



MONTAGEM E TESTES EM MÉDIA TENSÃO DE CHAVES ESTÁTICAS PARA UM REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAPES

Eduardo Esteves de Souza Netto

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Maurício Aredes, Dr.-Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JULHO DE 2012

**MONTAGEM E TESTES DE CHAVES ESTÁTICAS EM MÉDIA TENSÃO
PARA UM REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTADOR ELETRÔNICO
DE TAPES**

Eduardo Esteves de Souza Netto

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Examinada por:

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.
(Orientador)

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr.-Ing.

Eng. Thiago Americano do Brasil

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JULHO DE 2012

Souza Netto, Eduardo Esteves de

Montagem e Testes em Média Tensão de Chaves Estáticas para um Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de TAPES/ Eduardo Esteves de Souza Netto. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2012.

XI, 74 p.: il; 29,7 cm

Orientador: Maurício Aredes, Dr.-Ing.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 63-65.

1. Reguladores de tensão. 2. VTCD. 3. Qualidade de Energia
4. RECET. 5. Chave Estática. 6. Equipamentos de Segurança. 7.
Comutador Eletrônico de Tapes
I. Aredes, Maurício II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Montagem e
Testes em Média Tensão de Chaves Estáticas para um Regulador
de Tensão com Comutador Eletrônico de Tapes.

*“A educação é a arma mais poderosa que você
pode usar para mudar o mundo.”*

(Nelson Mandela)

*“Não cruze os braços diante de uma dificuldade,
pois o maior homem do mundo morreu de braços abertos.”*

(Bob Marley)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus, pois sem a sua benção eu não teria resistido às pressões, e não teria conseguido ultrapassar barreiras que estavam neste longo trajeto.

Quero agradecer de todo o meu coração, o incentivo, carinho, amor e broncas que recebi dos meus pais, principalmente no início desta “viagem” quando eu ainda não sabia o que era carregar um fardo cheio de responsabilidades. Um fator importantíssimo foi o suporte financeiro que sempre tive dentro de casa, não sendo necessário me preocupar com trabalho para me sustentar, apenas com a minha formação. Agradeço também a minha irmã.

Lembrarei sempre dos colegas de faculdade e do LEMT que me incentivaram e nunca deixaram que eu desanimasse, me fornecendo ajuda nos momentos mais complicados. Alguns deles são: Thiago Americano, Mauro Reis, Eduardo Leandro, Bruno França. Mas é claro que todos no LEMT tiveram sua parcela de participação.

Não posso me esquecer da minha namorada Daiane que suportou os meus nervosismos antes das provas, meus momentos de mau humor e principalmente quando queria sair pra conversar, distrair a mente e eu não podia, pois precisava terminar um trabalho, estudar para uma prova e vários outros motivos. Obrigado Daiane.

Professor Maurício Aredes, obrigado pelo voto de confiança que depositou em mim. A partir deste momento eu pude perceber que a vida não é tão simples quanto a gente pensa. Mas com o passar do tempo, com a prática dos “exercícios”, a gente adquire “condicionamento físico” para superar os obstáculos. Hoje eu posso dizer que consegui virar a mesa mostrando o que eu sou capaz de fazer, sem puxar o tapete de ninguém.

Resumo do Projeto Final em Engenharia Elétrica apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica – UFRJ como parte dos requisitos necessários para do grau de Engenheiro Eletricista:

MONTAGEM E TESTES EM MÉDIA TENSÃO DE CHAVES ESTÁTICAS PARA UM REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAPES

Eduardo Esteves de Souza Netto

JULHO de 2012

Orientador: Maurício Aredes, Dr.–Ing.

Curso: Engenharia Elétrica

Os reguladores de tensão (RT) com comutadores eletromecânicos de tapes vêm sendo utilizados nos sistemas de distribuição para garantir que os consumidores disponham de uma tensão dentro dos limites adequados de fornecimento. Melhorias no desempenho do RT, sendo mais específico, no circuito de acionamento e monitoração, com a substituição dos comutadores mecânicos por Chaves Estáticas (Comutador Eletrônico), permitem a comutação de tapes de forma direta, sem precisar da transição de tapes na forma sequencial, como acontece nos eletromecânicos.

Para a construção de um comutador eletrônico de tapes é necessária uma associação em série de semicondutores de potência, já que a tensão de trabalho do comutador é superior a tensão de cada dispositivo semicondutor utilizado. A divisão uniforme de tensão entre os elementos deve ser assegurada, respeitando os limites de tolerância. Como as impedâncias de bloqueio variam entre si em função da temperatura, uma equalização deve ser feita para que as tensões em cada módulo (tiristores SKKT-162) tenham o mesmo valor, e uma das formas é colocar resistores em paralelo com cada componente da associação série.

O objetivo deste trabalho é testar e montar as 12 chaves que fazem parte de um segmento (uma fase) e analisar o comportamento das mesmas diante de situações de bloqueio e condução.

Palavras-chave: Chave Estática, RECET, Qualidade de Energia, Comutador Eletrônico.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

ASSEMBLY AND TESTING IN MEDIUM VOLTAGE OF STATIC SWITCHES
FOR A VOLTAGE REGULATOR WITH SWITCH ELECTRONIC TAPS

Eduardo Esteves de Souza Netto

JULY/2012

Advisor: Maurício Aredes, Dr.-Ing.

Course: Electrical Engineering

Voltage Regulators (RT) with electromechanical switches taps have been used in distribution systems to ensure that consumers have a voltage within the appropriate supply limits. Improvements in the performance of RT, being more specific, the drive circuit and monitoring, with the electromechanical switches replacement by Static Switches (Electronic Switch), allow the taps commutation directly, without going through taps sequentially, as in electromechanical.

For the construction of a regulator with switch electronic taps , it is required a series combination of semiconductor power devices, since the voltage power source supply is higher than the voltage of each semiconductor device used. The uniform voltage division between the devices should be ensured within the limits of tolerance. As the impedance blocking vary from each other depending on the work temperature, it is desired a voltage equalization on each module (SKKT-162 thyristor. One way to goal the voltage equalization is to place resistors in parallel with each device in the series association. This work aim to test and assemble the 12 keys that are part of a segment (a phase) and analyze those behavior in situations of blocking and driving.

Keywords: Static Switch, RECET, Power Quality, Electronic Switch

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – MOTIVAÇÃO	3
1.2 – VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD)	4
1.3 – CAPÍTULOS SEGUINTE	7
CAPÍTULO 2 - INTRODUÇÃO AO RECET	9
2.1 – REGULADORES DE TENSÃO	9
2.2 – REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTAÇÃO ELETRÔNICA DE TAP	13
2.3 – CIRCUITO COM COMUTADOR BASEADO EM TIRISTORES	13
2.4 – TOPOLOGIA DO RECET	18
2.5 – MODELO DA CHAVE UTILIZADA EM BANCADA EXPERIMENTAL ...	19
2.5.1 – ASSOCIAÇÃO SÉRIE DE TIRISTORES	20
2.5.2 – CÁLCULO DO RESISTOR DE EQUALIZAÇÃO	22
2.6 – DRIVER	26
2.7 – TRANSFORMADOR PLANAR	28
2.8 – RETIFICADOR	30
2.9 – TESTES DE TENSÃO APLICADA	30
CAPÍTULO 3 – AMBIENTE DE TESTES	32
3.1 – EQUIPAMENTOS EXISTENTES	32
3.1.1 – EQUIPAMENTOS DO CIRCUITO DE ACIONAMENTO E POTÊNCIA	32
3.1.2 – INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	34
3.2 – EQUIPAMENTOS DE SEGURANÇA	34
3.3 – NORMA 14039	35
3.4 – O LABORATÓRIO DE MÉDIA TENSÃO	40
3.5 – O TESTE	41
4 – SIMULAÇÕES DO CIRCUITO	43
4.1 – SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE TESTES DA CHAVE ESTÁTICA	43
4.1.1 – SIMULAÇÃO EM ESTADO DE CONDUÇÃO	45
4.1.2 – SIMULAÇÃO EM ESTADO DE BLOQUEIO	47
4.1.3 – VARIAÇÃO NOS VALORES DOS RESISTORES DA REDE DE EQUALIZAÇÃO ESTÁTICA	51

4.1.4 – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA INTERNA DOS TIRISTORES EM ESTADO DE BLOQUEIO	53
5 – MONTAGEM DO CIRCUITO DE POTÊNCIA E ACIONAMENTO	56
5.1 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	57
5.2 – TRABALHOS FUTUROS	60
5.3 – CONCLUSÃO	61
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXO 1 - EQUIPAMENTOS DOS CIRCUITOS DE ACIONAMENTO E POTÊNCIA	66
ANEXO 2 – INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	72

Índice de figuras

Figura 1.1 - VTCD - Elevação de tensão (pu).....	5
Figura 1.2 - VTCD - Afundamento de tensão (pu).....	5
Figura 2.1 - REGULADOR DE TENSÃO MONOFÁSICO AUTOMÁTICO RAV-2 – ITB	11
Figura 2.2 – RT do tipo A abaixador.....	11
Figura 2.3 – RT do tipo A elevador.....	11
Figura 2.4 – RT do tipo B abaixador	11
Figura 2.5 – RT do tipo B elevador	11
Figura 2.6 – Diagrama esquemático de um regulador do tipo B geral.....	12
Figura 2.7 – Circuito de Mudança de Tapes com o Reator de Equalização junto ao Reator de Comutação	12
Figura 2.8 – Esquema elétrico do RECET (Tipo A)	14
Figura 2.9 – Tiristores conectados em antiparalelo	14
Figura 2.10 - Esquema elétrico do RECET (tipo B) com 3 exemplos de compensação (mostrados na tabela 2.1: (a) Fase A <i>Step</i> 6, (b) Fase B <i>Step</i> 0 e (c) Fase C <i>Step</i> -10	17
Figura 2.11 – Esquema de ligação das chaves estáticas	19
Figura 2.12 – Chave Estática completa para simulação em bancada experimental	20
Figura 2.13 – Tensões em associações série de tiristores sem rede de equalização	21
Figura 2.14 – Chave estática com a rede de equalização estática	22
Figura 2.15 – Módulo com 2 tiristores SKKT-162 da SEMIKRON	22
Figura 2.16 – Montagem para medição da resistência interna do tiristor.....	23
Figura 2.17 – Equalização estática de componentes em uma associação em série	24
Figura 2.18 – <i>Layer top</i> da placa	27
Figura 2.19 – <i>Layer bottom</i> da placa	27
Figura 2.20 – Driver montado	28
Figura 2.21 – Forma de borracha para fabricação do transformador planar.	29
Figura 2.22 – Transformador planar	29
Figura 2.23 – Placa do retificador montada para utilização na chave estática (circulada em vermelho).....	30
Figura 3.1 – Esquema simplificado do circuito para realização dos testes	33
Figura 3.2 – Esquema TNR	36
Figura 3.3 – Dimensões para uma instalação interna e circulação por mais de um lado	38
Figura 4.1 – Circuito para simulação dos testes na chave estática com rede de equalização	44
Figura 4.2 – Tensão no transformador elevador e abaixador, respectivamente	45
Figura 4.3 – Tensão na chave estática (em condução)	46
Figura 4.4 – Tensão em cima de cada módulo de tiristores (em condução).....	46
Figura 4.5 – Corrente na carga (em condução)	47
Figura 4.6 – Tensão no transformador elevador e abaixador, respectivamente (em bloqueio).....	48
Figura 4.7 – Tensão no transformador abaixador (primário – lado de média tensão).	48
Figura 4.8 – Tensão na chave estática (em bloqueio).....	49
Figura 4.9 – Tensão em cima de cada módulo de tiristores (em bloqueio).	49
Figura 4.10 – Corrente na carga (em bloqueio).....	50
Figura 4.11 – Corrente na carga (em bloqueio).....	51

Figura 4.12 – Tensões em cima dos módulos de tiristores (resistores de equalização diferentes).....	52
Figura 4.13 – Tensão em cima dos módulos de tiristores (resistências internas diferentes).....	54
Figura 5.1 – Disposição de parte dos equipamentos utilizados para a realização dos testes da chave estática	56
Figura 5.2 – Parte do circuito de acionamento	57
Figura 5.3 – Chaves estáticas	58
Figura 5.4 – Formas de onda para tensão e corrente (amarelo e azul, respectivamente) adquiridas com osciloscópio.....	59
Figura 5.5 – Forma de onda da tensão aplicada na chave estática	59
Figura 5.6 – Forma de onda da corrente que passa na chave estática	60
Figura 5.7 – Esquema feito em AutoCAD da interligação das 12 chaves.....	61
Figura A.1.1 – Botoeira de duas posições	66
Figura A.1.2– Placa de disparo	66
Figura A.1.3– Placa I/O	67
Figura A.1.4– Relé eletromecânico TN4RC3 24 V CC	67
Figura A.1.5– Soquete para o relé	68
Figura A.1.6– Princípio de funcionamento do contator	68
Figura A.1.7– Variador de tensão da AUJE trifásico 220V, 50/60 Hz	69
Figura A.1.8– Transformador monofásico da ITB	70
Figura A.1.9– Associação série-paralelo de resistores.....	70
Figura A.1.10 – Carga resistiva.....	71
Figura A.2.1– TP - Transformador de potencial	72
Figura A.2.2– Alicates amperímetro (Tektronix)	73
Figura A.2.3 – Osciloscópio modelo Tektronix TPS-2024.	74

Índice de tabelas

Tabela 1.1 – Classificação das variações de tensão de curta duração [3]	6
Tabela 1.2 – Variações de tensão de curta duração (VTCD) [5].....	6
Tabela 2.1 – Nível de compensação por degrau de tensão [Confidencial]	16
Tabela 3.1 – Espaçamento para instalações internas [22]	39
Tabela 3.2 – Distâncias mínimas x tensão nominal da instalação [22]	39

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Antes dos anos 70, a preocupação básica era a garantia do fornecimento da energia elétrica, mas após esta década esse pensamento mudou. Os consumidores e o governo começaram a se preocupar com os índices de qualidade no fornecimento de energia elétrica. Na atual conjuntura que a humanidade vive, a tecnologia se faz cada vez mais necessária no que diz respeito à qualidade de vida. Os equipamentos que proporcionam um aumento na expectativa de vida ou que facilitam a execução de certas tarefas, importantes no dia-a-dia de cada pessoa, independentemente da profissão, requer uma energia de qualidade para funcionarem adequadamente. A demanda por energia é cada vez maior, pois a modernização dos trabalhos e a automatização dos processos em todos os setores das indústrias aumentam a cada dia em consequência dos incentivos recebidos pelas empresas, sejam públicos, ou privados.

Quase toda a energia utilizada pela população, pelas indústrias e outros setores, é entregue através de redes de distribuição, primária ou secundária. Estas redes representam uma parte, um segmento, do setor elétrico. A rede secundária atende os consumidores com potência instalada até 50 kW e a primária atende, a princípio, os consumidores que têm potência instalada entre 50 kW e 2500 kW. Os níveis de tensão são diferentes, sendo baixa tensão na rede secundária e dentro das faixas de 15, 25 e 35 kV na primária.

A Resolução nº 505 da ANEEL [1], publicada no dia 01 de fevereiro de 2012, estabelece de forma atualizada e consolidada as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, ou seja, a qualidade do produto. Neste documento são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão e outros critérios como indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, os prazos para regularização e compensação ao

consumidor, caso as medições de tensão ultrapassem os limites que constam nos indicadores. Com a constante busca por melhorias e regulamentação do sistema de distribuição por conta da ANEEL, houve a contratação do CEPEL em 1999 e este deu início à elaboração do documento que resultou na primeira versão aprovada dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, dezembro de 2009 [2]. Porém já existe uma revisão atualizada (revisão 4) com data de vigência em 01 de fevereiro de 2012. .

O PRODIST é dividido em 8 módulos e o Módulo 8 trata exatamente da qualidade de energia elétrica [3], estabelecendo procedimentos e levando em consideração a qualidade do produto e a qualidade do serviço. Neste Módulo 8, são incluídas, além da tensão em regime permanente, outros indicativos de qualidade, conforme mostrado abaixo:

- Harmônicos;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variação de tensão de curta duração;
- Variação de frequência.

Neste trabalho o universo de estudo está na rede elétrica primária, com a intenção de conseguir um controle de tensão mais sofisticado e seguro. Um dos maiores objetivos no que diz respeito ao controle de tensão é proporcionar uma tensão que esteja dentro dos limites aceitáveis de fornecimento para o consumidor. Os equipamentos, por exemplo, de uma residência, possuem limites de variação de tensão. No projeto é determinado um valor de tensão, valor nominal, e há um intervalo no qual a variação da tensão para mais ou para menos é permitida sem que o equipamento deixe de funcionar

ou sofra algum dano. É preciso observar, também, que o valor da tensão fornecida para os consumidores dependerá da situação operacional do sistema de distribuição e deve ser considerada a localização do consumidor em relação à concessionária.

A regulação de tensão está relacionada ao regime permanente nos sistemas de distribuição elétrica. As variações que ocorrem na amplitude de tensão se estendem por um longo período de tempo, e se caracterizam como fenômenos que podem ocorrer de forma cíclica ou por alguma falha na rede elétrica. A regulação de tensão é a relação entre a tensão contratada e a tensão de operação no ponto de conexão do sistema. Sendo assim, a ocorrência de queda de tensão em diferentes pontos da rede ao longo dos alimentadores afeta de forma direta a regulação de tensão.

Diversos métodos já foram estudados e desenvolvidos para serem utilizados na regulação da tensão, conforme citado em [4], e os principais podem ser vistos abaixo:

- Aplicação de capacitores em subestações;
- Instalação de novas subestações e/ou alimentadores;
- Transferência de carga para novos alimentadores;
- Aumento da bitola dos condutores ou até mesmo aumento do número de fases em seções dos alimentadores;
- Elevação do nível da tensão primária;
- Utilização de reguladores de tensão (RT) em subestações ou ao longo da rede de distribuição.

1.1 – MOTIVAÇÃO

O foco de estudo deste trabalho está no último item mencionado acima. Os Reguladores de Tensão com Comutação Eletromecânica de Tapes proporcionam um

bom desempenho na regulação de tensão em regime permanente. Porém, este tipo de regulador precisa variar seus tapes de forma sequencial até chegar ao *tape* desejado, para que a tensão seja compensada e se mantenha dentro dos níveis permitidos.

Com o objetivo de obter um tempo de resposta mais rápido na atuação do Regulador de Tensão, foram estudados os Reguladores de Tensão com Comutador Eletrônico de Tapes (S-DVR – *Step Dynamic Voltage Regulator*). Este equipamento permite que a regulação da tensão atue mesmo na ocorrência de uma VTCD (Variação de Tensão de Curta Duração), sendo assim, a regulação pode atuar em uma faixa mais ampla, fornecendo uma tensão de boa qualidade.

Uma grande diferença do S-DVR em relação ao regulador com comutação eletromecânica é que a comutação dos tapes, no regulador com comutação eletrônica pode ser feita diretamente para o *tape* desejado, sem precisar passar sequencialmente. Por exemplo, se o *tape* utilizado é o primeiro e foi detectado que necessita-se ir para o último *tape* para corrigir uma determinada falha que alterou o valor da tensão, a comutação será feita do primeiro para o último sem precisar passar pelo segundo, terceiro, quarto, etc.

1.2 – VARIACAO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD)

As Variações de Tensão de Curta Duração são eventos de afundamento e elevação de tensão com duração de 1 ciclo (aproximadamente 17 ms) a 3 minutos, dependendo da norma a ser considerada. A qualidade de energia é importante para três blocos relacionados com a energia elétrica: consumidores, fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos e concessionárias. Segundo [5], um distúrbio de energia elétrica é qualquer variação na tensão que ocasione um funcionamento inadequado de equipamentos que utilizam esta energia.

Em [6] encontra-se uma definição para afundamento de tensão (*voltage sag*) como sendo uma diminuição no valor eficaz da tensão CA entre 10% a 90% do valor nominal, e ainda define a elevação de tensão (*voltage swell*) como acréscimo da tensão nominal que pode variar de 0,5 ciclo a alguns segundos. No caso do efeito *flicker*, o documento diz que se trata de uma variação com duração suficiente para ser percebida visualmente na intensidade luminosa, por exemplo. Nas figuras abaixo podem ser vistos os exemplos de elevação e afundamento de tensão. O intuito das figuras a seguir não é mostrar o valor da tensão nem o tempo, é apenas mostrar os efeitos causados na tensão por causa dos distúrbios citados (*voltage swell* e *sag*, respectivamente).

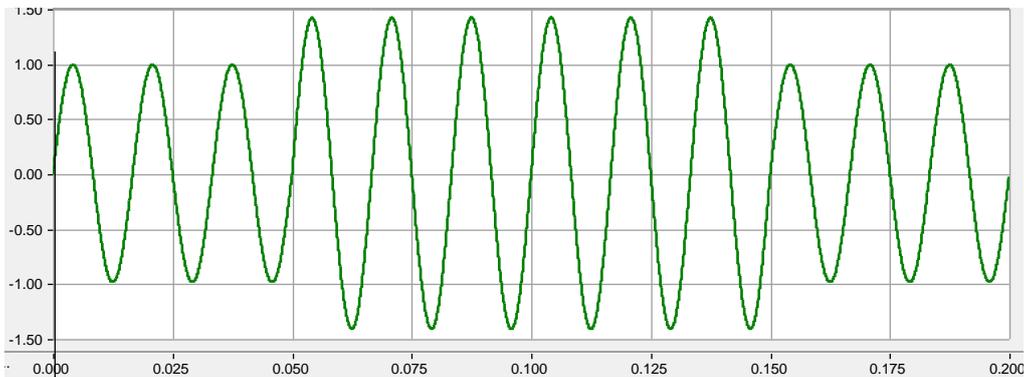


Figura 1.1: VTCD - Elevação de tensão (pu).

