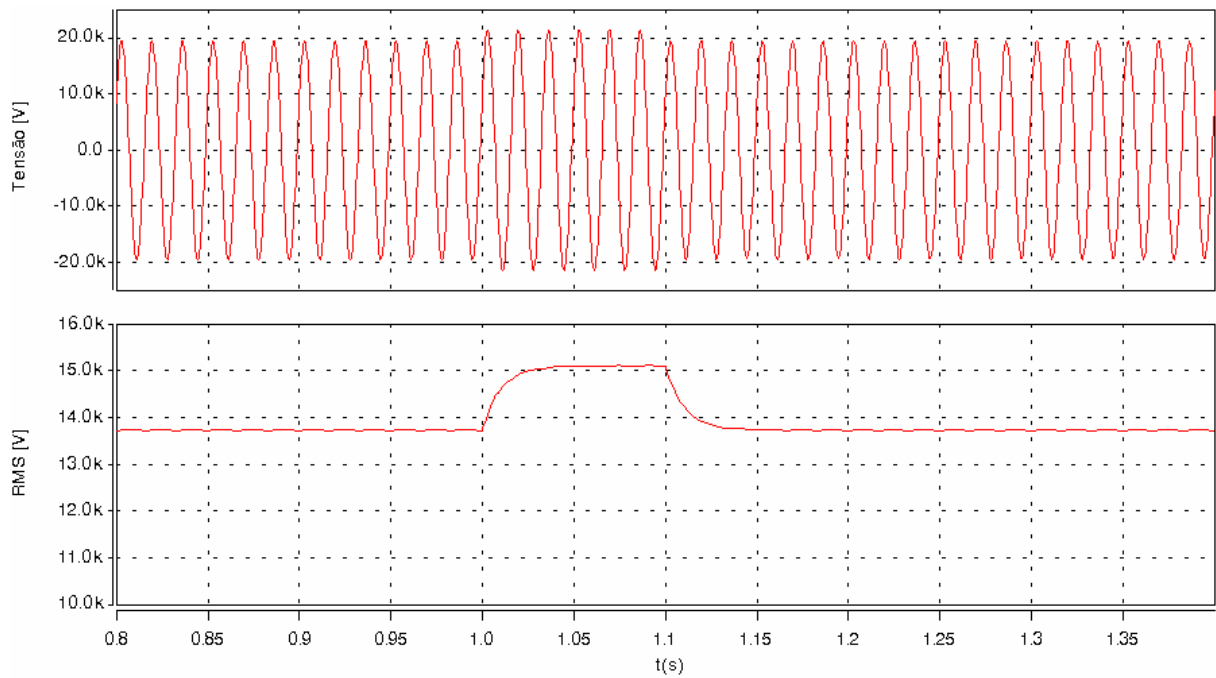


Figura 1.2 - Exemplo de *voltage swell*.

Os mais importantes problemas de qualidade de energia elétrica, incidentes principalmente sobre os grandes consumidores industriais, são as interrupções momentâneas e os *voltage sags* [2]. Estes dois tipos de problemas estão, na maioria das vezes, relacionados à ocorrência de faltas ou curtos-circuitos em algum ponto do sistema. Entretanto, os *sags* são muito mais comuns, uma vez que podem estar associados às faltas remotas no local sob observação [3]. Pode ser mostrado que faltas ocorrendo em sistemas de alta tensão podem provocar *voltage sags* em regiões num raio de várias centenas de quilômetros [4]. Em alguns casos, estima-se que 87% das falhas no suprimento de energia estejam relacionadas a ocorrências desses fenômenos [5]. Além das faltas nos sistemas de transmissão e distribuição de energia, a entrada em operação de grandes cargas, como a partida de motores de potência elevada, pode levar ao surgimento de distúrbios como os *voltage sags*.

Os distúrbios relatados podem acarretar prejuízos financeiros bastantes significativos para os consumidores. Nos EUA, esses distúrbios são responsáveis por

despesas que chegam a U\$400 bilhões por ano [6]. Já no Brasil, os estudos sobre o impacto financeiro das variações de tensão são ainda bastante recentes. Os prejuízos médios por parada circundam em torno de U\$5,3/kWh, com valores anuais que podem atingir o montante de U\$200 mil [7,8].

Nos últimos anos, várias tecnologias têm sido investigadas como solução para os problemas de qualidade da energia. Neste contexto, o regulador de tensão comanda pelo controle eletrônico inteligente proposto nesta dissertação se destaca quanto à sua eficácia no processo de correção dos distúrbios de tensão. Isto se deve ao fato de propiciar alta velocidade de resposta operacional na correção da amplitude da referida grandeza ofertada à carga sensível com apreciável relação custo $\times$ benefício, uma vez que a produção deste tipo de equipamento já é realizada integralmente em território nacional.

Esta dissertação será direcionada à apresentação, desenvolvimento e implementação de um controle eletrônico inteligente (microcontrolado) proposto a um regulador de tensão com 09 degraus (06 de elevação, 02 de abaixamento e o central). Cada estágio de regulação proporciona uma variação de 5% sobre o valor nominal da tensão remetida à carga, estabelecendo um amplo controle para valores entre 70% e 110%, através das 09 chaves estáticas constituídas por tiristores (SCR's).

Os microcontroladores (MCU's) empregados no processo viabilizarão uma atuação altamente dinâmica, inteligente e independente de qualquer tipo de intervenção humana durante o processo de correção. Os circuitos de controle serão capazes de avaliar continuamente o estado da tensão e da corrente atuantes sobre a carga, de modo a garantir a operação segura do RT através de seus taps, os quais são comutados sempre respeitando zeros das referidas grandezas elétricas. Um controle

preventivo sobre níveis de curto-circuito na carga também será implementado, conforme a apresentação dos capítulos que se seguem.

1.2- ESTADO DA ARTE

Antes de apresentar uma proposta de mitigação dos fenômenos de variação da tensão, comprometedores da qualidade da energia entregue aos consumidores de diversas categorias, o levantamento bibliográfico permitiu uma compilação sobre as tecnologias de reguladores existentes no mercado, suas características intrínsecas, e também suas limitações e benefícios.

De fato, há de se reconhecer a existência de uma grande variedade de reguladores de tensão utilizados em concessionárias e em sistemas de potência industrial, tanto para controlar as variações de tensão de curta quanto as de longa duração [2], os quais são tipicamente agrupados em três grandes categorias:

1. Transformadores de tap variável;
2. Dispositivos de isolamento com reguladores de tensão separados;
3. Dispositivos de compensação de impedância.

Quanto aos transformadores de tap variável mecânicos e eletrônicos, destacam-se os autotransformadores, embora também existam numerosas aplicações de transformadores de dois ou três enrolamentos com taps variáveis. Os dispositivos mecânicos destinam-se às mudanças mais lentas de carga, enquanto os eletrônicos mostram-se capazes de responder com maior agilidade às variações de tensão.

Dispositivos de isolamento incluem sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supply*), transformadores ferorressonantes (tensão constante), conjuntos M-G (motor-gerador), dentre outros. Há dispositivos que essencialmente isolam a carga sensível da fonte de potência, graças ao desempenho de algumas classes de conversores de energia. Portanto, o dispositivo de carga pode ser regulado separadamente e manter a tensão constante, independentemente de qualquer ocorrência no sistema supridor.

