

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE SEMICONDUTORES
DE POTÊNCIA COM O USO CONTÍNUO EM
COMPENSADORES ESTÁTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal
de Itajubá, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Ciências da
Engenharia

AUTOR:

ADOLPHO EUGENIO DE ANDRADE LIMA CALAZANS

ORIENTADOR:

PROF. DR. LUIZ EDUARDO BORGES DA SILVA

CO-ORIENTADOR:

PROF. DR. VALBERTO FERREIRA DA SILVA

Itajubá, agosto de 2004



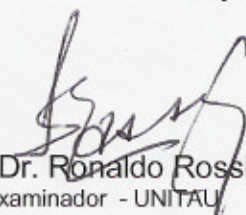
Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O I


PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

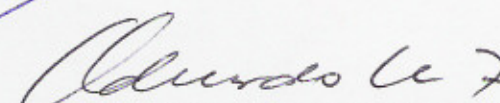
A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 353 de 18 de agosto de 2004, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **“Avaliação da Degradação de Semicondutores de Potência com o Uso Contínuo em Compensadores Estáticos”** apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência**, satisfeitas as demais exigências regimentais, a **Adolpho Eugênio de Andrade Lima Calazans**.

Itajubá, 19 de agosto de 2004.


Prof. Dr. Ronaldo Rossi
1º Examinador - UNITAU


Prof. Dr. Germano Lambert Torres
2º Examinador - UNIFEI


Prof. Dr. Valberto Ferreira da Silva
3º Examinador - (Co-Orientador) - UNIFEI


Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva
4º Examinador - (Orientador) - UNIFEI



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **“Avaliação da Degradação de Semicondutores de Potência com o Uso em Compensadores Estáticos”**

Autor: **Adolpho Eugênio de Andrade Lima Calazans**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado R = Reprovado	
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Observações:

- 1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- 2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- 3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deve apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A, ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 19 de agosto de 2004.

Prof. Dr. Ronaldo Rossi,
1º Examinador - UNITAU

Prof. Dr. Germano Lambert Torres
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Valberto Ferreira da Silva
3º Examinador - (Co-Orientador) - UNIFEI

Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva
4º Examinador - (Orientador) - UNIFEI

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

**A minha esposa Patrícia e aos meus filhos
Rodolpho e Júlia.**

AGRADECIMENTOS

A Deus, sem a ajuda do qual nada seria possível.

À Patrícia Maciel Calazans, minha esposa, pelo incentivo e ajuda na elaboração dos desenhos e editoração gráfica do presente trabalho.

Aos meus pais Eutíquio Torres Calazans e Isabel de Andrade Lima Calazans, que sempre me incentivaram a enfrentar os desafios da vida.

À Chesf – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco pela oportunidade que me foi dada de fazer o curso de pós-graduação na Universidade Federal de Itajubá.

Ao Engenheiro Sérgio Fontan, colega da Chesf, pelo incentivo e oportunidade oferecida para o retorno à vida universitária e fazer o curso de pós-graduação em Itajubá.

Ao Professor Doutor Luiz Eduardo Borges da Silva pela confiança, palavras de incentivo e orientações que tornaram possível o presente trabalho.

Ao Professor Doutor Germano Lambert Torres pelo confiança depositada e apoio recebido.

Ao Professor Doutor Valberto Silva e ao Professor Ismael Noronha pelos ensinamentos e discussões que tanto enriqueceram as pesquisas desenvolvidas e proporcionaram a superação de muitas das dificuldades encontradas.

Aos colegas Gilberto Pessoa, Miguel Medina, Bismark Rodrigues, Zósimo Resende, Luciano Abadio, Luciano Lins, Sebastião Gilbaltar, Wilson Sant'ana e Everaldo Gaspar pelo apoio e contribuições recebidas.

Agradeço também a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a execução do presente Trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

SIMBOLOGIA

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.2 – OBJETIVO.....	6
CAPÍTULO 2 - APLICAÇÃO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	8
2.1 - INTRODUÇÃO.....	8
2.2 - O CONTROLE DE TENSÃO.....	10
2.3 - AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO.....	12
2.4 - AUMENTO DA MARGEM DE ESTABILIDADE.....	17
2.5- MELHORIA DO AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA.....	21
CAPÍTULO 3 - PRINCIPAIS TIPOS E CARACTERÍSTICAS DE COMPENSADORESESTÁTICOS.....	23
3.1 – INTRODUÇÃO.....	23
3.2-COMPENSADORES ESTÁTICO TIPO CAPACITOR CHAVEADO A TIRISTOR.....	24
3.3-COMPENSADORES ESTÁTICOS TIPO REATOR CONTROLADO A TIRISTOR.....	30
3.4-COMPENSADORES ESTÁTICOS DOS TIPOS RCT E CCT QUE FIZERAM PARTE DAS PESQUISAS.....	38
3.4.1- Compensador Estático da Subestação de Fortaleza.....	40
3.4.2 – Compensador Estático da Subestação de Mossoró.....	44
CAPÍTULO 4 - INDICADORES DE DESEMPENHO.....	48
4.1 – INTRODUÇÃO.....	48

4.2 – CONFIABILIDADE E TAXA DE FALHA.....	49
4.2.1 – Conceito de Confiabilidade.....	49
4.2.2 – Taxa de Falhas.....	50
4.3 - TAXA DE FALHA DOS SEMICONDUCTORES APLICADOS EM COMPENSADORES ESTÁTICOS.....	55
4.4- A DISPONIBILIDADE OPERACIONAL DE COMPENSADORES ESTÁTICOS.....	59
CAPÍTULO 5 - CARACTERÍSTICAS DOS SEMICONDUCTORES DE POTÊNCIA	64
5.1 – INTRODUÇÃO.....	64
5.2 – SEMICONDUCTORES.....	65
5.3 – DIODOS.....	68
5.4 – TIRISTORES.....	75
CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DAS FALHAS DOS SEMICONDUCTORES.....	87
6.1 – INTRODUÇÃO.....	87
6.2 – CLASSIFICAÇÃO DAS FALHAS.....	88
CAPÍTULO 7 - PARÂMETROS DEFINIDORES DA DEGRADAÇÃO E INSTRUMENTO DE ENSAIO PARA A AVALIAÇÃO DO ESTADO DOS SEMICONDUCTORES.....	94
7.1 – CONCEITUAÇÃO DO ESTADO DOS SEMICONDUCTORES.....	94
7.2 – PARÂMETROS QUE POSSIBILITAM A AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DOS SEMICONDUCTORES.....	96
7.3 – INSTRUMENTO DE ENSAIO UTILIZADO PARA A AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DOS SEMICONDUCTORES.....	98
CAPÍTULO 8 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	105
8.1 – INTRODUÇÃO.....	105
8.2 – ENSAIOS NO COMPENSADOR ESTÁTICO TIPO CCT.....	106
8.2.1 – Ensaios nos Tiristores do Tipo FT500AH-70.....	107
8.2.2 – Ensaios nos Tiristores do Tipo FT1000BV-70.....	113
8.2.3 – Ensaios nos Diodos dos Tipos FD500EV-70 e FD1000A-56	114

8.3 – ENASIOS NO COMPENSADOR ESTÁTICO TIPO RCT.....	117
8.4 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CAPACIDADE DE BLOQUEIO.....	124
CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	131
BIBLIOGRAFIA.....	136
ANEXO - CARACTERÍSTICAS DOS SEMICONDUCTORES.....	140

RESUMO

Os compensadores estáticos são equipamentos de grande importância para os sistemas elétricos de potência. A evolução tecnológica tem permitido, cada vez mais, viabilizar estes equipamentos como uma das alternativas para a solução de muitos dos problemas encontrados nos sistemas elétricos de diferentes complexidades. No entanto, pouco se conhece sobre a degradação dos semicondutores de potência com o uso contínuo nos compensadores estáticos.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para a avaliação da degradação dos semicondutores de potência, aplicados em compensadores estáticos dos tipos capacitores chaveados por tiristores (CCT) e reatores controlados a tiristores (RCT), que resulte na melhoria do desempenho operacional desses equipamentos, como também, apresentar os resultados dos ensaios realizados em semicondutores com diferentes estados de degradação e, como a temperatura da junção influencia na capacidade de bloqueio dos semicondutores.

Na primeira parte do trabalho, foram feitas considerações gerais sobre a importância do desenvolvimento de pesquisas, que permitam a avaliação da degradação dos semicondutores de potência aplicados em compensadores estáticos, especialmente considerando a atual regulamentação do setor elétrico brasileiro.

O capítulo 2 apresenta os benefícios que a instalação dos compensadores estáticos proporciona para os sistemas elétricos de potência. Em seguida, no capítulo 3 são apresentados os principais tipos e arranjos de compensadores estáticos, bem como é feita uma descrição dos compensadores estáticos que fizeram parte das pesquisas.

No capítulo 4 é feita uma avaliação do desempenho operacional dos compensadores estáticos que fizeram parte das pesquisas, abordando questões relativas à taxa de falha dos semicondutores e à disponibilidade operacional, comparando este último indicador com os dados fornecidos em pesquisa realizada pelo CIGRÉ.

O capítulo 6 apresenta a análise e classificação das falhas encontradas em alguns semicondutores retirados de operação das válvulas de compensadores estáticos, sendo esta análise precedida, no capítulo 5, de uma breve recapitulação da teoria dos semicondutores, com a descrição das principais características elétricas desses dispositivos.

Seguidamente, no capítulo 7, são apresentados os conceitos para a classificação dos semicondutores em diferentes estados de degradação, definidos que parâmetros que devem ser utilizados para a avaliação da degradação dos semicondutores e, finalmente, a descrição do instrumento de ensaios utilizado nas pesquisas.

O capítulo 8 apresenta os resultados das análises dos ensaios realizados nas pesquisas, mostrando as formas de onda da tensão e da corrente de semicondutores em diferentes estados de degradação, e como a temperatura influencia a capacidade de bloqueio desses semicondutores.

Finalmente, no capítulo 9, são apresentadas as conclusões e recomendações desta dissertação, bem como a proposição de novos trabalhos para darem seguimento às pesquisas para a avaliação da degradação dos semicondutores de potência.

ABSTRACT

Nowadays the Static VAR Compensators is a equipment essentially important for the electric power system. The rapid development technologic has offered the Static VAR Compensators (SVC) as solution to a number of problems encountered in electric power system. However, research in degradation of semiconductors applied in SVC is still developing.

The objective of this dissertation is to introduce a methodology for diagnosing semiconductors degradation, applied in SVC type Thyristor Switched Capacitor (TSC) and Thyristor Controlled Reactor (TCR), resulting in the improvement of operational performance of SCV. It also presents the results of tests carried out in semiconductors during different stages of degradation, and how the junction temperature affects the semiconductor blocking capability.

In Chapter 1, general comments are made on the importance of the SVC in electric power systems and the research development on semiconductors degradation, especially in the context of actual Brazilian Electric Model.

In Chapter 2, there are some comments about the benefices of SVC's application. Following this, in Chapter 3, the main types of SVC are presented, and the basic configuration of the SVC researched.

Next, in Chapter 4, a performance analysis of SVC in service in national grid of Brazil is done, emphasizing failure rates of semiconductors e availability rates of SVC.

In Chapter 5, a brief review of semiconductors theory is provided, considering the electrical characteristics of thyristors and diodes. It Chapter 6, the failures of semiconductors are analyzed and classified according to the characteristics of damage.

Following this, in Chapter 7, the concept of various levels of degradation (normal, defect and failure) is introduced. It is presented which parameters of semiconductors shall be analyzed to determinate the level of degradation.

In Chapter 8, the results of tests carried out in semiconductors during different stages of degradation are discussed, highlighting the analysis of voltage-current characteristics, and the behavior of the leaking current when the maximum ratings of repetitive peak off-state voltage and repetitive peak reverse voltage are applied. The manner in which junction temperature affects the semiconductor blocking capability is also presented.

Finally, in Chapter 9, conclusions are drawn. Some recommendations are given, including proposals for developing of new research projects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema Elétrico Simplificado.

Figura 2.2 – Compensador estático instalado no ponto médio da linha de transmissão.

Figura 2.3 – Diagrama fasorial das tensões e correntes do sistema com a instalação do compensador estático.

Figura 2.4 – Potência transferida em função do ângulo de potência com um compensador ideal.

Figura 2.5 – Potência transferida em função do ângulo de potência com um compensador com limitação de potência.

Figura 2.6 – Sistema elétrico simplificado com dois geradores e o compensador estático na barra intermediária.

Figura 2.7 – Potência transmitida em função do ângulo δ .

Figura 3.1 – Circuito básico do compensador tipo CCT.

Figura 3.2 – Chaveamento controlado do capacitor.

Figura 3.3 – Compensador CCT com um dos ramos paralelos com diodos.

Figura 3.4 – Circuito básico do compensador tipo RCT.

Figura 3.5 – Forma de onda da corrente do compensador tipo RCT.

Figura 3.6 – Compensador do tipo RCT com banco de capacitores.

Figura 3.7 – Característica de saída do compensador tipo RCT com capacitor em paralelo.

Figura 3.8 – Compensador Estático do tipo RCT da Subestação de Fortaleza.

Figura 3.9 – Compensador Estático do tipo CCT da Subestação de Mossoró.

Figura 3.10 – Diagrama da válvula de tiristores do compensador estático do tipo RCT que fez parte das pesquisas.

Figura 3.11 – Módulo de tiristores da válvula do CE da subestação de Fortaleza.

Figura 3.12 – Diagrama da válvula do compensador estático tipo CCT que fez parte das pesquisas.

Figura 3.13- Válvula do CE da subestação de Mossoró.

Figura 4.1 – Curva temporal da taxa de falhas – Curva em banheira.

Figura 4.2 – Taxa de falha dos tiristores do compensador estático do tipo RCT.

Figura 4.3 – Taxa de falha dos semicondutores do compensador estático do tipo CCT.

Figura 4.4 - Disponibilidade dos compensadores estáticos do tipo RCT em operação na Chesf.

Figura 4.5 - Disponibilidade dos compensadores estáticos do tipo CCT em operação na Chesf.

Figura 5.1 – Junção PN e símbolo do diodo.

Figura 5.2 – Característica tensão-corrente do diodo.

Figura 5.3 – Símbolo do tiristor.

Figura 5.4 – Característica tensão-corrente do tiristor.

Figura 5.5 – Tiristor e a concentração de corrente no gatilho.

Figura 5.6 – Geometria do gatilho.

Figura 6.1 - Tiristor Tipo FT500AH-70 - Falha tipo I.

Figura 6.2 - Diodo tipo FD500EV-70 - Falha Tipo II.

Figura 6.3 - Diodo tipo FD500EV-70 - Falha Tipo III.

Figura 6.4 - Tiristores BstT68H280S15 - falha tipo IV.

Figura 6.5 - Tiristores BstT 68H280S15 – falha tipo V.

Figura 6.6 – Tiristores BstT 68H280S15 – falha tipo VI.

Figura 6.7 – Tiristores BstT 68H280S15 – falha tipo VII.

Figura 7.1 – Diagrama de blocos do instrumento de ensaios.

Figura 7.2 – Prensa para ensaios dos semicondutores.

Figura 8.1- Tensões V_{DRM} suportadas pelos tiristores FT500AH-70.

Figura 8.2 - Tensões V_{RRM} suportadas pelos tiristores FT500AH-70.

Figura 8.3 – Tela do instrumento de ensaio do tiristor de número 9, que não suportou a aplicação da tensão V_{DRM} .

Figura 8.4 – Curva característica tensão x corrente tiristor de número 11, em estado defeituoso.

Figura 8.5 – Curva característica tensão x corrente tiristor de número 23, em estado normal.

Figura 8.6 – Forma de onda da tensão e da corrente do tiristor de número 11.

Figura 8.7 – Forma de onda da tensão e da corrente do tiristor de número 23.

Figura 8.8 – Tensões V_{DRM} suportadas pelos tiristores FT1000BV-70.

Figura 8.9 - Tensões V_{RRM} suportadas pelos tiristores FT1000BV-70.

Figura 8.10 - Tensões reversas suportadas pelos diodos FD500EV-70.

Figura 8.11 – Tensões reversas suportadas pelos diodos FD1000A-56.

Figura 8.12 - Forma de onda da tensão e da corrente do diodo FD500EV-70 de número 3, em estado falhado.

Figura 8.13 – Primeira seqüência de ensaios da válvula do CE tipo RCT.

Figura 8.14 – Segunda seqüência de ensaios da válvula do CE tipo RCT.

Figura 8.15 – Curva tensão x corrente típica de tiristores BstT68H280S15.

Figura 8.16 - Formas de onda da tensão e corrente tiristores BstT68H280S15 em bom estado.

Figura 8.17 – Característica tensão x corrente tiristor falhado.

Figura 8.18 – Formas de onda da tensão e da corrente direta de um tiristor falhado.

Figura 8.19 - Formas de onda da tensão e da corrente reversa de um tiristor falhado.

Figura 8.20 - Característica tensão x corrente sentido reverso do diodo FD500EV-70.

Figura 8.21 – Comparação das características tensão x corrente do tiristor tipo FT500AH-70, com diferentes temperaturas, na tensão de bloqueio reverso.

Figura 8.22 – Comparação das características tensão x corrente do tiristor tipo FT500AH-70, com diferentes temperaturas, na tensão de bloqueio reverso.

Figura 8.23 - Comparação das características tensão x corrente do tiristor tipo BstT68H280S15, com diferentes temperaturas, na tensão de bloqueio direto.

Figura 8.24 - Comparação das características tensão x corrente do tiristor tipo BstT68H280S15, com diferentes temperaturas, na tensão de bloqueio reverso.

Figura 8.25 – Forma de onda da tensão e da corrente tiristor tipo BstT68H280S15 a 24⁰C.

Figura 8.26 - Forma de onda da tensão e da corrente tiristor tipo BstT68H280S15 a 94⁰C.