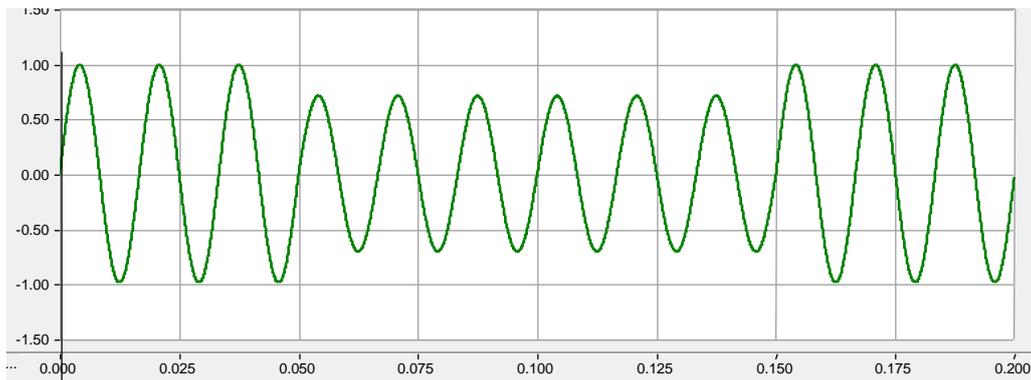


Figura 1.2: VTCD - Afundamento de tensão (pu).

As VTCD são classificadas de acordo com a tabela mostrada a seguir:

Classificação	Denominação	Duração da variação	Amplitude de tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
---------------	-------------	---------------------	--

Variação momentânea de tensão	Interrupção momentânea de tensão	$t \leq 3s$	$V_{ef} < 0,1 \text{ pu}$
	Afundamento momentâneo de tensão	$1 \text{ ciclo} \leq t \leq 3s$	$0,1 \leq V_{ef} < 0,9 \text{ pu}$
	Elevação momentânea de tensão	$1 \text{ ciclo} \leq t \leq 3s$	$V_{ef} < 1,1 \text{ pu}$
Variação temporária de tensão	Interrupção temporária de tensão	$3s \leq t \leq 3 \text{ minutos}$	$V_{ef} < 0,1 \text{ pu}$
	Afundamento temporário de tensão	$3s \leq t \leq 3 \text{ minutos}$	$0,1 \leq V_{ef} < 0,9 \text{ pu}$
	Elevação temporária de tensão	$3s \leq t \leq 3 \text{ minutos}$	$V_{ef} > 1,1 \text{ pu}$

Tabela 1.1: Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração [3]

De acordo com [5], a classificação dos distúrbios de qualidade de energia definindo as variações de tensão de curta duração são: instantâneos, momentâneos ou temporários de acordo com a tabela abaixo.

VTCD	Denominação	Duração da variação	Amplitude de tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Instantânea	Afundamento (<i>sag</i> ou <i>dip</i>)	0.5 - 30 ciclos	$0,1 \leq V_{ef} < 0,9 \text{ pu}$
	Elevação (<i>swell</i> ou <i>surge</i>)	0.5 - 30 ciclos	$1,1 \leq V_{ef} < 1,8 \text{ pu}$
Momentânea	Interrupção	0.5 ciclo - 3.0 seg.	$V_{ef} < 0,1 \text{ pu}$
	Afundamento (<i>sag</i> ou <i>dip</i>)	30 ciclo - 3.0 seg.	$0,1 \leq V_{ef} < 0,9 \text{ pu}$
	Elevação (<i>swell</i> ou <i>surge</i>)	30 ciclo - 3.0 seg.	$1,1 \leq V_{ef} < 1,4 \text{ pu}$
Temporária	Interrupção	3.0 seg. - 1.0 min.	$V_{ef} < 0,1 \text{ pu}$
	Afundamento (<i>sag</i> ou <i>dip</i>)	3.0 seg. - 1.0 min.	$0,1 \leq V_{ef} < 0,9 \text{ pu}$
	Elevação (<i>swell</i> ou <i>surge</i>)	3.0 seg. - 1.0 min.	$1,1 \leq V_{ef} < 1,2 \text{ pu}$

Tabela 1.2: Variações de tensão de curta duração (VTCD's) [5].

As Variações de Tensão de Curta Duração relacionadas ao afundamento de tensão (*sag*) são ocasionadas por ocorrências de falhas no sistema (curtos-circuitos), energização de transformadores, partida de grandes motores, etc. Apesar de diversos motivos, os curtos-circuitos são os que representam a maior parte das falhas no sistema, principalmente em se tratando da rede de distribuição. Normalmente quando ocorre uma falta, o sistema de proteção atua em alguns milissegundos até que o sistema volte ao seu

funcionamento normal. Mas quando esta ação não acontece, algum dispositivo de proteção (disjuntor, fusível, *circuit breaker*) atua interrompendo a parte do sistema que se situa na área atingida. Durante a falha, a tensão estará interrompida no alimentador atingido, assim como em outros pontos do sistema.

Quando se fala nas VTCD relacionadas à elevação de tensão (*swell* ou *surge*), pode-se citar o exemplo do desligamento de cargas pesadas do sistema como um motivo para tal ocorrência. Cabe evidenciar que, frequentemente, os afundamentos (*sag*) monofásicos provocam elevações de tensão (*swell*) nas outras fases.

A VTCD é considerada um dos distúrbios que mais causam problemas às concessionárias quando se trata de qualidade de energia, como também aos consumidores (principalmente os industriais). Portanto, a atuação do Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Tapes irá proporcionar uma minimização dos impactos das VTCD no sistema. Tal minimização será possível devido ao fato deste tipo de regulador conseguir compensar variações de tensões a partir de pouco mais de meio ciclo

1.3 – CAPÍTULOS SEGUINTE

No capítulo 2 será feita uma introdução ao RECET e a apresentação sobre o tipo de regulador de tensão utilizado e suas diferentes formas de operação, e então será introduzido o conceito do regulador com comutação eletrônica. Também será apresentado o modelo de chave estática, assim como a necessidade da associação em série dos tiristores e a inserção da rede de equalização estática.

O Laboratório de Média Tensão será mostrado no capítulo 3. A preparação do ambiente de testes, a montagem do circuito de acionamento e de potência e os equipamentos utilizados serão descritos nesta seção do documento.

No capítulo 4 serão mostradas as simulações realizadas no software PSCAD, e as análises dos resultados encontrados. O capítulo 5, apresentará os testes com tensão aplicada realizados em bancada e os resultados comparados com a simulação. Ainda no capítulo 5, serão feitas as conclusões e indicações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – INTRODUÇÃO AO RECET

Neste capítulo serão mostrados dois tipos de reguladores de tensão (tipo A e tipo B) e o tipo escolhido para o RECET. Também será mostrada a metodologia utilizada para a concepção das chaves estáticas e a lógica utilizada para a compensação de tensão.

Ainda neste capítulo, as diferentes partes que compõem uma chave estática serão apresentadas para um breve entendimento do funcionamento das mesmas e ainda um modelo da chave utilizada nos testes em bancada experimental.

2.1 – REGULADORES DE TENSÃO

Estes equipamentos são utilizados para manter o nível de tensão dentro dos limites especificados, na distribuição urbana ou rural, quando esta foge dos valores aceitáveis, de acordo com a norma. Os RT são basicamente autotransformadores com tapes que podem operar com comutação em carga, tanto como redutores quanto como elevadores de tensão. Com isso, além do acoplamento magnético, existe o acoplamento elétrico. No regulador de tensão, parte da potência é transferida de forma eletromagnética, que é a potência própria, e a outra parte é transferida por meio de condução, que é a potência transformada. O projeto do regulador é desenvolvido tomando como base a potência transformada.

Os reguladores mais utilizados pelas concessionárias de distribuição de energia são aqueles constituídos por um autotransformador monofásico imerso em óleo isolante, com várias derivações ou tapes no secundário, conhecidos como degraus de tensão. São geralmente denominados como sendo *Regulador de Tensão por Degraus*. Cada tape proporciona um nível ou degrau de tensão, que é conectado à carga através de uma chave automática mecânica, comumente denominada de *comutador de derivação em carga (on-load tap-changer)* [7]. Este nome indica, portanto, que a operação do equipamento é, feita sem interrupção da carga.



Figura 2.1: Regulador De Tensão Monofásico Automático Rav-2 – Itb

Os RT, em termos de padrões estabelecidos [8], podem ser de dois tipos:

- *Regulador de tensão do tipo A:* a comutação é feita pelo lado da carga. O circuito primário está diretamente ligado ao enrolamento paralelo, e este paralelo está ligado através de tapes ao circuito regulado. Este tipo de regulador de tensão é conhecido como regulador de excitação variável, pois o enrolamento de excitação sente qualquer variação de tensão fornecida pela fonte (figuras 2.2 e 2.3).
- *Regulador de tensão do tipo B:* A comutação é feita do lado da fonte. Este tipo de regulador permite obter um valor de tensão predeterminado constante em qualquer ponto do sistema. Para que este valor fique constante, o que é alterado, elevado ou abaixado, é o valor da tensão nos terminais de entrada. É conhecido como regulador de tensão com excitação constante, pois o enrolamento de excitação encontra-se do lado da carga, sendo assim, o mesmo não sente as variações de tensão da fonte (figuras 2.4 e 2.5).

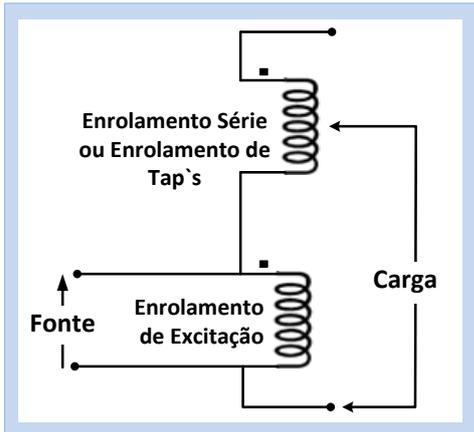


Figura 2.2: RT do tipo A abaixador

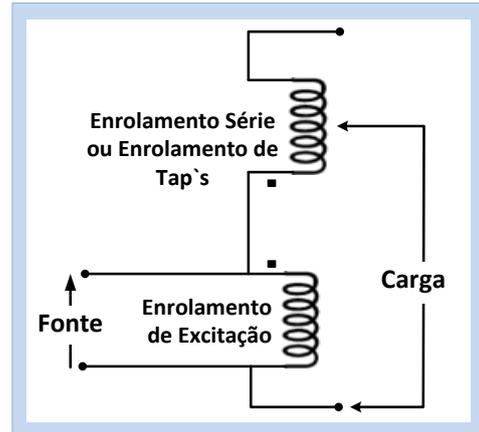


Figura 2.3: RT do tipo A elevador

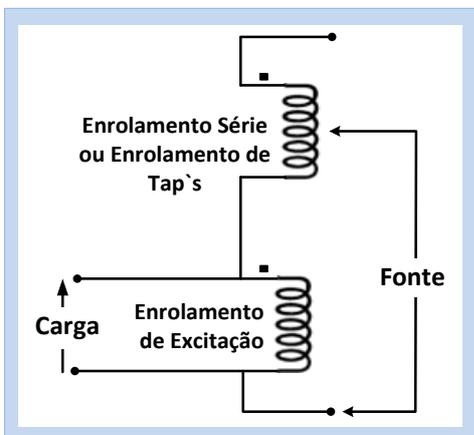


Figura 2.4: RT do tipo B abaixador

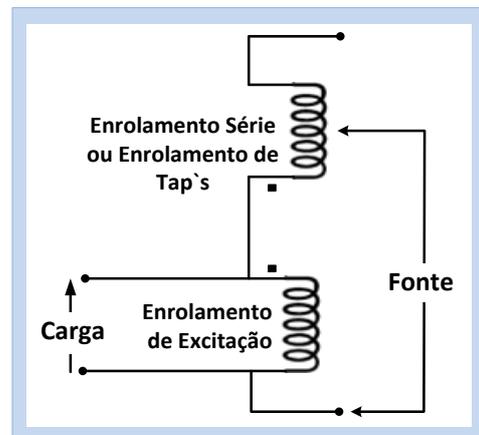


Figura 2.5: RT do tipo B elevador

Conforme pode ser visto nas figuras acima, é possível observar que a ligação como abaixador ou elevador de tensão é determinada pela polaridade da conexão do enrolamento de tapes com a bobina de excitação. Para que o equipamento trabalhe nas duas condições (abaixador ou elevador), sem precisar ficar ligando e desligando o circuito para modificar a polaridade, adiciona-se uma chave inversora de polaridade de circuito, como pode ser vista na figura 2.6, para adicionar ou subtrair a tensão do enrolamento série do circuito.

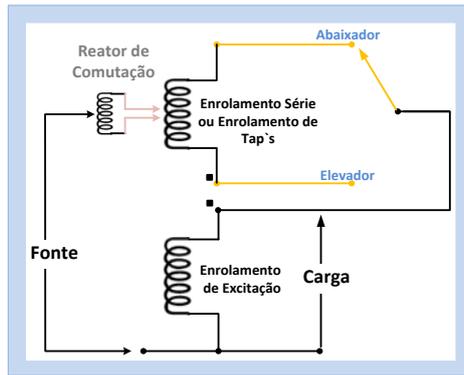


Figura 2.6: Diagrama esquemático de um regulador do tipo B geral.

O reator de comutação tem a finalidade de impedir que o circuito (corrente circulante) seja interrompido durante a comutação de tape, de forma que, enquanto uma das extremidades do reator varia o *tap*, a carga é alimentada pela outra extremidade. A corrente que circular no reator ao se aplicar uma determinada tensão em seus terminais deve ser limitada para que não haja desgaste excessivo dos contatos do comutador, e com isso a vida útil dos mesmos seja preservada.

Por conta desta necessidade de limitar a corrente no reator de comutação, e assim limitar o desgaste dos contatos em decorrência da taxa de variação de corrente $(L_R di/dt)$ entre o reator de comutação e as derivações dos tapes, um reator de equalização é adicionado ao circuito (figura 2.7). Este reator impede que a corrente que circula no reator de comutação varie, ou seja, a mesma será mantida constante independentemente da posição em que se encontra o comutador de tapes.

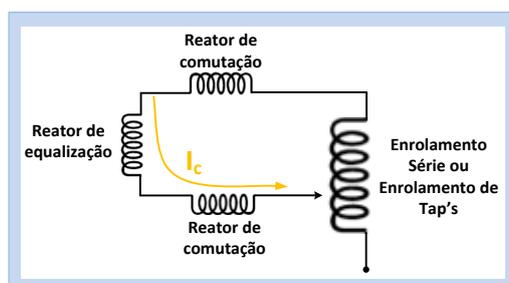


Figura 2.7: Circuito de Mudança de Tapes com o Reator de Equalização junto ao Reator de Comutação

2.2 – REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTAÇÃO ELETRÔNICA DE TAPE

A *ABB Components* foi a primeira empresa do mundo a colocar em operação um regulador de tensão com comutador eletrônico de tapes, fato ocorrido na Noruega em 1986 [9]. A partir deste acontecimento, várias propostas surgiram, envolvendo por exemplo, diferentes projetos de transformadores, técnicas de controle e conexões de chaves para regular a tensão e fornecer o nível desejado à carga. A maioria das propostas procura resolver problemas como: aumento do número de degraus de tensão disponível, diminuição das perdas por condução, diminuição do tempo de resposta às faltas e redução de custos.

2.3 – CIRCUITO COM COMUTADOR BASEADO EM TIRISTORES

A figura 2.8 mostra um diagrama unifilar de um regulador de tensão com dispositivos semicondutores de potência, baseadas em conexões antiparalelas de SCR [10]. O autotransformador é composto de um enrolamento primário e de um enrolamento secundário, e este secundário possui vários tapes. O comutador eletrônico é composto por 12 chaves CA (G1 – G12), que proporcionam 41 níveis de tensão, e por um circuito eletromagnético do autotransformador. É possível observar que os circuitos passivos de proteção (*snubbers*) não estão mostrados na figura 2.8.

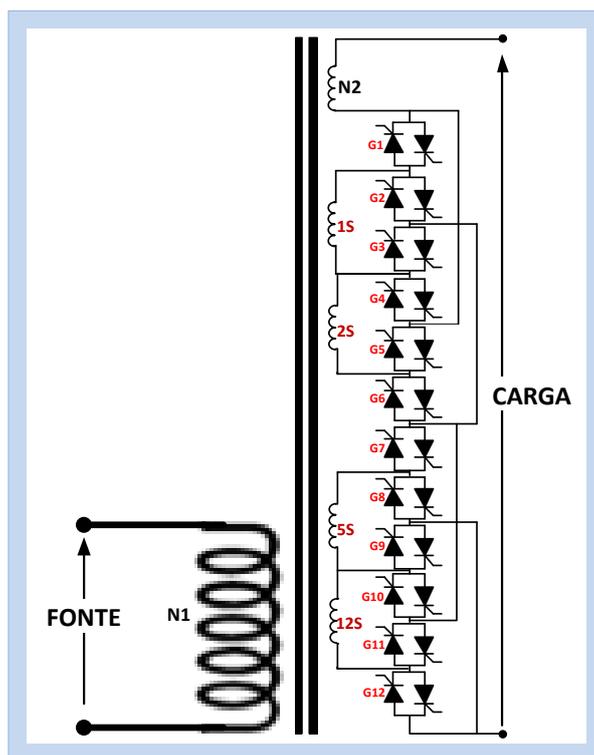


Figura 2.8: Esquema elétrico unifilar do RECET (tipo A).

Na chave estática os tiristores são ligados em pares, em antiparalelo (figura 2.9), sendo assim, há no total 8 tiristores por chave estática. Esta topologia (S-DVR20, o RECET) permite que haja uma variação de 41 níveis de tensão, os quais são divididos em 20 degraus positivos para redução de tensão de carga, 20 degraus negativos para aumento de tensão de carga e 1 nível zero. No nível zero não há redução ou aumento de tensão de carga, ou seja, não há compensação [11].

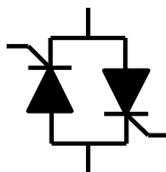


Figura 2.9: Tiristores conectados em antiparalelo

A identificação do conjunto de pares de tiristores que deve atuar na compensação é feita através de consulta a uma tabela (*look-up-table*) que relaciona o degrau (*step*) ou percentual de tensão a ser corrigido e as chaves a serem acionadas para realizar a conexão série de enrolamentos. Por exemplo, em duas situações hipotéticas de

operação, três linhas estão destacadas na tabela 2.1 (amarelo, cinza e vermelho). Cada linha representa uma compensação diferente em cada fase. Na linha destacada em amarelo, a tensão na fase A apresenta uma amplitude na faixa de 8,26576 kV até 8,31556 kV, e para esta faixa de tensão as chaves utilizadas para compensação serão G1-G3-G7-G9, que representam uma compensação de 6 níveis de tensão (6 *steps* positivos). Quando as chaves G1-G2-G7-G8 ou G1-G2-G11-G12 forem utilizadas, estas representarão um nível sem compensação (nível zero), como mostra a linha central da tabela para a fase B. Para a linha destacada em vermelho, a tensão na fase C possui uma amplitude na faixa de 7,46906 kV até 7,51886 kV. Para este nível de tensão as chaves utilizadas deverão ser G4-G6-G9-G11 representando uma compensação de 10 níveis de tensão (10 *steps* negativos).

(*) O nível de compensação zero possui, além das duas possibilidades mostradas na tabela, mais 7 diferentes possibilidades de combinação das chaves, são elas: G1-G2-G10-G9; G4-G3-G11-G12; G4-G3-G10-G9; G4-G3-G7-G8; G5-G6-G7-G8; G5-G6-G10-G9 e G5-G6-G11-G12.