Capacitores *shunt* ajudam a manter a tensão reduzindo a corrente de linha. Além disso, um aumento de tensão também pode ser realizado por sobrecompensações de circuitos indutivos. Para manter a tensão constante a maior parte do tempo, o capacitor pode ser chaveado em conjunto com a carga, às vezes em pequenos degraus de incrementos para seguir a carga mais de perto. Se o objetivo é simplesmente manter a tensão o mais alta possível para evitar uma condição de sub-tensão, os capacitores são freqüentemente fixados (não chaveados).

Capacitores em série são relativamente raros. Os usuários em potencial não os utilizam por causa do cuidado extra que é necessário à sua correta instalação e perfeito funcionamento. Contudo, eles são muito efetivos em determinadas condições do sistema, principalmente perante rápidas variações de carga que causam excessivos *flickers*. Se o sistema não é altamente indutivo, tendo, portanto, uma parcela resistiva significativa, capacitores série não serão muito eficazes. E esta é uma situação típica de muitos sistemas industriais que têm uma longa extensão de cabos entre o transformador e a carga. Será necessário redimensionar os condutores ou mudar o transformador para obter uma mudança expressiva na impedância.

1.2.1- TRANSFORMADORES FERRORESSONANTES

No lado do usuário, transformadores ferrorressonantes não são úteis apenas para proteger os equipamentos de *voltage sags*, eles podem auxiliar também na obtenção de uma boa regulação de tensão (mais ou menos 1% na saída). A figura 1.3 ilustra a entrada/saída característica em regime permanente de um transformador ferrorressonante de 120 VA com uma carga de 15 VA. A tensão de entrada é reduzida para menos de 30 V, a saída fica constante. Se a tensão de entrada puder ser ainda mais reduzida, a tensão de saída começará a cair. Além disso, como a tensão de entrada é reduzida, a corrente solicitada pelo transformador aumentará substancialmente de 0,4 a 2 A. Contudo, transformadores ferrorressonantes tendem a apresentar perdas e ineficiência, tornando-os uma aplicação inviável, sobretudo em larga escala.

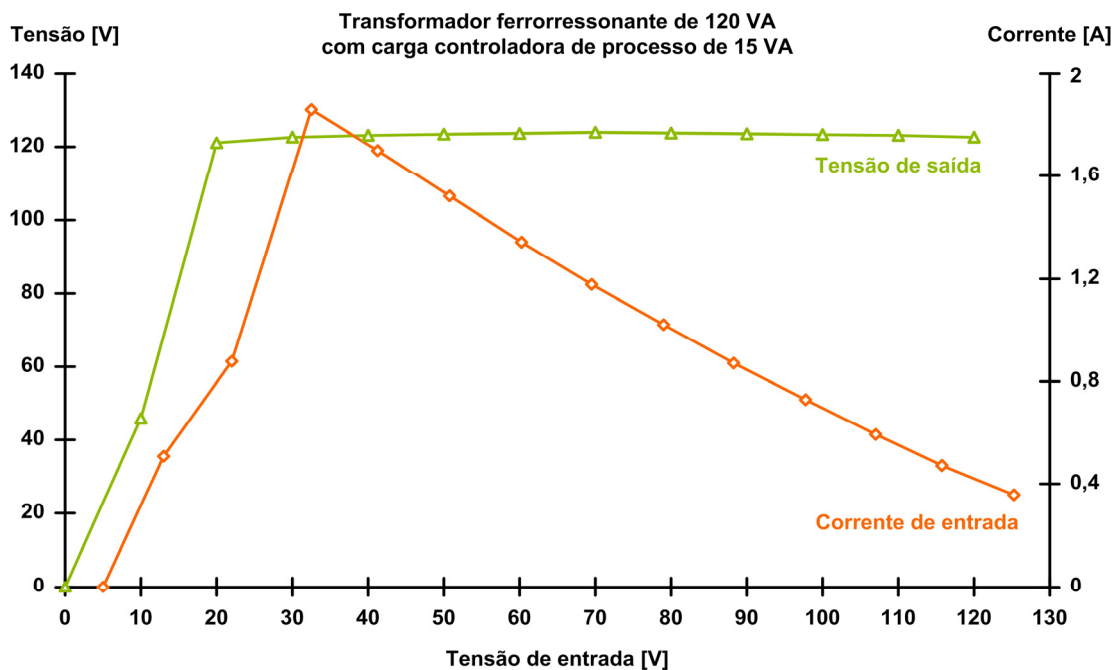


Figura 1.3 - Características em regime permanente de um transformador ferrorressonante.

1.2.2- SISTEMAS UPS ON-LINE

Sistemas UPS *on-line* são utilizados na proteção contra *sags* e breves interrupções, podendo também ser empregados como reguladores quando a tensão da fonte se tornar suficientemente alta para manter as baterias carregadas. O princípio de operação deste tipo de equipamento consiste em detectar o distúrbio elétrico e isolar a carga, alimentando a mesma com a energia armazenada nas baterias. Esta é uma solução comum para pequenas cargas, computadores críticos ou controles eletrônicos de cargas em ambientes industriais, bem como para cargas flutuantes que causam a variação da tensão.

As soluções tradicionalmente utilizadas consistem na aplicação dos sistemas UPS com um possível gerador de reserva, o que é considerada uma solução cara. Vale ressaltar que a bateria do UPS tem uma vida útil de 2 a 5 anos e demanda forte necessidade de monitoramento e exigências de manutenção. Além disso, sua confiabilidade é inferior à do sistema elétrico. Estes fatos culminaram com a elaboração da norma SEMI F47 por parte das indústrias de semicondutores, a qual é destinada a contemplar de maneira mais incisiva a susceptibilidade dos equipamentos utilizados na fabricação dos semicondutores aos afundamentos de tensão, e determina também que estes requisitos devem ser atingidos sem o uso de baterias. Por conseguinte, o emprego de sistemas UPS acabou entrando em descrédito.

1.2.3- CONJUNTOS MOTOR-GERADOR

Como a SEMI F47 desacreditou o uso de baterias como fonte de armazenamento de energia, novas soluções para os problemas de qualidade da mesma

precisaram ser aplicadas. Muitos pesquisadores e fabricantes optaram pela busca de outros modos de estocagem energética para suprimento das cargas. Uma delas é o conjunto motor-gerador, baseado no armazenamento de energia mecânica (cinética) em um volante (*flywheel*).

O conjunto motor-gerador (figura 1.4) desacopla completamente a carga do sistema elétrico de potência, protegendo a mesma de transitórios. A regulação de tensão é fornecida pelo controle do gerador. O maior inconveniente deste tipo de dispositivo é sua resposta no tempo perante grandes variações de cargas. O conjunto motor-gerador pode requerer vários segundos para fazer a tensão voltar ao nível desejado, atestando que sua capacidade de regulação de tensão é lenta para certos tipos de carga, especialmente as sujeitas aos VTCD's. Motor-gerador podem também ser usados para fornecer tensões de saída, posto que a energia é armazenada continuamente no volante.