SIMBOLOGIA

CHESF: Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

UNIFEI: Universidade Federal de Itajubá

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CIGRÉ: Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques à Haute Tension

ONS: Operador Nacional do Sistema

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

CPST: Contrato de Prestação de Serviço de Transmissão

RAP: Receita anual permitida

PB: Pagamento base

PV: Parcela variável

CE: Compensador estático

CCT: Capacitor chaveado a tiristor

RCT: Reator controlado a tiristor

ETT: Electrically Triggered Thyristor

BOD: Break Over Diode

TUT: Tiristor sob ensaio

V_S: Tensão do sistema

V_L: Tensão da carga

X: Impedância

δ: Ângulo de potência

P: potência

P_{Max}: Potência máxima transmitida

P_C: Potência transmitida com o compensador estático

E: Força eletromotriz
X_d': Reatância transitória do gerador
X_L: Reatância série da linha
X_T: Reatância do transformador
V_C: Tensão do capacitor
I_C: Corrente do capacitor
I₁: Componente fundamental da corrente
 α : Ângulo de disparo do tiristor
 σ : Graus elétricos de condução da corrente
L: Indutância
B: Susceptância
 ω : Freqüência angular
f: Freqüência
t: Tempo
N: Número de equipamentos
 λ : Taxa de falha
n: Concentração de elétrons
p: Concentração de lacunas
N_A: Número de átomos aceitadores
N_D: Número de átomos doadores
LTT: Light Triggered Thyristor
C_j: Capacitância equivalente da junção
A: Anodo
K: Catodo
G: Gatilho
V_{AK}: Tensão anodo-catodo
CPU: Central Processing Unit

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1– INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico de sistemas de controles cada vez mais rápidos e, de semicondutores de potência capazes de conduzir elevadas correntes e suportar altos níveis de tensão, permitiu de forma relativamente recente, que os compensadores estáticos de potência reativa, controlados a tiristores, fossem empregados nos sistemas elétricos de potência.

Desde a entrada em operação dos primeiros compensadores estáticos de grande porte no final da década de 1970, primeiramente em sistemas elétricos na América do Norte e Europa e, posteriormente, a partir da década de 1980, no Brasil, até os dias atuais, a evolução tecnológica da compensação de reativos permitiu

que, a aplicação dos compensadores estáticos fosse uma das alternativas técnicas e econômicas mais viáveis para a solução de muitos dos problemas encontrados nos sistemas elétricos de diferentes complexidades.

Os compensadores estáticos (CE) podem ser de vários tipos, sendo projetados com diferentes arranjos de circuitos, sistema de controle e filosofia de proteção. Os tipos mais comuns de compensadores estáticos são o reator controlado a tiristores (RCT) e o capacitor chaveado a tiristor (CCT). Mas, independentemente, do tipo e do arranjo, a válvula de tiristores é o componente mais importante do compensador estático, por ser o equipamento a partir do qual o compensador desempenha a sua função, como também por ser um dos equipamentos de maior valor econômico.

Os compensadores estáticos são projetados para terem baixas perdas e alta disponibilidade operacional. Sendo o compensador uma instalação complexa, a disponibilidade está associada à confiabilidade de cada equipamento que o integra. A válvula de tiristores tem importante papel para que o compensador apresente um desempenho operacional satisfatório. Entre outros requisitos, a válvula deve ter elementos semicondutores redundantes e, um eficiente sistema de monitoramento do estado destes semicondutores.

No Brasil, a atual legislação do setor elétrico estabelece como regra para a remuneração das empresas transmissoras de energia, a disponibilização dos ativos de transmissão, sendo os valores

econômicos da remuneração de cada instalação determinados pelos órgãos regulamentadores.

O contrato de prestação de serviços de transmissão (CPST), que cada empresa transmissora tem com o Operador Nacional do Sistema (ONS), estabelece que a empresa poderá ter sua receita anual reduzida de uma parcela variável (PV), deduzida mensalmente do pagamento base (PB), como resultado da efetiva disponibilização das instalações de transmissão. A parcela variável é calculada pela seguinte fórmula:

$$PV = \frac{PB}{24 \times 60 \times D} \times K_p \times \left(- \sum_{i=1}^{NP} DDP_i \right) + \frac{PB}{24 \times 60 \times D} \times \left(- \sum_{i=1}^{NO} K_{oi} \times DOD_i \right)$$

Onde:

DDP: Duração em minutos de cada desligamento programado que ocorra durante o mês.

DOD: Duração em minutos de cada um dos outros desligamentos que ocorram durante o mês.

PB = Pagamento Base das instalações de transmissão.

K_p = Fator para desligamentos programados = $k_o/15$.

K_o = Fator para outros desligamentos, que é igual a 150 do 1^o minuto até o 300^o minuto. Após o 301^o minuto, o fator será reduzido para 10.

NP = Número de desligamentos programado da instalação ao longo do mês.

NO = Número de outros desligamentos da instalação ao longo do mês.

D = Número de dias do mês.

De acordo com a fórmula da parcela variável, os desligamentos não programados que levam a indisponibilidade operacional da instalação, podem penalizar a empresa transmissora em até 150 vezes o valor correspondente ao que ela recebe por disponibilizar a instalação. Normalmente, os valores econômicos envolvidos com os compensadores estáticos são elevados. Por exemplo, para um compensador de última geração, em valores atuais, caso o equipamento fique fora de operação por cinco horas, em função de um desligamento não programado, a perda de receita da empresa de transmissão seria na ordem de R\$ 720.000,00 (US\$240,000.00).

Considerando os benefícios que os compensadores estáticos proporcionam para o sistema elétrico e a importância econômica destes equipamentos para as empresas, é necessário que as equipes de manutenção e operação das empresas explorem bem estes equipamentos, conhecendo suas limitações e desenvolvendo técnicas de manutenções que assegurem a maior disponibilidade possível. No entanto, poucas pesquisas têm sido feitas para se conhecer a degradação dos semicondutores com o uso contínuo dos compensadores estáticos, existindo uma escassez de informações sobre este assunto.

Os primeiros compensadores que entraram em serviço no sistema elétrico brasileiro estão com quase vinte anos de operação. Para se assegurar a continuidade da disponibilidade operacional destes equipamentos, após todo este tempo de operação, é necessário

que seja conhecido o estado dos semicondutores das válvulas destes compensadores. A experiência prática tem demonstrado que alguns semicondutores apresentam suas características alteradas, sem que os dispositivos de supervisão da válvula, que têm como finalidade a verificação do estado dos semicondutores, identifiquem essas anormalidades, caracterizando que os semicondutores podem passar por um estado de degradação, classificado neste trabalho como defeituoso, antes que venham finalmente a falhar.

A introdução do conceito de semicondutores defeituosos vem contribuir com novas informações, considerando que os semicondutores são normalmente tratados na literatura técnica como componentes não reparáveis, que podem assumir apenas dois estados: bom ou falhado.

Embora o estado de degradação do semicondutor seja irreversível e progressivo, se diagnosticado a tempo, pode permitir que o componente seja substituído preventivamente, dentro de um desligamento programado do compensador, pois do contrário, considerando os atuais dispositivos de supervisão, pode ocorrer a situação do compensador ser desligado, automaticamente, por falhas dos semicondutores, em situação desfavorável para o sistema elétrico, podendo causar grandes transtornos operacionais para o sistema e, até mesmo, implicar em penalidades para a empresa transmissora, considerando as atuais regras do setor elétrico brasileiro.

1.2 - OBJETIVO

O presente trabalho de dissertação tem como objetivo apresentar uma metodologia para a avaliação da degradação dos semicondutores de potência, aplicados em compensadores estáticos dos tipos capacitores chaveados por tiristores (CCT) e, reatores controlados a tiristores (RCT), que resulte na melhoria do desempenho operacional desses equipamentos.

A metodologia proposta consiste, basicamente, no desenvolvimento de ações de manutenções preventivas, que permitam a antecipação de intervenções que reduzam o risco do compensador estático vir a ser desligado automaticamente de forma intempestiva, devido à evolução da degradação dos semicondutores que resultam na falha desses componentes.

Para a consecução da metodologia proposta neste trabalho, foi primeiro necessário definir os parâmetros que poderiam permitir a avaliação do nível de degradação dos semicondutores, como também definir as análises que deveriam ser realizadas nesta avaliação. A validação do modelo proposto está baseada nos ensaios realizados em válvulas de tiristores de dois compensadores estáticos de grande porte, instalados na rede básica do sistema elétrico brasileiro.

Como parte da metodologia empregada, o trabalho mostra, através da análise das formas de onda das tensões e correntes medidas nos ensaios, o comportamento dos semicondutores em

diferentes estados de degradação, e como a temperatura da junção influencia na capacidade de bloqueio dos semicondutores.

Por fim, o presente trabalho pretende, ainda, oferecer a engenheiros de projeto, operação e manutenção e, ao meio acadêmico em geral, uma contribuição para o conhecimento do desempenho operacional de compensadores estáticos de grande porte, sujeitos continuamente, a solicitações do sistema elétrico de caráter transitório ou permanente, abordando questões relacionadas com a disponibilidade operacional e a taxas de falhas de semicondutores.

CAPÍTULO 2

APLICAÇÃO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

2.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as principais motivações para a aplicação dos compensadores estáticos nos sistemas elétricos de potência, enfocando seus benefícios e princípios de funcionamento.

Embora existam diferentes tipos de equipamentos de compensação de reativos, cada um com suas vantagens e desvantagens, o presente trabalho limitará a abordagem para os compensadores estáticos controlados a tiristores, considerando que o objetivo final do trabalho é a avaliação da degradação desses componentes.

Os compensadores estáticos controlados a tiristores são aplicados nos sistemas elétricos de potência com o objetivo de solucionar uma série de problemas naturalmente encontrados nestes sistemas. Fornecendo ou absorvendo potência elétrica reativa de forma contínua ou em pequenos degraus, os compensadores estáticos controlados a tiristores tendem a manter a tensão na barra em que estão conectados, dentro de uma faixa fixada em seu sistema de controle. Isto é, o controle ou o chaveamento das correntes de dispositivos geradores ou absorvedores de potência reativa, conectados em paralelos com o sistema, permite compensar as variações das cargas e das fontes equivalentes, mitigando a variação de tensão na barra de conexão.

Os compensadores estáticos são aplicados nos sistemas elétricos de potência, trazendo os seguintes principais benefícios:

- Controle da tensão do sistema em estado transitório ou permanente.
- Aumento da capacidade de transmissão de potência ativa do sistema.
- Aumento da margem de estabilidade.
- Melhoria no amortecimento de oscilações de potência.

2.2 - O CONTROLE DE TENSÃO

Em sistemas elétricos fracos com pequena potência de curto circuito, ou em sistemas radiais, com linhas longas e grande concentração de carga nas barras terminais, a variação da carga ou a manobra de elementos do sistema, tais como linhas de transmissão, bancos de capacitores, transformadores ou reatores, podem provocar significativas variações na tensão da barra de conexão da carga. Em sistemas com estas características, se nenhuma fonte de compensação de reativo for utilizada, a medida que a corrente de carga aumenta, a tensão na barra da carga diminui, podendo esta atingir valores baixos que dificultam a operação do sistema, sendo prejudicial para o desempenho de certos tipos de carga, como motores à indução, e em casos extremos pode ocorrer o colapso de tensão.

Em situação oposta, em sistemas com as características descritas anteriormente, mas em condições de carga leve, a passagem da corrente da carga pela impedância equivalente das linhas do sistema, causa uma diferença de potencial com regulação negativa, conhecida como efeito Ferranti, que provoca o aumento da tensão nos terminais da carga, em relação à tensão do sistema, podendo a tensão na barra do consumidor atingir elevados valores e, resultar em saturações de transformadores e maior geração de harmônicos. A tensão pode atingir valores não suportados pelos equipamentos conectados a esta barra e, eventualmente, levar a falha da isolação desses equipamentos.

Podem ainda existir casos que, mesmo em sistemas com elevado nível de curto circuito e boa malha de linhas de transmissão, a potência reativa demandada por grandes e flutuantes blocos de cargas industriais, tais como fornos a arco, associadas a variações de elementos do circuito, tais como manobras de linha e transformadores, resultem na necessidade do controle de tensão, de modo a estabilizá-la dentro de limites que assegurem a qualidade da energia elétrica fornecida.

Mas tanto em sistemas fracos como em sistemas mais malhados, em condições transitórias, seja devido a falhas que resultem em curto circuitos ou a variação de grandes blocos de carga, a energia transmitida varia rapidamente durante esses transitórios, podendo resultar em grandes variações nos níveis de tensão dos barramentos, com grande influência no desempenho do sistema.

Como os compensadores estáticos são capazes de responder, quase que instantaneamente, às variações transitórias da tensão do sistema, eles são aplicados nos sistemas elétricos para minimizar os efeitos da variações da tensão, sejam essas variações em regime transitório ou permanente.

Os compensadores estáticos podem controlar a tensão do sistema em situações de contingências, tais como variações da carga, desligamentos de linhas, transformadores e geradores, e em situações de distúrbios provocados, por curtos-circuitos e rejeições de cargas.

2.3 – AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO

Considerando a figura 2.1 [8], que mostra o circuito simplificado de um sistema elétrico de potência, onde um gerador representado por V_S é conectado a uma barra de uma carga, com tensão V_L , através de uma linha de transmissão representada pela impedância X . Sendo δ o ângulo de defasagem entre as tensões V_S e V_L , a potência transmitida pelo circuito é dada pela expressão:

$$P = \frac{V_S \cdot V_L}{X} \cdot \text{sen} \delta \quad (2.1)$$

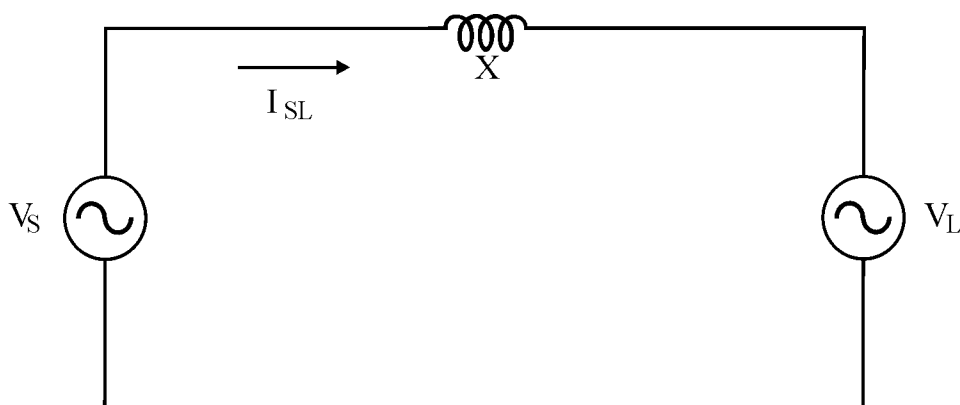


Figura 2.1 – Sistema elétrico simplificado.

Considerando V_S igual a V_L em módulo, com um valor V , a máxima potência transmitida pelo sistema é atingida quando o ângulo de defasagem entre essas tensões for igual a 90° , sendo a máxima potência expressa pela equação 2.2.

$$P_{Max} = \frac{V^2}{X}$$

(2.2)

Caso no circuito simplificado do sistema elétrico de potência mostrado anteriormente, um compensador estático ideal (sem perdas e limite de potência) for conectado ao ponto médio da linha de transmissão, conforme mostra a figura 2.2, de forma a controlar e manter constante a tensão na barra M, e sendo as tensões em cada barra correspondentes à barra da fonte, à barra do ponto médio e à barra da carga, respectivamente V_S , V_M e V_L . Não tendo o compensador perdas, a tensão V_M e corrente I_M estão defasadas de 90 graus.

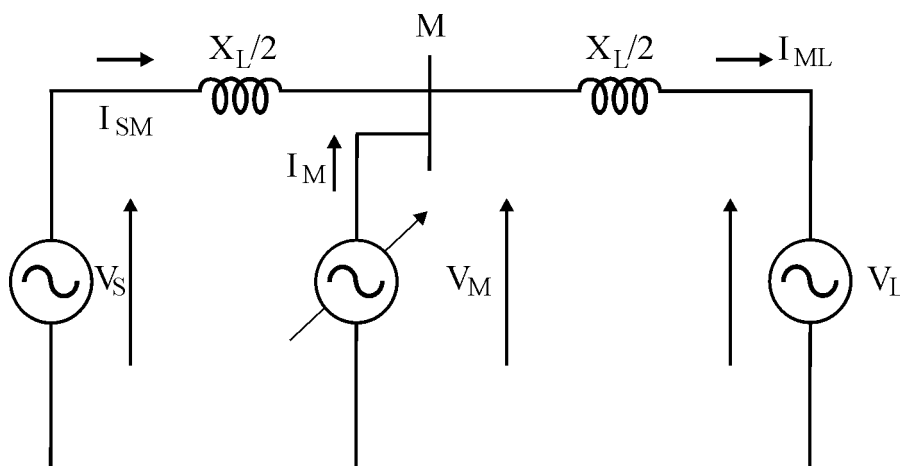


Figura 2.2 –Compensador estático instalado no ponto médio da linha de transmissão.

Considerando ainda que as tensões V_S e V_L em cada barramento iguais em módulos e δ o ângulo de defasagem entre as tensões, essas podem ser expressas pelas equações a seguir:

$$V_S = V \text{sen} \omega t \quad (2.3)$$

$$V_M = V \text{sen}(\omega t - \delta/2) \quad (2.4)$$

$$V_L = V \text{sen}(\omega t - \delta) \quad (2.5)$$

O diagrama fasorial das tensões e correntes pode ser visualizado na figura 2.3.

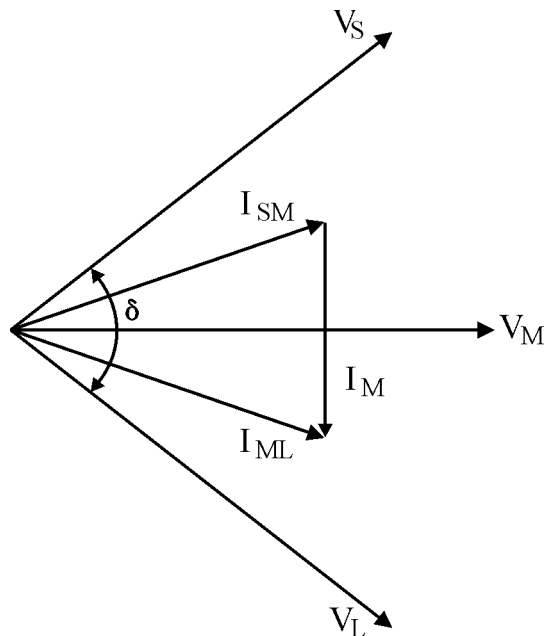


Figura 2.3 – Diagrama fasorial das tensões e correntes do sistema com a instalação do compensador estático.

Como as tensões em cada barramento são iguais em módulo, a potência transmitida no sistema, da fonte para a carga, com a instalação do compensador estático é expressa pela equação 2.6 [18]:

$$P_C = \frac{2.V^2}{X} . \text{sen}\delta / 2 \quad (2.6)$$

Comparando a equação 2.6 com a equação 2.2, pode-se concluir que a instalação do compensador estático no ponto médio da linha de transmissão, duplica a capacidade do sistema de transmitir potência.