	Ventrada (KV)	Tensão no TP (lado de baixa) (V)	Razão (Vsaida/Ventrada)	Tiristores disparados	Steps	Lógica de Compensação Direta
Elevação de tensão	8,96288	71,4432	88,889%	(G1G6G7G12)	20	12 + 5 + 2 + 1
	8,91308	71,0463	89,385%	(G4G6G7G12)	19	12 + 5 + 2
	8,86329	70,6494	89,888%	(G1G3G7G12)	18	12 + 5 + 1
	8,81349	70,2525	90,395%	(G1G2G7G12) (G5G6G7G12)	17	12 + 5
	8,76370	69,8556	90,909%	(G2G4G7G12)	16	12 + 5 - 1
	8,71391	69,4587	91,429%	(G3G5G7G12)	15	12 + 5 - 2
	8,66411	69,0617	91,954%	(G4G6G10G12)	14	12 + 2
	8,61432	68,6649	92,486%	(G1G3G10G12)	13	12 + 1
	8,56453	68,2680	93,023%	(G1G2G10G12) (G5G6G10G12)	12	12
	8,51473	67,8710	93,567%	(G2G4G10G12)	11	12 - 1
	8,46494	67,4742	94,118%	(G3G5G10G12)	10	12 - 2
	8,41514	67,0772	94,675%	(G2G5G10G12)	9	12 - 2 - 1
	8,36535	66,6803	95,238%	(G1G6G7G9)	8	5 + 2 + 1
	8,31556	66,2834	95,808%	(G4G6G7G9)	7	5 + 2
	8,26576	65,8865	96,386%	(G1G3G7G9)	6	5 + 1
	8,21597	65,4896	96,970%	(G1G2G7G9) (G5G6G7G9)	5	5
	8,16618	65,0927	97,561%	(G2G4G7G9)	4	5 - 1
8,11638	64,6958	98,160%	(G1G6G7G8) (G1G6G11G12)	3	1 + 2	
8,06659	64,2989	98,765%	(G4G6G7G8) (G4G6G11G12)	2	2	
8,01679	63,9019	99,379%	(G1G3G7G8) (G1G3G11G12)	1	1	
(*)	7,96700	63,5051	100,000%	(G1G2G7G8) (G1G2G11G12)	0	0
Afundamento de tensão	7,91721	63,1092	100,629%	(G2G4G7G8) (G2G4G11G12)	-1	-1
	7,86741	62,7112	101,266%	(G3G5G7G8) (G3G5G11G12)	-2	-2
	7,81762	62,3144	101,911%	(G2G5G7G8) (G2G5G11G12)	-3	-1 - 2
	7,76783	61,9175	102,564%	(G1G3G8G10)	-4	-5 + 1
	7,71803	61,5205	103,226%	(G1G2G8G10) (G5G6G8G10)	-5	-5
	7,66824	61,1237	103,896%	(G2G4G8G10)	-6	-5 - 1
	7,61844	60,7267	104,575%	(G3G5G8G10)	-7	-5 - 2
	7,56865	60,3298	105,263%	(G2G5G8G10)	-8	-5 - 2 - 1
	7,51886	59,9329	105,960%	(G1G6G9G11)	-9	-12 + 2 + 1
	7,46906	59,5360	106,667%	(G4G6G9G11)	-10	-12 + 2
	7,41927	59,1391	107,383%	(G1G3G9G11)	-11	-12 + 1
	7,36948	58,7422	108,108%	(G1G2G9G11) (G5G6G9G11)	-12	-12
	7,31968	58,3453	108,844%	(G2G4G9G11)	-13	-12 - 1
	7,26989	57,9484	109,589%	(G3G5G9G11)	-14	-12 - 2
	7,22009	57,5514	110,345%	(G4G6G8G11)	-15	-12 - 5 + 2
	7,17030	57,1546	111,111%	(G1G3G8G11)	-16	-12 - 5 + 1
	7,12051	56,7577	111,888%	(G1G2G8G11) (G5G6G8G11)	-17	-12 - 5
7,07071	56,3607	112,676%	(G2G4G8G11)	-18	-12 - 5 - 1	
7,02092	55,9639	113,475%	(G3G5G8G11)	-19	-12 - 5 - 2	
6,97113	55,5670	114,286%	(G2G5G8G11)	-20	-12 - 5 - 2 - 1	

Tabela 2.1: Nível de compensação por degrau de tensão [Relatório confidencial]

A terceira coluna da tabela acima mostra a tensão que deverá aparecer no multímetro conectado no lado de baixa tensão de um TP que, por sua vez, está conectado no secundário do transformador elevador (o circuito pode ser visto mais a frente na figura 3.1). Este TP facilita a leitura da tensão em níveis mais altos.

A seguir são mostradas três figuras que ilustram as situações hipotéticas de compensação citadas acima.

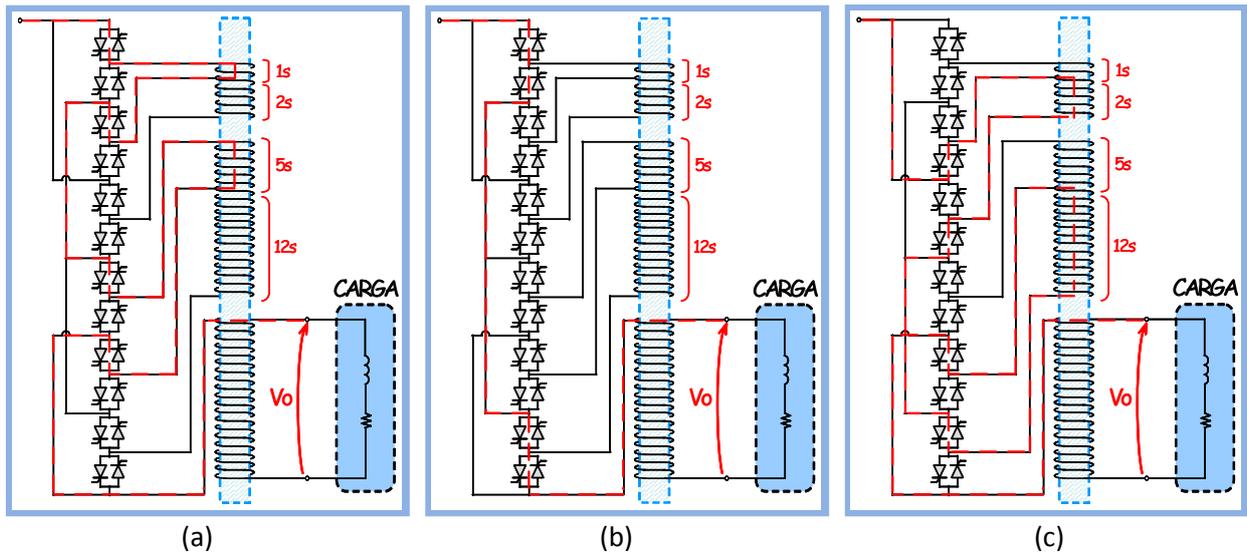


Figura 2.10: Esquema elétrico do RECET [11] (tipo B) com 3 exemplos de compensação (mostrados na tabela 2.1): (a) Fase A Step 6, (b) Fase B Step 0 e (c) Fase C Step -10.

O tempo de resposta para que a correção da tensão seja realizada é em torno de meio ciclo, pois é o tempo suficiente da corrente passar pelo zero, os tiristores desligarem e o novo grupo de chaves ser acionado. Para evitar que ocorram distorções harmônicas, foi encontrada uma forma de comutação que é chavear o tap durante o cruzamento pelo zero da corrente de linha.

Em [12] é proposta uma otimização no número de tapes e chaves, que compõem a topologia do regulador, baseada numa diferente e complexa disposição de enrolamento e de conexões de chaves. Nesta proposta os autores sustentam que, com 12 tapes e 12 chaves (tiristores ligados em antiparalelo) é possível obter 63 degraus de tensão, tendo sempre 6 chaves em série a cada instante. Já em [10] é sugerida uma configuração com 8 tapes e 12 chaves (bidirecionais), com isso é possível obter 31 degraus (incluindo o nível sem regulação), porém com 4 chaves em série no caminho de corrente. A utilização de 4 chaves em série implica em menores perdas de condução.

Outras propostas de topologia podem ser encontradas como em [13], que é um regulador com chaves eletrônicas utilizando tiristor GTO. Neste caso, o comutador é uma combinação de chaves a vácuo, acionadas por atuadores especiais, com as chaves eletrônicas. Em outras palavras, é dito que o comutador mecânico é “assistido” por chave eletrônica. O problema, presente nesta configuração, para um transformador de 240 MVA e com 19 tapes, é o tempo de resposta que pode variar entre 80 ms (mudança de tape) e 800 ms (mudança entre os 19 tapes). Nesta situação, um regulador com comutador totalmente mecânico atuaria em 100 segundos. Em [14], a topologia proposta consegue fazer uma varredura, em um transformador de 240 MVA com 19 tapes, entre todos os tapes num tempo total de 1,5 segundos.

Observa-se que, com o comutador assistido por chaves eletrônicas os tempos de resposta são competitivos quando comparados com a resposta de um tape totalmente mecânico, mas ainda são lentos para atender exigências de qualidade de energia. Portanto, após estudar as topologias encontradas nas pesquisas optou-se pela sugerida em [10], a S-DVR. Esta escolha resulta em melhorias significativas no RT, tais como: todos os tapes têm o mesmo tempo de troca (pois o dispositivo comutador não é sequencial, como acontece no comutador mecânico), o tempo de troca dos tapes é menor e há uma menor necessidade de manutenção, devido ao fato da vida útil das chaves não se degradar com o tempo pois não tem partes móveis.

2.4 – TOPOLOGIA DO RECET

Após análise das topologias pesquisadas e tomada a decisão da topologia a ser usada no Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Tape, partiu-se para o desenvolvimento de uma nova configuração baseada no S-DVR. Em [10], são mostradas três configurações de *Step Dynamic Voltage Regulator* (S-DVR): S-DVR6,

S-DVR8 e S-DVR12, e as mesmas possuem capacidade de compensar afundamentos e elevações de tensão em meio ciclo da frequência fundamental.

A topologia escolhida para o RECET, denominada S-DVR20, como citada no capítulo anterior, possui 41 níveis de compensação. Desses 41 níveis, 20 são positivos, 20 são negativos e 1 é o nível zero (sem compensação). A relação de transformação foi definida visando garantir que a excursão entre o menor e o maior nível de compensação ocorra de forma gradual segundo o menor nível permitido, por conta do número máximo de degraus ser de 20 positivos e 20 negativos. [11]

2.5 – MODELO DA CHAVE USADO EM BANCADA EXPERIMENTAL

Como podemos observar na Figura 2.12, a parte da comutação eletrônica do RECET é formada por tiristores que estão ligados aos pares em antiparalelo, e cada chave estática é composta por 4 destes pares de tiristores. Abaixo é apresentada uma ilustração do esquema elétrico para um melhor entendimento.

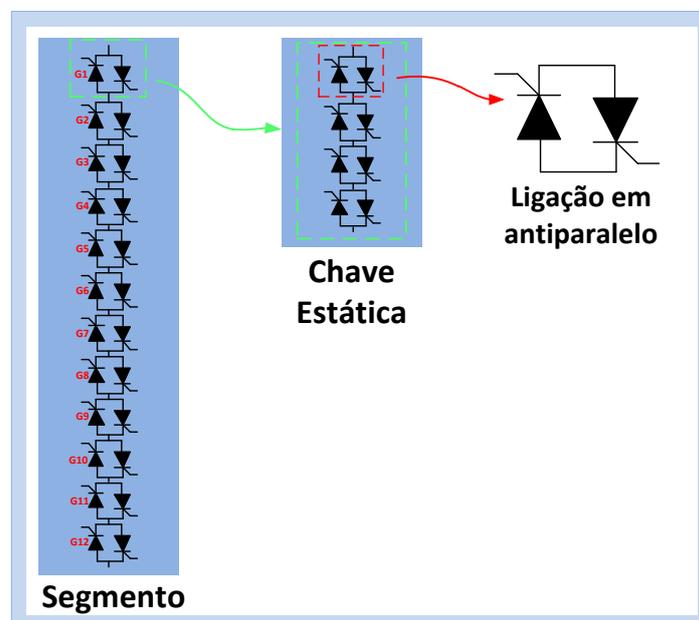


Figura 2.11: Esquema de ligação das chaves estáticas.

Após estudos em busca da melhor estrutura de dissipadores para a composição da chave estática, além da análise do comportamento termodinâmico do grupo

dissipador/tiristor [15], foi confeccionada uma chave estática para a realização de testes de tensão aplicada, em bancada experimental. Este modelo pode ser visto na Figura 2.12. As outras partes que compõem a chave estática são objetos de estudo deste trabalho, sendo assim, serão abordadas de forma superficial.

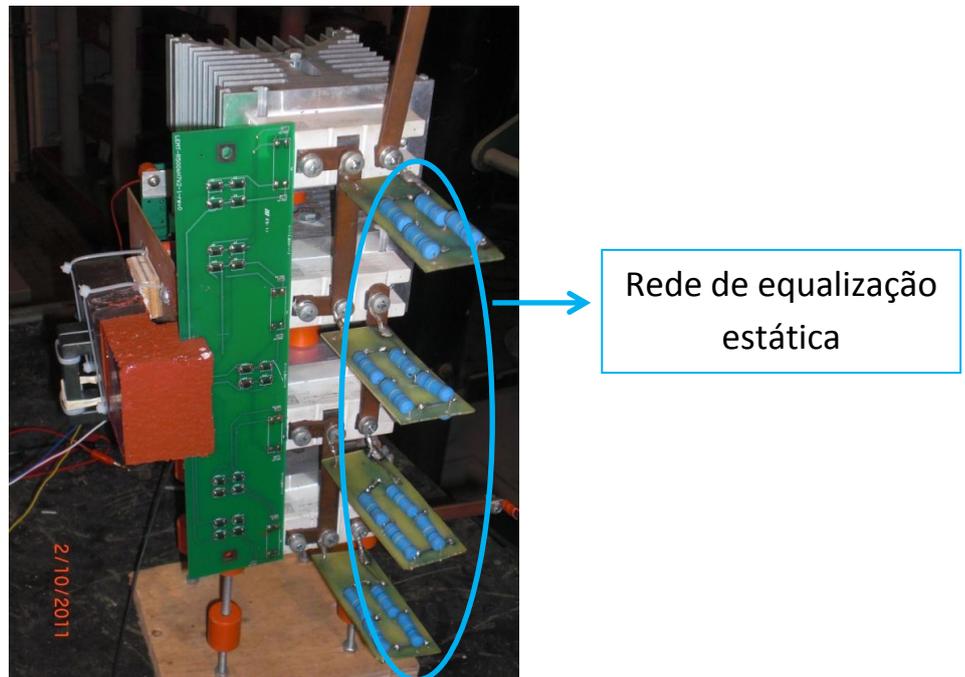


Figura 2.12: Chave Estática completa para simulação em bancada experimental

2.5.1 – ASSOCIAÇÃO SÉRIE DE TIRISTORES

Como a tensão aplicada em cada chave (7,2 kV de pico) durante os testes é superior à tensão suportada por um único tiristor, há a necessidade de fazer a ligação em série dos dispositivos semicondutores. Porém, deve-se levar em conta a diferença da natureza das correntes de bloqueio, capacitâncias de junção, tempos de atraso, quedas de tensão direta e recombinação reversa, ou seja, há uma necessidade de utilizar uma rede de equalização estática externa, que são os resistores, observados em destaque na figura 2.14, conectados em paralelo com os tiristores. Considerando um caso hipotético, temos possíveis distribuições de tensões no caso de uma associação série de 3 tiristores como mostra a figura 2.13.

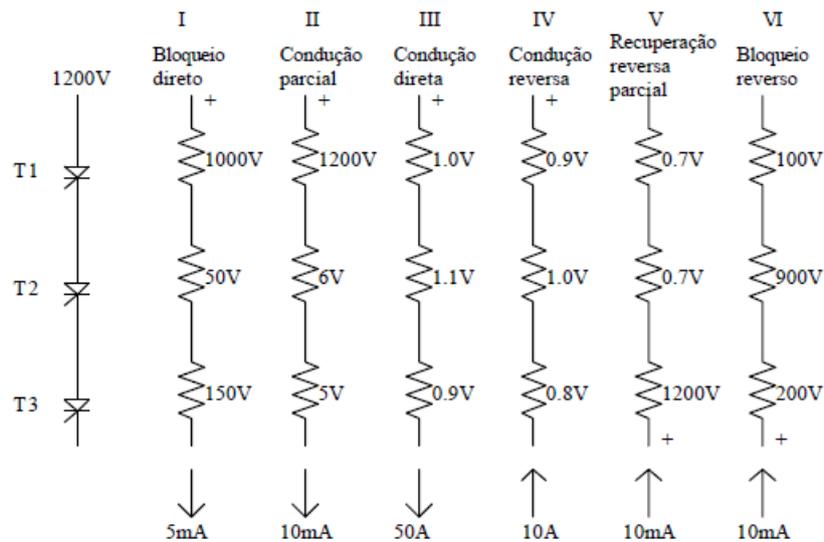


Figura 2.13: Tensões em associações série de tiristores sem rede de equalização [16]

É aconselhável a utilização de componentes com características mais próximas possíveis, pois existem diferenças de um componente para outro, que ocorrem até mesmo durante o processo de fabricação do componente. Portanto, uma distribuição desigual de tensão em regime ocorre durante os estados de bloqueio direto e reverso, I e VI. Sendo assim, o dispositivo semiconductor com a menor condutância deverá suportar a maior tensão quando bloqueado. Nos casos de condução III e IV, não existe este problema de desigualdade de queda de tensão nos tiristores. E os casos II e V mostram, respectivamente, o desbalanceamento durante os transientes de disparo e comutação. Em II, o primeiro tiristor deve suportar a maior tensão, pois possui um tempo de disparo maior do que os outros, já em V existem diferentes tempos de recombinação e o primeiro a se recombinar suporta toda a tensão.

Na figura 2.14 é mostrada uma ilustração da adição da rede de equalização estática em paralelo com os tiristores.

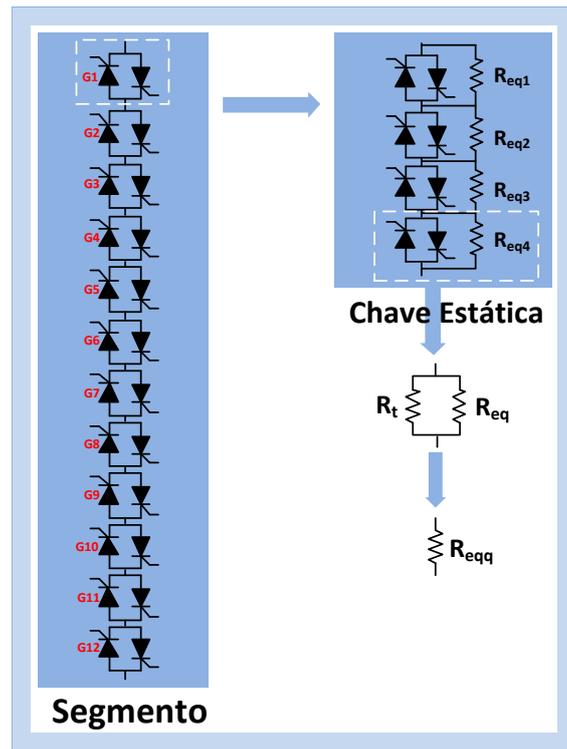


Figura 2.14: Chave estática com a rede de equalização estática

2.5.2 – CÁLCULO DO RESISTOR DE EQUALIZAÇÃO

Os tiristores possuem uma resistência interna, e no estado estático (bloqueado), será chamada de R_{off} . Como os tiristores estão ligados em antiparalelo, serão consideradas duas resistências em paralelo, R_{off_d} e R_{off_r} (direta e reversa, respectivamente). O equivalente da ligação em paralelo de R_{off_d} e R_{off_r} é a resistência R_t , mostrada na figura 2.14. A resistência R_{eq} é a resistência de equalização, e R_{eqq} é o resultado da associação em paralelo de R_t e R_{eq} .

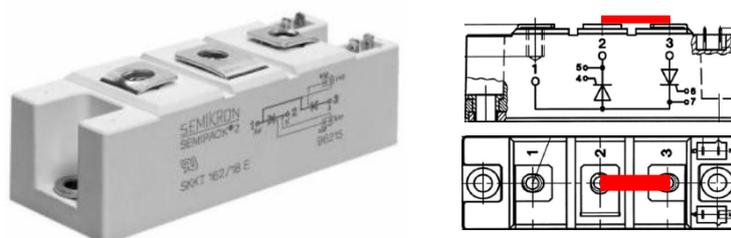


Figura 2.15: Módulo com 2 tiristores SKKT-162 da SEMIKRON

Algumas medições da resistência interna dos tiristores foram realizadas no laboratório com auxílio de uma estufa, para que fosse possível elevar a temperatura da junção do dispositivo semicondutor, e verificar o comportamento da resistência interna.

As medições foram realizadas através de um megohmetro, modelo MG-3150 da ICEL, ao aplicar uma tensão de 1 kV nos terminais 2 e 3 do componente (figura 2.15) SKKT-162 (forma de ligação para que os tiristores fiquem em antiparalelo) como pode ser visto na figura 2.16. De acordo com [16], para temperaturas altas, a corrente de fuga dobra com o aumento de 8°C na temperatura, aproximadamente. O valor da resistência diminui à medida que a temperatura aumenta.



Figura 2.16: Montagem para medição da resistência interna do tiristor

Para o cálculo da resistência de equalização será utilizado o valor de 1,1 MΩ encontrado para uma temperatura elevada, em torno de 125°C, que é a temperatura máxima suportada pelo dispositivo de acordo com o *datasheet* [17]. Como a corrente de fuga aumenta com o aumento da temperatura, no limite máximo ocorrerá o pior caso, ou seja, a corrente de fuga será a maior possível. A seguir é considerado uma associação de n tiristores em série para o dimensionamento do resistor de equalização que será utilizado.