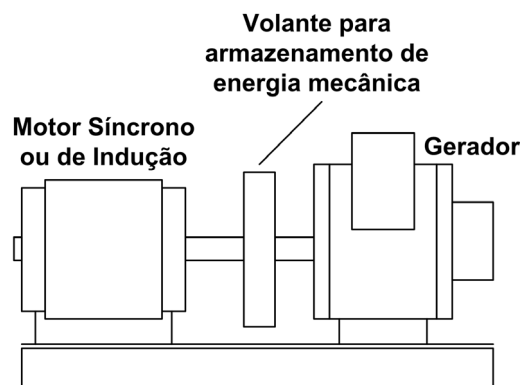


Figura 1.4 - Conjunto motor-gerador.

1.2.4- COMPENSADORES ESTÁTICOS

Os compensadores estáticos ajudam a regular a tensão respondendo rapidamente a um fornecimento ou consumo de potência reativa. Estas ações ocasionam interações

com a impedância do sistema, tanto para elevar quanto para diminuir a tensão ciclo a ciclo.

Os dois principais tipos de compensadores estáticos de reativos são mostrados na figura 1.5. O reator controlado a tiristor é provavelmente o mais comum. Ele utiliza um banco de capacitores fixo para fornecer potência reativa e tiristores controlam a indutância que é engatilhada em várias quantidades para equilibrar parcialmente ou totalmente o efeito capacitivo. Os capacitores são freqüentemente configurados como filtros para drenar as distorções harmônicas causadas pelos tiristores.

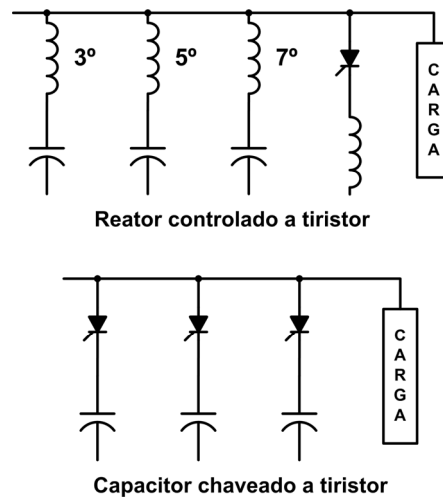


Figura 1.5 - Configurações comuns do compensador estático.

1.2.5- CAPACITORES *SHUNT*

A presença de um capacitor *shunt* no final de um alimentador resulta em uma mudança gradual da tensão ao longo do mesmo, como mostra a figura 1.6. Idealmente, o percentual de elevação no capacitor é dado por:

$$\% \Delta V = \frac{100 \cdot (V_{comcap} - V_{semcap})}{V_{comcap}} \quad (1.1)$$

Este valor será zero sem carga e se elevará ao máximo valor em plena carga. Contudo, com capacitores *shunt* a elevação percentual da tensão é essencialmente independente da carga. Portanto, chaveamentos automáticos são freqüentemente empregados na obtenção da regulação desejada em altas cargas, ao mesmo tempo em que evitam excessivas tensões em pequenas cargas. Isto pode resultar em sobretensões transitórias no interior das instalações. Aplicações de capacitores *shunt* podem também resultar em uma variedade de problemas com harmônicos.

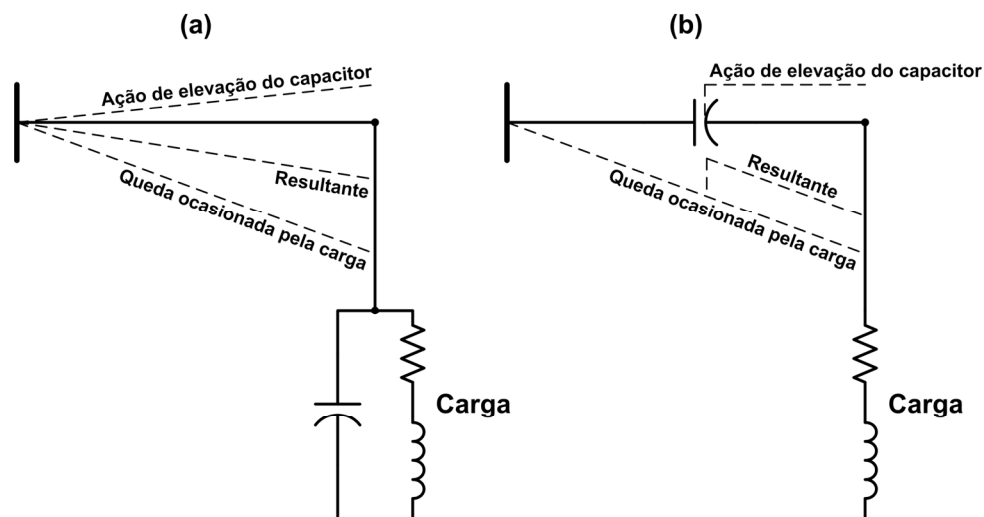


Figura 1.6 - Elevação da tensão no alimentador devido aos capacitores *shunt* (a) e série (b).

1.2.6- CAPACITORES SÉRIE

Ao contrário do esquema *shunt*, um capacitor conectado em série com o alimentador resulta em uma elevação de tensão no final do alimentador, a qual varia diretamente com a corrente da carga. Sem carga, a elevação de tensão é nula; à plena carga, é máxima. Assim, capacitores em série necessitam ser chaveados em resposta às mudanças de carga. Além disso, capacitores em série requerem muito menos kilovolts

e kvars de capacidade que um capacitor *shunt* para conseguir uma regulação equivalente.

Contudo, capacitores em série possuem várias desvantagens. Primeiramente, eles não podem fornecer compensação de reativos para alimentadores com carga e deste modo, não reduzem significativamente perdas do sistema. Capacitores em série podem apenas livrar capacidade adicional do sistema se este é limitado por excessivas quedas de tensão no alimentador. Os capacitores *shunt*, ao contrário, são também efetivos quando a capacidade do sistema é limitada por altas correntes nos alimentadores.

Em segundo lugar, capacitores em série não podem tolerar falta de corrente. Isto resultaria em uma catastrófica sobretensão, e deve ser evitada “*bypassando*” o capacitor através de um chaveamento automático. Um pára-raios também deve ser conectado após o capacitor para desviar a corrente até que a chave feche.

Há vários outros cuidados que devem ser avaliados em uma aplicação de capacitores em série. Estes incluem ressonância e/ou oscilação de máquinas síncronas, motores de indução e transformadores ferorressonantes. Por causa destes cuidados, a aplicação de capacitores em sistemas de distribuição é muito limitada. Uma aplicação à qual eles provaram ser vantajosos é quando a reatância de alimentadores deve ser minimizada em prol da contenção de *flickers* [2].

1.2.7-RESTAURADORES DINÂMICOS DE TENSÃO

O Restaurador Dinâmico de Tensão (RDT ou *Dynamic Voltage Restorer* – DVR) caracteriza-se como uma interessante solução para os problemas de qualidade da energia elétrica provocados pelas variações momentâneas de tensão [9]. Aliando um

bom desempenho a um custo relativamente competitivo, comparado com outras soluções, como os sistemas de energia ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply* – UPS), o restaurador dinâmico de tensão é capaz de reduzir em mais de 90% o número de desligamentos inoportunos da carga sensível, quando da ocorrência das variações momentâneas de tensão [10].