O aumento da capacidade de transmissão é devido a manutenção pelo compensador estático da tensão no barramento de conexão. A potência transferida pelo sistema de transmissão em função do ângulo de potência δ é mostrada na figura 2.4, para o sistema sem compensação estática e com o compensador estático instalado no meio da linha de transmissão entre os barramentos da fonte e da carga.

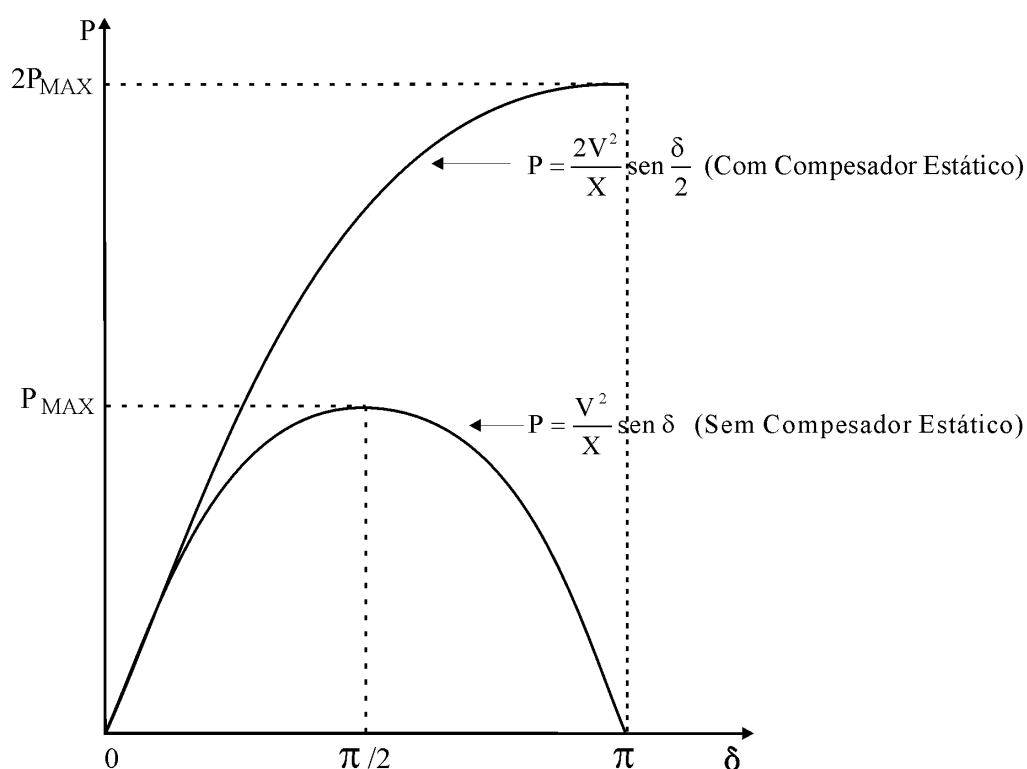


Figura 2.4 – Potência transferida em função do ângulo de potência com um compensador ideal.

No gráfico da figura 2.4, com a instalação do compensador estático, observa-se que a máxima capacidade de transmissão de potência é atingida quando o ângulo δ for igual a 180° . Esta curva de fato só é obtida em condições ideais, ou seja, na hipótese de que o compensador estático responda instantaneamente e tenha capacidade de fornecer uma corrente puramente reativa e que atenda, integralmente, à demanda do sistema. Na prática nenhuma dessas condições são encontradas. Portanto, a combinação entre o retardo na resposta do compensador, associada a sua limitação em manter a tensão no barramento constante, devido a sua limitação de potência, faz com que a curva da potência transferida pelo sistema de

transmissão em função do ângulo de potência δ tenha a forma apresentada na figura 2.5, [6], [8] e [11].

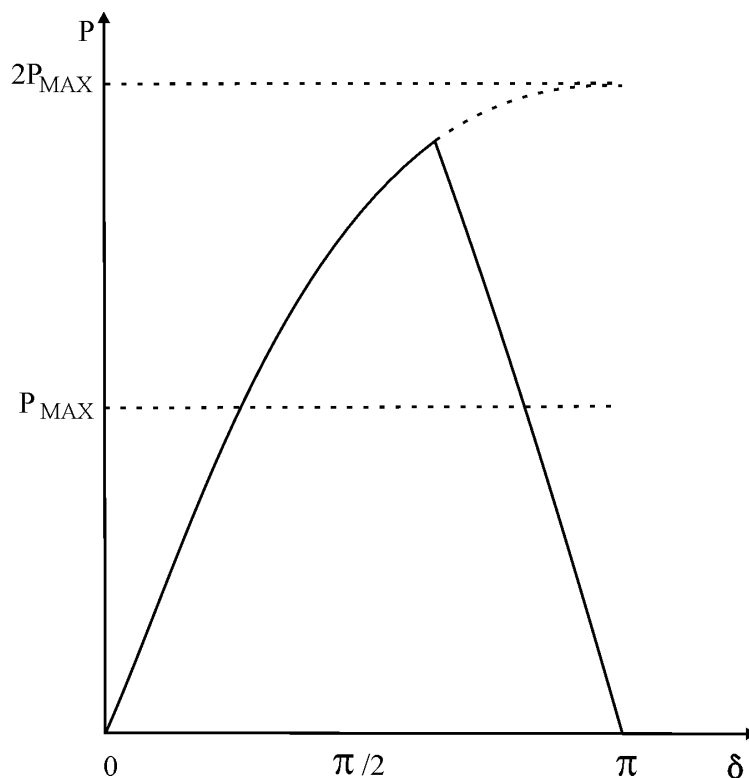


Figura 2.5 – Potência transferida em função do ângulo de potência com um compensador com limitação de potência.

2.4 – AUMENTO DA MARGEM DE ESTABILIDADE

A estabilidade é a característica do sistema elétrico de potência, ou parte do sistema, que lhe permite desenvolver em seus elementos forças restauradoras iguais ou maiores que as forças perturbadoras, as quais permitem estabelecer um estado de equilíbrio entre os elementos. O limite de estabilidade é o fluxo máximo de potência que pode passar em determinado ponto do sistema, quando

todo ele ou parte a que se refere o limite de estabilidade está operando de maneira estável [17].

Os sistemas elétricos de potência apresentam limites de estabilidade para os regimes permanentes e transitórios. O limite de estabilidade em regime permanente é atingido quando o fluxo máximo de potência possível em um determinado ponto do sistema, sem perda de estabilidade, é atingido de forma gradual. Enquanto que o limite de estabilidade transitória é atingido quando o fluxo máximo de potência possível em determinado ponto, também sem perda de estabilidade, é atingido de forma brusca, após uma perturbação no sistema.

Normalmente, o limite de estabilidade transitória é menor que o limite de estabilidade em regime permanente. Portanto, para que o sistema de potência opere dentro de seus limites de estabilidade, é necessário que o mencionado sistema seja mantido com margens as quais permitam que a ocorrência de perturbações causadas por falhas e suas eliminações, não levem a perda da estabilidade do sistema.

Considerando o sistema apresentado na figura 2.6 [11], formado por dois geradores interligados por um sistema simétrico, com um compensador estático, instalado no ponto médio, onde E é a força eletromotriz atrás da reatância transitória X'_d de cada gerador, X_ℓ a reatância série de cada linha de transmissão e X_T a reatância equivalente dos transformadores entre as linhas e geradores.

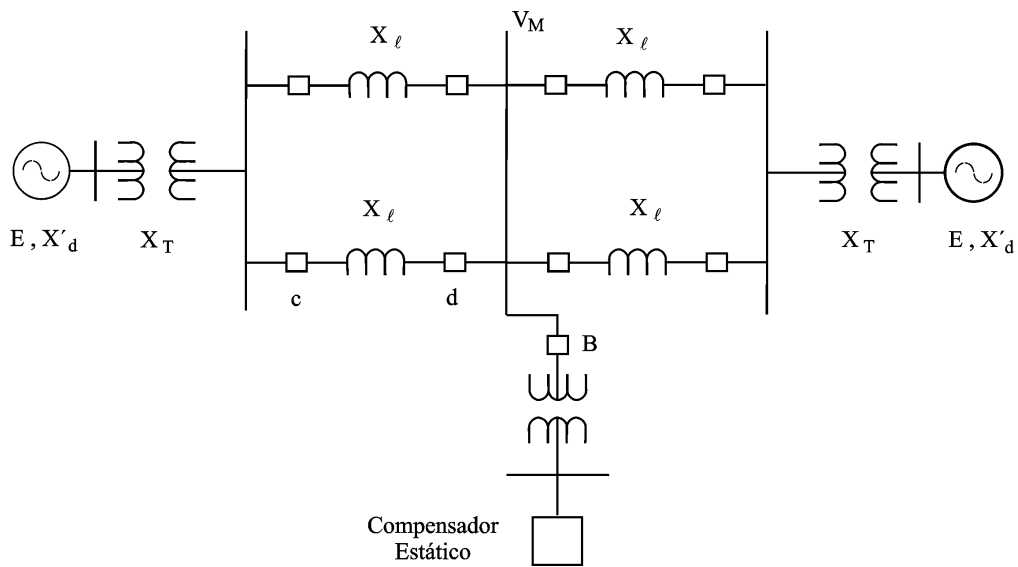


Figura 2.6 – Sistema elétrico simplificado com dois geradores e o compensador estático na barra intermediária.

As tensões E , de cada gerador, são iguais em módulo com valor V e defasadas de δ graus. Considerando V_M a tensão na barra em que o compensador estático está conectado, e sendo a tensão V_M igual em módulo a V , pela equação 2.1, a potência máxima transmitida pelo sistema sem o compensador estático é obtida pela expressão a seguir:

$$P_{Max} = \frac{V^2}{X_\ell + 2(X_T + X'_d)} \quad (2.7)$$

Com a instalação do compensador estático, e a tensão V_M sendo mantida em módulo igual a V , de acordo com a equação 2.6, a máxima potência transmitida pelo sistema é agora igual a $2P_{Max}$. A figura 2.7 (a) mostra na curva 1 a potência transmitida em função do

ângulo de potência δ , sem a instalação do compensador, e a curva 1 da figura 2.7 (b), o mesmo gráfico com a instalação do compensador.

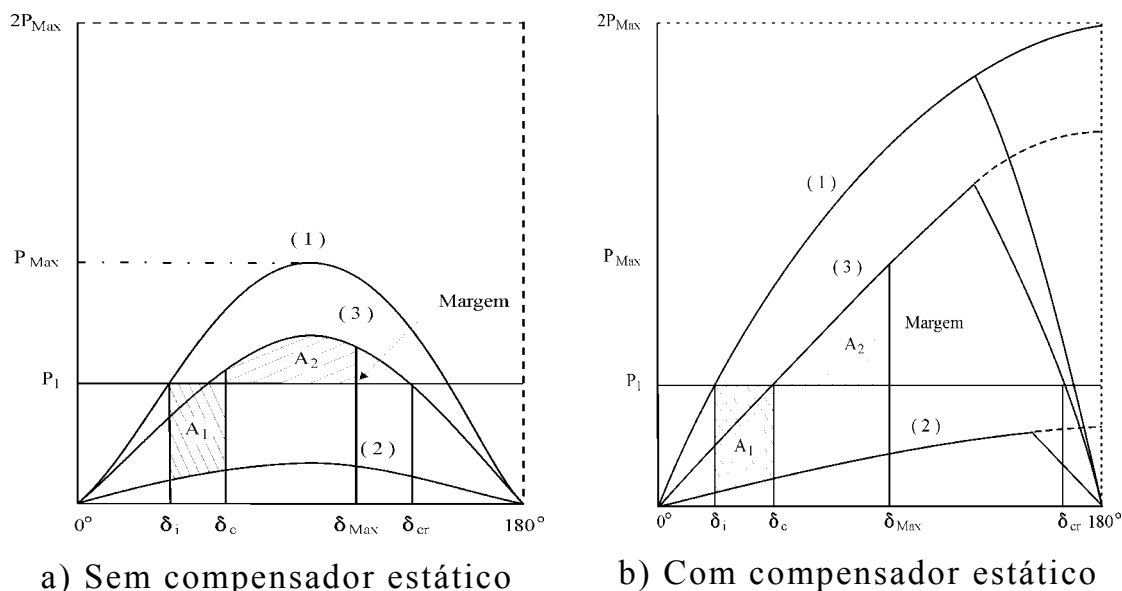


Figura 2.7 – Potência transmitida em função do ângulo δ .

Se no sistema apresentado na figura 2.6, a potência transmitida for igual a P_1 e, ocorrer uma perturbação causada por uma falha na linha de transmissão entre os terminais c e d, que leve a retirada de operação desta linha, durante a falha haverá uma redução na capacidade de transmissão de potência do sistema, representada nos gráficos a e b da figura 2.7 pelas curvas 2. Com o aumento brusco da carga e até que a falha seja eliminada, os geradores irão acelerar, passando o ângulo de potência de δ_i para δ_c . A energia dessa aceleração é representada pela área A_1 . Com a eliminação da falta, e a saída de operação da linha entre os terminais c e d, nas duas configurações, com e sem compensador estático, a capacidade de transmissão de potência do sistema é reduzida sendo esta nova situação representada nos gráficos a e b da figura 2.7 pelas curvas 3.

Com a redução de potência, os geradores são forçados a desacelerar, havendo um aumento no ângulo de δ_c para δ_{Max} , sendo a energia de desaceleração representada nos gráficos pela área A_2 .

Para que o sistema permaneça estável é necessário que a energia de desaceleração dos geradores seja igual ou maior que a energia de aceleração, devendo após a falta, o ângulo δ_{Max} ser menor que o ângulo crítico representado por δ_{cr} , para que o sistema permaneça transitoriamente estável. As margens de estabilidade são representadas na figura 2.7, pelas áreas entre as curvas de potências e os ângulos δ_{Max} e δ_{cr} .

Com a instalação do compensador estático, para uma mesma potência anterior a falha, a energia de desaceleração e a margem de estabilidade são maiores do que na configuração do sistema sem o compensador estático. Portanto, a instalação do compensador proporcionou um aumento da estabilidade transitória do sistema.

2.5 – MELHORIA DO AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA

Os sistemas elétricos estão constantemente expostos a variações de potência, causadas por variações normais da carga e manobras operacionais dos elementos que compõem o sistema. Esses distúrbios, embora normais e freqüentes, causam oscilações eletromecânicas nos geradores, que resultam em variações na freqüência e na tensão do sistema.

Os geradores são projetados de modo que seus enrolamentos de amortecimentos e o sistema de controle de excitação da máquina absorvam parte dessas oscilações de potência. No entanto, o amortecimento das oscilações de potência é função da característica da carga, dos geradores e seu sistema de controle e, do sistema de transmissão. Pode ocorrer casos em que as oscilações de potência não sejam absorvidas, podendo levar a perda de sincronismo de geradores [17].

Como os compensadores estáticos possuem um sistema de controle com resposta rápida, que podem controlar a tensão em determinado ponto do sistema, é possível com um adequado sistema de controle, melhorar o amortecimento das oscilações de potência do sistema [6] e [8].

CAPÍTULO 3

PRINCIPAIS TIPOS E CARACTERÍSTICAS DE COMPENSADORES ESTÁTICOS

3.1 – INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foi apresentado que, através do controle rápido da tensão da barra na qual está conectado, os compensadores estáticos proporcionam muitos benefícios para os sistemas elétricos de potência, tanto em condições normais de operação como em situações de contingências.

Os compensadores estáticos são capazes de manter a tensão em seus terminais substancialmente constante, por meio do ajuste contínuo da potência reativa que eles absorvem ou fornecem ao

sistema, sendo o valor da potência resultado do controle da corrente de reatores e ou do chaveamento controlado de bancos de capacitores, podendo, com um adequado sistema de controle, variar continuamente a potência desde limites capacitivos a indutivos.

Existem muitos tipos diferentes de compensadores estáticos para o controle de reativos, que podem ser utilizados separadamente ou em combinação, compondo várias configurações de circuitos com o objetivo de fornecer a resposta desejada. No entanto, conforme já afirmado anteriormente e, como o objetivo principal do presente trabalho é a avaliação da degradação dos semicondutores, a abordagem neste capítulo dos tipos dos compensadores estáticos será limitada às principais características dos compensadores estáticos dos tipos reator controlado a tiristor (RCT) e capacitor chaveado a tiristor (CCT). Nos capítulos seguintes será analisado o desempenho operacional e avaliada a degradação dos semicondutores de potência das válvulas dos compensadores estáticos desses dois tipos, pertencentes ao Sistema de Transmissão da Região Nordeste do Brasil, operados pela Chesf - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.

3.2 – COMPENSADORES ESTÁTICO TIPO CAPACITOR CHAVEADO A TIRISTOR

A configuração básica do compensador estático do tipo capacitor chaveado a tiristor (CCT) é mostrada na figura 3.1, que é composta por uma válvula de tiristores bidirecionais em série com o

capacitor. Em série com este conjunto existe um reator, que tem como função amortecer os transitórios de corrente e formar filtro de harmônicos.

O princípio de funcionamento do compensador estático tipo CCT é a inserção ou a retirada de operação de capacitores de forma controlada, minimizando os transitórios de tensão e corrente associados à manobra de capacitores e, resultando na manutenção da tensão nos terminais do compensador em um valor prefixado substancialmente constante.

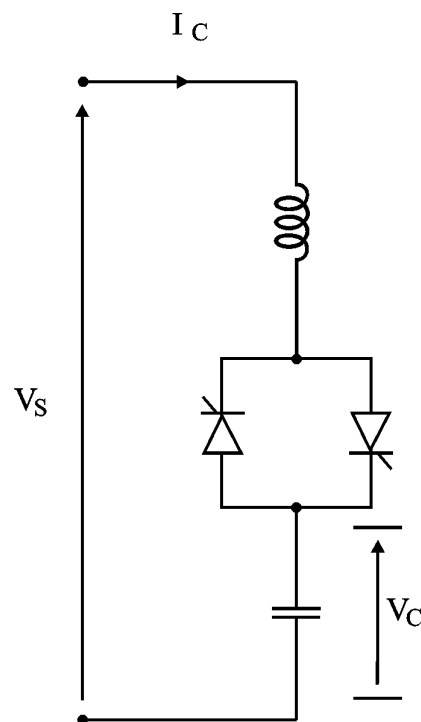


Figura 3.1 – Circuito básico do compensador tipo CCT.