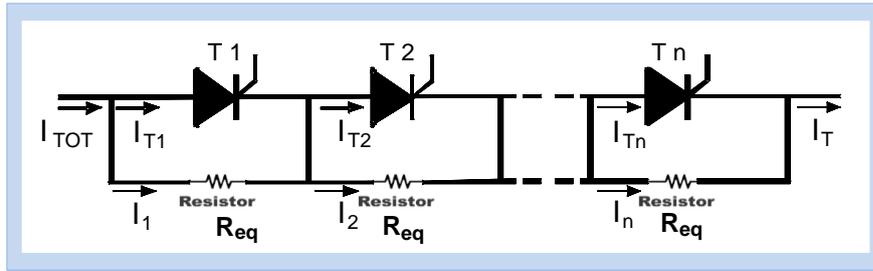


Figura 2.17: Equalização estática de componentes em uma associação em série [12]

De acordo com [18], cada resistor R_s deve conduzir uma corrente da ordem de duas a cinco vezes o valor da corrente de fuga nominal à temperatura de operação, garantindo, assim, que haja uma distribuição estática de tensão equalizada. A dedução da fórmula para o cálculo do valor do resistor de equalização, R_{eq} , é feita para o caso em que somente o SCR T_1 (figura 2.17) apresenta uma corrente de fuga menor que os demais, sendo assim, este está submetido a uma tensão superior de valor E_1 (e os demais estão submetidos a uma tensão E_n).

Da Figura 2.19:

$$I_{T2} = I_{T3} = \dots = I_{Tn} = I_T \text{ (Eq. 06)}$$

$$I_2 = I_3 = \dots = I_n = I_{Req} \text{ (Eq. 07)}$$

$$I_{T1} < I_T \text{ (Eq. 08)}$$

Como

$$I_{TOT} = I_1 + I_{T1} \rightarrow (I_{TOT} - I_1) = I_{T1} \text{ (Eq. 09)}$$

e

$$I_{TOT} = I_{Rs} + I_T \rightarrow (I_{TOT} - I_{Req}) = I_T \text{ (Eq. 10),}$$

tem-se que:

$$\Delta I_T = I_{T1} - I_T = (I_{TOT} - I_1) - (I_{TOT} - I_{Req}) \rightarrow \Delta I_T = I_{Req} - I_1 \text{ (Eq. 11).}$$

A tensão sobre T_1 será:

$$E_1 = R_{eq} \cdot I_1 \text{ (Eq. 12)}$$

e como

$$\Delta I_T < 0 \rightarrow I_1 > I_{Req} \rightarrow E_1 > I_{Req} \cdot R_{eq} \rightarrow E_1 > E_n$$

conforme afirmado anteriormente por hipótese.

A associação tem uma tensão de pico total igual a

$$E_{max} = E_1 + (n-1)I_{Req} \cdot R_{eq},$$

logo

$$E_{max} = E_1 + (n-1) \cdot (I_1 + \Delta I_T) \cdot R_{eq} = E_1 + (n-1)R_{eq} \cdot I_1 + (n-1)R_{eq} \cdot \Delta I_T \text{ (Eq. 13),}$$

sendo assim:

$$E_1 = R_{eq} \cdot I_1, E_{max} = nE_1 + (n-1) \cdot R_{eq} \cdot \Delta I_T \text{ (Eq. 14).}$$

Isolando a tensão sobre T_1 :

$$E_1 = \frac{E_{max} - (n-1) \cdot R_{eq} \cdot \Delta I_T}{n} \text{ (Eq. 15)}$$

Onde:

E_{max} : tensão máxima de pico repetitiva sobre a associação em série

E_1 : máxima tensão por célula

ΔI_T : máxima variação entre correntes residuais

Observando que $\Delta I_T < 0$ (o módulo do valor será utilizado) e isolando o valor do resistor de equalização estática em (Eq. 9) temos que:

$$R_{eq} \leq \frac{nE_1 - E_{max}}{(n-1)\Delta I_T} \text{ (Eq. 15)}$$

Os valores considerados para o cálculo deste resistor seguem abaixo:

Tiristor SKKT-162 SEMIKRON

- Temperatura: 125°C (temperatura atingida na junção com auxílio de uma estufa)
- Resistência: 1,1 MΩ (valor medido com um megohmetro – 1 kV)
- Corrente de fuga: 0,91 mA
- Tensão suportada por cada tiristor: 1800 V
- Tensão aplicada sobre o arranjo: 5 kV
- Quantidade de tiristores em série: 4

$$R_{eq} \leq \frac{4 * 1800 - 5000}{(4 - 1) * 0,91 * 10^{-3}} \rightarrow R_{eq} \leq 805,6 \text{ K}\Omega \rightarrow R_{eq} = 800 \text{ k}\Omega$$

Portanto, de acordo com os cálculos acima, o valor utilizado para cada resistor pertencente à rede de equalização será igual 800 kΩ, e foi realizada uma associação de 8 resistores em série de 100 kΩ cada um.

2.6 – DRIVER

Os dispositivos semicondutores são comandados através de um circuito chamado *gate driver*, ou apenas driver. A utilização deste circuito se faz necessária por conta da necessidade de uma considerável energia de ativação que os dispositivos eletrônicos de potência necessitam [19]. É esta energia de ativação que dá início a condução ou estabelece a condição de bloqueio dos dispositivos.

Estes circuitos *gate drivers* podem ser auto-alimentados ou com alimentação externa. Os auto-alimentados utilizam alimentação do próprio sistema ao qual estão conectados para disparar os SCR, e os circuitos com alimentação externa precisam de uma fonte de alimentação externa. Os circuitos auto-alimentados não são aconselháveis para drivers que necessitam de altas energias, principalmente em casos em que vários tiristores são ligados em série, como acontece no RECET, pois são 48 pares de tiristores

ligados em série. O circuito de *gate driver* deve ser capaz de prover um pulso de corrente contínua (I_{gt}) de pelo menos 150 mA por tiristor. Sendo a chave estática composta por 8 tiristores no total, chega-se a um total de 1,2 A de corrente nominal de saída do *gate driver*.

Sendo assim, os esforços dos estudos e pesquisas foram voltados para o circuito *gate driver* com alimentação externa, pois não seria possível carregar os elementos armazenadores do circuito auto-alimentado em tempo suficiente para disparar os tiristores. Os *layers* da placa desenvolvida e a placa do driver montada para a realização dos testes em bancada podem ser vistas nas figuras seguintes.

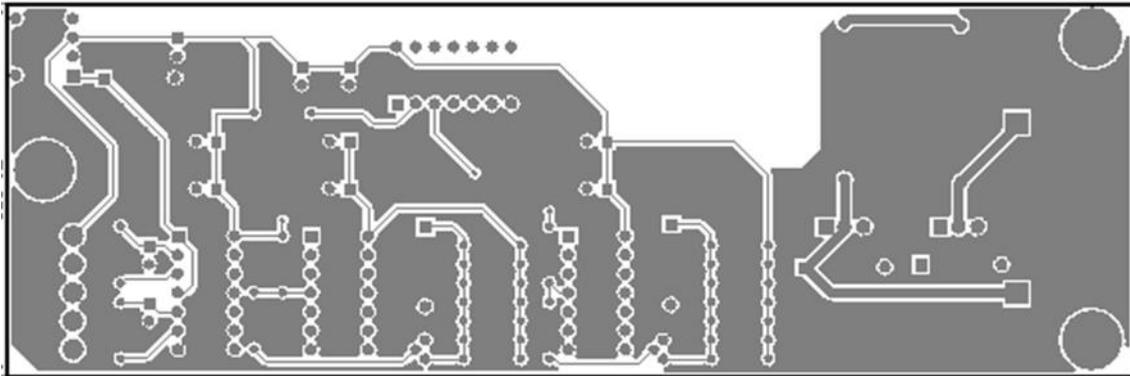


Figura 2.18: *Layer top* da placa.

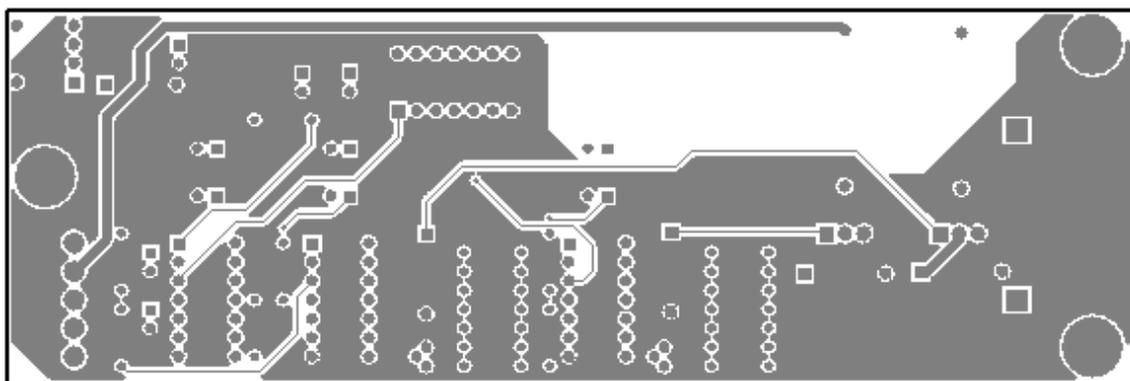


Figura 2.19: *Layer bottom* da placa.

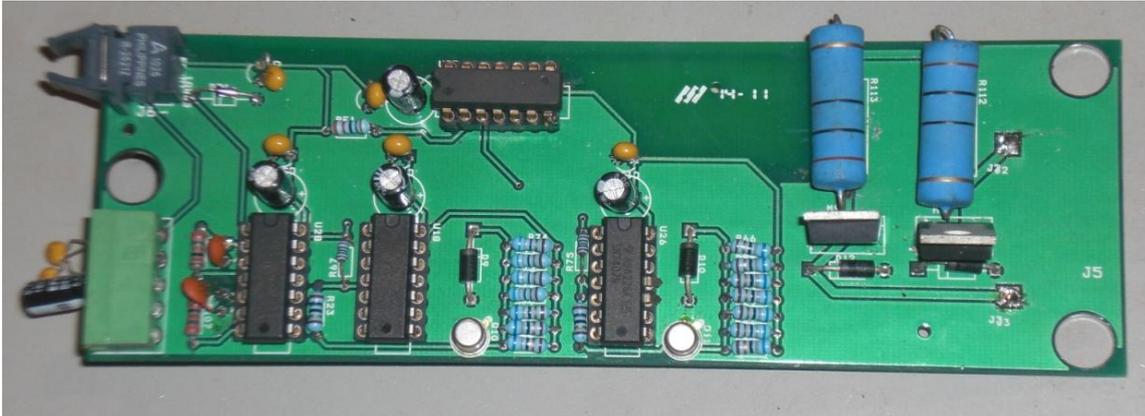


Figura 2.20: Driver montado.

2.7 – TRANSFORMADOR PLANAR

O desenvolvimento do transformador planar, foi de grande valia pela necessidade de se ter o acoplamento magnético para a transferência de energia necessária para disparar os tiristores que compõem a chave estática do RECET.

Todos os tiristores que compõem a chave estática precisam ser disparados simultaneamente para que não haja uma distribuição de tensão maior do que o limite suportado por cada um, e, conseqüentemente, o que não foi disparado receba toda a tensão aplicada na chave. O transformador de pulso planar trabalha com elevadas frequências, sem perdas significativas de energia, e transfere energia para os 5 secundários de forma sincronizada e com pouquíssima defasagem em relação ao primário.

Todo o processo de identificação do número de espiras, criação das placas, processo de resinagem (para que o transformador suportasse as TSI – Tensões suportáveis de impulso – de forma a atender as NBI) foi desenvolvido no Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão – LEMT.

A seguir são mostradas as figuras 2.21 e 2.22 que dizem respeito ao processo de fabricação do transformador:

- Processo de fabricação do transformador planar.



Figura 2.21: Forma de borracha para fabricação do transformador planar.

- Após o processo de resinagem, o transformador planar está pronto, conforme aparece na figura seguinte.

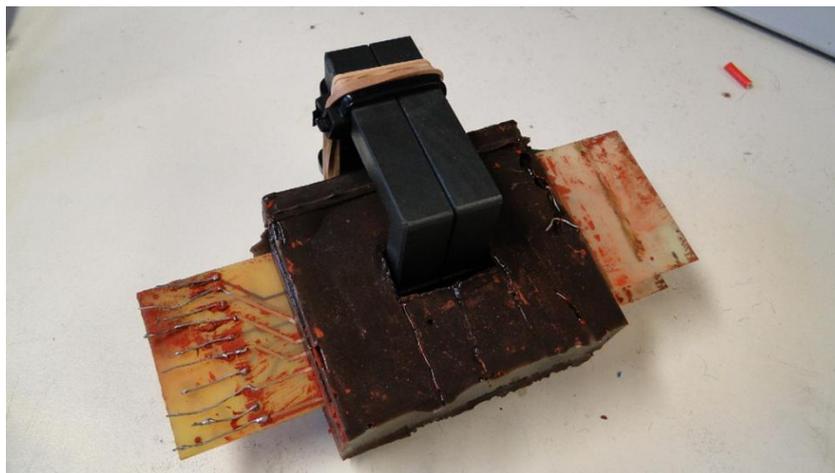


Figura 2.22: Transformador planar.

O transformador planar possui uma relação 3:1. Como o driver entrega uma tensão pulsada de 15 V no seu primário, os secundários do transformador entregam uma tensão de 5 V na placa retificadora.

De acordo com a figura 2.13, cada chave possui um driver, um transformador planar e uma placa retificadora, para que haja o correto disparo do tiristores simultaneamente.

2.8 – RETIFICADOR

O retificador é composto por um conversor com 4 (quatro) diodos ultrarrápidos e baixa tensão direta, um resistor de *gate* e um capacitor de filtro para cada uma das 8 (oito) chaves a serem disparadas.

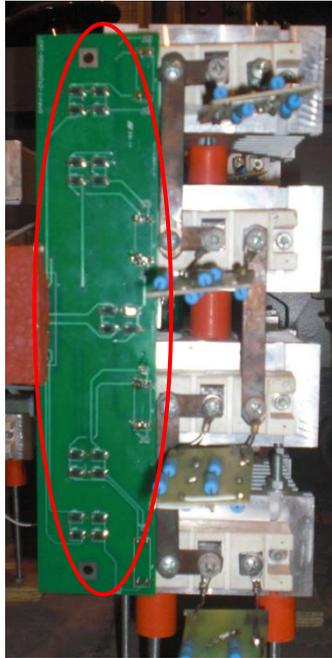


Figura 2.23 – Placa do retificador montada para utilização na chave estática (circulada em vermelho)

2.9 – TESTES DE TENSÃO APLICADA

Os testes de tensão aplicada a serem realizados nas chaves estáticas têm o intuito de observar o comportamento da mesma quando submetida a tensões de 5 kV eficazes, aproximadamente. O principal objetivo durante esses testes é que as chaves bloqueiem totalmente a tensão quando estiver no estado bloqueado, ou seja, quando o *gate* do tiristor não estiver recebendo sinal de disparo. Porém, é necessário “ligar” e “desligar” a chave para analisar a capacidade de bloqueio após um período em condução. Porém, também é importante analisar o comportamento da chave estática durante a condução, para verificar se a mesma está se comportando como deveria ou está havendo alguma falha.

Com a chave bloqueada, será aplicada uma tensão através de um variac e um circuito que inclui TP medidores de tensão e corrente e uma carga. Então será observado se a tensão aplicada está distribuída uniformemente entre os dispositivos, e isto é possível fazendo uma análise através do osciloscópio, pois se não estiver ocorrendo uma distribuição uniforme, o tiristor irá sofrer danos irreversíveis e a chave estática não irá bloquear. Esta distribuição igualitária de tensão ocorre por conta da rede de equalização mostrada na figura 2.14, e é importante, pois sem a mesma algum tiristor poderia estar submetido a uma tensão maior do que a suportada.

Após esta análise do comportamento da chave no estado estático, é enviado, através do circuito de disparo, um sinal para o *gate* e a chave passa para o estado de condução. Neste estado, conforme já foi falado no item 2.5.1, não há preocupação quanto à divisão igualitária de tensão entre os componentes, pois esta não existe. Passado certo tempo, sem um valor determinado, no estado de condução o sinal de disparo do *gate* é interrompido, e com isso a chave estática, se estiver funcionando corretamente, deverá bloquear a tensão que está sendo aplicada.

Os testes de tensão aplicada realizados nas chaves serão mostrados com mais detalhes, junto com os resultados, mais a frente.

CAPÍTULO 3 – AMBIENTE DE TESTES

Neste capítulo serão levantados os equipamentos e componentes que existem no laboratório e serão essenciais para a realização dos testes de tensão aplicada, e aqueles que foram adquiridos para que o teste fosse implementado com sucesso.

Para a realização dos testes e futuras instalações no laboratório de média tensão, foi utilizada a Norma 14039 como suporte para adequação dos equipamentos de segurança visando à integridade física de todos que trabalham neste ambiente.

3.1 – EQUIPAMENTOS EXISTENTES

O espaço destinado para estes tipos de experimentos é o anexo ao LEMT, que é chamado pela equipe de Laboratório de Média Tensão. Neste espaço foram colocados e posicionados os equipamentos e instrumentos de medição necessários.

3.1.1 – EQUIPAMENTOS DOS CIRCUITOS DE ACIONAMENTO E POTÊNCIA

A figura a seguir mostra de forma simplificada um esquema de ligação do circuito de acionamento e de potência montado no laboratório.

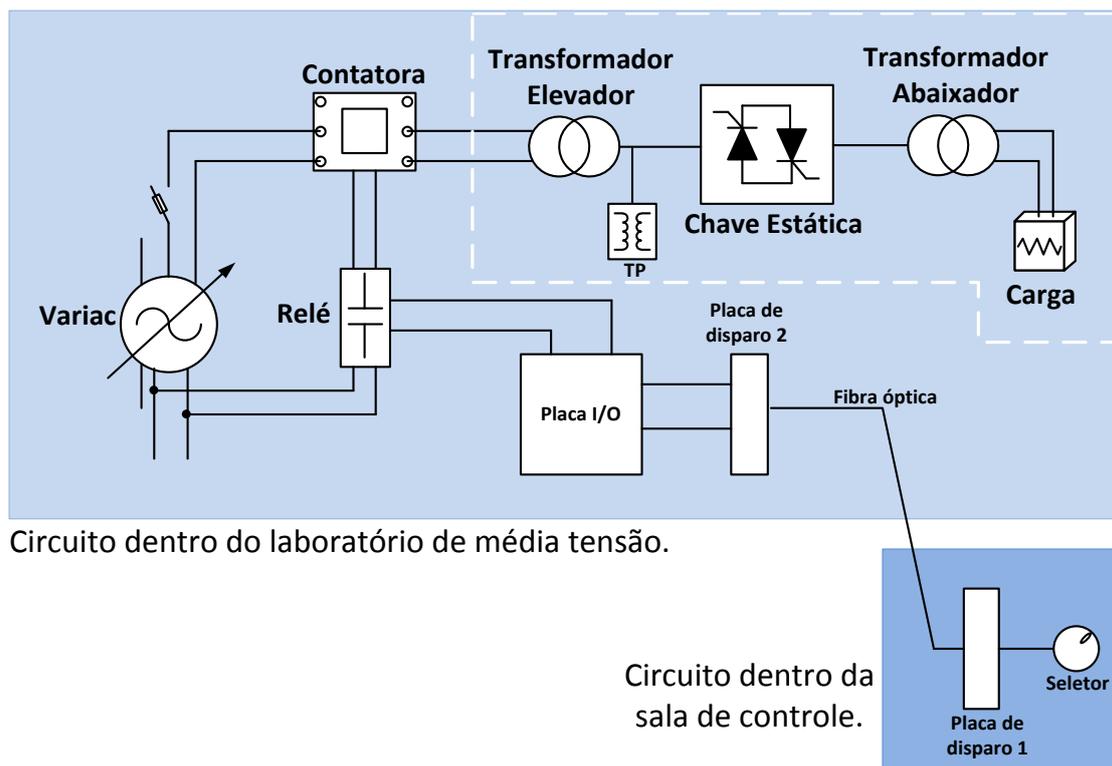


Figura 3.1: Esquema simplificado do circuito para realização dos testes

Como pode ser visto na figura 3.1, são utilizados diversos equipamentos e dispositivos tais como transformadores, contator, carga resistiva, relé, variador de tensão, entre outros. Todos os equipamentos que se encontram na figura serão listados no anexo 1 e acompanhados de uma breve explicação sobre a sua importância e funcionamento. Uma observação importante a fazer é que todo o circuito de média tensão se encontra dentro de uma gaiola, que tem a função de proteger contra explosões e possíveis objetos que possam se desprender e fornecer algum risco para o operador. Não se trata de uma Gaiola de Faraday, pois não está no mesmo potencial que a jiga de testes, e sim flutuando. Esta gaiola está simbolizada pela linha tracejada branca na figura 3.1.

3.1.2 – INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Para que fosse possível realizar a leitura do valor da tensão e corrente durante a realização dos testes, foram utilizados instrumentos de medição adequados. Estes instrumentos estão listados no anexo 2.

3.2 – EQUIPAMENTOS DE SEGURANÇA

Por ser tratar de um laboratório de média tensão, são necessários equipamentos de segurança para os operadores e qualquer outra pessoa que frequentam o laboratório. Os equipamentos que devem estar presentes para proporcionar o mínimo necessário de segurança são descritos a seguir.