Em sua forma mais convencional de implementação, o restaurador dinâmico de tensão é constituído por um conversor CC-CA, com filtro LC de saída, conectado serialmente à carga sensível através de um transformador, conforme ilustrado esquematicamente na figura 1.7 [11].

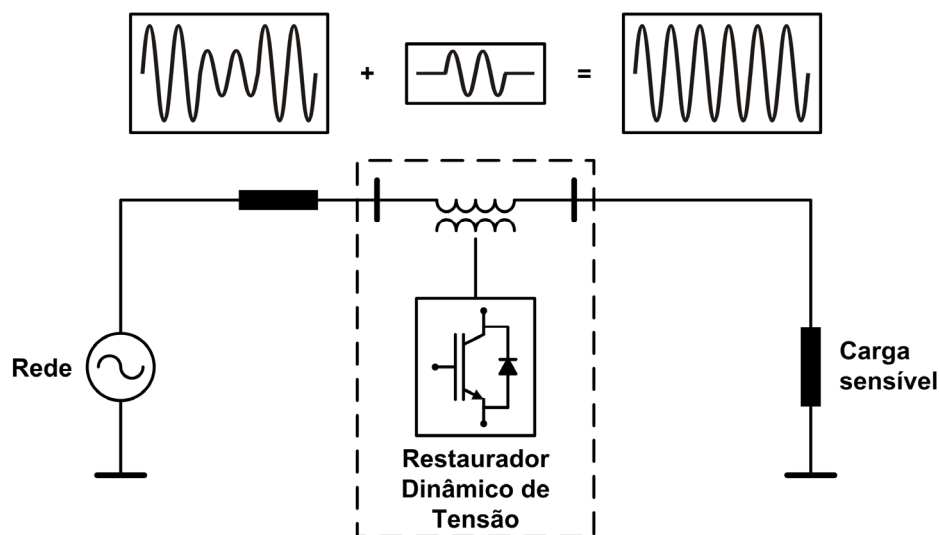


Figura 1.7 - Esquema básico de operação de um restaurador dinâmico de tensão.

1.2.8-REGULADORES DE TENSÃO (RT's) - SÉRIE

Reguladores revelam-se atenuadores efetivos em condições de baixa tensão nos alimentadores quando a carga é pequena em relação à capacidade do alimentador em condições de pico da carga. Isto é justificado pelo tempo consumido para determinar a correta calibragem do compensador nivelador de linha; a calibragem de R e X é muitas

vezes fixada em zero e a regulação de tensão pontual é fixada próxima ao máximo valor admissível (125 ou 126 V em 120 V de base). Isto resulta em tensão nos alimentadores próxima do máximo a maioria do tempo, uma vez que a carga permanece em pico durante uma pequena fração de tempo a cada dia. Porém, deve-se considerar que:

1. Transformadores que operam em alta sobre suas curvas de saturação produzem mais correntes harmônicas, além de contribuírem ainda mais com as distorções harmônicas nos alimentadores, o que pode ser particularmente incômodo quando cargas mais sensíveis estiverem inseridas no sistema;
2. Consumidores podem ficar sujeitos a trocas mais freqüentes de lâmpadas incandescentes.

Em áreas onde a população é dispersa, é comum encontrar dois ou mais bancos de reguladores em série com linhas extremamente longas alimentando cargas remotas. Duas relevantes aplicações estão nos serviços de irrigação e mineração, nos quais as linhas se estendem por quilômetros alimentando apenas cargas ocasionais. Ainda assim estas aplicações requerem considerações especiais para evitar problemas com a qualidade da energia.

Um importante fator para a correta coordenação dos reguladores em série é a calibração precisa do tempo de atraso inicial. O regulador mais próximo da subestação é calibrado com um tempo de atraso mais curto, em torno de 15 a 30 s. Reguladores mais distantes na linha de baixa são calibrados com tempo de atraso de 15 s. Isto minimiza mudanças de tap nos reguladores nas linhas de baixa, conservando a variação de tensão no mínimo e estendendo a vida dos contatos. Todavia, a necessidade de uma

calibração tão primorosa finda por abrir espaço para o desenvolvimento de novas tecnologias que requerem menos ajustes e atuam mais dinamicamente sobre as cargas, sobretudo as mais sensíveis.

1.2.9-REGULADORES DE TENSÃO EM DEGRAUS

Os reguladores de tap variável típicos podem regular de -10 a +10% da tensão de linha da entrada empregando até 32 degraus de 0,625% (5/8). Existem algumas variações, mas a maior parte dos reguladores segue esta configuração. Transformadores de distribuição freqüentemente têm três fases de tap variável da carga (LTC's) quando reguladores são instalados na saída dos alimentadores, os quais são tipicamente monofásicos.

Reguladores em linha podem ser instalados em bancos bifásicos e trifásicos. Isto não é incomum quando há bancos em delta aberto conectados a alimentadores trifásicos com luzes para moderar a carga e garantir maior economia. A figura 1.8 mostra um diagrama esquemático de um regulador de tensão em degraus de uma concessionária conectado a um controle eletrônico para o chaveamento de taps.

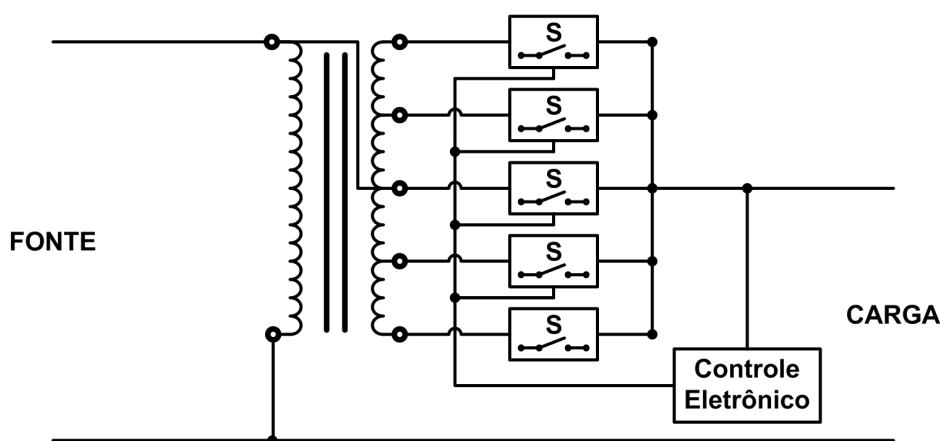


Figura 1.8 - Esquema de um tipo de regulador de tensão em degraus.

Reguladores de tensão em linha e subestações LTC's controlados mecanicamente são relativamente lentos. O tempo de atraso à regulação da tensão é maior que 15 s (geralmente de 30 a 45 s). Desta maneira, esta não é uma situação sob a qual tensões possam variar em alguns ciclos ou segundos. Todavia, com o emprego de um controle eletrônico inteligente e autônomo, como o proposto neste estudo, o tempo de regulação passa a ser da ordem de 03 a 04 ciclos, de modo que o RT passa a ser uma alternativa bastante interessante e competitiva à mitigação dos fenômenos de variação da tensão de curta duração. Sua principal aplicação perfaz-se no aumento da amplitude da tensão em alimentadores longos de sistemas de distribuição, sendo bastante empregado em barramentos de média tensão.