O valor da potência capacitiva que se deseja que o compensador estático forneça ao sistema é atingido através do controle do número de capacitores que são energizados, o que resulta em uma variação da potência por degraus. A combinação de bancos de capacitores de diferentes potências pode proporcionar variações de pequenos degraus de potência, de modo que o controle de tensão da barra seja feito, mitigando os transitórios associados aos chaveamentos dos capacitores.

Na energização inicial do capacitor, o maior transitório de corrente irá ocorrer caso o tiristor seja disparado no máximo da tensão do sistema, sendo esta corrente limitada pelo reator série do compensador. A corrente no capacitor é mantida pelo disparo dos tiristores a cada meio ciclo. Quando a corrente no capacitor atinge o seu zero natural, o tiristor cessa seu estado de condução e a corrente nesse ramo é interrompida, sendo então disparado o tiristor antiparalelo, para manutenção da corrente através do capacitor e continuidade da potência fornecida.

Caso se deseje a interrupção no suprimento de potência pelo compensador, quando da passagem da corrente por seu zero, não haverá mais disparo dos tiristores, o suprimento de potência pelo compensador é então interrompido.

Com a interrupção da corrente no capacitor, durante sua passagem pelo zero natural, a tensão mantida nos terminais do capacitor é igual à tensão de pico do sistema. Caso o tiristor seja novamente disparado quando não houver diferença de potencial

através de seus terminais anodo e catodo, ou seja, quando a tensão do sistema passar novamente pelo seu valor máximo de mesma polaridade da tensão mantida no capacitor, o compensador voltará a fornecer potência ao sistema sem causar os transitórios de energização do banco de capacitor, em consequência do chaveamento controlado.

A figura 3.2 mostra o comportamento da corrente e da tensão no capacitor, quando do chaveamento dos tiristores, onde I_C é a corrente no capacitor e V_S e V_C são respectivamente as tensões do sistema e do capacitor.

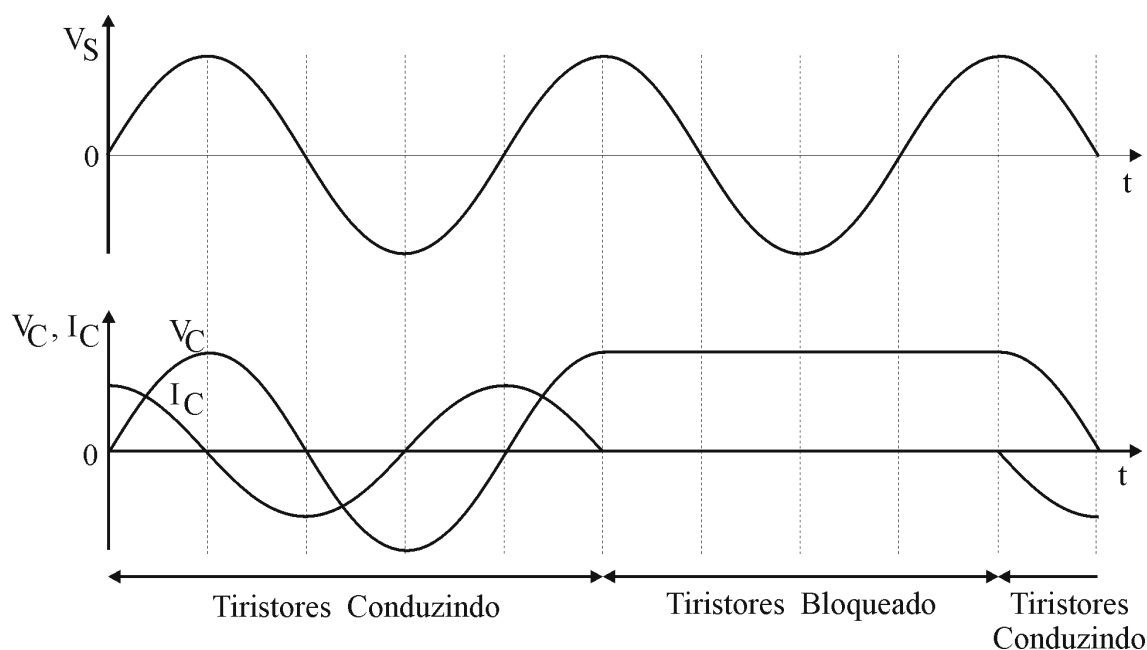


Figura 3.2 – Chaveamento controlado do capacitor.

Em um sistema trifásico, os componentes do compensador podem ser arrançados em conexões em estrela ou em delta, podendo a potência total do compensador ser determinada pelo número de estrelas ou deltas em paralelo.

O que determina o número de capacitores em paralelo em cada arranjo é a máxima corrente suportável pela válvula de tiristores. A tensão da válvula determina o número de tiristores que devem ser postos em série para suportar a tensão do sistema. Na prática, o projetista do compensador limita a tensão da válvula por critérios econômicos, sendo a tensão otimizada por um transformador abaixador que interliga o compensador ao sistema.

Os capacitores de potência são fabricados com dispositivos de descargas, que têm a função de reduzir a tensão entre os terminais do capacitor, quando eles forem desenergizados. O arranjo mostrado na figura 3.3 mantém a tensão do capacitor igual ao valor de pico da tensão do sistema. Neste arranjo, um dos ramos da válvula de tiristores foi substituído por diodos, sendo o disparo da válvula feito por tiristores no sentido antiparalelo.

Este arranjo apresenta a vantagem de ter uma válvula e sistema de controle mais simples, considerando que o sistema de disparo, assim como os próprios tiristores só existe para um sentido da corrente.

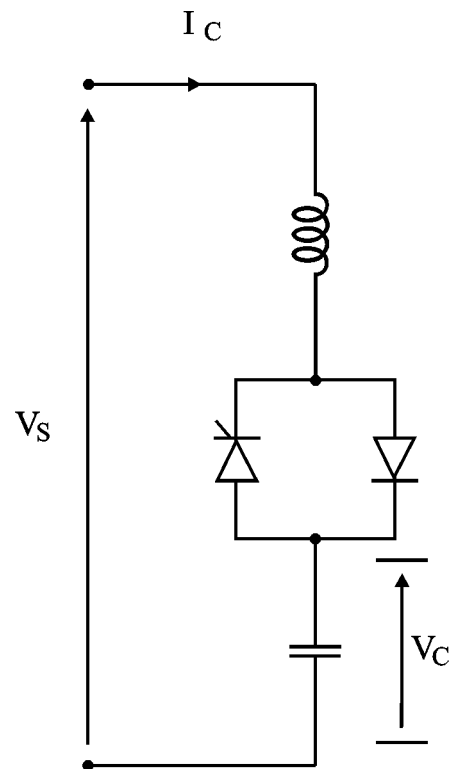


Figura 3.3 – Compensador CCT com um dos ramos paralelos com diodos.

Para que o tempo de resposta do compensador seja mais rápido, este pode ter válvulas de tiristores em paralelo montadas com a direção dos tiristores em sentidos opostos, de modo que os capacitores de cada válvula sejam carregados com tensões de polaridades opostas. A combinação de capacitores carregados com polaridade oposta, permite reduzir o tempo necessário para que o compensador tenha suas válvulas inseridas ou retiradas de operação, melhorando sua resposta às necessidades do sistema elétrico.

Como o chaveamento da corrente em cada ramo da válvula de tiristores ocorre a cada semiciclo completo, os compensadores estáticos do tipo CCT não são fonte de harmônicos. No entanto, o

conjunto série formado pelo reator limitador e o banco de capacitores pode ser sintonizado para servir de filtro de harmônicos existentes no sistema.

3.3 – COMPENSADORES ESTÁTICOS TIPO REATOR CONTROLADO A TIRISTOR

O circuito elétrico básico do compensador estático do tipo reator controlado a tiristor (RCT), consiste de um reator em série com um par de tiristores conectados em paralelo em sentido opostos, conforme exemplifica a figura 3.4.

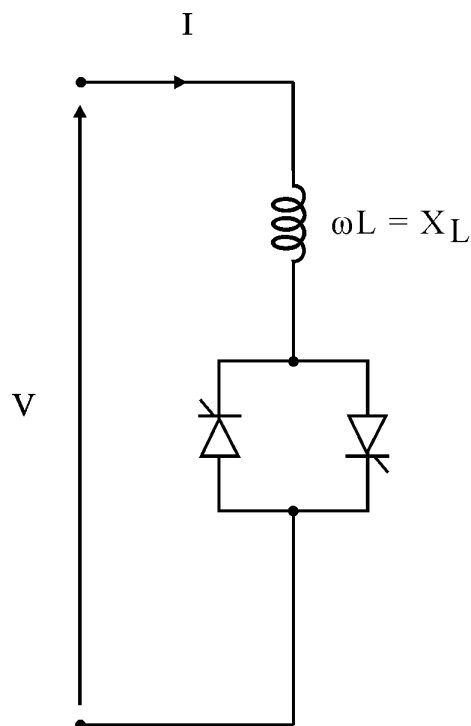


Figura 3.4 – Circuito básico do compensador tipo RCT.

O princípio de operação do compensador do tipo RCT está no controle da condução alternadamente dos tiristores a cada meio ciclo da tensão do sistema. Através da mudança do ângulo de disparo dos tiristores, se obtém uma reatância equivalente do reator série continuamente variável. O ângulo de disparo, em relação à passagem pelo zero da tensão do sistema, pode variar de 90 a 180 graus.

Se os tiristores são disparados a 90^0 da tensão do sistema, ou seja no valor máximo da tensão, a corrente que passa no conjunto tem a mesma forma de onda e amplitude da corrente que haveria caso não existisse a válvula de tiristores, sendo neste caso, a corrente senoidal e defasada de 90^0 em relação à tensão do sistema.

Quando o ângulo de disparo dos tiristores é maior que 90^0 e menor que 180^0 , ocorre uma condução parcial da corrente, reduzindo a componente fundamental da corrente e o seu valor eficaz, o que é equivalente ao aumento da indutância do reator e uma redução da potência reativa fornecida pelo compensador estático.

Considerando α o ângulo de condução dos tiristores, a figura 3.5 mostra as formas de ondas para $\alpha = 90^0$, 120^0 e 150^0 . Os graus elétricos que a corrente permanece conduzindo em cada meio ciclo é representado por σ .

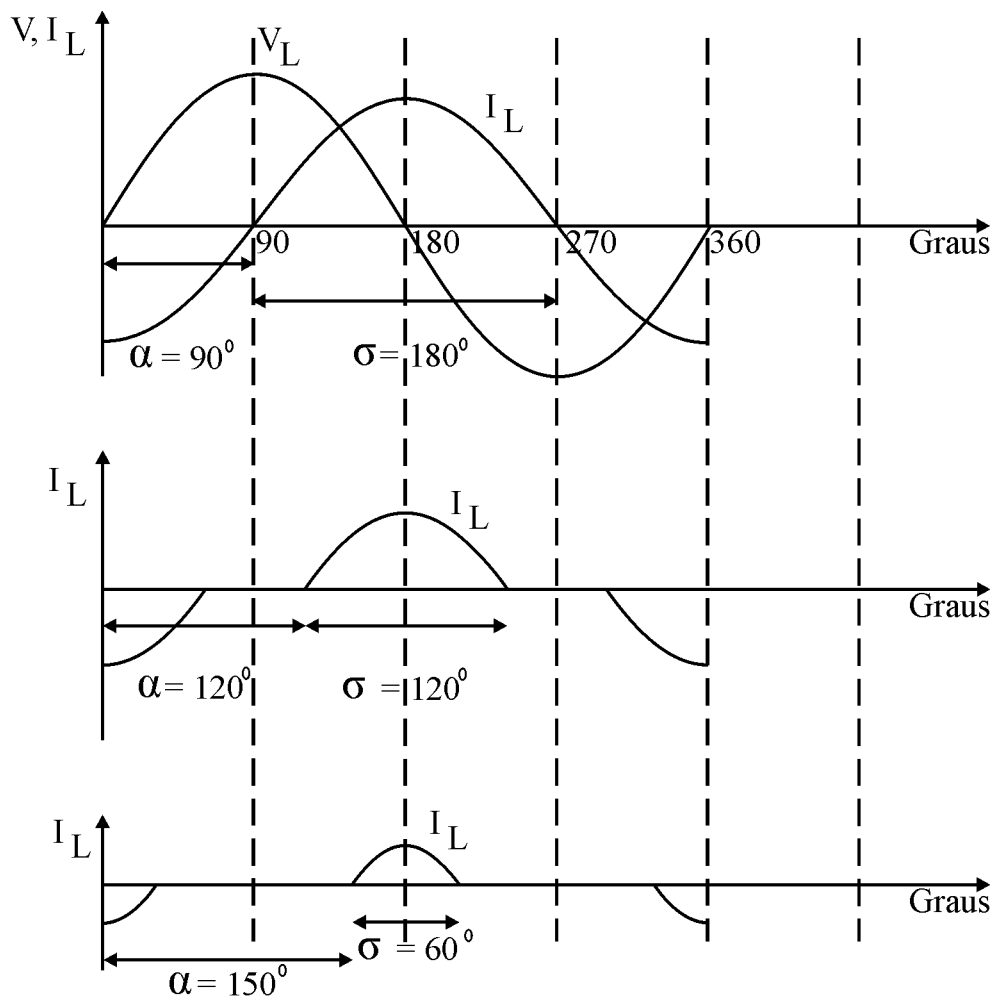


Figura 3.5 – Forma de onda da corrente do compensador tipo RCT.

Considerando X_L a reatância nominal do reator em série com a válvula de tiristores, com indutância L . Para uma tensão do sistema, representada pela equação 3.1, em módulo igual a V , com frequência angular $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência industrial do sistema, o valor instantâneo da corrente no reator, em função do ângulo de condução é obtido pelas equações 3.2 e 3.3 [11].

$$v(t) = \sqrt{2} V \text{ sen } \omega t \quad (3.1)$$

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad \text{para } \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \quad (3.2)$$

$$i(t) = 0 \quad \text{para } \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \quad (3.3)$$

O valor eficaz da componente fundamental da corrente no reator é pela equação 3.4 [11].

$$I_1 = \frac{\sigma - \text{sen}\sigma}{\pi X_L} V \quad (3.4)$$

Mas sendo $\alpha + \sigma/2 = \pi$, a equação 3.4 pode ser reescrita em função do ângulo de condução dos tiristores, conforme equação 3.5.

$$I_1 = \frac{2(\pi - \alpha) - \text{sen}(2\pi - 2\alpha)V}{\pi X_L} \quad (3.7)$$

$$I_1 = \frac{2(\pi - \alpha) + \text{sen}(2\alpha)V}{\pi X_L} \quad (3.6)$$

O valor eficaz da componente fundamental da corrente no reator está relacionado com o valor da susceptância variável do reator, que é função do ângulo de disparo dos tiristores, conforme equação 3.7.

$$I_1 = B_L(\alpha) \cdot V \quad (3.7)$$

A partir das equações 3.6 e 3.7, pode-se obter o valor da susceptância equivalente variável do reator em função do ângulo de condução dos tiristores, conforme equação 3.8.

$$B_L(\alpha) = \frac{2(\pi - \alpha) + \text{sen}2\alpha}{\pi X_L} \quad (3.8)$$

A susceptância controlada do compensador permite que haja uma variação contínua da potência reativa, podendo o compensador manter a tensão no barramento no qual está conectado, dentro de limites pré-estabelecidos em seu sistema de controle.

Para que o compensador opere continuamente desde limites capacitivos a indutivos, bancos de capacitores podem ser postos em paralelos com o reator controlado a tiristores, conforme ilustra a figura 3.6.

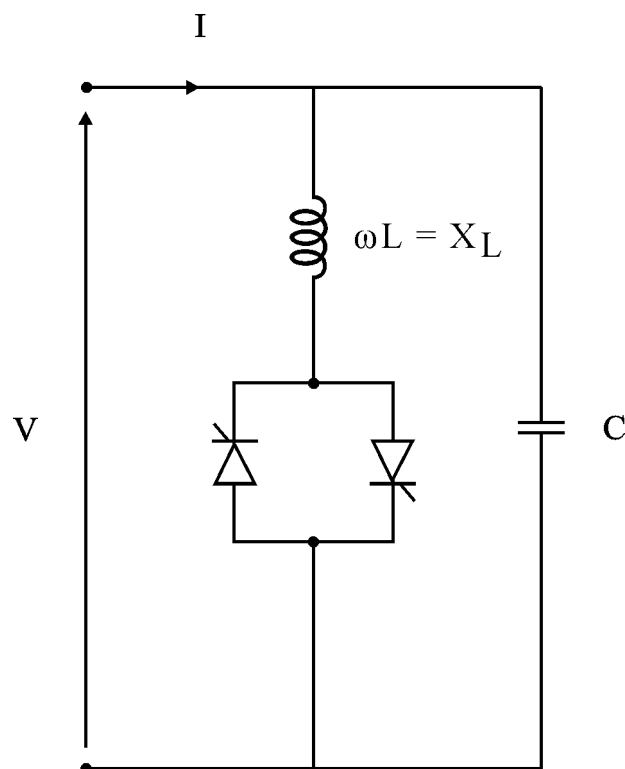


Figura 3.6 – Compensador do tipo RCT com banco de capacitores.

Para um conjunto formado por reatores controlados a tiristores e banco de capacitores fixos, desejando-se que o compensador excursione sua potência desde valores capacitivos a valores indutivos, o reator tem que ser dimensionado de modo a compensar toda potência do banco de capacitores e, a partir de determinado ângulo de condução dos tiristores, a corrente total do compensador tenha características indutivas, atingindo essa corrente o seu valor máximo indutivo, quando o ângulo de disparo dos tiristores, em relação à tensão do sistema, for próximo de 90° . A medida que o ângulo de disparo aumenta, a corrente total do compensador, com características indutivas diminui, passando por um valor nulo, quando as potências do banco de capacitores e reator forem iguais. Continuando aumentando o ângulo de disparo, a

corrente total do compensador assume características capacitivas, atingindo o seu valor máximo quando o ângulo de disparo dos tiristores for próximo de 180° .

A figura 3.7 mostra o gráfico tensão versus corrente, que representa o comportamento do compensador para determinada tensão de referência pré-fixada no sistema de controle. Dentro da faixa de controle, limitada pelos nominais capacitivos e indutivos do compensador, o sistema de controle tenta manter a tensão do barramento o mais próximo possível da tensão de referência.