- EPI – Equipamento de Proteção Individual (Texto publicado em [20])

Para os fins de aplicação desta Norma Regulamentadora – NR 6, considera-se Equipamento de Proteção Individual - EPI, todo dispositivo ou produto, de uso individual utilizado pelo trabalhador, destinado à proteção de riscos suscetíveis de ameaçar a segurança e a saúde no trabalho.

A empresa é obrigada a fornecer aos empregados, gratuitamente, EPI adequado ao risco, em perfeito estado de conservação e funcionamento, nas seguintes circunstâncias:

- a) sempre que as medidas de ordem geral não ofereçam completa proteção contra os riscos de acidentes do trabalho ou de doenças profissionais e do trabalho;
- b) enquanto as medidas de proteção coletiva estiverem sendo implantadas; e,
- c) para atender a situações de emergência.

A partir da norma [21] e outras providências que constam em [20], o laboratório se preocupou em adquirir os equipamentos necessários para fornecer uma adequada proteção para os seus funcionários e alunos perante aos riscos que a eletricidade oferece. Alguns equipamentos indispensáveis são listados abaixo.

- i) EPI para proteção da cabeça:
 - Capacete de segurança para proteção contra choques elétricos, e impactos.

- ii) EPI para proteção dos membros superiores:
 - Luva de segurança para proteção das mãos contra choques elétricos;

 - Manga de segurança para proteção do braço e do antebraço contra choques elétricos.

- iii) EPI para proteção dos membros inferiores:
 - Calçado de segurança para proteção dos pés contra choques elétricos;

Além destes ainda é necessário ter no laboratório a vestimenta (calça e camisa de acordo com a NR10) para proteção contra arco voltaico.

Os equipamentos de uso coletivo também são necessários pois, mesmo pessoas que não estejam operando ou manuseando os equipamentos poderão circular na zona livre do laboratório. Alguns equipamentos de uso coletivo já existiam no laboratório, como grade de proteção e extintores de incêndio que foram revisados e colocados em pontos estratégicos. O piso foi preparado para a instalação de um tapete de borracha, principalmente na região onde o(s) operador(es) ficará(ão), e na região onde serão colocados transformadores e a chave estática. Tudo isto foi feito em prol da segurança de todas as pessoas que circulam pelo laboratório.

3.3 – NORMA 14039

A NBR 14039 estabelece um sistema para o projeto e execução de instalações elétricas de média tensão, com tensão nominal de 1,0 kV a 36,2 kV.

Esta norma servirá de base para que o laboratório se adeque de acordo com as regras citadas neste documento. Como já existia uma instalação no laboratório, uma reforma foi realizada procurando estar de acordo com as exigências. O ambiente não

abrigará somente o circuito para testes das chaves estáticas, mas todos os equipamentos que trabalham com uma tensão acima da tensão fornecida pela rede 127/220 V.

O texto presente neste trabalho não citará cada item que consta na norma. Serão tratados os pontos que se encaixam no contexto do laboratório. De acordo com o item que trata da estrutura geral e alimentação, é possível identificar a forma de aterramento, ou seja, a TNR. Esta forma possui um único ponto de alimentação diretamente aterrado, sendo as massas da instalação e da subestação ligadas a esse ponto através de condutores de proteção (PE) ou condutor de proteção com função combinada de neutro (PEN). Nessa forma de ligação, toda corrente de falta direta fase-massa é uma corrente de curto-circuito. O esquema da ligação é mostrado abaixo.

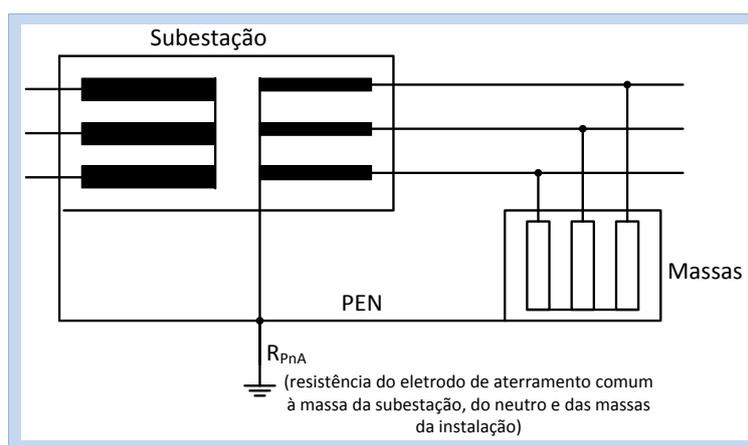


Figura 3.14: Esquema TNR [22]

Como pode ser visto no esquema acima, o laboratório possui um único ponto de aterramento que é a malha de terra que se encontra logo abaixo do piso. Alguns pontos para contato com esta malha existem ao redor do laboratório para facilitar a conexão dos equipamentos. Sendo assim, para garantir um bom aterramento, todos os pontos deverão ser interligados.

A tensão nominal da subestação será de 13,8 kV fase-fase, de forma a atender os requisitos da classe de 15 kV. Porém, a tensão utilizada a princípio não chegará a esta

valor, e sim a um valor máximo de 7967 V fase-neutro, que é a tensão nominal dos transformadores no lado MT.

O local que será reformado para a construção da subestação, possui as seguintes classificações de acordo com o item sobre meio ambiente da norma:

- Temperatura ambiente: AA5, ou seja, quente.
- Presença de água: AD1, ou seja, a probabilidade de presença de água é desprezível. As paredes não apresentam traços de umidade.
- Presença de corpos sólidos: AE2, ou seja, presença de corpos sólidos cuja menor dimensão é igual ou superior a 2,5 mm. Ferramentas e pequenos objetos existem no local.
- Presença de substâncias corrosivas ou poluentes: AF1, ou seja, quantidade ou natureza dos agentes corrosivos ou poluentes não é significativa.
- Existem influências eletromagnéticas, eletrostáticas ou ionizantes por correntes parasitas (AM2) ou influências eletromagnéticas (AM3).
- Não existem riscos por conta de radiações solares (AN1) e os riscos com raios são indiretos (AQ2), proveniente da rede de alimentação.
- A resistência do corpo humano pode ser considerada normal (BA4), pois a pele pode estar úmida por conta do suor e a superfície de contato ser significativa por estar segurando um elemento dentro da mão.
- O ambiente possui baixa densidade de circulação de pessoas, portanto é considerado um local com condições normais de fuga das pessoas em emergência (BD1).

Em relação ao item de proteção para garantir a segurança já existem meios para impedir o contato das pessoas nas partes vivas e não ocorrer choque elétrico. As partes vivas são isoladas, e a área destinada para a instalação dos equipamentos para os testes terá uma tela de arame, com o intuito de impedir os contatos fortuitos com as partes vivas.

Toda subestação deverá possuir um espaçamento entre os equipamentos, que são valores que garantem a segurança das pessoas. A seguir pode ser vista uma figura e uma tabela retiradas da norma com as dimensões a serem respeitadas.

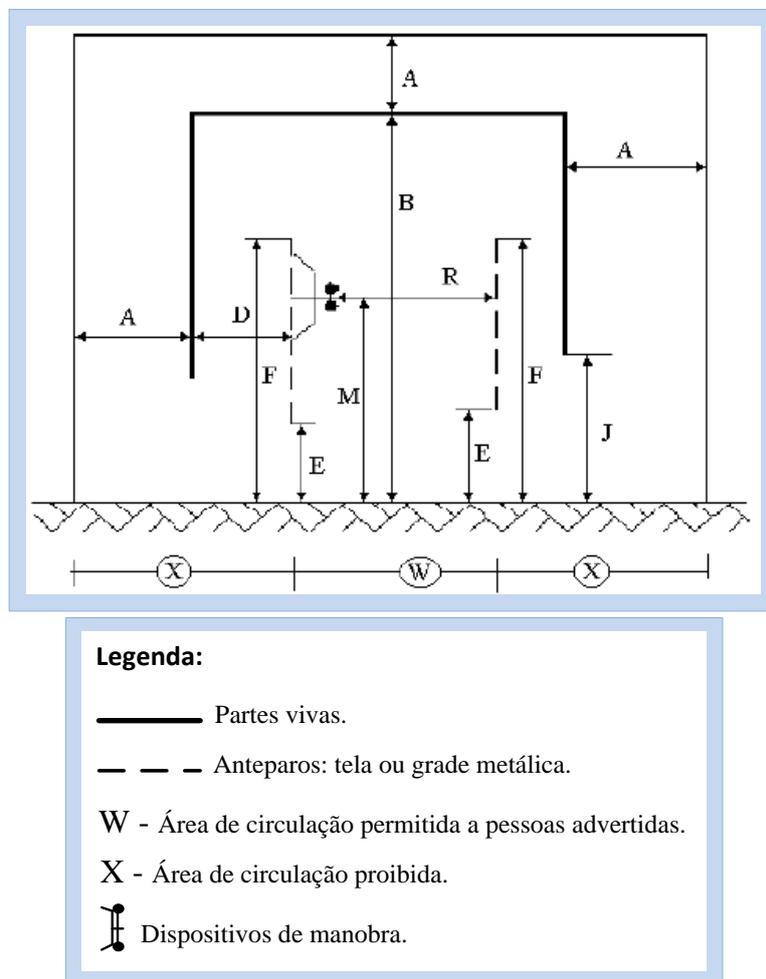


Figura 3.15: Dimensões para uma instalação interna e circulação por mais de um lado [22]

Na tabela abaixo podem ser vistos os números referentes às letras mostradas no diagrama da figura 3.15.

Dimensões mínimas (mm)		
D	300 até 24,2 KV	Distância entre a parte viva e um anteparo vertical.
	400 até 36,2 KV	
A	-	Valores de distância mínima da tabela ___
R	1200	Locais de manobra.
B	2700	Altura mínima de uma parte viva com circulação.
K	2000	Altura mínima de um anteparo horizontal.
F	17000	Altura mínima de um anteparo vertical.
J	E+300	Altura mínima de uma parte viva sem circulação.
Dimensões máximas (mm)		
E	300	Distância máxima entre a parte inferior de um anteparo vertical e piso.
M	1200	Altura dos punhos de acionamento manual.
malha	20	Abertura de malha.

Tabela 3.1: Espaçamento para instalações internas [22]

De acordo com a tabela 21 da página 18 da Norma 14039, os valores para a dimensão A na tabela acima são:

Tensão nominal da instalação KV	Tensão de ensaio à frequência industrial (valor eficaz) KV	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (valor de pico) KV	Distância mínima fase/terra e fase/fase	
			Interno	Externo
			mm	
13,8	34	95	160	
		110	180	
		120	220	

Tabela 3.2: Distâncias mínimas x tensão nominal da instalação. [22]

Todos os cuidados deverão ser tomados para que sejam respeitados itens tais como: proteção contra efeitos térmicos, incêndio, sobrecorrentes, sobretensões, mínima é máxima tensão e falta de fase, inversão de fase, fuga de líquido isolante, perigos resultantes de faltas por arco e proteção das pessoas que trabalham nas instalações de média tensão.

- Seleção e instalação de equipamentos e componentes

A escolha do equipamento e componente e sua instalação deve permitir que sejam obedecidas as medidas de proteção para garantir a segurança, as prescrições para

garantir um funcionamento adequado ao uso da instalação e as prescrições apropriadas às condições de influências externas previsíveis. Portanto, todos os componentes e equipamentos que serão selecionados e instalados precisam respeitar prescrições presentes na norma.

- Prescrições gerais para subestação abrigada

Todas as medidas adotadas no projeto e montagem da instalação necessitam ter os cuidados para que a instalação existente não tenha as medidas de segurança anuladas pela instalação já existente. As normas NBR 5410 e NBR 5314 também servirão como base para o planejamento da subestação e, os assuntos que servirão como suporte nestas normas são: medidas de proteção para o caso de operação remota e nível iluminação artificial, respectivamente.

3.4 – O LABORATÓRIO DE MÉDIA TENSÃO

Visando equipar o laboratório com outros equipamentos, que não existiam, para ensaios de tensão aplicada, uma proposta de projeto foi produzida a partir de um edital da FAPERJ referente ao programa Apoio às Engenharias. Com este projeto foi possível adquirir os equipamentos e instrumentos de medição e segurança necessários para o funcionamento correto e seguro dos ensaios realizados. Uma das etapas da produção da proposta deste projeto foi solicitar cotações dos materiais listados para diversas lojas e fabricantes. Os itens que possuem uma relação direta com o RECET são:

- i) Ponta de prova de alta tensão – instrumento utilizado para medir a tensão nas fases, em média tensão.
- ii) Contator – utilizado para o acionamento, pelo lado de baixa, da bancada de média tensão.

- iii) Ponteira de corrente 150A – utilizado para obter a forma de onda de corrente que circula pelo sistema, em média tensão.
- iv) EPI e EPC (Equipamentos de proteção individual e coletiva) – capacete, luva para alta tensão, roupa adequada, vara de manobra, tapete isolante e outros considerados necessários ao longo das atividades.

Outros equipamentos que constam na planilha de cotações não são citados acima por não estarem diretamente ligados aos ensaios das chaves estáticas do regulador de tensão. Por fim, todos os equipamentos necessários para a montagem da bancada de testes com tensão aplicada foram testados, e constatou-se que estavam em perfeitas condições. Com tudo funcionando perfeitamente, os testes puderam ser realizados e os resultados serão mostrados mais a frente, no capítulo 5. Contudo, antes é preciso descrever do que consta o teste, sendo assim, o próximo item explica esta parte.

3.5 – O TESTE

O circuito começa na sala de controle, e nela existe um fonte CC de 5V que alimenta a placa de disparo 1. O operador utiliza apenas o botão seletor para liberar ou bloquear a tensão que alimenta a placa. Ao receber a tensão de 5 V, a placa de disparo libera o pulso de luz através da fibra óptica.

Ao receber o pulso de luz, a placa de disparo 2 (que esta funcionando como receptor deste sinal), envia este sinal (elétrico) para a placa I/O, que por sua vez trata este sinal e envia para o relé. Ao receber o comando, o relé fecha os contatos e com isso alimenta a bobina do contator. Os terminais de saída do variador de tensão são conectados no contator, que aciona o circuito principal após ter a sua bobina energizada, e os contatos NA (normalmente abertos) fechados.

Retornando ao interior da sala de controle, não pode passar despercebida a presença de um gerador de sinais que envia o sinal elétrico, que também é transformado em luz, para o driver fixado na chave estática. Sem este sinal, a chave estática permanece em estado de bloqueio, pois os terminais de *gate* dos tiristores não recebem o pulso de disparo. Portanto, a transição entre os estados de condução e bloqueio pode ser feita apenas enviando ou interrompendo o sinal do driver da chave estática.

CAPÍTULO 4 – SIMULAÇÕES DO CIRCUITO

A simulação do circuito para a realização de uma jiga de testes é importante, pois problemas podem ser vistos antes da implementação do circuito. Os testes a serem realizados em bancada, com a chave estática mostrada na Figura 2.12, são simulados e analisados em duas diferentes condições de operação: (i) os tiristores em estado de condução, (ii) os tiristores em estado de bloqueio.

Todas as simulações deste capítulo são realizadas no software PSCAD[®]/EMTDC. Este programa tem uma larga utilização em simulações de aplicações em sistemas de potência no mundo inteiro, pois fornece resultados com uma grande confiabilidade e bem próximos da realidade. Muitos centros de pesquisas e universidades de diversos países aceitam os resultados do PSCAD por conta desta confiabilidade.

4.1 – SIMULAÇÕES DO CIRCUITO DE TESTES DA CHAVE ESTÁTICA

O circuito mostrado na Figura 4.1 tenta retratar de forma fiel o que será montado no laboratório de média tensão. No software não estão sendo consideradas possíveis falhas em um ou mais tiristores durante a realização do procedimento experimental. Por conta de tal desconsideração, o andamento do experimento deve ser monitorado a todo instante com total atenção para detectar em um tempo curto a ocorrência de algum defeito. A simulação foi feita em apenas uma fase, correspondendo com a etapa dos testes com tensão aplicada realizados, ou seja, o circuito mostrado na figura 4.1 é monofásico.

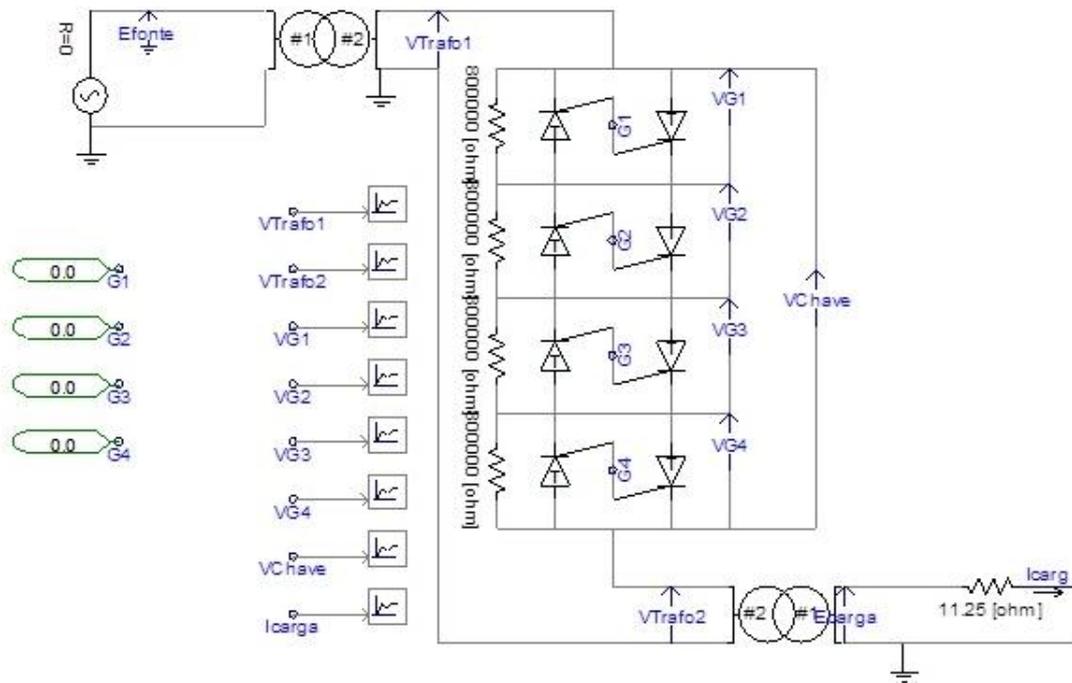


Figura 4.1: Circuito para simulação dos testes na chave estática com rede de equalização

O primeiro modo simulado acontece com os tiristores em estado de condução, ou seja, os *gates* recebem um sinal igual a 1 ($G1 = 1$, $G2 = 1$, $G3 = 1$ e $G4 = 1$). O segundo modo de operação acontece com os tiristores em estado de bloqueio, e isto ocorre quando os *gates* recebem um valor igual a zero ($G1 = 0$, $G2 = 0$, $G3 = 0$ e $G4 = 0$). Os estados estudados são em regime permanente, sendo assim, não será abordado o comportamento das chaves no momento de transição do estado de condução para bloqueio ou o contrário.

Todos os tiristores utilizados na simulação estão com o mesmo valor para a resistência interna, de acordo com o item 2.5.2, que existe em estado de bloqueio (1,1 M Ω), mas na realidade há, mesmo que pequena, uma diferença entre os valores medidos. O motivo desta diferença está na fabricação destes dispositivos, ou seja, eles são bem parecidos, mas não iguais. Resultados com valores diferentes para estas resistências internas também são adquiridos com este mesmo circuito, e para isto basta modificar o valor de Thyristor OFF Resistance.

4.1.1 – SIMULAÇÃO EM ESTADO DE CONDUÇÃO

Todos os gráficos vistos nesta seção são obtidos da simulação considerando o primeiro modo de operação descrito acima, no qual todos os *gates* recebem um sinal de disparo igual e no mesmo instante de tempo.

- ✓ Gráfico da tensão no transformador elevador e no transformador abaixador.

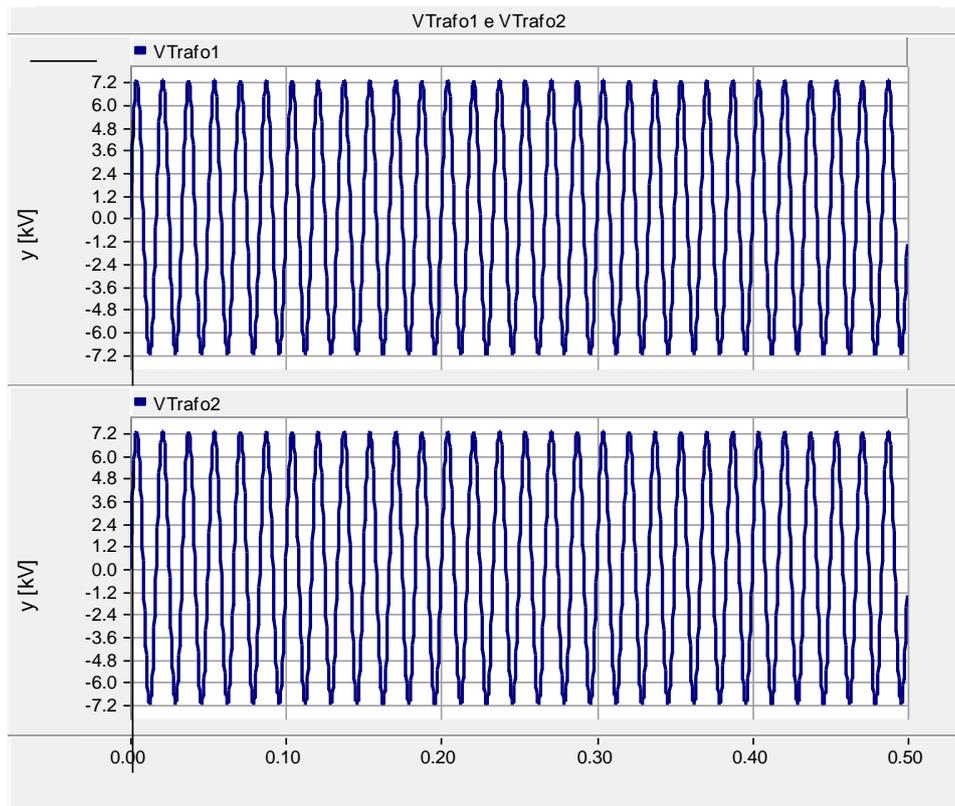


Figura 4.2: Tensão no transformador elevador e abaixador, respectivamente.