1.3- AS CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Enquanto proposta de regulação da tensão, o regulador com controle eletrônico inteligente (CEI) é destacado aqui pelos aspectos que o diferenciam dos demais equipamentos hodiernamente utilizados: autonomia, rapidez e, segurança na manutenção e estabilização da alimentação das cargas. E estas tônicas vêm à tona graças ao emprego do controle eletrônico que comanda a comutação dos taps reguladores. O desenvolvimento de um dispositivo microcontrolado robusto e dinâmico está sintonizado ao propósito de consolidação do referido equipamento no mercado de distribuição de energia como uma alternativa confiável, de fácil aplicação e com relação custo-benefício atrativa.

1.4- ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Capítulo 2 – A Tecnologia do RT com Controle Eletrônico Inteligente (CEI)

Este capítulo concederá uma visão geral do dispositivo de regulação da tensão com aplicação do controle eletrônico inteligente (CEI). Após uma contextualização histórica dos reguladores de tensão, uma estrutura em diagrama de blocos será apresentada, a partir da qual os cinco módulos que interagem na concepção do equipamento serão elucidados com o detalhamento cabível a cada um deles. As fotos reveladas neste capítulo fornecerão uma visão rica sobre o protótipo desenvolvido para os testes em baixa tensão, o qual estereotipa o modelo elaborado às ações em média tensão.

Capítulo 3 – Projeto e Desenvolvimento do Controle Eletrônico

O controle eletrônico estrela no foco principal dos desenvolvimentos e contribuições efetivas desta dissertação. Desta feita, o capítulo 3 será integralmente dedicado a uma exploração pormenorizada dos detalhes condizentes aos dois módulos que o constituem (o de leitura RMS e o decisório), desde as estruturas de *hardwares* até as lógicas operacionais dos *firmwares*. Cada circuito de condicionamento será averiguado a partir de sua funcionalidade, conectividade, análise gráfica e equacionamento matemático. Os microcontroladores receberão uma atenção muito especial, uma vez que perfazem o “cérebro” de comando da unidade que controla os procedimentos de regulação da tensão.

Capítulo 4 – Resultados Experimentais da Aplicação do CEI

Neste capítulo, uma apreciável quantidade de resultados será apresentada através de gráficos de formas de onda e variação em RMS das tensões e correntes, tanto na carga quanto na fonte distribuidora. Análises cabíveis serão realizadas em baixa e média tensão, incluindo uma breve avaliação de suportabilidade das cargas elencadas para os testes propostos de acordo com a curva ITIC e trabalhos afins. Em suma, a avaliação gráfica então proposta será empregada para consumir o princípio de regulação da tensão na carga defendido como tema central desta pesquisa.

Capítulo 5 – Conclusões

Com caráter conclusivo, o capítulo 5 fará um apanhado geral das informações de maior relevância tratadas no presente trabalho. E isto será feito com o claro objetivo de propiciar uma visão ampla e consolidada sobre todos os aspectos ressaltados do RT dentro do contexto de regulação da tensão, destacando, sobremaneira, o papel do controle eletrônico inteligente enquanto elemento indispensável ao propósito de atuação autônoma, rápida e eficaz.

CAPÍTULO II

A TECNOLOGIA DO RT COM CONTROLE ELETRÔNICO INTELIGENTE (CEI)

2.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os reguladores de tensão (RT's) são equipamentos destinados à manutenção dos níveis de tensão em diferentes nós de um sistema elétrico. O crescimento acelerado dos sistemas elétricos exigiu a busca constante por novas tecnologias que oferecessem suporte para essa rápida expansão e que permitissem ainda a interligação de grandes sistemas elétricos, na tentativa de aumentar a confiabilidade e a continuidade do fornecimento de energia aos consumidores [12].

Nos últimos anos, o avanço tecnológico dos semicondutores de potência (tanto em termos de tensão quanto em termos de corrente), tem viabilizado novos desenvolvimentos aplicados ao controle de tensão CA. Várias patentes (como [13-15], por exemplo) têm sido requeridas e diversas publicações [16-32] empregando semicondutores com baixa potência apresentam idéias para o desenvolvimento de transformadores controlados, seja em média ou baixa tensão. Entretanto, não se encontra disponível no mercado nacional e internacional um produto consolidado nos sistemas de distribuição de energia. Em termos de pesquisa, encontram-se os desenvolvimentos nacionais de um RT com taps eletrônicos em 13,8 kV [33, 34], além

de uma proposta de pesquisa, considerada prioritária pela ANEEL, a ser desenvolvida aprovada pelas Centrais Elétricas de Goiás (CELG) em parceria com a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) envolvendo a fabricação de um transformador de distribuição inteligente (TDI) com controle dos taps em baixa tensão (BT). Este equipamento será destinado à compensação das quedas associadas aos consumidores desta categoria.

A legislação do setor elétrico precisou também ser atualizada, revisada e até modificada com a criação de novas leis que regulamentassem a comercialização de energia e garantissem os direitos dos consumidores [35,36]. Dentre as várias características que garantem o fornecimento de uma energia com qualidade para suprir diferentes tipos de cargas, pode-se destacar os níveis de tensão de alimentação. As variações de tensão de curta duração precisam ficar contidas entre limites máximos e mínimos, regulamentados pela legislação vigente [37]. É nesse contexto que se justifica a extensa utilização dos reguladores de tensão nas redes de distribuição de energia elétrica na tentativa de manter constante o nível de tensão em diferentes nós do sistema elétrico, atendendo às condições de alimentação exigidas pelos tipos de cargas mais susceptíveis às variações de tensão.

Os modelos tradicionais de reguladores de tensão são dotados de sistemas mecânicos responsáveis pela comutação de taps. Durante algum tempo, estes reguladores com comutação mecânica conseguiram atender às necessidades dos consumidores garantindo o bom funcionamento das cargas conectadas à rede elétrica. Entretanto, com o emprego crescente de cargas mais sensíveis às variações de tensão de curta duração, surge a necessidade de pesquisar novas técnicas de comutação que possibilitem uma atuação mais eficiente do regulador de tensão, reduzindo, assim, o seu tempo de operação. Tem-se, então, a base de fomento necessária ao

desenvolvimento de tecnologias eletrônicas inovadoras capazes de comutar em poucos ciclos os taps do regulador, como é o caso do circuito de controle proposto no presente trabalho.

Neste capítulo serão apresentadas informações gerais referentes às partes (módulos) constituintes da estrutura física do RT com comutação eletrônica de taps, de modo a consolidar uma visão geral sobre o equipamento típico que deve ser operado pelo controle eletrônico inteligente desenvolvido nesta dissertação.

2.2- HISTÓRICO

A aplicação de reguladores de tensão nos sistemas de distribuição de energia elétrica teve início na década de 40, nos países desenvolvidos [38]. Dentre estes, os EUA se destacam em função de sua grande extensão territorial, de modo que os centros de consumo estão espalhados por vastas áreas, distantes dos pontos de geração. Aliado a isso, o aparecimento de grande quantidade de novos aparelhos eletro-eletrônicos sensíveis às oscilações de tensão acarretou um aumento expressivo das reclamações dos consumidores que passaram a exigir boa qualidade na distribuição de energia elétrica. Por conta disso, atualmente se encontram instalados em vários pontos daquele país dezenas de milhares de reguladores, fornecendo aos consumidores uma regulação de tensão adequada e conferindo qualidade ao fornecimento de energia. Isso traz pelo menos três conseqüências benéficas:

- Satisfação do consumidor;
- Redução das perdas na distribuição;

- Aumento do faturamento das concessionárias de energia elétrica.