Quando a tensão do barramento diminui, o sistema de controle permite que a corrente capacitiva do compensador aumente. A corrente capacitiva aumentará até que seja atingido o seu valor máximo, a partir do qual o compensador não mais conseguirá manter a tensão do barramento próximo ao valor da tensão de referência, não podendo mais o compensador contribuir para a regulação da tensão.

No sentido oposto, caso a tensão do barramento tenda a subir acima do valor de referência, a corrente indutiva do compensador tenderá aumentar, com o objetivo de manter a tensão próxima do valor de referência. Caso o sistema force no sentido de que a tensão do barramento continue aumentando e o limite da corrente indutiva do compensador seja atingido, o compensador não terá mais capacidade de regular a tensão do barramento, comportando-se como um reator fixo. Após esse limite atingido, o compensador pode ser

retirado de operação pela atuação de proteções tipo sobrecarga da válvula ou de sobretensão.

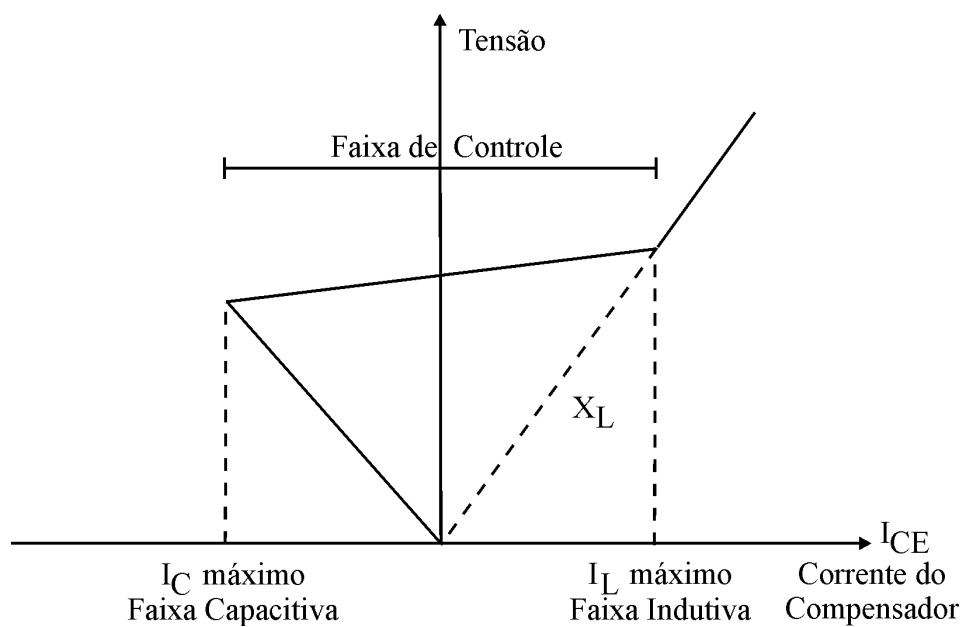


Figura 3.7 – Característica de saída do compensador tipo RCT com capacitor em paralelo.

A condição dos compensadores do tipo RCT conduzirem parcialmente a corrente nos reatores, quando os tiristores são disparados com ângulos maiores que 90° , faz com que esses dispositivos sejam fontes geradoras de harmônicos.

Com o objetivo de mitigar a injeção no sistema dos harmônicos gerados no compensador, os equipamentos do compensador são conectados, formando um arranjo de forma a cancelar os harmônicos gerados.

Para eliminar os harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos, a válvula de tiristores e o reator são conectados em delta.

Os harmônicos de quinta e sétima ordem podem ser eliminados, utilizando filtros ou através da disponibilização de dois enrolamentos secundários do transformador abaixador, sendo um conectado em estrela não aterrada e o outro em delta. A cada secundário do transformador são conectados bancos de capacitores e reatores controlados a tiristores. Essa configuração produz uma defasagem de 30° , que elimina o quinto e o sétimo harmônico a nível do lado do enrolamento primário do transformador. Essa configuração do compensador é conhecida como arranjo em 12 pulsos, pois a cada período da tensão do sistema, 12 conjuntos de tiristores são disparados.

3.4 – COMPENSADORES ESTÁTICOS DOS TIPOS RCT E CCT QUE FIZERAM PARTE DAS PESQUISAS

Os compensadores estáticos dos tipos RCT e CCT respectivamente instalados nas subestações de Fortaleza e de Mossoró, parte integrante do Sistema de Transmissão da Chesf, e componentes da rede básica do sistema de transmissão brasileiro, foram os equipamentos em que foram desenvolvidas as pesquisas para a avaliação da degradação dos semicondutores, cujos resultados serão apresentados nos capítulos seguintes. As configurações destes compensadores são apresentadas através dos diagramas unifilares das figuras 3.8 e 3.9.

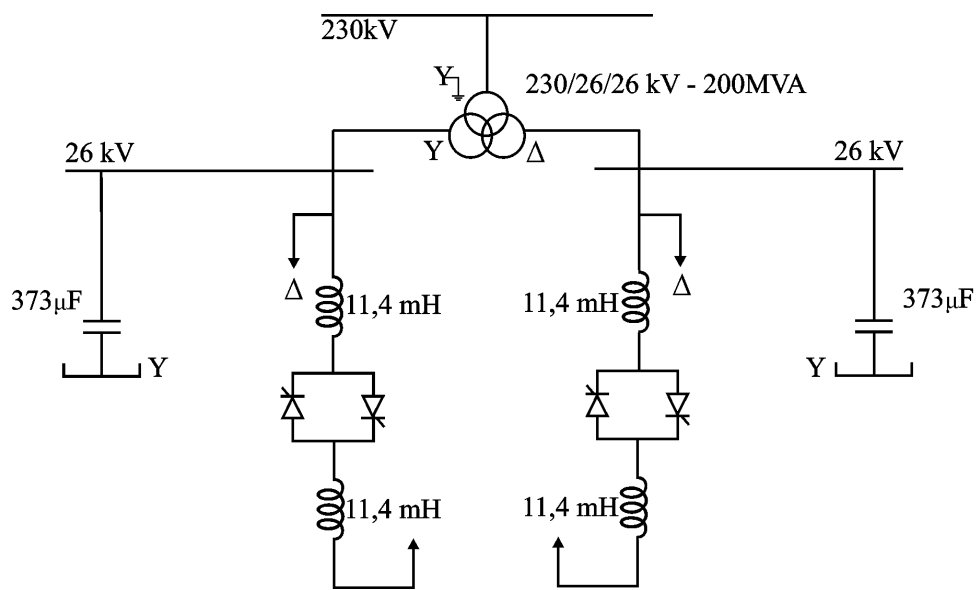


Figura 3.8 – Compensador Estático do tipo RCT da Subestação de Fortaleza.

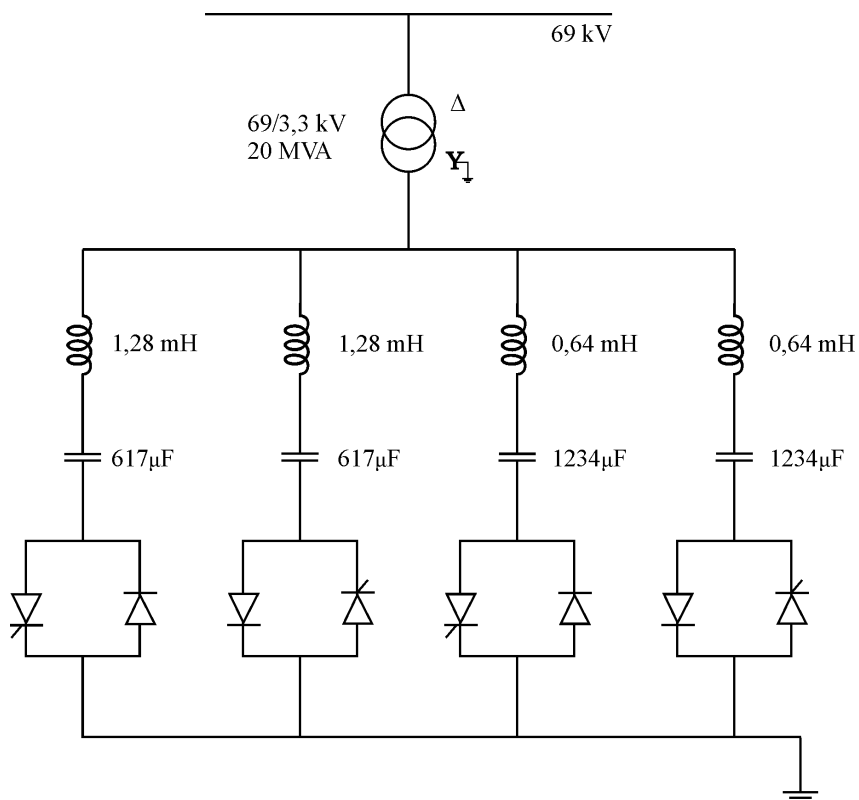


Figura 3.9 – Compensador Estático do tipo CCT da Subestação de Mossoró.

3.4.1 - Compensador Estático da Subestação de Fortaleza

O compensador da subestação de Fortaleza é formado por dois reatores controlados a tiristores e dois bancos de capacitores fixos, interligados à barra de 230 kV da subestação através de um transformador, com dois enrolamentos secundários, sendo um conectado em estrela e o outro em delta, podendo o conjunto operar com seis ou doze pulsos. Com sistema de doze pulsos, o compensador é capaz de variar continuamente sua potência de saída desde 140 MVar indutivos a 200 MVar capacitivos.

O sistema de controle é puramente analógico, com características não adaptativas, tendo o sistema, em malha fechada, um único valor de ganho que é utilizado em todas as condições do sistema elétrico.

As válvulas de tiristores do compensador estático de Fortaleza estão trifasicamente conectadas em delta na tensão de 26 kV, sendo do tipo ETT (Electrically Triggered Thyristor), havendo necessidade de aplicação de um sinal de corrente nos gatilhos dos tiristores para que os mesmos conduzam. O controle e geração de pulsos óticos para o disparo dos tiristores é feito pela eletrônica de base, sendo os pulsos transmitidos para as válvulas de tiristores através de fibras óticas. Nos módulos de tiristores, a eletrônica de tiristores transforma os sinais óticos em sinais elétricos que efetuam o disparo dos tiristores.

O sistema da eletrônica de tiristores utiliza a tensão nos próprios tiristores, mantida pelos capacitores do circuito de amortecimento (Snubber), para o disparo dos tiristores. Também na eletrônica de tiristores está o sistema de disparo protetivo (BOD – Break Over Diode) que efetua o disparo dos tiristores caso a tensão entre seus terminais (anodo – catodo) ultrapasse o valor limite definido no projeto do tiristor, evitando sua danificação.

Como o sistema de disparo utiliza a tensão aplicada nos tiristores como energia para os disparos, a faixa dos ângulos de disparo dos tiristores não pode ser inferior a $92,5^{\circ}$, de modo a manter uma margem de segurança para efetuar o disparo dos tiristores.

O circuito de amortecimento existente em cada nível de tiristores, é formado por um capacitor de $4\mu\text{F}$, 2800 V, em série com três resistores de 18Ω , refrigerados a água deionizada, a mesma que refrigera os tiristores.

A válvula de tiristores de cada lado do compensador (Y ou delta) tem as três fases ligadas em delta, sendo cada fase composta por dois módulos de tiristores e entre cada módulo existe um reator de núcleo de ar, que tem como finalidade limitar o crescimento da corrente na válvula, quando do disparo dos tiristores. Cada fase da válvula está em série com o enrolamento do reator de potência.

Os módulos de tiristores são compostos por oito níveis de tiristores, sendo cada nível formado por dois tiristores em paralelo e dois antiparalelos. Cada ramo da válvula funciona com um nível de

tiristores em redundância, ou seja, o compensador permanece em operação com um nível de tiristores falhado. Caso um segundo nível vem a falhar, o compensador é desligado automaticamente.

A figura 3.10 mostra a configuração de dois módulos de tiristores que compõem uma fase da válvula do compensador estático da subestação de Fortaleza.

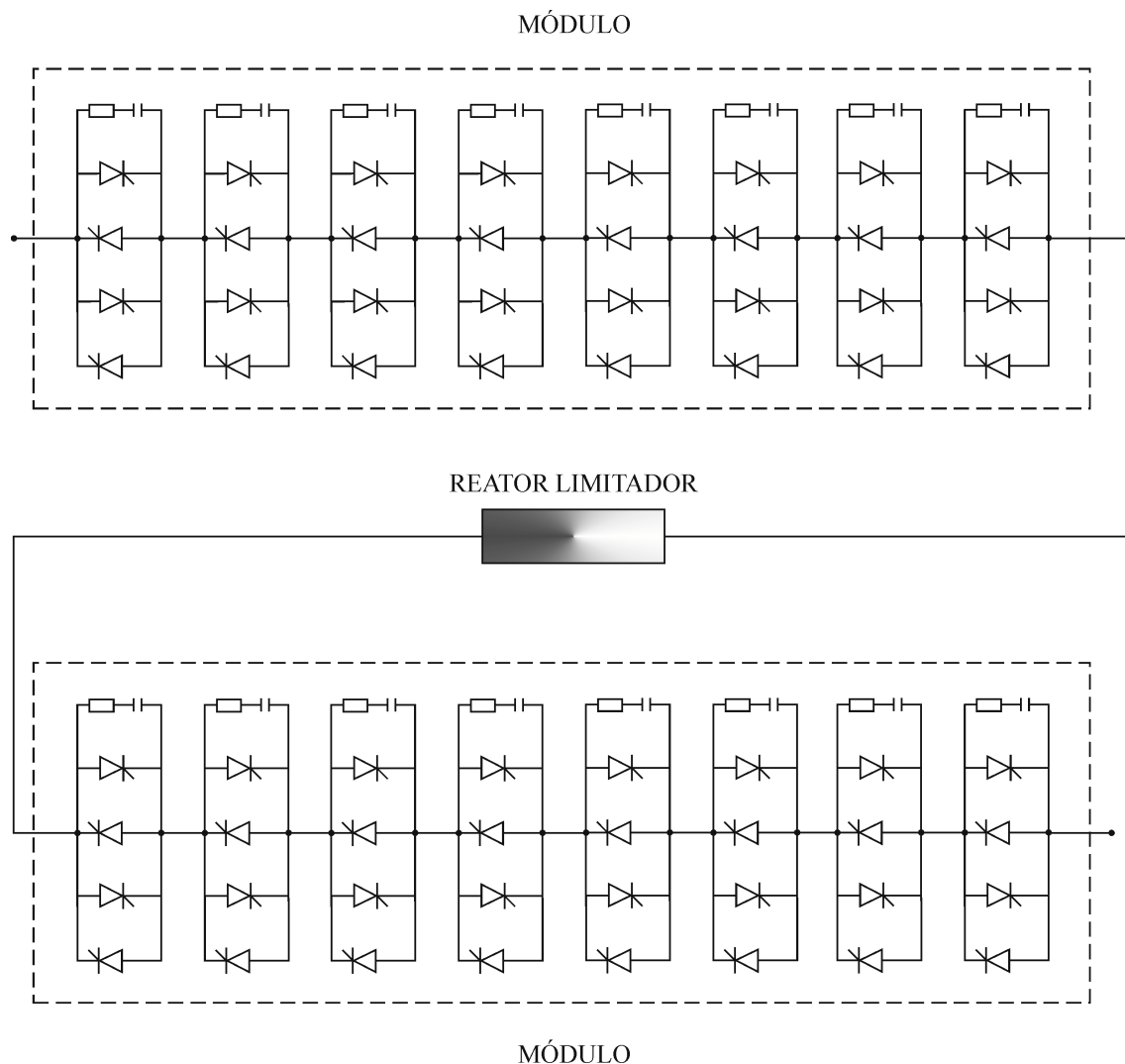


Figura 3.10 – Diagrama da válvula de tiristores do compensador estático do tipo RCT que fez parte das pesquisas.

A válvula de tiristores do compensador estático da subestação de Fortaleza é composta por 12 módulos de tiristores, totalizando em 384 tiristores, todos do tipo BstT68H280S15. Os principais dados técnicos dos tiristores constam na Tabela 1, do Anexo. A figura 3.11 mostra um módulo da válvula da subestação de Fortaleza, com os tiristores em primeiro plano.



Figura 3.11 – Módulo de tiristores da válvula do CE da subestação de Fortaleza.

Devido às diferenças construtivas de cada tiristor, e para que haja balanceamento da corrente em cada par de tiristores em paralelo, o par deve ser formado por tiristores que tenham a mesma característica estática, ou seja tenham a mesma faixa de tensão de condução, para uma mesma corrente de gatilho. De acordo com o fabricante do tiristor do compensador estático de Fortaleza, se a

diferença de tensão entre as características estáticas dos tiristores em paralelo for menor que 0,1 V, passando 2000 A pelos tiristores, é assegurado que a diferença na distribuição de corrente é menor que 25%, quando esses tiristores são postos para operar em paralelo.

O compensador dispõe do recurso de poder ser energizado na condição de teste. Nessa condição, cada ramal formado pelos lados Y ou delta pode ter sua válvula de tiristores energizada com a tensão nominal do sistema, com o respectivo banco de capacitores isolado. Esse recurso permite que a suportabilidade de bloqueio dos tiristores seja testada, sem que haja troca de potência reativa entre o compensador e o sistema.

Os tiristores são resfriados por um sistema de circulação forçada de água deionizada em circuito fechado. A água depois de circular por trocadores de calor, posicionados em série alternadamente com os tiristores, é resfriada por dois radiadores, cada um com quatro ventiladores, com capacidade de dissipação máxima de 486 kW.

3.4.2 – Compensador Estático da Subestação de Mossoró

O compensador estático da subestação de Mossoró está conectado ao barramento de 69 kV dessa subestação, sendo formado por um transformador abaixador com ligação delta / estrela aterrada (69/3,3 kV), quatro bancos de capacitores controlados a tiristores, sendo dois de 6,67 MVar e dois de 3,33 MVar, que totalizam 20

MVAr. Por meio da combinação dos quatro bancos, o sistema de controle do compensador permite que a potência seja variada de 0 a 20 MVAr em degraus de 3,33 MVAr.

Cada banco de capacitores está trifasicamente conectado em estrela aterrada e, em série com os capacitores existem reatores de núcleo de ar que sintonizam o conjunto na frequência de 180 Hz.