Conforme está sendo apresentado na figura acima, os transformadores do circuito possuem a mesma tensão. Portanto, pode-se concluir que não há bloqueio da tensão proveniente do transformador elevador, este fato confirma a condução da chave estática. As figuras 4.3 e 4.4 também mostram, mais uma vez, que não existe diferença de potencial entre os terminais de entrada e saída da chave, logo não há queda de tensão em cada módulo SKKT-162.

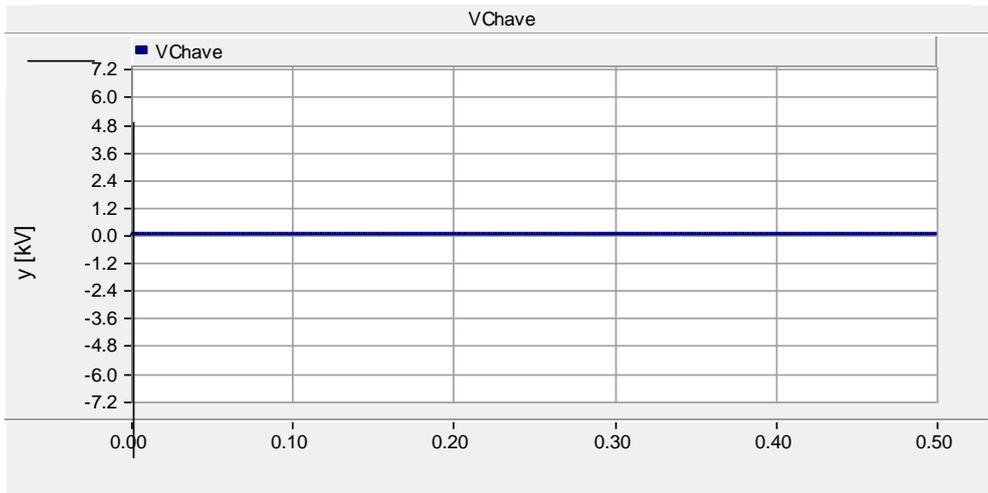


Figura 4.3: Tensão na chave estática (em condução)

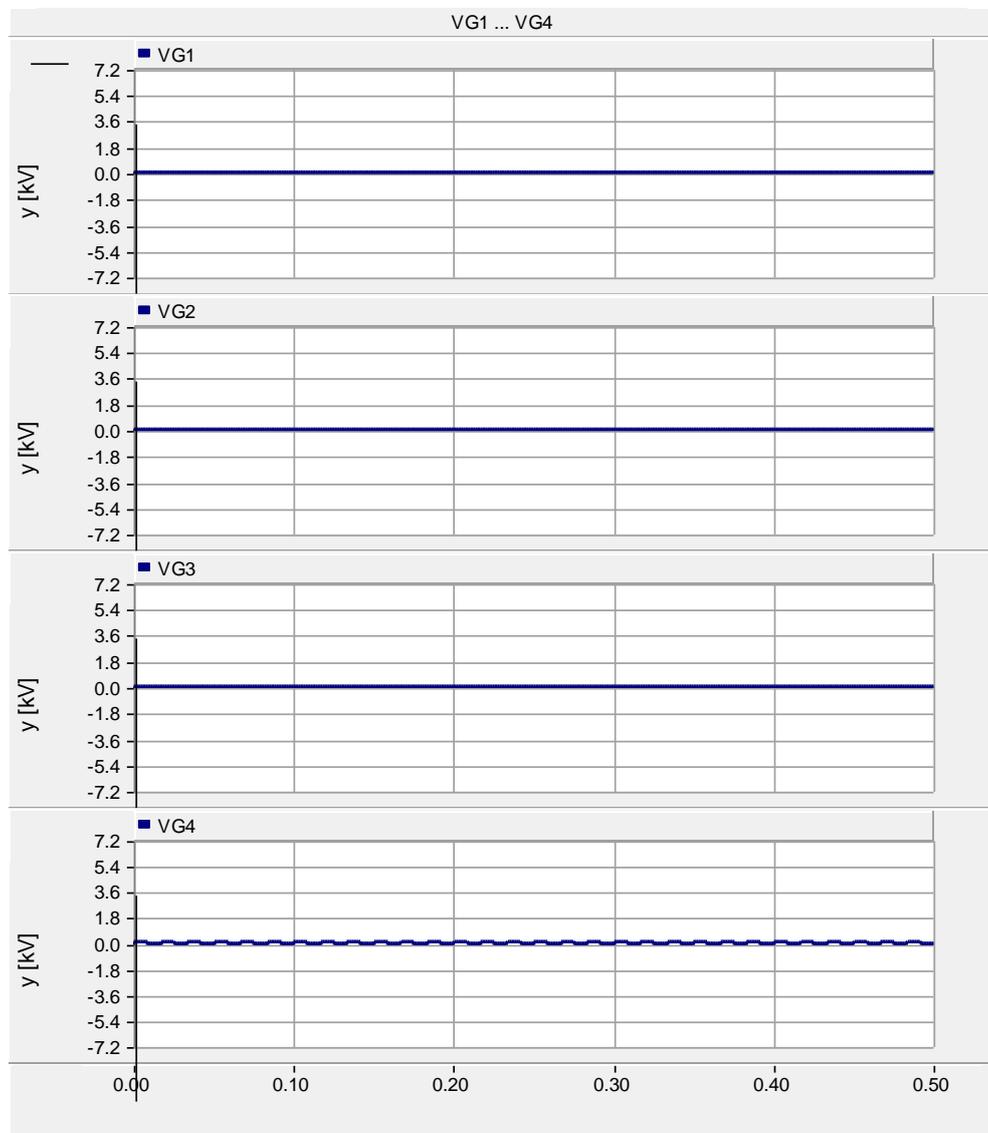


Figura 4.4: Tensão em cada módulo de tiristores (em condução)

Quando a chave se encontra em condução, o valor da resistência interna de bloqueio de cada tiristor não tem importância, assim como o valor dos resistores da rede de equalização estática. A confirmação foi feita variando os valores dos resistores mencionados e, ao coletar os novos gráficos observou-se que os resultados mostrados para a queda de tensão nos módulos de tiristores não foram alterados.

✓ Corrente na carga

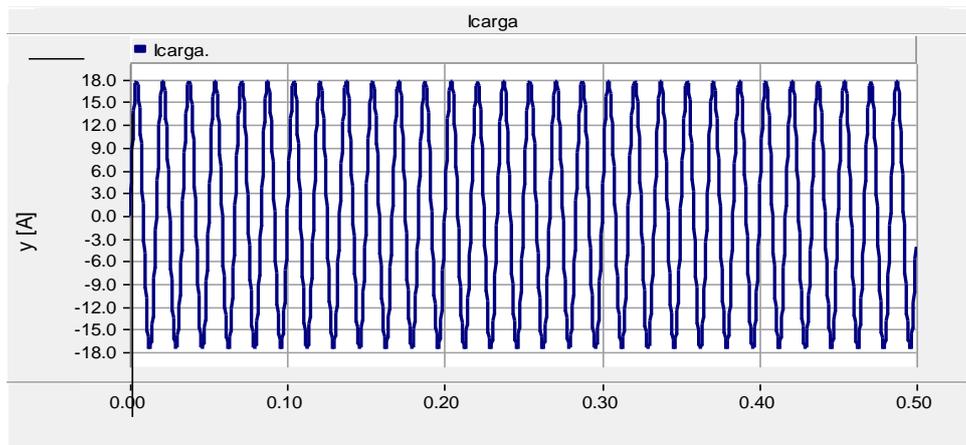


Figura 4.5: Corrente na carga (em condução).

O gráfico acima mostra a medição da corrente na carga. Esta medição está sendo realizada em cima da carga, pois a mesma se encontra no lado de baixa tensão no circuito montado, logo a tensão é mais baixa e não há necessidade de instrumentos de medição especiais. Caso a ponteira de corrente (para baixa tensão) fosse utilizada na parte de média tensão, a mesma sofreria danos irreversíveis.

4.1.2 – SIMULAÇÃO EM ESTADO DE BLOQUEIO

Para que os tiristores entrem em estado de bloqueio basta retirar o sinal enviado para os *gates*, e isso é feito enviando um valor igual a 0 para G1, G2, G3 e G4.

✓ Gráfico da tensão no do transformador elevador e no transformador abaixador

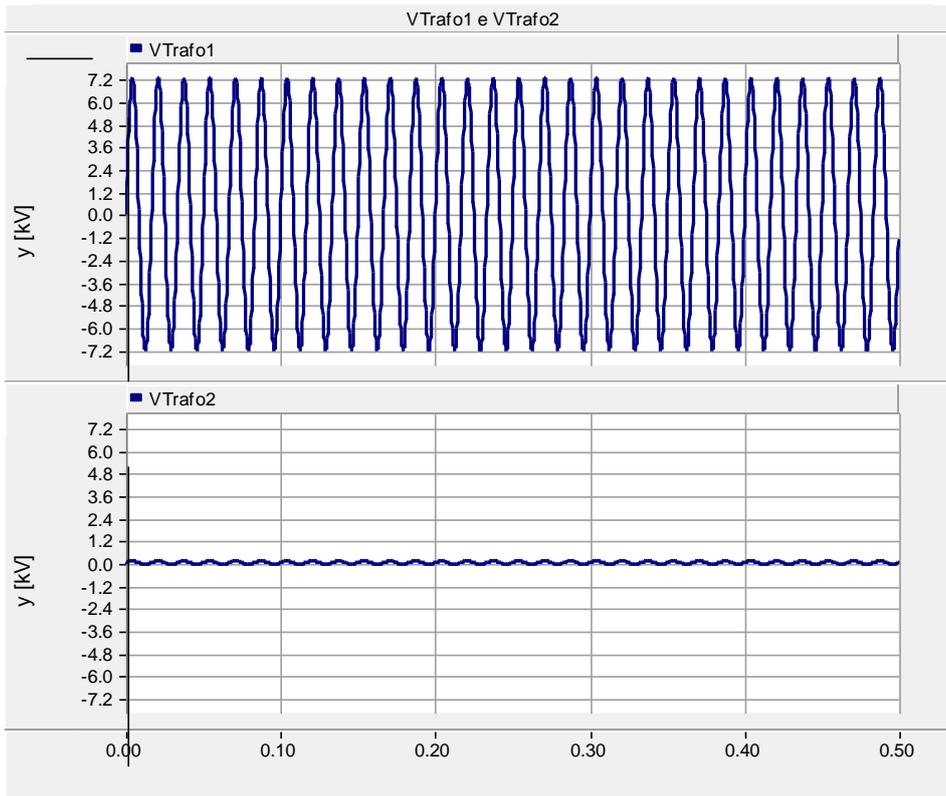


Figura 4.6: Tensão no transformador elevador e abaixador, respectivamente (em bloqueio).

No estado de bloqueio o transformador abaixador não recebe a tensão aplicada na chave, ou seja, toda a tensão está sendo bloqueada pelos dispositivos semicondutores. Como não há outro caminho, não haverá tensão nos terminais da carga. A pequena variação na tensão encontrada nos terminais do lado de média do transformador abaixador não ocasionará problemas para a chave. Ao reduzir a escala do gráfico da tensão no trafo 2, observamos que a mesma está com um valor em torno de 80 V de pico, figura 4.7.

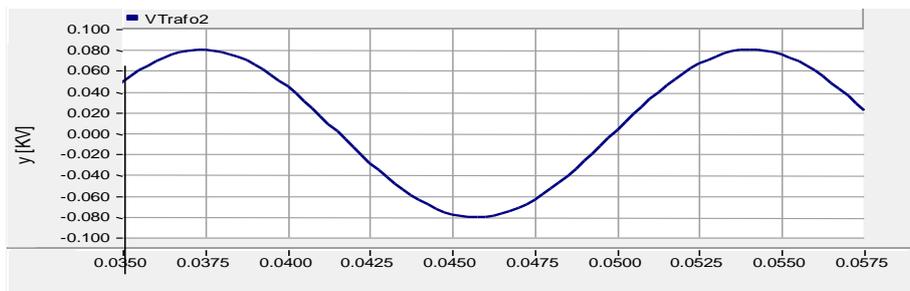


Figura 4.7: Tensão no transformador abaixador (primário – lado de média tensão).

- ✓ Queda de tensão na chave estática e em cada módulo de tiristores.

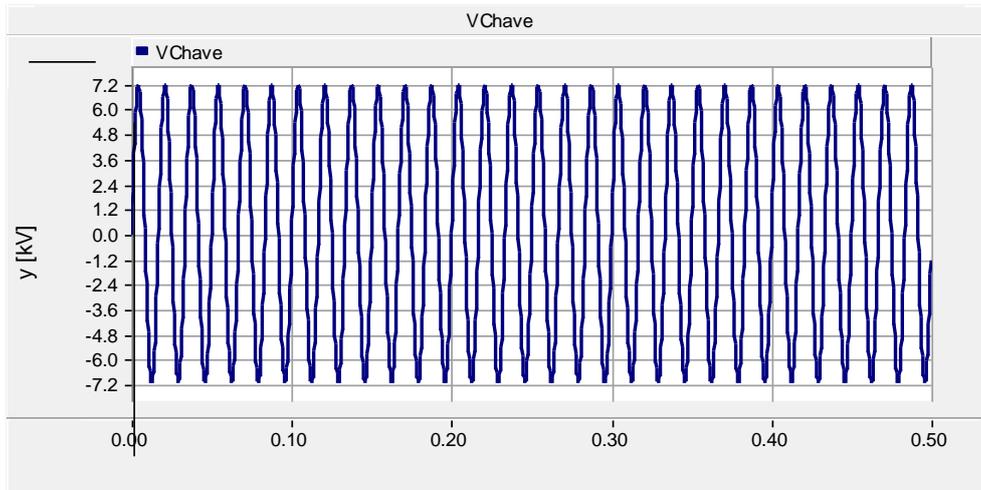


Figura 4.8: Tensão na chave estática (em bloqueio).

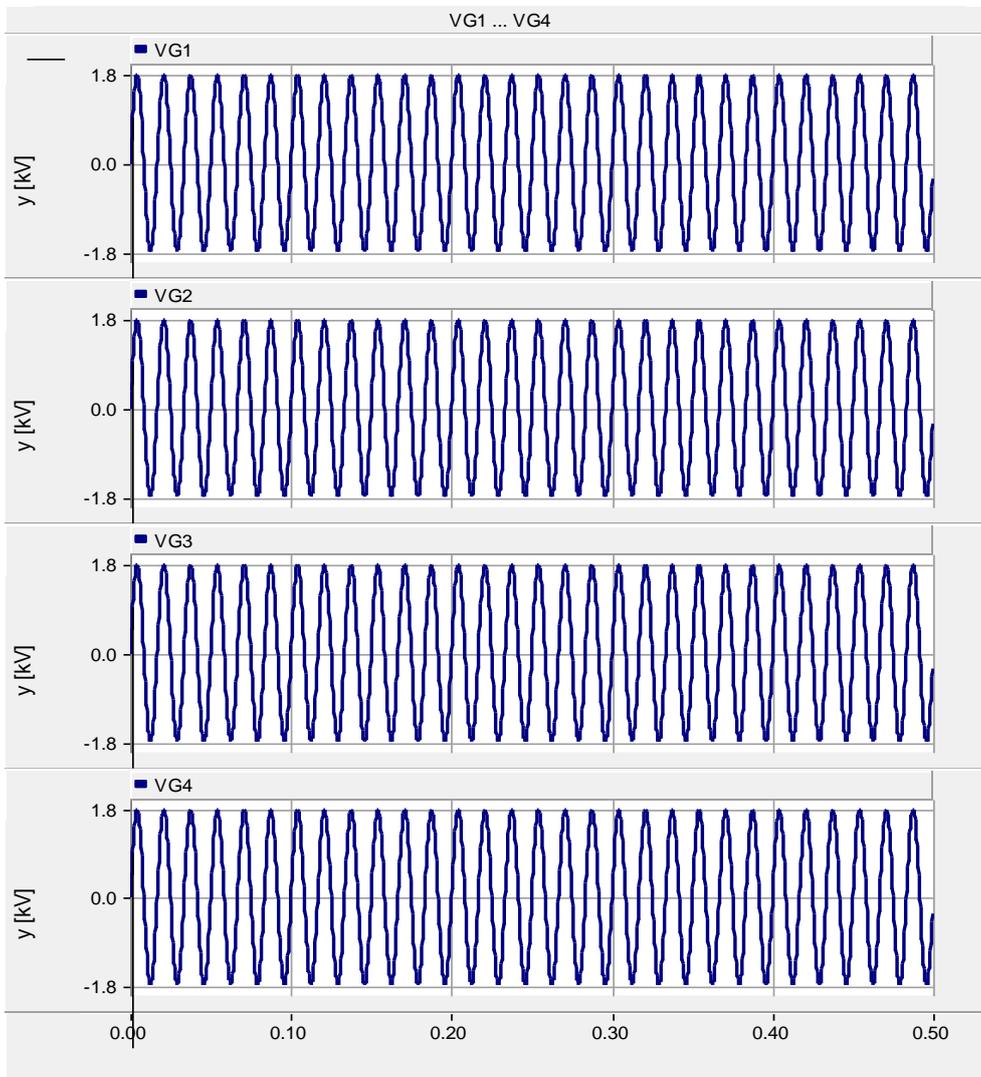


Figura 4.9: Tensão em cada módulo de tiristores (em bloqueio).

As duas figuras acima reforçam que toda a tensão está sendo bloqueada pela chave estática, pois a queda de tensão na chave estática é igual à tensão encontrada no lado de alta do transformador elevador.

Neste caso, estado de bloqueio, a resistência interna dos tiristores e o valor da rede de equalização possuem grande importância. Na figura acima, a tensão está dividida de forma igual entre os dispositivos, mas se o valor das resistências internas tivessem valores com grande diferença entre si, e o mesmo acontecesse com a rede de equalização estática, a tensão bloqueada pela chave não estaria dividida igualmente entre os componentes semicondutores em série. Tal fato poderia causar danos irreparáveis aos tiristores e com isso comprometer o correto funcionamento da chave. A simulação com estes valores desiguais será mostrada mais a diante.

✓ Corrente na carga

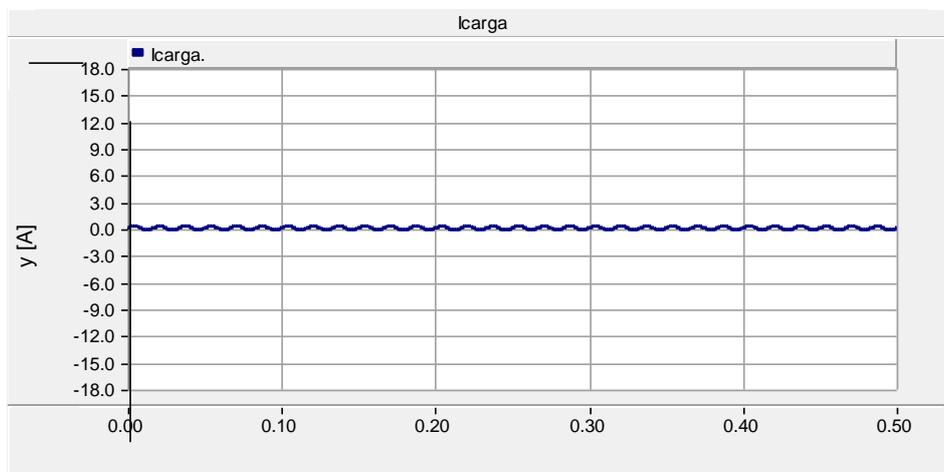


Figura 4.10: Corrente na carga (em bloqueio).

Como a chave se encontra em estado de bloqueio, é de se esperar que não haja corrente no circuito, já que não há tensão na carga. Esta suposição foi confirmada com o resultado encontrado na simulação e vista na figura 4.9, onde a corrente pode ser considerada nula em relação à que foi encontrada no circuito quando a chave estava em condução. Não se pode ignorar a corrente observada no gráfico da figura 4.9, mas após

analisar estes valores, observou-se que se tratava de um valor pequeno, que não causaria transtornos para a chave. E com o valor da corrente, em torno de 200 mA de pico, figura 4.10, é possível abrir um disjuntor sem precisar de um câmara de extinção de arco elétrico.