O Brasil apresenta certa similaridade com os EUA, no que se refere ao espaço territorial, o que viabiliza a utilização dos reguladores de tensão. Estes têm grande aceitação por parte das concessionárias, por razões econômicas, de simplicidade e versatilidade. Além disso, hoje há reguladores de tensão totalmente fabricados no Brasil, o que elimina os problemas de obtenção de peças de reposição verificados até 1986, quando tais equipamentos eram total ou parcialmente (comutador de derivações em carga) importados dos EUA.

2.3- VISÃO GERAL DO RT COM CEI

Na sequência serão apresentadas as partes que constituem um dos tipos de regulação de tensão com a aplicação de chaves estáticas e controle totalmente eletrônico. Este RT foi desenvolvido ao longo de um período de três anos (novembro de 2003 a outubro de 2006) através da trílice parceria entre a UFU a Elektro Eletricidade e Serviços e a Toshiba do Brasil.

O diagrama de blocos apresentado na figura 2.1 oferece uma perspectiva ampla e genérica do modelo de regulação, ilustrando o engajamento do sistema elétrico de potência com o circuito eletrônico de controle projetado. Todas as partes envolvidas no processo de regulação da tensão entregue à carga serão tratadas aqui como módulos do dispositivo em questão.

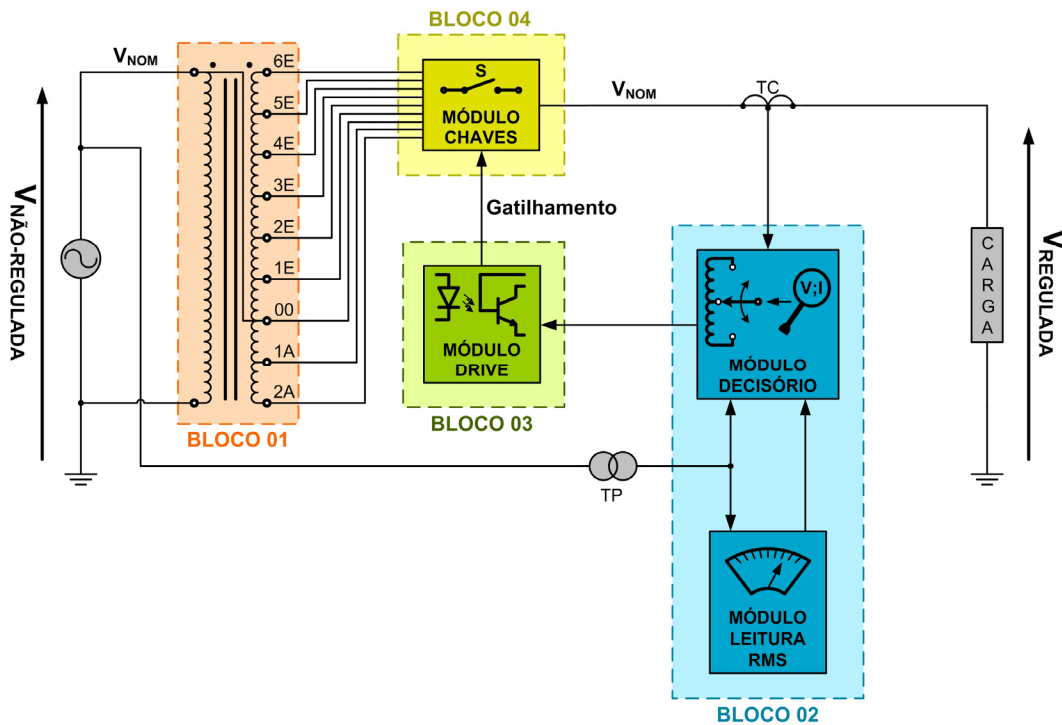


Figura 2.1 - Visão geral das unidades do regulador de tensão.

Os blocos da figura anterior foram desenvolvidos e obtidos com as particularidades da referida pesquisa (UFU/Elektro/Toshiba) e têm a seguinte caracterização:

- **Bloco 01:** Unidade magnética do regulador de tensão (RT) com 09 degraus, sendo 06 de elevação, 02 de abaixamento e o central;
- **Bloco 02:** Unidade de controle composta pelo módulo de leitura RMS e pelo módulo decisório, contribuições efetivas desta dissertação que serão detalhadamente apresentadas no presente capítulo e no seguinte;
- **Bloco 03:** Módulo do drive de fibra ótica que garante o isolamento entre os circuitos de controle e as unidades de potência durante o gatilhamento dos tiristores (SCR's);

- **Bloco 04:** Módulo das chaves estáticas a tiristores que perfazem a conexão CA entre a fonte e a carga.

A figura 2.2 ilustra o comportamento da tensão RMS na carga mediante a atuação do RT. Duas faixas são notadamente apresentadas: a de variação de tensão tolerada pela resolução nº 505 da ANEEL [37] para valores em BT (região adequada) e a da região coberta pelo equipamento (de -30% a +10% do valor nominal da tensão, com 5% de ajuste em cada tap). Note-se que o gráfico apresenta a ação de controle em relação ao tempo de atuação em ciclos, uma vez que se deseja evidenciar a rápida recuperação da tensão. Neste sentido, quatro situações foram esboçadas, sendo que três caracterizam *voltage sags* e uma caracteriza *voltage swell*. Cabe salientar ainda que o controle eletrônico inteligente não permanece indiferente a nenhuma variação de tensão da fonte entre zero e 227,2% de seu valor nominal. Para os valores que extrapolarem a cobertura cabível aos taps reguladores, outras medidas cautelares poderão ser adotadas, conforme será explanado no capítulo III.