As válvulas de tiristores, associadas aos bancos de capacitores de 6,67 MVAr, são formadas, em cada uma das três fases, por uma pilha de quatro tiristores em série do tipo FT1000BV-70, tendo no sentido antiparalelo uma pilha formada por cinco diodos do tipo FD1000A-56. Por sua vez, as válvulas associadas aos bancos de 3,33 MVAr, cada fase é formada por uma pilha de quatro tiristores do tipo FT500AH-70, e no sentido antiparalelo quatro diodos do tipo FD500EV-70 conectados em série. As características dos semicondutores estão relacionadas nas tabelas 2, 3, 4 e 5 do anexo.

A figura 3.12 mostra o diagrama de conexão de uma fase da válvula de tiristores associada ao banco de capacitores de 3,33 MVAr. O circuito de amortecimento em paralelo com cada semicondutor é formado por uma resistência de 30Ω em série com um capacitor de $0,5 \mu\text{F}$.

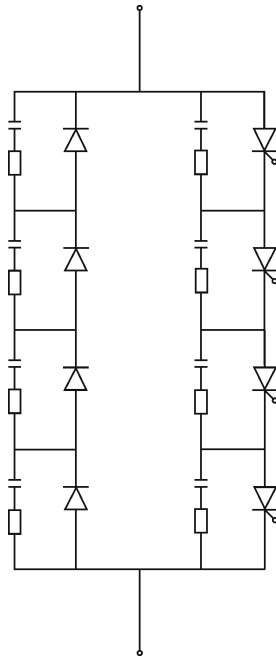


Figura 3.12 – Diagrama da válvula do CE tipo CCT da subestação de Mossoró.

A figura 3.13 mostra uma fase da válvula associada ao banco de capacitores de 3,33 MVAR do CE da subestação de Mossoró. O circuito de amortecimento aparece no lado direito da figura, os semicondutores ao centro e as tubulações de resfriamento no lado esquerdo.



Figura 3.13- Válvula do CE da subestação de Mossoró.

A energia e sincronismo para o disparo dos tiristores é transferida do sistema de controle para as válvulas através de transformadores de pulso. Um sistema de supervisão de tensão em cada tiristor ou diodo informa o estado do componente ao sistema de controle de falha dos semicondutores, sendo o sinal de tensão detectado transmitido para o controle via cabos de fibra ótica.

O calor produzido em cada semicondutor é transferido para trocadores de calor posicionados de forma que cada semicondutor fique entre dois trocadores de calor. Uma motobomba faz com que óleo isolante mineral circule no interior dos trocadores de calor, removendo a energia térmica, transferida pelos semicondutores. O resfriamento do óleo isolante é feito em dois radiadores ventilados cada um por dois ventiladores, que dá ao conjunto total uma capacidade de resfriar 70,8 kW.

CAPÍTULO 4

INDICADORES DE DESEMPENHO

4.1 – INTRODUÇÃO

A atual legislação do setor elétrico brasileiro estabelece a disponibilidade operacional, como indicador para a remuneração dos ativos das empresas concessionárias de transmissão de energia. O grande desafio das empresas é disponibilizar essas ativos de forma confiável e otimizada, buscando meios que minimizem a probabilidade de ocorrerem falhas que causariam transtornos operacionais e, que resultariam em penalizações pela indisponibilidade desses equipamentos, ou prejuízos para a qualidade da energia fornecida.

Neste capítulo é apresentado um resumo sobre os conceitos de confiabilidade e taxa de falha e, também serão apresentados os resultados das disponibilidades operacionais de cada compensador estático, instalado no sistema de transmissão da Chesf. Na última parte do capítulo, são apresentadas as taxas de falhas dos semicondutores das válvulas dos compensadores estáticos, em que foram desenvolvidas as pesquisas para avaliação da degradação dos semicondutores.

4.2 – CONFIABILIDADE E TAXA DE FALHA

4.2.1 – Conceito de Confiabilidade

A confiabilidade de um equipamento ou de um componente, é a capacidade de este elemento sob observação, desempenhar uma função especificada, nos limites pré-estabelecidos, por um período determinado. Assim, a confiabilidade é dependente do tempo, das condições de uso (operação e manutenção), ambiente e do local onde o equipamento está operando.

A função básica da confiabilidade pode ser expressa pela equação 4.1, onde $F(t)$ é a função de distribuição acumulada de falhas, ou seja, é a probabilidade de que um elemento sob observação falhe num instante qualquer de tempo t , e $R(t)$, função confiabilidade, é a probabilidade de se encontrar um elemento em funcionamento até o instante t [13].

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (4.1)$$

Sendo $f(t)$ a função densidade de probabilidade de falha, que pode ser interpretada como a frequência relativa da ocorrência de falha por unidade de tempo, uma vez conhecida essa função densidade de falha, a função distribuição acumulada de falha pode ser expressa pela equação 4.2 a seguir:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (4.2)$$

Substituindo a equação 4.2 na equação 4.1, a função confiabilidade $R(t)$ pode ser expressa pela equação 4.3 a seguir:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (4.3)$$

4.2.2 – Taxa de Falhas

A falha ocorre quando um equipamento ou componente deixa de desempenhar a função para qual foi especificado. Para o caso de unidades não reparáveis (por exemplo semicondutores, lâmpadas) na ocorrência de falha, a unidade, necessariamente, tem que ser substituída. Por essa razão, nos estudos de confiabilidade, os componentes não reparáveis só podem ser encontrados em dois

estados distintos e excludentes, em funcionamento ou avariado, só podendo passar do primeiro para o segundo estado.

Sendo N_0 a quantidade inicial de componentes a serem observados, $N_S(t)$ a quantidade de componentes em funcionamento no instante t e, $N_F(t)$ a quantidade de componentes falhados no instante t . Em cada instante a soma de $N_S(t)$ mais de $N_F(t)$ é igual à quantidade inicial N_0 , conforme equação 4.4 a seguir:

$$N_S(t) + N_F(t) = N_0 \quad (4.4)$$

A taxa de falha instantânea ou função mortalidade, $\lambda(t)$ é definida como sendo em cada instante, igual à variação instantânea do número de falhas por componentes ainda sobreviventes naquele instante. A partir da equação 4.4, a taxa instantânea de falha pode ser expressa por:

$$\lambda(t) = \frac{dN_F(t)}{dt} \cdot \frac{1}{N_S(t)} \quad (4.5)$$

Para esses componentes sob observação, e, sendo a função confiabilidade $R(t)$, a probabilidade de se encontrar um elemento em funcionamento até o instante t , a partir da equação 4.4, a função $R(t)$ pode ser expressa pela equação 4.6.

$$R(t) = \frac{N_S(t)}{N_0} \quad (4.6)$$

A partir das equações 4.4 e 4.6 se obtém:

$$\frac{dN_S(t)}{dt} = - \frac{dN_F(t)}{dt} \quad (4.7)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN_S(t)}{dt} \quad (4.8)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = - \frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN_F(t)}{dt} \quad (4.9)$$

A partir das equações 4.5 e 4.9 se obtém:

$$\frac{dR(t)}{dt} = - \frac{N_S(t)}{N_0} \cdot \lambda(t) \quad (4.10)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = - R(t) \cdot \lambda(t) \quad (4.11)$$

$$\frac{1}{R(t)} \cdot dR(t) = - \lambda(t) \cdot dt \quad (4.12)$$

Integrando a equação 4.12, obtém-se a confiabilidade do componente em função de sua taxa de falha:

$$\int_1^{R(t)} \frac{1}{R(t)} \cdot dR(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt \quad (4.13)$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt} \quad (4.14)$$

A equação 4.14 mostra a confiabilidade de um componente em função do tempo e da taxa instantânea de falhas (que também é função do tempo). Para o caso particular de taxa de falhas constante, a equação 4.14 é simplificada conforme a equação 4.15 a seguir:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4.15)$$

No caso da taxa de falhas ser constante, a função confiabilidade tem uma distribuição exponencial, com a probabilidade do componente não falhar, diminuindo com o tempo. Na prática, apenas em parte da vida útil dos componentes a taxa de falhas é constante. Em muitos componentes, especialmente em componentes eletrônicos, a evolução temporal da taxa de falhas assume a forma da curva em banheira, conforme figura 4.1, na qual se distinguem três regiões distintas [12]:

- Região de mortalidade infantil
- Região de uso normal
- Região de envelhecimento

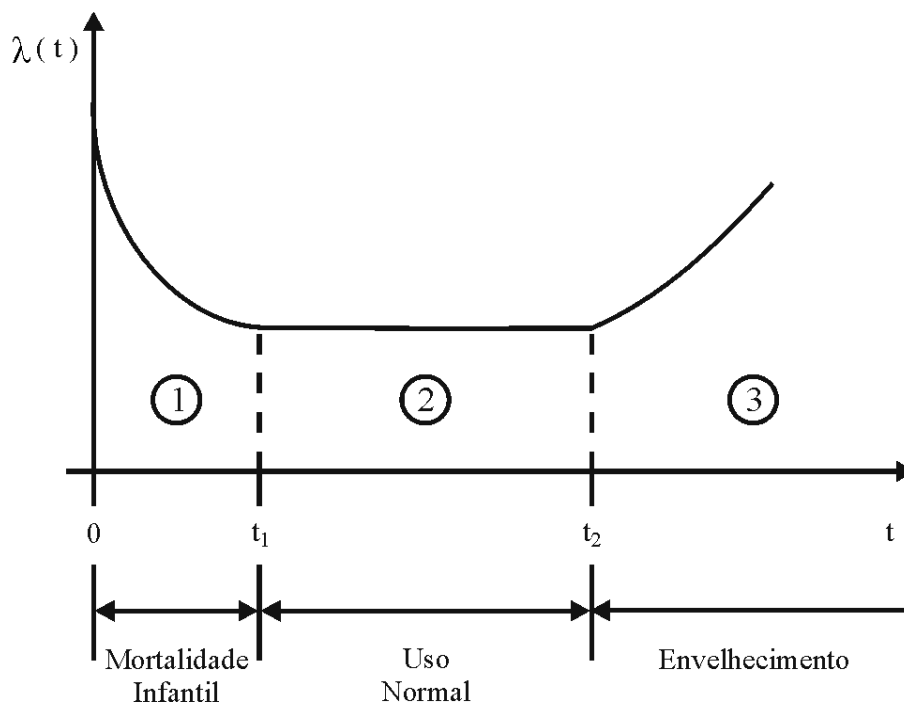


Figura 4.1 – Curva temporal da taxa de falhas – Curva em banheira.

A região 1 da curva temporal da taxa de falhas, designada por região de mortalidade infantil, é caracterizada por taxas, relativamente altas no início da curva, que decresce com tempo, tendendo a valores mais baixos e constantes. As falhas prematuras dos componentes nessa fase de operação, podem ser atribuídas a deficiências de materiais, fabricação, montagem ou ainda devido a problemas ocorridos durante o transporte.

A região 2, designada por região de uso normal, abrange normalmente a maior parte da vida útil do componente, a taxa de falhas é mantida aproximadamente constante. Nessa região, conforme equação 4.15, a confiabilidade do componente é governada

por uma distribuição exponencial e, as falhas ocorrem de forma aleatória. No entanto, a previsão da confiabilidade de um equipamento com base em valores de taxas de falhas que correspondam a fase da região 2, não é válida, por se obter valores bastantes otimistas, especialmente se os componentes estiverem operando no período correspondente à região 3.

A região 3, designa o período de falhas causadas pelo envelhecimento e desgaste, é caracterizada pelo crescimento rápido da taxa de falhas do componente, podendo representar a sua obsolescência. No caso de componentes não reparáveis, conhecido o início da fase de envelhecimento, deve ser feita uma análise técnico-econômica, que subsidie a tomada de decisão de se continuar operando o componente, com a confiabilidade operacional comprometida, ou de se proceder a sua substituição, de modo que o sistema retorne a operar em sua fase de vida útil.

4.3 - TAXA DE FALHA DOS SEMICONDUCTORES APLICADOS EM COMPENSADORES ESTÁTICOS

A análise de desempenho das válvulas de tiristores, focada nas taxas de falhas dos semicondutores, apresentada no presente capítulo, será restrita aos dois dos compensadores estáticos da Chesf, instalados nas subestações de Fortaleza e Mossoró, cujas características principais foram descritas no capítulo anterior e, que

serão objeto da pesquisa para avaliação da degradação dos semicondutores, que será apresentada nos capítulos seguintes.

Para a taxa de falhas dos semicondutores que formam as válvulas de tiristores dos compensadores estáticos, a Chesf utiliza a metodologia de cálculo de taxas de falhas anuais, obtidas pela relação entre o somatório do número das falhas ocorridas no período total, pelo produto de unidades anos em operação, conforme mostra a fórmula 4.16.

$$\text{Taxa de Falhas} = \frac{\sum \text{número de falhas}}{\sum \text{unidades anos}} \times 100 \quad (4.16)$$

De acordo com o Grupo de Trabalho 14.01, Força Tarefa 2, referência [19], os estresses nas válvulas de tiristores de compensadores são fortemente influenciados pela natureza do projeto do compensador, pela filosofia de proteção de seus componentes e pelas ocorrências de perturbações no sistema de potência do qual o compensador faz parte.

A experiência operacional da Chesf coincide com as conclusões apresentadas no artigo do Cigré, considerando que as falhas dos semicondutores, em sua maioria, são provocadas por estresses de tensão e corrente. Essa constatação fica evidente quando se compara os valores das taxas de falhas dos semicondutores dos dois compensadores estáticos, ambos instalados em sistemas com características radiais, com concentração de carga em sua barra de conexão, mas de diferentes tecnologias, sendo um do tipo RCT, de

grande porte e com melhores recursos de proteção da válvula de tiristores e, o outro do tipo CCT, de menor porte e tecnologicamente menos favorecido.

O gráfico da figura 4.2, mostra a taxa de falha dos tiristores do compensador estático da subestação de Fortaleza. Esse compensador, que foi o primeiro compensador estático de grande porte a entrar em operação no Brasil, apresenta 0,44% como o valor máximo da taxa de falha dos tiristores. Nos últimos anos, a taxa de falhas tem se mantido aproximadamente constante, entorno de 0,14%, permitindo fazer uma analogia com a curva em banheira, e concluir que o equipamento encontra-se em sua fase de uso normal, já tendo passado por sua fase de mortalidade infantil.

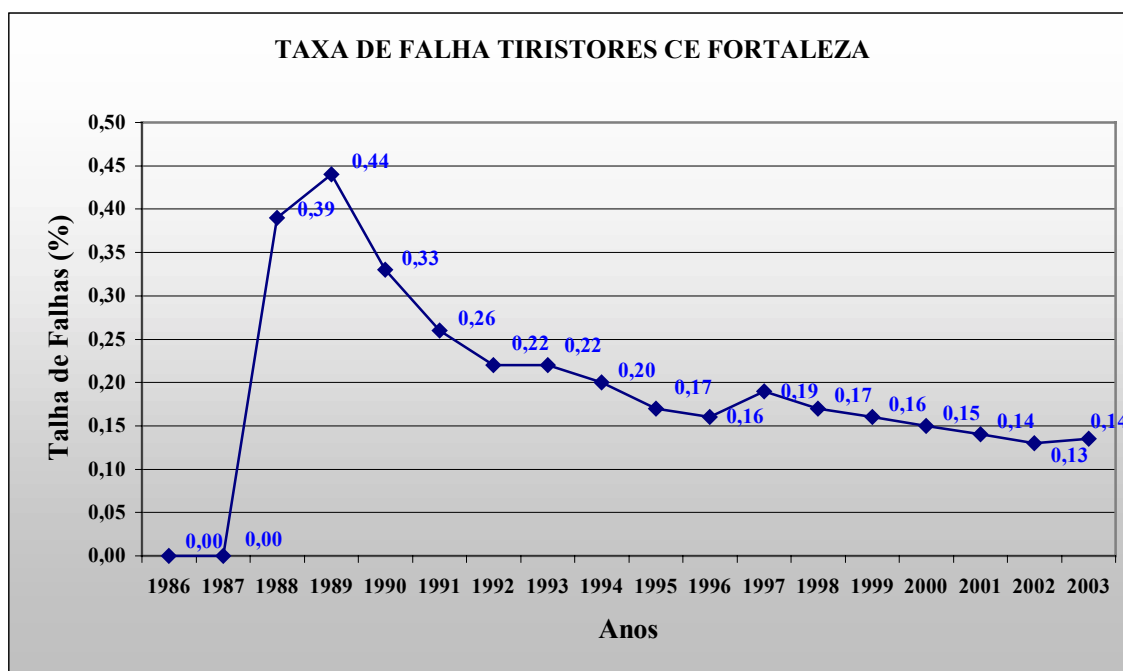


Figura 4.2 – Taxa de falha dos tiristores do compensador estático do tipo RCT.

O gráfico da figura 4.3 apresenta a taxa de falha dos semicondutores do compensador estático da subestação de Mossoró, que apresenta uma curva de formato semelhante à curva do compensador da subestação de Fortaleza, mas com valores relativamente maiores. O valor da média aritmética da taxa de falhas dos últimos 5 anos é de 7,01%, que é 50 vezes maior que a verificada para o compensador de Fortaleza em igual período.

O capítulo 6 apresenta a análise das falhas dos semicondutores danificados, retirados de operação desses dois compensadores, identificando os casos de danos causados por sobretensões e por sobrecorrentes.

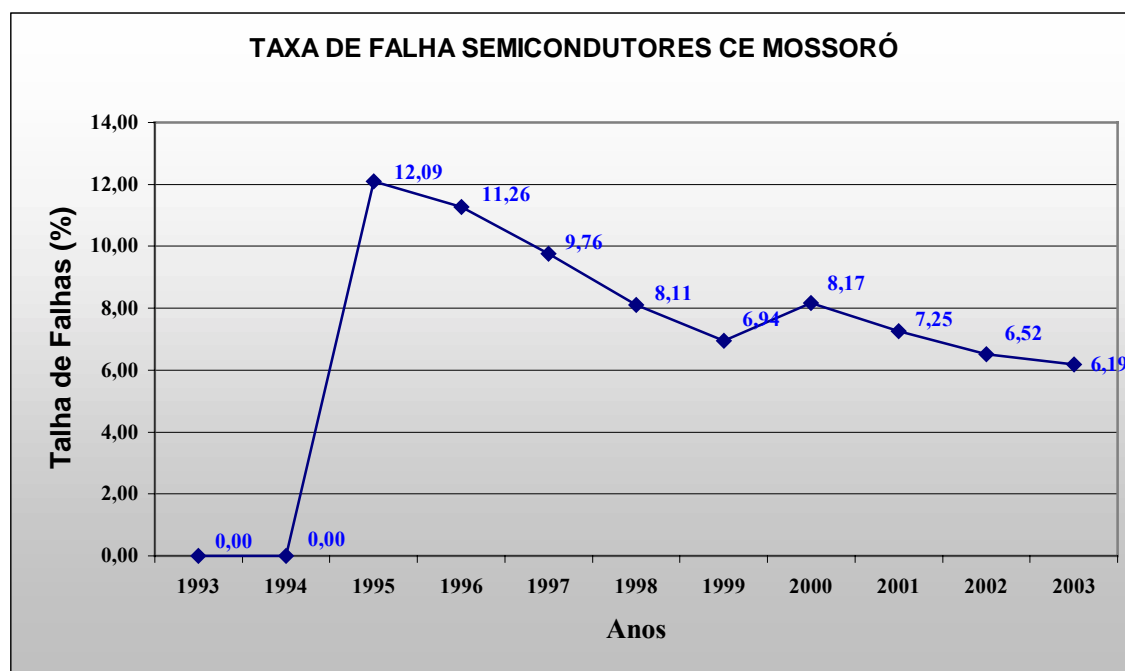


Figura 4.3 – Taxa de falha dos semicondutores do compensador estático do tipo CCT.