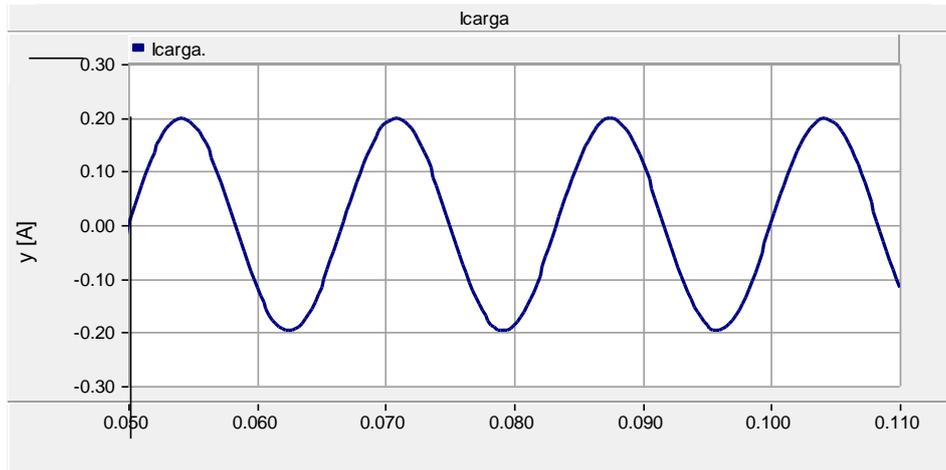


Figura 4.11: Corrente na carga (em bloqueio).

A figura com os gráficos das tensões nos lados de baixa dos dois transformadores não será mostrada. O transformador elevador sempre terá a mesma tensão, que é a alimentação recebida do variador de tensão. Já o transformador abaixador terá sua tensão igual à zero, pois toda a tensão está bloqueada pelos tiristores da chave estática.

4.1.3 – VARIAÇÃO NOS VALORES DOS RESISTORES DA REDE DE EQUALIZAÇÃO ESTÁTICA.

Algumas alterações foram feitas na simulação com o intuito de mostrar o que acontece com a divisão de tensão, na situação de bloqueio. Tais variações ocorreram, em um primeiro passo, nos valores dos resistores de equalização estática. As resistências tiveram seus valores reduzidos em 20% nos tiristores G1 e G3, e aumentados em 20% nos tiristores G2 e G4. Portanto, os valores foram alterados para 640 k Ω e 969 k Ω e o resultado encontrado para as tensões em cima de cada módulo de tiristores está na figura a seguir.

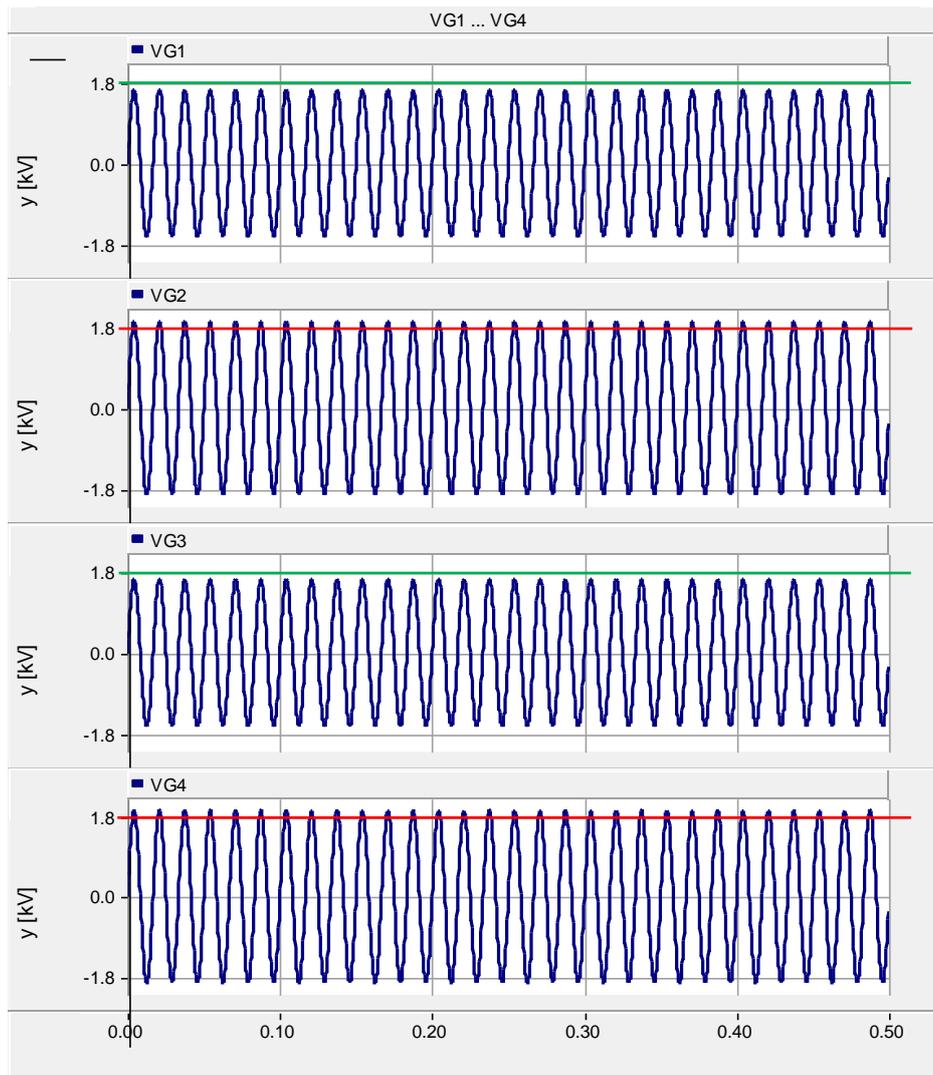


Figura 4.10: Tensões nos módulos de tiristores.

Uma análise simples pode ser feita ao observar os gráficos acima e perceber que os valores de VG1 e VG3, que possuem um resistor cada conectado em paralelo com valores iguais, são iguais. E o mesmo acontece com VG2 e VG4. Ao variar o valor da resistência de equalização em paralelo com G1 e G3 para 640 k Ω , a tensão nesses dois módulos variou aproximadamente 9,4% pra menos e a tensão em VG2 e VG4 aumentou aproximadamente 7,1%. A variação da tensão bloqueada para um valor menor, com a alteração do valor do resistor para um valor maior, não traz problemas para o tiristor (≈ 1630 Vp), porém a variação para um valor maior é perigosa, pois pode ultrapassar o valor nominal do dispositivo.

De acordo com a suposição citada no parágrafo anterior, os tiristores no qual as resistências de equalização foram aumentadas, passaram a bloquear aproximadamente 1928 Vp. Isto é perigoso, pois ultrapassa o valor suportado pelo dispositivo, que é 1800 Vp. Com isso fica claro que os resistores da rede de equalização precisam ter valores iguais para que a tensão bloqueada pela chave seja dividida de uma maneira mais igualitária possível.

4.1.4 – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA INTERNA DOS TIRISTORES EM ESTADO DE BLOQUEIO

Outro fator importante a ser analisado é o valor da resistência interna dos tiristores utilizados. Nesta simulação, as resistências da rede de equalização foram mantidas com os mesmos valores calculados no início deste trabalho (800 k Ω), e as resistências internas dos tiristores G2 e G4 foram aumentadas para 1,32 M Ω . Os resultados encontrados para as tensões em cada módulo são mostrados na figura 4.11.

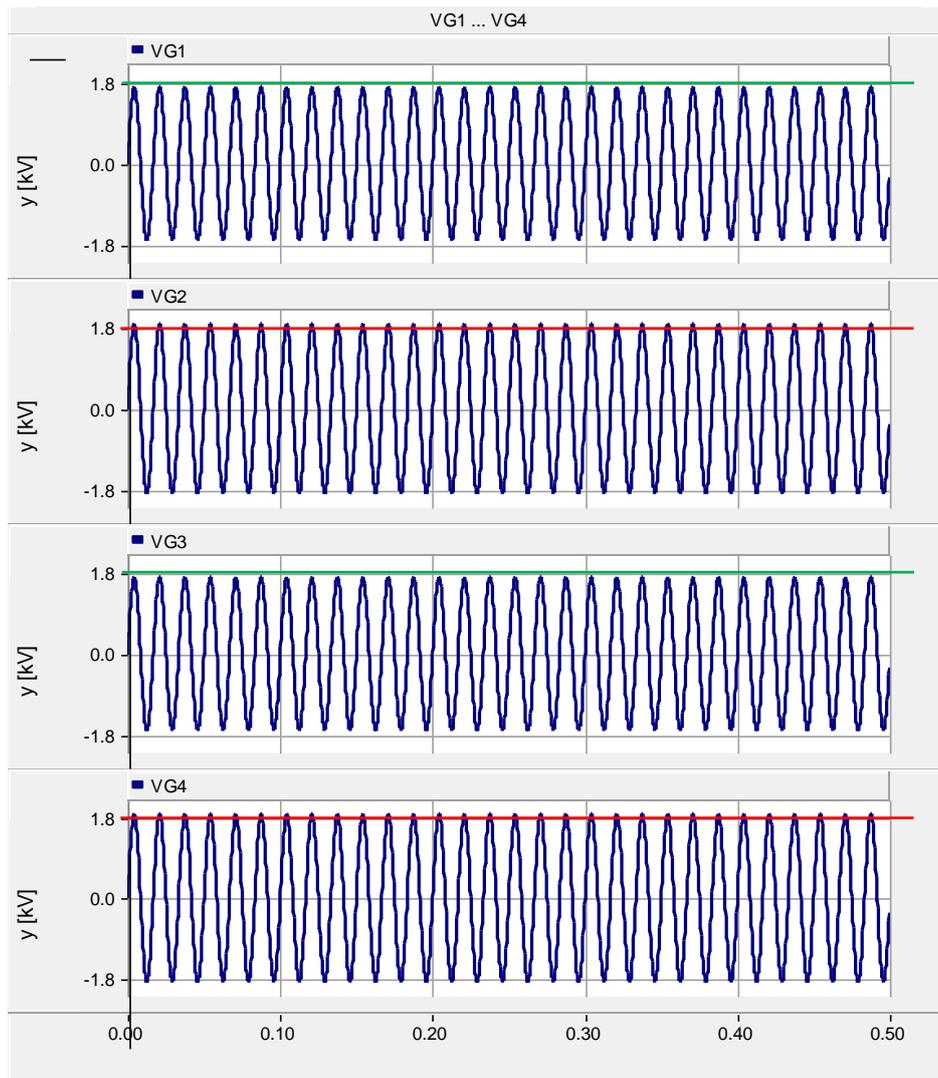


Figura 4.11: Tensão nos módulos de tiristores (resistências internas diferentes).

No gráfico da figura anterior pode-se concluir que a tensão nos tiristores, que não tiveram o valor de suas resistências internas alterado, também sofreu uma mudança. Os tiristores com a resistência maior passaram a bloquear uma tensão com um valor superior à bloqueada pelos tiristores com a resistência interna menor. Tal fato também é preocupante, pois o risco de algum dispositivo bloquear, na prática, uma tensão maior do que a suportada também é evidente nesta situação. Sendo assim, é essencial que os dispositivos semicondutores de potência utilizados no circuito possuam características mais semelhantes possíveis, ou seja, que os valores das resistências internas em estado de bloqueio possuam a menor diferença entre elas. Este cuidado minimiza as chances de

variação muito grande entre as tensões bloqueadas por cada dispositivo semicondutor, e evite o efeito avalanche.

CAPÍTULO 5 – MONTAGEM DO CIRCUITO PARA REALIZAÇÃO DA JIGA DE TESTES

Após a análise dos resultados encontrados nas simulações foi dado início à montagem do circuito para a realização dos experimentos. Na figura 5.1 pode ser visto uma parte do circuito montado, que é a parte de potência com transformadores, TP, carga e além destes, existe também instrumentos de medição e uma fonte de alimentação CC, que alimenta o driver mostrado no item 2.6. Estes equipamentos se encontram dentro da gaiola de Faraday (representada pela linha tracejada branca da figura 3.1).



Figura 5.1: Disposição de parte dos equipamentos utilizados para a realização dos testes da chave estática

A figura seguinte mostra os componentes e instrumentos usados no circuito de acionamento, interligado com a sala de controle através da fibra ótica. A pessoa com a responsabilidade de operar, de controlar a tensão aplicada na chave é quem gira as escovas do variador de tensão (visto na Figura 5.2), com os devidos equipamentos de proteção e segurança. Quem tem o dever de monitorar os resultados, e até mesmo

perceber alguma falha através dos instrumentos de medição, é a pessoa que fica na sala de controle. É na sala de controle que se encontra o botão seletor que libera ou interrompe a alimentação do transformador elevador, pois ao colocar o botão na posição desligado, o relé não fecha os contatos NA e, conseqüentemente, o contator não alimenta o circuito principal (de potência).

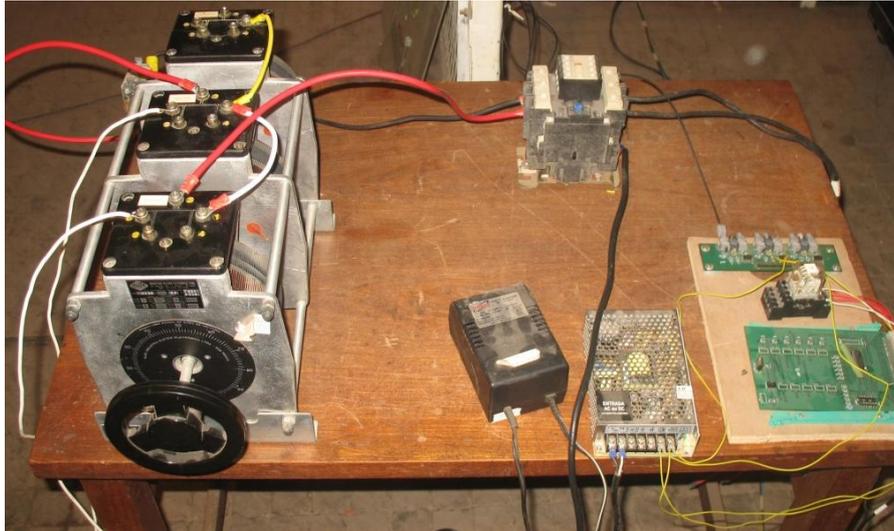


Figura 5.2: Parte do circuito de acionamento.

5.1 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com a finalização da montagem do circuito conforme esquemático da Figura 3.1 e Figuras 5.1 e 5.2, os testes com tensão aplicada nos terminais da chave foram realizados. Conforme já mencionado, a tensão máxima a ser aplicada em cada chave é de 7,2 kV de pico, pouco mais que 5 kV eficazes. O projeto do RECET contempla uma tensão de 7967V de pico em cada fase, ou seja, aplicada em 12 pares de tiristores em série (interligados de acordo com a Figura 2.13), mas como foi estudado e concluído que nenhuma chave estática estará sujeita a este nível de tensão, os 7200 V são suficientes para a realização dos procedimentos.

Durante a realização dos testes foi observado que algumas chaves se comportaram de forma indesejada. O esforço, a partir desta constatação, foi direcionado para a

identificação dos motivos causadores do funcionamento indesejado das chaves. Foram encontrados diversos motivos tais como: solda fria nos pinos de *gate* e catodo do módulo do tiristor; resistor SMD queimado na placa do retificador; solda fria entre os fios do secundário do transformador planar e das ilhas da placa do retificador; e resistor de equalização com valor fora do especificado.

Ao término de todos os reparos necessários nas chaves danificadas, os testes foram refeitos e os resultados encontrados foram satisfatórios, ou seja, as chaves, testadas individualmente, funcionaram de acordo com a proposta de operação descrita no projeto.

A figura 5.3 mostra as 12 chaves agrupadas em um local seguro do laboratório após a realização dos testes. Todas foram etiquetadas após a conclusão de que estavam funcionando corretamente.

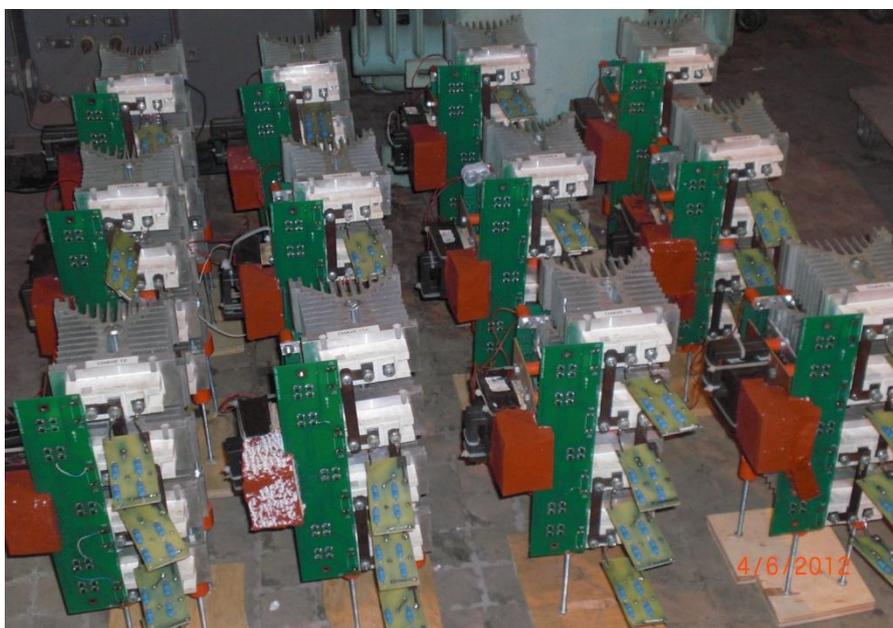


Figura 5.3: Chaves estáticas.

Abaixo seguem algumas figuras que mostram o correto comportamento das chaves. Estes gráficos foram adquiridos com auxílio de um osciloscópio, no qual foi

utilizada uma ponteira de corrente ligada na carga com uma atenuação de 10x e uma ponteira de tensão com uma atenuação igual a 100x.

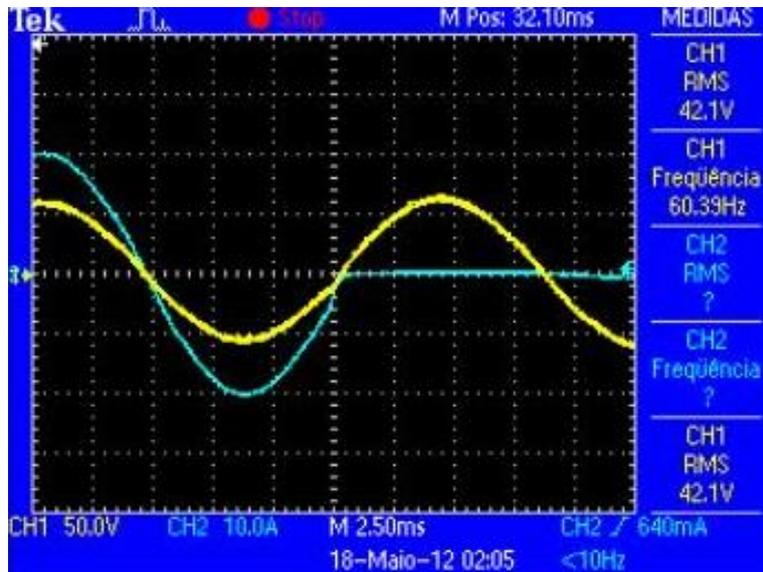


Figura 5.4: Formas de onda para tensão e corrente (amarelo e azul, respectivamente) aferidas com osciloscópio.

Os gráficos da figura 5,4 foram separados e encontram-se nas duas figuras seguintes.

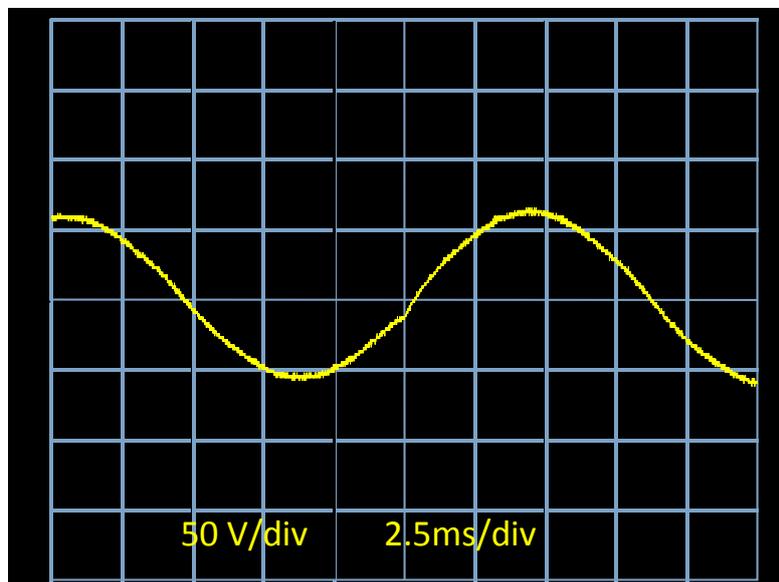


Figura 5.5: Forma de onda da tensão aplicada na chave estática.