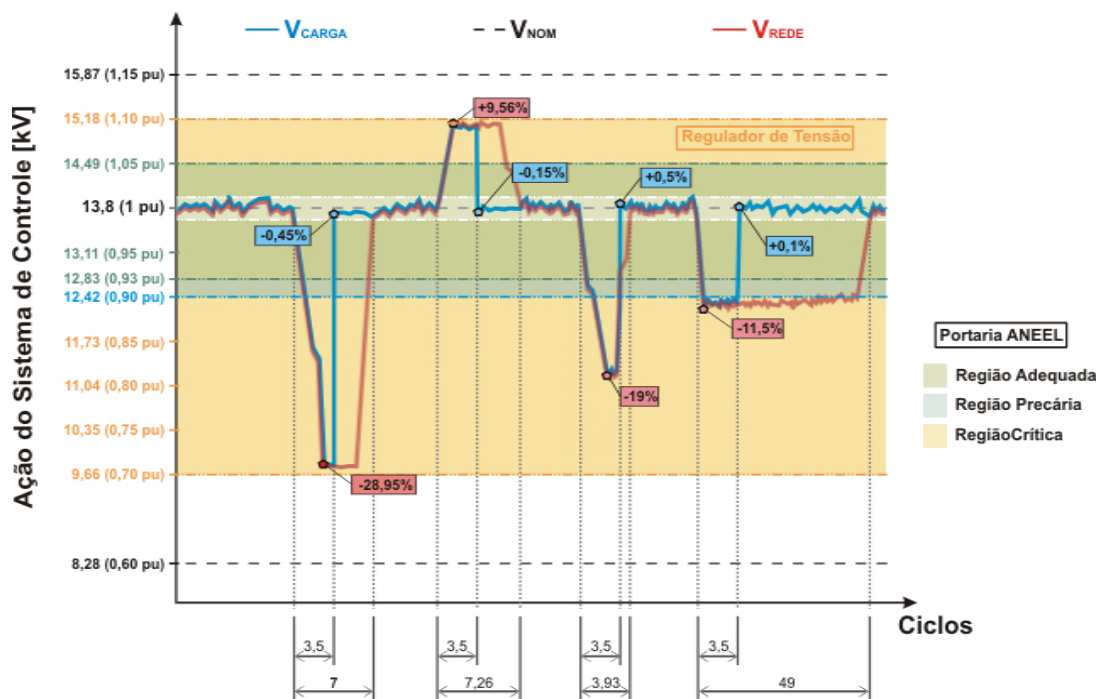


Figura 2.2 – Exemplos de correções pretendidas para o valor RMS da tensão na carga.

2.3.1- BLOCO 01: RT COM 09 DEGRAUS

Os reguladores de tensão têm o princípio de funcionamento similar ao de um autotransformador com derivações [12], ou seja, além do acoplamento elétrico, existe também o acoplamento magnético entre os enrolamentos (bobina de taps, bobina de excitação e bobina de equalização). Segundo [39], existem dois tipos de reguladores de tensão citados que constam nas normas atuais:

- **Tipo A:** chamado regulador com excitação variável porque a bobina de excitação sente qualquer variação que ocorra na tensão da fonte [40];
- **Tipo B:** chamado de regulador de excitação constante porque a bobina de excitação se localiza do lado da carga, não sentindo as variações de tensão da fonte [40].

As figuras 2.3(a) e (b) mostram o circuito elétrico equivalente dos reguladores de tensão dos tipos A e B, respectivamente. Estas figuras representam um caso geral onde a fonte de tensão alimenta o regulador e este tem como função manter o nível de tensão na carga o mais próximo possível do seu valor nominal. Nestas figuras, os taps de elevação de tensão estão representados por 1E, 2E, 3E, 4E, 5E e 6E, enquanto que os taps de abaixamento estão representados por 1A e 2A; 00 corresponde ao tap central.

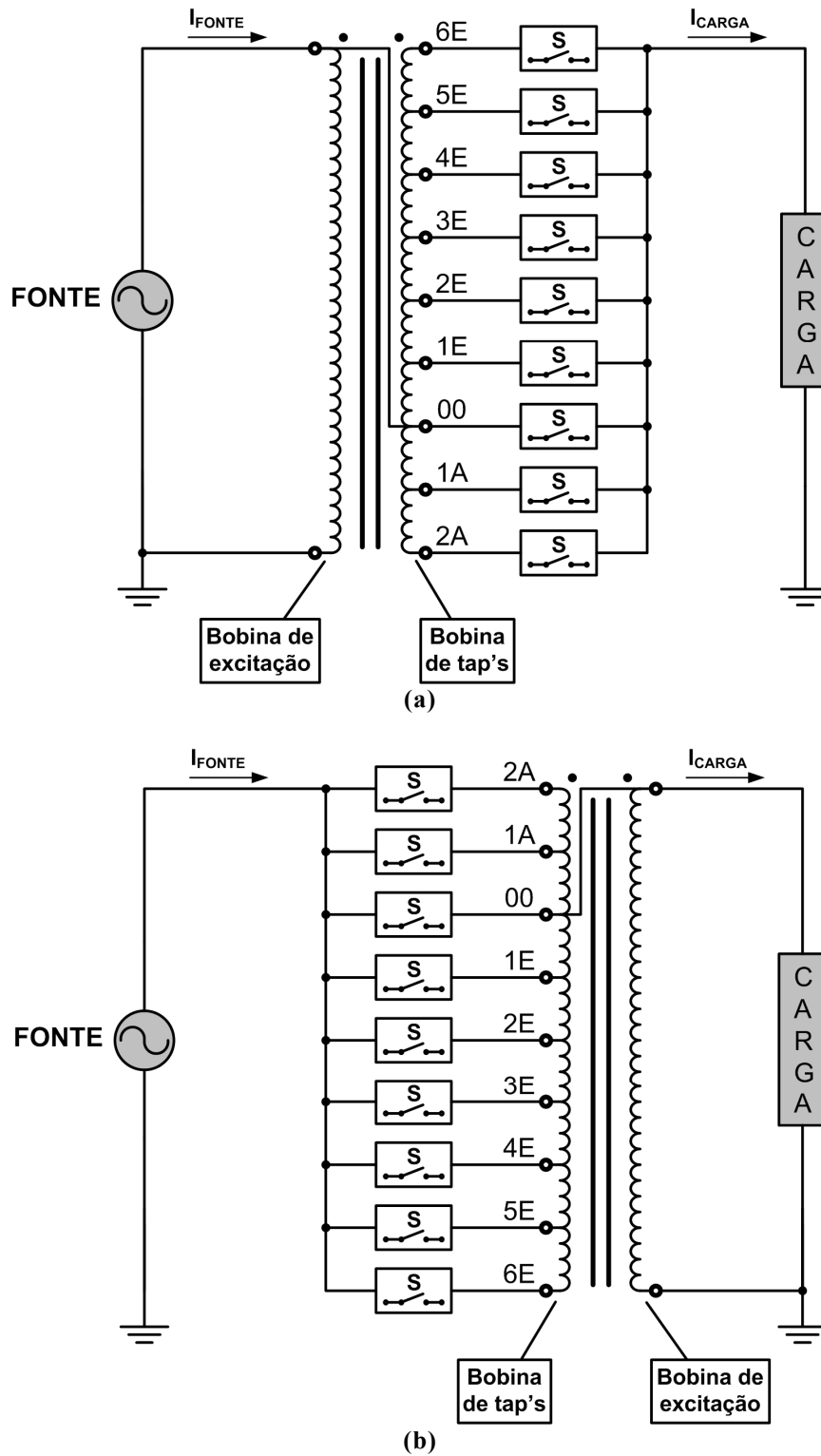


Figura 2.3 - Arranjo magnético do regulador de tensão.

(a) Tipo A;

(b) Tipo B.

No tipo A, a variação do nível de tensão na fonte é diretamente percebida pela bobina de excitação que, por sua vez, produz uma variação proporcional nos níveis de

tensão de cada tap da bobina de taps, conforme esclarecido em [12]. Este modelo tem como vantagem a eliminação da ocorrência de sobretensão transitória na carga, fenômeno este que pode ser verificado no tipo B. Além disso, o arranjo com bobina de excitação ligada à carga ainda está sujeito a efeitos dos fenômenos de ferrorressonância e corrente de “*Inrush*”, uma vez que a bobina de excitação está inclusa no circuito que é chaveado.