4.4- A DISPONIBILIDADE OPERACIONAL DE COMPENSADORES ESTÁTICOS

De acordo com a atual legislação do setor elétrico brasileiro, os Contratos de Concessão de Serviço Público de Transmissão, firmados entre a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e as Empresas Transmissoras, fixam o direito das Empresas receberem a Receita Anual Permitida (RAP), sendo essa receita vinculada ao uso das instalações da Rede Básica e os encargos de conexão. Por outro lado, O Contrato de Prestação de Serviços de Transmissão – CPST firmado entre a empresa concessionária de explorar o serviço público de transmissão e o Operador Nacional do Sistema – ONS estabelece que a receita anual pode ser reduzida de uma parcela variável, que reflete a efetiva disponibilização das instalações de transmissão, sendo a empresa penalizada, caso ocorra desligamentos das instalações de transmissão, programados ou não programados, estando os critérios para classificação dos desligamentos definidos nos Procedimentos de Rede.

Para as empresas concessionárias do serviço público de transmissão, a disponibilidade operacional dos equipamentos passa a ser um indicador diretamente vinculado ao faturamento da empresa. As empresas também assumem o compromisso de disponibilizar essas instalações dentro de padrões que obrigam a existência de planos de manutenção e métodos de avaliação do estado dos equipamentos que assegurem a manutenção da confiabilidade, devendo, também, ser levado em conta que as penalidades por

desligamentos não programados são mais severas que para aqueles programados.

Atualmente, a remuneração dos compensadores estáticos em operação na Chesf representa aproximadamente 1,5% da Receita Anual Permitida, sendo, portanto, relevante a continuidade operacional desses equipamentos do ponto vista econômico. Mas a continuidade operacional desses equipamentos também deve ser analisada pelos benefícios operacionais que o mesmos proporcionam, melhorando a qualidade da prestação de serviços do setor elétrico para a sociedade.

A Chesf calcula a disponibilidade de cada compensador estático pela fórmula 4.17.

$$\text{Disponibilidade} = \frac{N^0 \text{ total de horas disponíveis no período considerado}}{N^0 \text{ total de horas do período considerado}} \times 100 \quad (4.17)$$

Para o cálculo de disponibilidade de todos os compensadores estáticos, é utilizada a fórmula da equação 4.18, onde é levada em consideração a potência de cada compensador.

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i \times HD_i)}{\sum_{i=1}^N (P_i \times HP_i)} \quad (4.18)$$

Onde:

HD_i = número de horas disponíveis do equipamento i ;

HP_i = número de horas de existência do equipamento no período considerado;

P_i = Potência do equipamento;

N = número total de equipamentos;

O gráfico da figura 4.4 mostra a disponibilidade de cada compensador estático do tipo RCT em operação na Chesf, sendo identificados os compensadores estáticos instalados nas subestações de Fortaleza, Milagres e Campina Grande. O gráfico da figura 4.5 mostra a disponibilidade dos compensadores do tipo CCT também em operação na Chesf, instalados nas subestações de Mossoró e Natal. Em ambos os gráficos é mostrada a curva resultante da disponibilidade equivalente, calculada pela equação 4.18, de todos os compensadores instalados no sistema da Chesf.

Nos últimos cinco anos, a disponibilidade dos compensadores estáticos do tipo RCT variou entre 94,4% a 99,57%, enquanto a dos compensadores estáticos do tipo CCT variou entre 94,4% e 99,90%.

No caso dos compensadores tipo RCT a maior parte dos desligamentos foram programados, para atendimento a manutenções preventivas, havendo poucos desligamentos devido a falhas de equipamentos.

Para os compensadores tipo CCT, mesmo apresentando, de um modo geral, alto valor de disponibilidade, o desempenho do compensador de Mossoró é impactado pela alta taxa de falha de sua válvula de tiristores, conforme mostrado anteriormente.

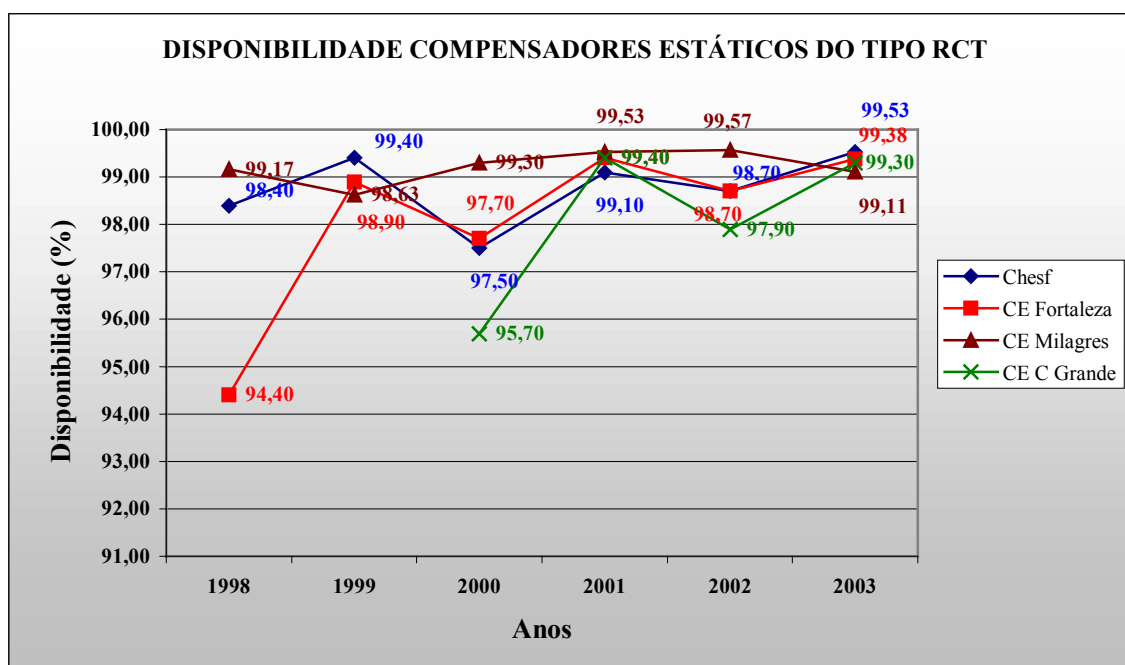


Figura 4.4 - Disponibilidade dos compensadores estáticos do tipo RCT em operação na Chesf.

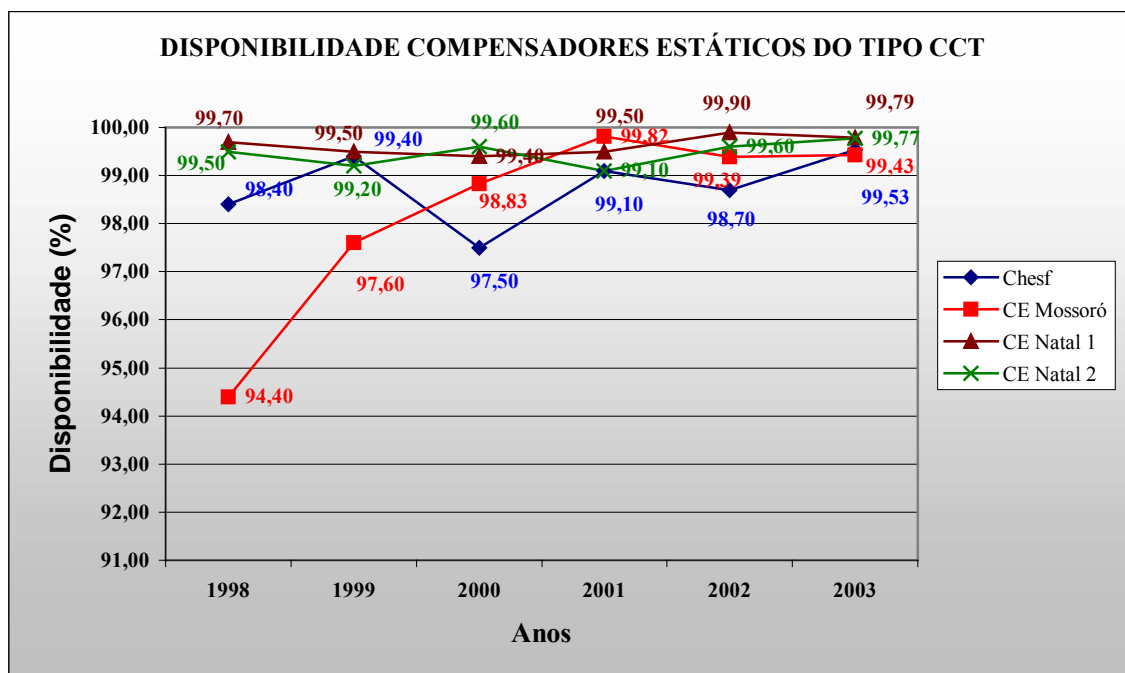


Figura 4.5 - Disponibilidade dos compensadores estáticos do tipo CCT em operação na Chesf.

Na pesquisa realizada pelo Cigré, apresentada pelo Grupo de Trabalho 38-01, força tarefa nº 02, referência [6], apresenta valores de disponibilidade de compensadores estáticos dos tipos RCT e CCT, instalados na Argentina e Suécia, variando entre 97,7% e 100%. Evidentemente, cabe o comentário de que a disponibilidade de 100% é dependente do período de observação, pois sempre haverá a necessidade de desligamentos para a execução de manutenção preventiva e conservação dos equipamentos.

Os dados apresentados na pesquisa do Cigré, como também os dados da Chesf, mostram valores de disponibilidade relativamente altos, o que permite concluir que no período do levantamento de dados, os compensadores estáticos pesquisados apresentaram desempenhos satisfatórios, mostrando serem equipamentos confiáveis.

CAPÍTULO 5

CARACTERÍSTICAS DOS SEMICONDUCTORES DE POTÊNCIA

5.1 – INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico dos semicondutores de potência, com dispositivos capazes de suportar altos níveis de tensão e conduzir elevadas correntes, possibilitou o emprego dos compensadores estáticos como elementos dos sistemas elétricos de potência. A válvula de semicondutores dos compensadores estáticos constitui-se no principal e, é normalmente, o mais caro equipamento do compensador, quando aplicado nos sistemas elétricos de potência.

Neste capítulo serão descritas as principais características dos diodos e dos tiristores, de modo a possibilitar o entendimento das

razões que levaram nos capítulos subseqüentes à escolha de determinados parâmetros dos semicondutores, como argumento para avaliação da degradação desses dispositivos, quando aplicados em compensadores estáticos.

5.2 – SEMICONDUTORES

A corrente elétrica em um material bom condutor é devido ao fluxo de cargas negativas (elétrons), enquanto a corrente em materiais semicondutores é resultante do movimento de cargas positivas e negativas. Os dispositivos semicondutores de potência, em sua grande maioria, têm o silício como elemento básico de sua constituição.

No cristal de silício puro, os quatro elétrons da camada de valência de cada átomo são compartilhados por outros quatro átomos vizinhos de silício, formando ligações covalentes. Se de alguma forma, energia for fornecida a este cristal, os elétrons podem sair da estrutura cristalina, ficando livres da influência dos átomos, deslocando-se, randomicamente, através da rede que forma o cristal. Ao saírem da estrutura cristalina, os elétrons deixam lugares vazios ou lacunas nas ligações covalentes entre os átomos. Estas lacunas podem se mover no cristal, de um íon para outro e formar uma corrente equivalente ao movimento de cargas positivas livres.

Quando quantidades em pequeno percentual de átomos pentavalentes são adicionados à estrutura cristalina do silício, no processo chamado de dopagem, quatro dos cinco elétrons da camada

de valência do átomo dopante formam ligações covalentes com os átomos de silício, ficando o quinto elétron necessitando de uma quantidade bem menor de energia para torna-se livre da influência do átomo e, deslocar-se pela estrutura cristalina. Neste material semiconductor, também existe elétrons livres devido a quebra de ligações covalentes entre átomos de silício e conseqüentemente também lacunas. Entretanto, devido ao excesso de elétrons vagando pela estrutura do cristal, haverá uma maior probabilidade das lacuna serem preenchidas pelos elétrons livres, reduzindo o número de lacunas do semiconductor. Os materiais dopantes pentavalentes são chamados de doadores e o material semiconductor dopado, por ter uma quantidade maior de elétrons que lacunas, é chamado de tipo N.

A dopagem do semiconductor pode também ser feita com a introdução na rede cristalina de átomos trivalentes, ou seja, átomos com três elétrons na camada de valência. Nessa situação, apenas três ligações covalentes são formadas entre o átomo dopante e os átomos de silício vizinhos, resultando da ausência do quarto elétron em uma lacuna. Os materiais dopantes trivalentes são chamados de aceitadores e o material semiconductor dopado, por ter uma quantidade maior de lacunas que elétrons livres, é chamado de tipo P.

É importante que seja ressaltado que, tanto no semiconductor puro quanto no material dopado, o material permanece eletricamente neutro, pois a quantidade total de prótons e elétrons do material não é alterada.

Nos materiais dopados, pode-se afirmar que a concentração de átomos doadores é igual à concentração de cargas positivas, formadas pelos átomos que perderam elétrons de sua camada de valência. De forma análoga, a concentração de átomos aceitadores é igual à concentração de cargas negativas, formadas pelos átomos que receberam elétrons. Sendo n e p respectivamente as concentrações de elétrons e lacunas do material e, N_A e N_D as concentrações respectivamente de átomos aceitadores e doadores, e ainda como o semicondutor permanece eletricamente neutro, a equação 5.1 é válida.

$$N_A + n = N_D + p \quad (5.1)$$

Sendo o semicondutor dopado com átomos doadores, na equação 5.1, N_A é igual a zero. Como no material tipo N a quantidade de elétrons livres é muito maior que lacunas, a partir da equação 5.1 podemos afirmar que no material tipo N a concentração de elétrons livres é, aproximadamente, igual à concentração de átomos doadores. De forma análoga em um material tipo P, a concentração de lacunas é, aproximadamente, igual à concentração de átomos aceitadores.

Em materiais semicondutores, dopados ou não, a quantidade de elétrons livres e lacunas é, fortemente, influenciada pela temperatura do material. Com o aumento da temperatura, ocorre o fenômeno conhecido por ionização térmica, que gera quantidades iguais de elétrons livres e lacunas, aumentando a densidade de cargas e alterando a condutividade do material.

Quando um campo elétrico constante é aplicado a um material semicondutor, os elétrons livres se deslocaram em sentido oposto aos das lacunas, estabelecendo uma corrente de condução no semicondutor. Como resultado da força eletrostática aplicada, os elétrons livres adquirem velocidade e se chocam com os íons da estrutura cristalina do material, dissipando parte da energia recebida do campo elétrico. A rede cristalina absorve esta energia dissipada pelos elétrons, resultando no aquecimento do material.

No material semicondutor, variações nas concentrações de elétrons livres e lacunas na estrutura cristalina, resultam na formação da chamada corrente de difusão. O movimento randômico das cargas, como resultado da energia térmica, levam a concentrações não uniformes de cargas em determinadas regiões, sendo esperado que haja um movimento de cargas de mesma polaridade de uma região de maior concentração para a de menor concentração.

5.3 – DIODOS

O diodo é formado pela junção de materiais semicondutores dos tipos P e N. Devido ao gradiente de densidade de portadores na região da junção dos dois materiais, lacunas do material P difundirão para o material N e elétrons de material N difundirão para o material P. O átomo aceitador da região P, ao receber o elétron que difundiu da região N, torna-se um íon negativo. Enquanto o átomo doador da

região N, ao receber uma lacuna da região P, torna-se um íon positivo.

Este processo de difusão de elétrons e lacunas na região de junção dos dois materiais, cria uma região de transição formada por íons positivos no lado N e de íons negativos no lado P. Esta região de íons não neutralizados é chamada de região de cargas descobertas ou região de depleção. A figura 5.1 ilustra a junção P-N, com a região de íons não neutralizados, e o símbolo de um diodo formado por uma junção PN .

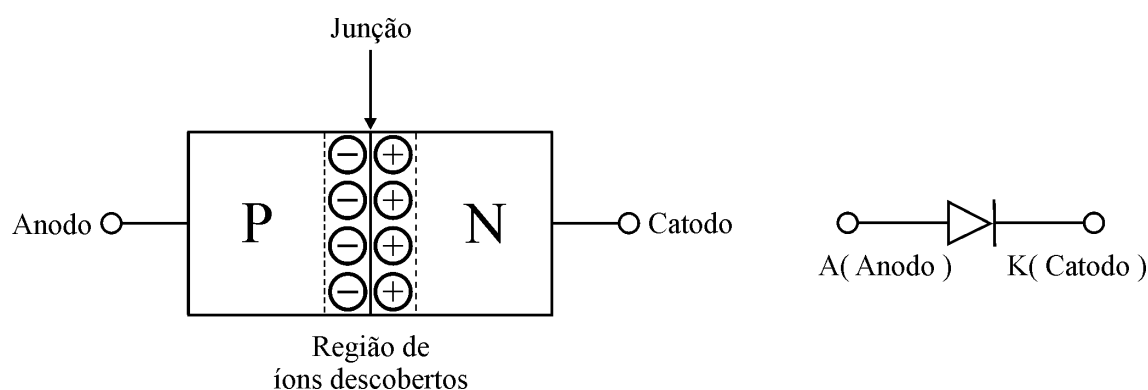


Figura 5.1 – Junção PN e símbolo do diodo.