De acordo com a figura acima, a tensão aplicada nas chaves tem a forma senoidal, pois a mesma é adquirida da rede disponível no laboratório e elevada (através do transformador elevador) até o valor máximo de projeto (para uma chave estática). Sendo

assim, a forma de onda esperada para corrente é a mais próxima possível da senoidal, em estado de condução. A Figura 5.6 confirma a forma de onda da corrente (alterada para a cor vermelha), que circula pela chave estática.

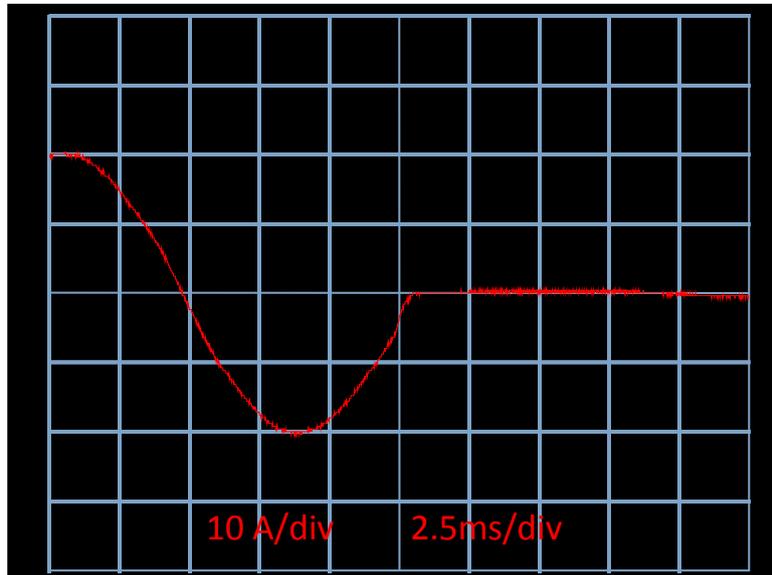


Figura 5.6 Forma de onda da corrente através da chave estática

Realizando a leitura dos gráficos das figuras 5.4, 5.5 e 5.6, conclui-se que a tensão e corrente estão em fase, como pode ser visto na primeira metade (esquerda) do gráfico da figura 5.4. Quando a chave deixa de receber os pulsos no *gate*, a corrente vai à zero, sendo este fato claramente observado na segunda metade (direita) do gráfico da corrente.

5.2 – TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros ficam:

- Montar uma bancada onde seja possível realizar a ligação das 12 chaves em série (figura 5.7) e realizar os testes com um autotransformador construído também pela ITB para este propósito, já disponível no laboratório.

- Com a ligação das 12 chaves estáticas em série, realizar novos testes. Estes novos testes contemplarão as variações dos tapes, mas a princípio de forma manual. Ou seja, deverão ser criadas situações hipotéticas onde haja a necessidade de compensação da tensão e verificar, junto à tabela 2.1, quais as chaves deverão ser ativadas para compensar a tensão necessária.

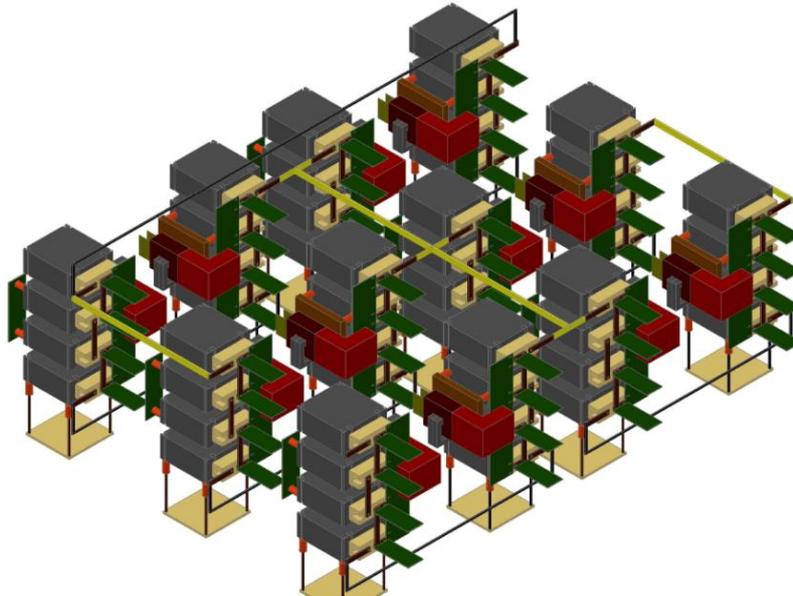


Figura 5.7: Esquema feito em AutoCAD da interligação das 12 chaves.

- Após esta etapa fica o desafio de desenvolver o controle para variação dos tapes de forma automática.

5.3 – CONCLUSÃO

Neste trabalho foi abordado e descrito de forma clara e objetiva o funcionamento, em geral, de reguladores de tensão com comutação eletrônica de tapes. Informações importantes foram apresentadas dos principais tipos de reguladores de tensão com comutador eletrônico de tapes existentes na literatura. Após a abordagem destes assuntos, ficou esclarecido que a utilização de comutadores eletrônicos proporcionará um melhor desempenho em relação aos reguladores com comutação eletromecânica de

tapes, no que diz respeito ao tempo de correção, de compensação. Tal melhora se dá principalmente pelo fato das modificações dos tapes serem feitas de forma direta entre os tapes considerados, não necessitando passar em todos os níveis ao sair do primeiro e ir para o último, por exemplo.

Foi apresentado o modelo construído da chave estática testada em bancada experimental, em média tensão. Todos os componentes que compõem a chave também foram citados, sem maiores detalhes por não ser alvo desse estudo.

As simulações feitas antes dos testes em bancada experimental tiveram grande importância, pois com os resultados encontrados pode-se observar como a chave deveria se comportar durante o correto funcionamento. Sendo assim, um comportamento diferente daqueles apresentados nas simulações (chave em perfeito estado), poderiam acarretar danos severos a chave se não fossem observados em um tempo curto.

Um esquema unifilar do circuito de potência e acionamento montado para a realização dos testes de tensão aplicada também consta, no qual o intuito foi apresentar cada componente existente neste arranjo e sua função. Em seguida, todas as etapas do teste foram descritas, de forma que cada passo ficasse esclarecido em relação a sua necessidade de execução. Por fim, os resultados encontrados mostraram que a chave estática desenvolvida no LEMT, se comportou de forma correta diante das condições de projeto.

Sendo assim, visando a inserção dos reguladores de tensão com comutação eletrônica no contexto dos equipamentos *custom power*, pode-se evidenciar que este tipo de equipamento será capaz de atuar na compensação de distúrbios de tensão, como na compensação de VTCD, e com isso contribuir de forma importante na qualidade de energia.

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução nº 505, Conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, 26 de novembro de 2001.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº 395, Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST, Revisão 1, 15 de dezembro de 2009.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade de energia elétrica – Fevereiro de 2012.
- [4] Reis Mauro S. – Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps para a Compensação de Variações de Tensão de Curta Duração // CBQEE VIII. - 2009.
- [5] IEEE Std 1159 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. - 1995.
- [6] IEEE Emerald Book - IEEE Standard 1100 - 1999. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. - 1999.
- [7] ITB Regulador de Tensão Monofásico RAV-2 comando CTRL-1. – 2007.
- [8] ANSI/IEEE - C57.15-1986 - IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Step-Voltage and Induction-Voltage Regulators
- [9] Larsson T., Innanen R. e Norstrom G. Static Electronic Tap-Changer for Fast Phase Voltage Control [Periódico]. - Milwaukee, USA : IEEE Electric Machines and Drives Conference Record, 1997.

- [10] Toh C. W.. A Voltage Quality Improvement Solution Using Step Dynamic Voltage Regulator // IEEE. – [s.l.]: IEEE, 2000.
- [11] Aredes, M.; Encarnação, Lucas Frizera; Moor Neto, J. A.; Reis, M. S.; Monteiro, L. F. C.; Siqueira, M. J. V.; Sanches, C. C.. Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de *Taps* para a Compensação de Variações de Tensão de Curta Duração. In: VIII CBQEE, Blumenau – Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2009. v.1. p. 1-5.
- [12] Faiz J. e Siahkollah B.. New Solid-State Onload Tap-Changers Topology for Distribution Transformers [Periódico] // Power Delivery, IEEE Transactions on. – janeiro de 2003.
- [13] Jiang Hao [et al.] Fast Response GTO Assisted Novel Tap Changer [Periódico] // IEEE Trans. On Power Delivery. – 2001.
- [14] Shuttleworth R. [et al.] New tap changing scheme [Periódico] // Electric Power Applications, IEE Proceedings. – Janeiro de 1996. – Vol. 143.
- [15] BRASIL, T. A. Implementação de construção de uma bancada para testes térmicos de dispositivos semicondutores de potência. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Orientador: Mauricio Aredes.
- [16] J. A. Pomílio: Eletrônica de Potência, DSCE – FEEC – Unicamp, 2009.
- [17] Datasheet do SKKT-162 – Fonte: http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKKT_162_07894100.pdf
- [18] Profs. Waldir Po, Walter Kaiser, Lourenco Matakas Jr. e Wilson Komatsu: PEA-2487 Eletrônica de Potencia I - 1º sem/2010 - Notas de aula – v. 0.99.

[19] Afsharian J., Wu Bin e Zargari N. – Self-Powered Supplies for SCR, IGBT, GTO and IGCT Devices: A Review of The State of The Art [Periódico] // Electrical and Computer Engineering. - 2009. - pp. 920-925.

[20] Portaria SIT n.º 25, de 15 de outubro de 2001.

[21] NR-6 – Norma Regulamentadora que trata de Equipamento de Proteção Individual.

[22] NORMA BRASILEIRA - ABNT NRB 14039 – Instalações elétricas de média tensão de 1,0 KV a 36,2 KV.

[23] Eletrônica Central – <http://www.eletronicacentral.com.br> - RELE TN4RC3 24VCC

ANEXO 1 – EQUIPAMENTOS DOS CIRCUITOS DE ACIONAMENTO E POTÊNCIA

i) Botão seletor



Fonte: METALTEX

Figura A.1.1: Botoeira de duas posições.

Se trata de uma botoeira de duas posições, e para o caso deste circuito, a botoeira tem a função de liberar ou bloquear a alimentação da placa de disparo, ou seja, na posição “on” a placa envia o sinal em forma de luz para que o relé feche os contatos e permita a alimentação do contator para fechar os seus contatos normalmente abertos.

ii) Placas de disparo 1 e 2



Figura A.1.2: Placa de disparo

São placas com a função de enviar ou receber sinais através de fibra óptica. Com isso, é evitada a interferência externa ao longo da fibra até o circuito de potência, e também é evitado que o operador receba algum sinal elétrico, caso ocorra alguma falha. O conector cinza claro é o emissor, e o cinza escuro é o receptor.

iii) Placa I/O

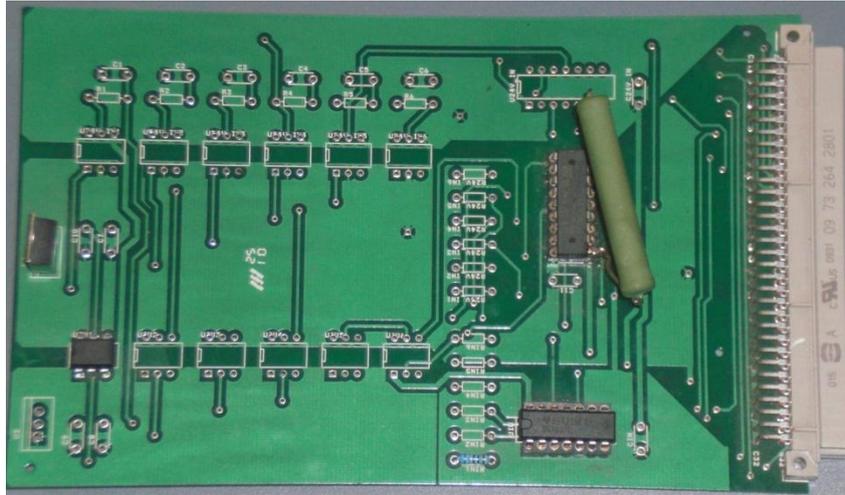


Figura A.1.3: Placa I/O

Placa utilizada para o condicionamento do sinal recebido da placa de disparo. Esta placa possui uma interface que passa o sinal de um nível TTL (5V) para tensões e corrente mais altas, e com isso proporciona o acionamento de relés, botoeiras, etc.

iv) Relé

O relé utilizado é da METALTEX, modelo TN4RC3. É um relé eletromecânico com 2 ou 4 contatos reversíveis com capacidade de 5A. A tensão de alimentação é de 24 V CC [20]. A figura ilustrativa pode ser vista abaixo. A tensão de 220V é conectada nos contatos NA (normalmente abertos), e quando o relé é alimentado com 24V, seus contatos fecham, liberando a alimentação para o contator.



Fonte: METALTEX

Figura A.1.4: Relé eletromecânico TN4RC3 24 V CC.

O relé é conectado em um soquete como é mostrado abaixo.



Fonte: METALTEX

Figura A.1.5: Soquete para o relé

v) Contator

O contator é uma chave de operação eletromagnética, que possui uma única posição de repouso e pode estabelecer a condução ou interromper correntes em condições normais ou de sobrecarga, mas não de curto-circuito. É constituído de uma bobina que, quando alimentada cria um campo magnético no núcleo fixo, atraindo o núcleo móvel e fechando o circuito. A ação de ligar ou desligar é feita através do relé de proteção, que está conectado a um circuito de acionamento comandado de dentro da sala de controle. Ao fechar os contatos, o relé libera a tensão de 220 V que irá magnetizar a bobina do contator. A Figura 3.5 mostra de forma simplificada o princípio de funcionamento do contator, onde NA são os contatos normalmente abertos e NF são os contatos normalmente fechados.

Os contatos NA permanecem abertos quando a bobina está desenergizada e se fecham quando a bobina é energizada. Para os contatos NF ocorre o inverso, ficam fechados quando não há energia na bobina e abertos quando a bobina é energizada.

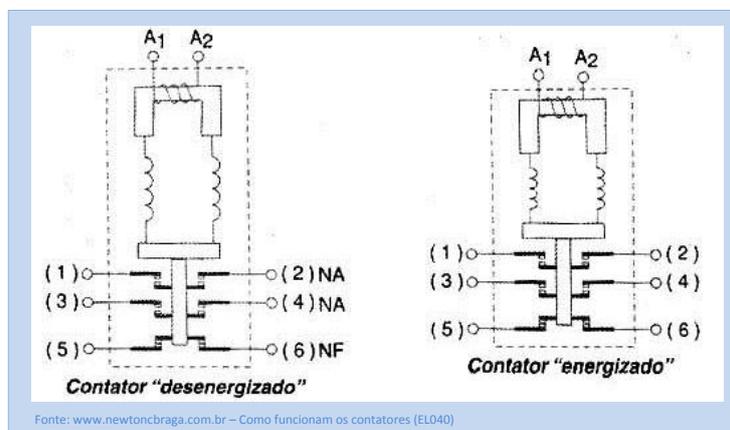


Figura A.1.6: Princípio de funcionamento do contator

vi) Variador de tensão

O variador de tensão utilizado é da marca AUJE, trifásico, 220 V e 50/60 Hz. Possui saídas 0-220/440 V, 20 A, 8,134 kVA. Como a tensão disponível é de 220 V, apenas dois bornes são utilizados com uma alimentação proveniente da rede do laboratório.

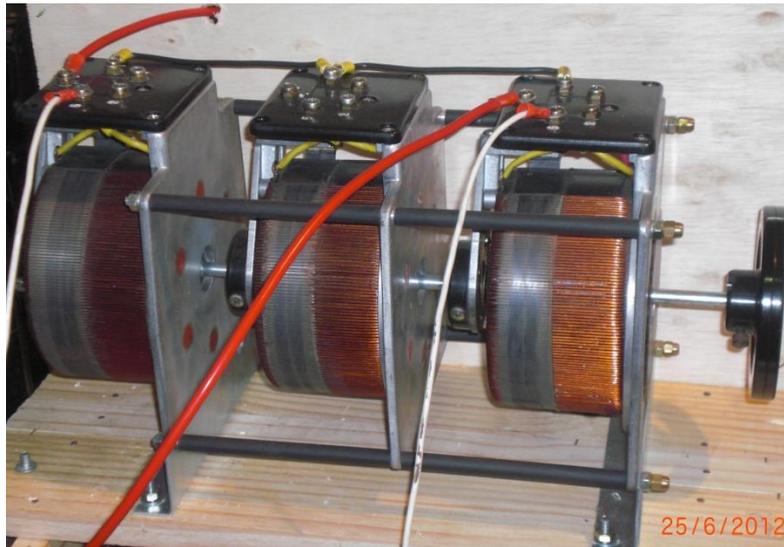


Figura A.1.7: Variador de tensão da AUJE trifásico 220V, 50/60 Hz

vii) Transformador elevador e abaixador

Os transformadores são do tipo monofásico com uma relação de tensão de 440/7967 V (com um tap em 220 V) e uma potência de 25 kVA. Os transformadores foram fabricados e fornecidos pela empresa ITB. Uma foto do transformador utilizado é mostrada a seguir.



Figura A.1.8: Transformador monofásico da ITB

viii) Carga

A carga é um banco de resistências elétricas com o intuito de simular a conexão dos consumidores ao regulador de tensão. No caso deste teste em específico, servirá para gerar uma corrente maior do que o $I_{latching}$ do tiristor. A figura A.1.9 mostra a forma que os resistores do banco são conectados. As resistências são do modelo tubular aletada, totalizando 18 dessas resistências no valor aproximado de $7,5 \Omega$ cada uma. Foi feita uma associação em série e paralelo (figura A.1.9) com o objetivo de conseguir a corrente requerida pelos tiristores. Como pode ser visto na imagem, o valor da carga utilizado para tal corrente foi de $11,25 \Omega$ aproximadamente.

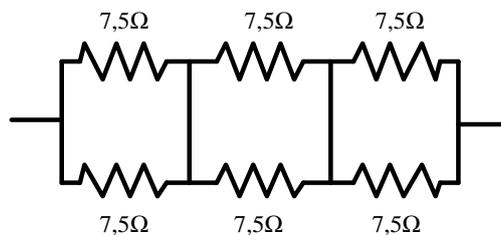


Figura A.1.9: Associação série-paralelo de resistores.



Fonte: ITE Equipamentos Elétricos

Figura A.1.10: Carga resistiva

ANEXO 2 - INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Estes equipamentos facilitam na observação e análise do comportamento da chave estática. São eles (utilizados):

i) Multímetros

Os multímetros são utilizados para que a leitura do valor da tensão no variador de tensão e no secundário do transformador elevador, que está conectado a chave estática, seja acompanhada a cada instante de tempo. A medição da tensão no secundário do transformador elevador é feita através de um TP, modelo e características mostradas a seguir.

ii) TP – Transformador de Potencial

É um transformador destinado especialmente para fornecer o sinal de tensão a instrumentos de medição, controle e proteção. No caso deste trabalho, fornece sinal para um multímetro. O TP utilizado no circuito é um modelo da INSTRUMENTI com uma potência térmica de 500 VA, relação de tensão 13800/110 V, $V_{\text{máx}}$ igual a 25 kV e Fator de sobretensão (FsT) igual a 1,15.



Figura A.2.1: TP - Transformador de potencial

iii) Alicate amperímetro

Este amperímetro é acoplado à carga para que não ultrapasse o valor de corrente suportado pela mesma, pois este valor aumenta à medida que a tensão se eleva. Outro alicate amperímetro é colocado logo após o contator para que sejam monitoradas possíveis falhas antes da chave estática submetida ao teste. Sendo assim, a corrente no primeiro amperímetro (logo após o contator) tem que ser igual (ou aproximadamente) a corrente na carga, caso contrário alguma falha pode está afetando o funcionamento correto do circuito.



Figura A.2.2: Alicate amperímetro (Tektronix)

iv) Osciloscópio

O osciloscópio é um dos instrumentos de medição com maior importância no teste, pois é através dele que a análise do comportamento da chave é feita. Neste instrumento são vistos as formas de onda de tensão e corrente durante todo o processo, ao serem impostas diferentes condições de operação. O modelo utilizado é o da Tektronix TPS 2024 (figura A.2.3).

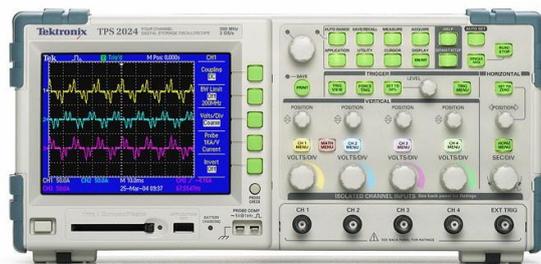


Figura A.2.3: Osciloscópio modelo Tektronix TPS-2024.

v) Megôhmetro

Ferramenta utilizada para a medição de resistências de isolamento. Todos os pontos propícios a descargas, ou arcos voltaicos, são testados e verificados se a distância é segura o suficiente para impedir a ocorrência destes arcos elétricos quando a chave estiver submetida. A imagem deste instrumento pode ser vista na figura 2.16.