Pelo exposto aqui e pelas contribuições da referência [12], o tipo A foi adotado como modelo de implementação durante as operações de controle de chaveamento inteligente. Esta escolha justifica-se pela necessidade de comutação rápida dos taps sem o acréscimo de oscilações indesejadas à carga, as quais culminariam, por conseguinte, numa morosidade maior durante a atuação do RT. O modelo reduzido (BT) apresentado na figura 2.4 foi construído através do P&D Elektro/Toshiba/UFU para os testes iniciais da unidade magnética. Posteriormente, foi empregado na aplicação do controle durante a realização dos ensaios de validação de todas as unidades constituintes do RT eletrônico.



Figura 2.4 - Ilustração do RT tipo A implementado.

2.3.2- BLOCO 02: UNIDADE DE CEI

A fim de proporcionar uma atuação rápida, segura e precisa do RT sobre a tensão entregue às cargas, a unidade de controle eletrônico inteligente (CEI) mostrada na figura 2.5 foi desenvolvida. Através da combinação de circuitos eletrônicos analógicos e digitais, tem-se aqui um dispositivo capaz de ler a tensão da rede elétrica da concessionária, calcular ciclo a ciclo o valor RMS da mesma, checar níveis de curto-circuito e anulação da corrente na carga durante a comutação de taps, e ainda ligar um novo tap somente quando um zero de tensão for encontrado. Para os propósitos estabelecidos, o controle foi subdividido, então, em duas partes: o módulo de leitura RMS e o módulo decisório, os quais serão apresentados a seguir.

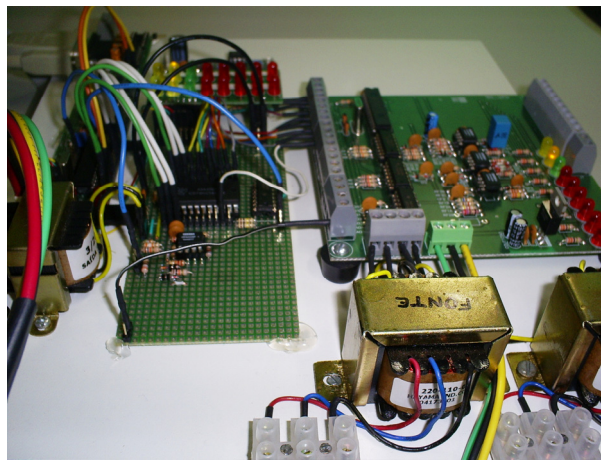


Figura 2.5 - Controle eletrônico inteligente do RT.

a) Módulo de Leitura RMS

O objetivo central deste módulo é determinar o valor RMS atual (ciclo a ciclo) da tensão da fonte, a qual é coletada por intermédio de um transformador de potencial. É feito, então, o processamento e envio desta informação ao módulo de controle

decisório, tudo isto respeitando o tempo limite de 01 ciclo. A placa mostrada na figura 2.6 foi desenvolvida para aplicação do módulo em questão.

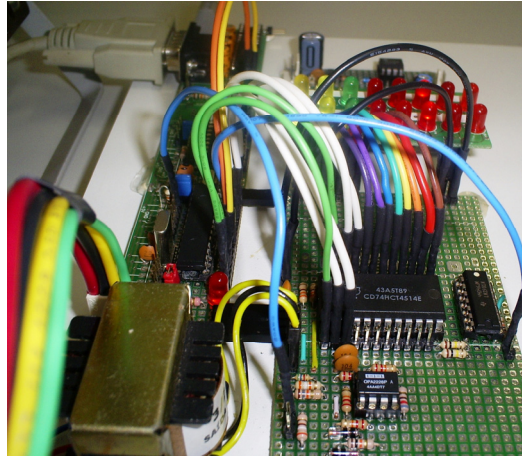


Figura 2.6 – Placa do módulo de leitura RMS.

Em sua concepção básica, o módulo de leitura opera com a filosofia de cálculo de amplitude em função do tempo, isto é, a cada variação da tensão RMS por ciclo. O circuito fornece o resultado do cálculo e ainda dentro do próprio ciclo indica o tap a ser acionado. A figura 2.7 ilustra uma taxa dV/dt , compreendendo um período de 03 ciclos até que a tensão atinja o afundamento final. Neste caso, o controle (módulo decisório) foi ajustado para não atuar em estágios intermediários antes de processar a regulação da tensão RMS 4, recuperando-a para o valor RMS 1.

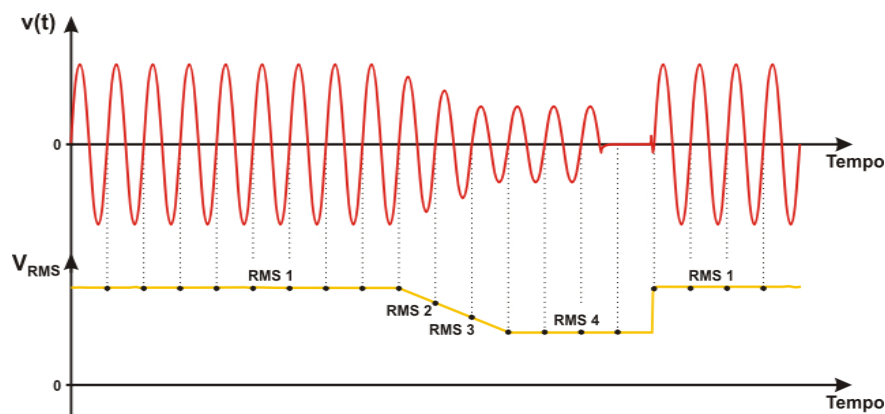


Figura 2.7 - Esquema ilustrativo do cálculo do valor RMS ciclo a ciclo.

Sabe-se que a taxa (dV/dt) de queda ou elevação depende de muitos fatores, como curtos-circuitos na rede de distribuição, entrada/saída de cargas, etc. O fato é que esta unidade tem a capacidade de indicar com alta velocidade a definição de um tap a cada ciclo. E esta rapidez de resposta poderia induzir o módulo decisório, quem de fato determina a posição do tap e sua permanência mínima, a atuar mais de uma vez sobre a carga. Desta feita, o controle tenderia a acionar taps intermediários até atingir o objetivo propriamente dito, ou seja, regular a tensão que efetivamente ficou estabelecida durante a queda ou elevação ocorrida na fonte (RMS 4). Objetivando evitar a passagem por estágios de regulação intermediários, optou-se por aguardar 01 ciclo por uma estabilização da tensão e, uma vez acionado um tap, mais um ciclo e meio de permanência no mesmo. Todos os detalhes referentes a este procedimento de aguardo serão explanados no capítulo III.

b) Módulo Decisório

Uma vez determinado o valor atual da tensão, o módulo decisório (figura 2.8) atua determinando o acionamento seguro de um tap do RT. Ele executa o desligamento de um tap e também “decide” quando e como acionar (em sincronismo com a tensão da fonte) o outro que manterá estabilizada a tensão na carga. Isto é realizado através de checagens para averiguar se realmente houve interrupção da corrente antes da entrada do novo tap, de modo a prevenir a ocorrência de curtos-circuitos entre os dois caminhos envolvidos na comutação e estabilização da tensão na carga.