A concentração de cargas de sinais opostos na região da junção, formando um dipolo elétrico, dá origem a um campo elétrico que atua no sentido de evitar a difusão dos elétrons e lacunas, estabelecendo um equilíbrio no processo de formação da junção. Na região de depleção é então formada uma barreira de potencial que age contra a difusão de elétrons, vindos do lado N através da junção, como também contra a difusão de lacunas, vindas do lado P através da junção para o lado N.

O terminal do diodo, ligado ao lado P é chamado de anodo e o terminal ligado no lado N é chamado de catodo. Quando uma tensão externa é aplicada aos terminais do diodo com polarização direta, ou seja, a tensão do anodo maior que a tensão do catodo, o campo elétrico que se estabelece no interior do diodo age no sentido inverso da barreira de potencial da junção, favorecendo a difusão das cargas majoritárias. Quando a tensão aplicada excede o valor natural da barreira de potencial, cerca de 0,7 V para o diodo de silício, os portadores majoritários do lado N serão atraídos pelo potencial positivo do anodo, e os majoritários do lado P pelo potencial negativo do catodo, levando o diodo a condução.

A corrente que se estabelece com o diodo em condução, varia exponencialmente com a tensão aplicada em seus terminais, devendo esta corrente ser limitada por elementos de circuitos externos ao diodo. Como normalmente em diodos de potência as outras tensões do circuito são muito maiores que o valor típico da barreira de potencial, no estado de condução, o diodo pode ser tratado analogamente como uma chave fechada.

Quando o diodo é inversamente polarizado, ou seja, quando se aplica uma tensão no catodo maior que a tensão no lado do anodo, o campo elétrico formado no interior do diodo age no sentido de aumentar a barreira de potencial da junção, dificultando ainda mais a difusão de portadores majoritários de um lado para o outro da junção. A aplicação da tensão reversa irá favorecer o deslocamento das cargas minoritárias existentes em cada lado da junção, ou seja,

lacunas no lado tipo N e elétrons livres no lado P. Este deslocamento das cargas minoritária forma uma corrente de pequeno valor, chamada de corrente de bloqueio reverso.

Como a corrente de bloqueio reverso é de pequena intensidade, o diodo polarizado inversamente é dito bloqueado, podendo seu comportamento ser aproximado ao de uma chave aberta.

Caso a tensão reversa aplicada seja aumentada continuamente, haverá um ponto em que o campo elétrico da junção reversamente polarizado irá acelerar os portadores minoritários de cada lado P-N, que são forçados a passar pela junção, provocando o aumento da corrente através do diodo. Quando a tensão de ruptura for atingida ocorre o fenômeno de avalanche da corrente, entrando o diodo em condução. Esta situação é normalmente destrutiva para o diodo de potência, devendo o circuito ser dimensionado de modo que as tensões que o diodo será submetido, em regime permanente e transitório, sejam menor que a tensão de ruptura reversa ou de tensão de breakdown.

A característica tensão-corrente do diodo é mostrada na figura 5.2, O primeiro quadrante representa a região de condução do diodo e, o terceiro quadrante representa a região de polarização reversa ou de bloqueio. A tensão V_{BR} , representa a tensão de ruptura reversa.

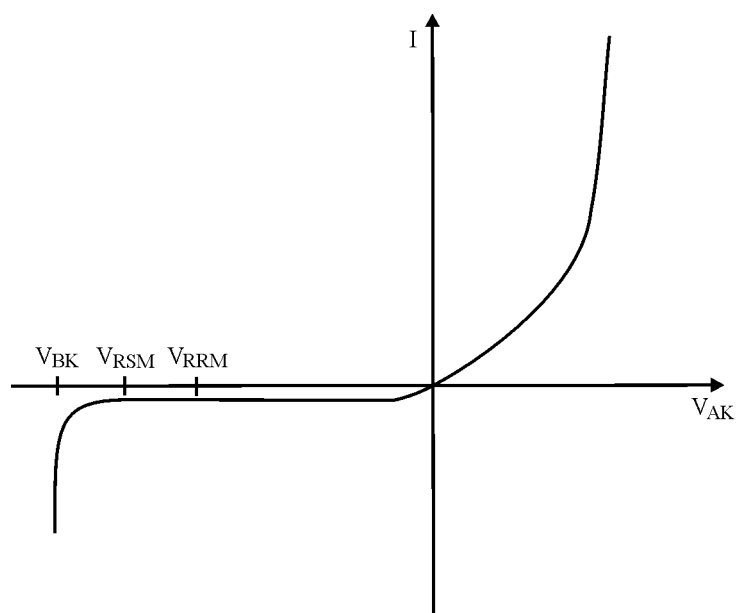


Figura 5.2 – Característica tensão-corrente do diodo.

As principais características elétricas dos diodos são definidas pelos seguintes parâmetros, que definem os limites de capacidade ou de operação do diodo [1]:

V_{RRM} – Tensão Repetitiva de Pico Reversa (Repetitive Peak Reverse Voltage): Indica o valor máximo instantâneo da tensão reversa de bloqueio que o semicondutor pode suportar, incluindo todas as tensões transitórias repetitivas. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C .

V_{RSM} – Tensão Não-Repetitiva de Pico Reversa (Non-Repetitive Peak Reverse Voltage): Representa o valor máximo instantâneo da tensão reversa de bloqueio que o semicondutor pode suportar de modo não repetitivo. É, geralmente, especificada para

uma temperatura da junção de 125°C e tempos de surto da ordem de 5 ms.

V_{TD} – Tensão de Condução (Threshold Voltage): É o valor de tensão entre anodo e catodo a partir da qual o diodo conduz plenamente, tipicamente 0,7 V para diodos de silício.

V_{TM} – Queda de Tensão em Estado de Condução (On State Voltage): É o valor máximo da tensão entre anodo e catodo para a corrente nominal de operação, considerando meia onda senoidal.

I_{RRM} – Máxima Corrente Repetitiva de Fuga Reversa (Repetitive Peak Reverse Current): Indica o valor máximo da corrente de fuga reversa que flui pelo diodo, quando aplicada à tensão V_{RRM} entre anodo e catodo. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C e, é da ordem de miliamperes.

$I_{\text{T(RMS)}}$ – Valor Eficaz da Corrente do Semicondutor (RMS On-State Current): Representa o valor eficaz máximo da corrente de condução, em condições normais de operação de forma repetitiva. É, geralmente, especificada para uma meia onda senoidal de 180° de duração.

$I_{\text{T(AV)}}$ – Valor Médio da Corrente do Semicondutor (Average On-State Current): Indica o máximo valor médio da corrente de condução em condições normais de operação de forma repetitiva. É,

geralmente, especificada para uma meia onda senoidal de 180° de duração.

I_{TSM} – Corrente de Surto Direto (Surge On-State Current): É o maior valor da corrente direta de surto que o semicondutor pode suportar. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C , para uma meia onda senoidal de 180° de duração de 5ms.

Devido a diferenças construtivas, diodos de mesmo tipo não têm a mesma curva característica da corrente em função da tensão. Na condição de polarização direta, os diodos possuem comportamento bem semelhante, apresentando, praticamente, a mesma queda de tensão entre os terminais de anodo e catodo para conduzir a mesma corrente. Mas na polarização reversa, cada diodo, apresenta sua característica com diferentes valores de tensão e corrente.

Na maior parte das aplicações dos diodos nos circuito de alta tensão, como nas válvulas dos compensadores estáticos, é necessária a associação de mais de um diodo em série para que seja atingida a capacidade de bloqueio, estando os diodos submetidos a tensões em estado permanente ou transitórias. No entanto, devido às diferenças construtivas que resultam em diferentes características, faz-se necessário a introdução de circuitos externos que possibilitem uma melhor distribuição da tensão em cada diodo posto em série para formar a válvula. Esses circuitos serão apresentados na seção

seguinte, pois também são aplicados para possibilitar a associação série de tiristores.

5.4 - TIRISTORES

O tiristor é o nome genérico de uma família de dispositivos semicondutores, contendo três junções PN, com capacidade de conduzir ou bloquear uma corrente em um ou em dois sentidos. No entanto, devido à grande utilização do SCR (Silicon Controlled Rectifier), que faz parte da família dos tiristores, esses dispositivos em muitas aplicações são chamados de tiristores. Neste trabalho, os SCR serão chamados simplesmente de tiristores, pois esta denominação está mais de acordo com o tratamento dado pelos fabricantes e por seus usuários na área de compensação estática.

O tiristor tem quatro camadas de silício dopadas alternadamente PNPN e, três terminais identificados como anodo, catodo e gatilho, sendo, simbolicamente, representado como ilustra a figura 5.3.

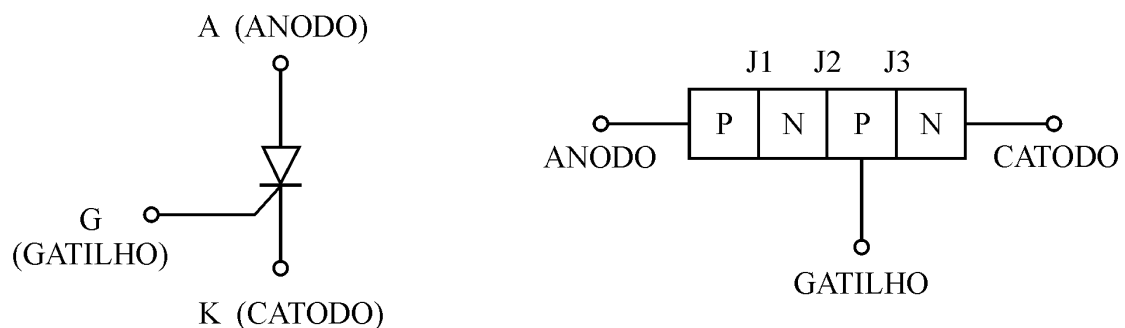


Figura 5.3 – Símbolo do tiristor.

O tiristor funciona como uma chave unidirecional. De forma semelhante ao diodo, a condição necessária para a condução do tiristor é de que a tensão no terminal do anodo seja maior que a tensão no terminal do catodo. Entretanto, para o tiristor, esta condição não é suficiente para a sua condução, havendo ainda a necessidade do gatilho receber um sinal positivo em relação ao catodo, para que o tiristor comece a conduzir. Uma vez que o tiristor inicie sua condução, o gatilho não exerce mais controle, permanecendo o tiristor conduzindo até que a corrente do circuito elétrico em que o mesmo está inserido, passe por um valor igual a zero.

Quando o tiristor é inversamente polarizado, ou seja, quando se aplica uma tensão no catodo maior que a tensão no lado do anodo, as junções J1 e J3 estão inversamente polarizadas, enquanto que a junção J2 está diretamente polarizada. O tiristor nesta condição está bloqueado no estado reverso, permitindo a passagem apenas de uma pequena corrente de fuga, formada pelas cargas minoritárias, conhecida como corrente reversa e, permanecendo o tiristor nesse estado de bloqueio, mesmo que seja aplicada uma tensão no gatilho maior que a tensão de catodo.

Se a tensão anodo-catodo for aumentada continuamente até que sejam superadas as barreiras de potenciais das junções J1 e J3, ocorrerá uma ruptura por avalanche, permitindo o fluxo de corrente normalmente destrutiva para o tiristor. A tensão que leva a avalanche

é conhecida como tensão de ruptura, simbolizada por V_{BR} (Breakdown Voltage).

Quando o tiristor é polarizado diretamente as junções J1 e J3 estão diretamente polarizadas, enquanto que a junção J2 está inversamente polarizada, o que impede o fluxo de corrente. O tiristor nesta condição está bloqueado no estado direto. Se houver uma tensão gatilho-catodo positiva, haverá uma circulação de corrente através da junção J3, com portadores negativos indo do catodo para o gatilho. A energia cinética de parte desses portadores negativos será suficiente para vencer a barreira de potencial da junção J2, estabelecendo uma corrente entre anodo e catodo e o início da condução do tiristor.

O tiristor polarizado diretamente poderá conduzir sem aplicação da corrente no gatilho se a tensão anodo-catodo for aumentada continuamente até que seja superada a barreira de potencial da junção J2, possibilitando o estabelecimento da corrente entre os terminais anodo e catodo. A tensão aplicada entre anodo-catodo que leva o tiristor a conduzir sem aplicação de sinal no gatilho é conhecida por tensão de disparo, simbolizada por V_{BO} (Breakover Voltage). Na prática, esta forma de forçar a condução do tiristor deve ser evitada, pois pode ser destrutiva.

Os tiristores podem ser levados ainda a conduzirem através da elevação da temperatura, sinal de luz nas junções e pela taxa de crescimento da tensão aplicada entre os terminais de anodo e catodo.

Para que o tiristor seja disparado por sinal de luz é necessário que o mesmo tenha sido fabricado de forma a permitir que um sinal de luz atinja a pastilha de silício, esse tipo de tiristor é conhecido por LTT do inglês Light Triggered Thyristor.

O disparo do tiristor por elevação da temperatura deve ser evitado, pois o mesmo é obtido através da agitação térmica dos portadores minoritários que aumenta com a elevação da temperatura. Nos capítulos seguintes, será mostrado que a temperatura influencia a corrente do tiristor, estando o mesmo em estado de bloqueio direto ou reverso. O excesso de temperatura pode causar a danificação dos semicondutores.

Quando uma junção é inversamente polarizada, a região de depleção comporta-se de maneira similar a um capacitor. Se o tiristor é diretamente polarizado, sem aplicação de sinal no gatilho, a junção J2 está inversamente polarizada, com a tensão aplicada entre o anodo e o catodo, agindo no sentido de aumentar a região de íons não neutralizados na região da junção J2. Fazendo-se novamente a analogia com um capacitor, o aumento da tensão na região da junção provoca um aumento de carga. A corrente que passa através da junção J2 é a corrente formada pela cargas minoritárias. Mas em um capacitor, a corrente é função da taxa de variação da tensão. Considerando C_J a capacitância equivalente da região da junção J2 e V_{AC} a tensão entre os terminais anodo e catodo do tiristor, a corrente que passa pela junção pode ser aproximada pela expressão 5.2.

$$i = C_J \frac{dv_{AC}}{dt} \quad (5.2)$$

Se a taxa de crescimento da tensão entre o anodo e o catodo for aumentada, haverá uma elevação da corrente através da junção, podendo este aumento da corrente levar o tiristor ao estado de condução mesmo sem aplicação de sinal no gatilho. Os fabricantes especificam o dv/dt máximo permitido dos tiristores, de modo que não ocorram disparos indevidos destes componentes. As válvulas de tiristores normalmente são projetadas com circuitos de amortecimento que minimizam o efeito sobre os tiristores de variações transitórias da tensão.

A figura 5.4 mostra a curva característica tensão x corrente de um tiristor. Quanto maior a corrente no gatilho menor será a tensão entre o anodo e o catodo necessária para o disparo do tiristor.

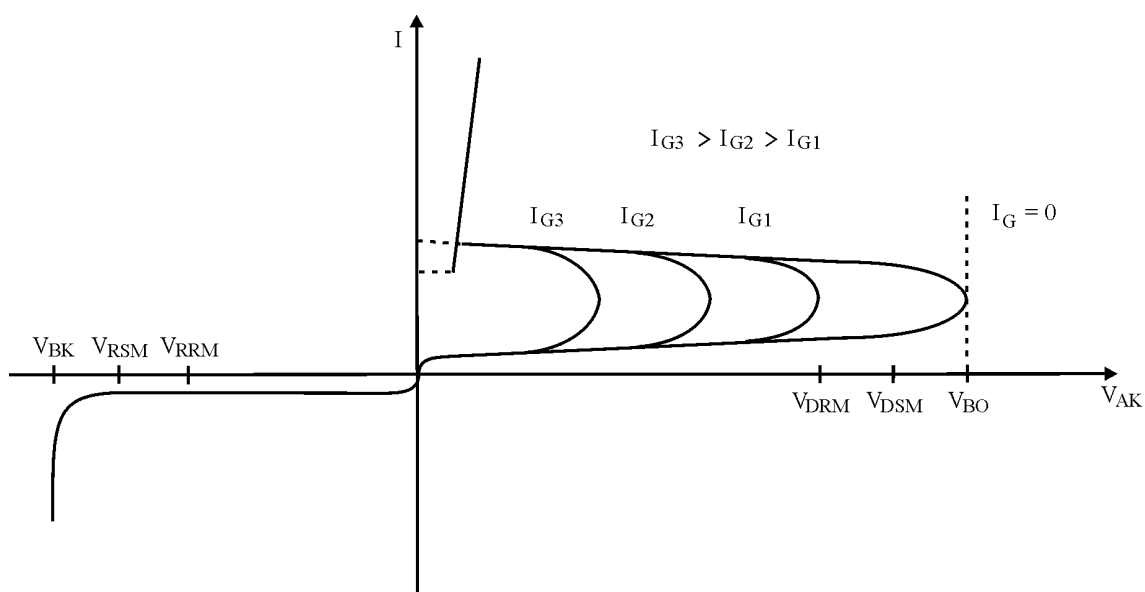


Figura 5.4 – Característica tensão-corrente do tiristor.

Quando uma corrente positiva é aplicada ao gatilho e o tiristor começa a conduzir, o fluxo de corrente inicial que se estabelece entre os terminais do anodo e do catodo, concentra-se em uma região próxima ao gatilho, espalhando-se gradualmente por toda a área de condução do tiristor. Se o fluxo de corrente inicialmente estabelecido cresce rapidamente, aumentando a densidade de corrente, haverá um aquecimento na região próxima ao gatilho, provocando o chamado ponto quente (hot spot). Se a taxa de crescimento da corrente for tal que provoque um aquecimento excessivo, o tiristor pode ser definitivamente danificado. No capítulo 6 serão apresentadas algumas pastilhas semicondutoras danificadas, algumas devido à taxa de crescimento da corrente.

A figura 5.5 ilustra a situação em que ocorre o ponto quente na região do gatilho, após o disparo do tiristor. Para que o tiristor suporte taxas mais elevadas de corrente, a geometria do gatilho pode ser alterada, com o posicionamento do gatilho no centro do tiristor ou ainda a estrutura do gatilho interdigitado, conforme figura 5.6, onde a área de contato com o gatilho é aumentada, o que facilita a condução da corrente e que o tiristor suporte maiores taxas de crescimento da corrente [3].

Nos projetos de compensadores estáticos, a taxa de crescimento da corrente na válvula, representada na especificação do

tiristor por di/dt , é limitada pela introdução de reator em série com a válvula de tiristores.

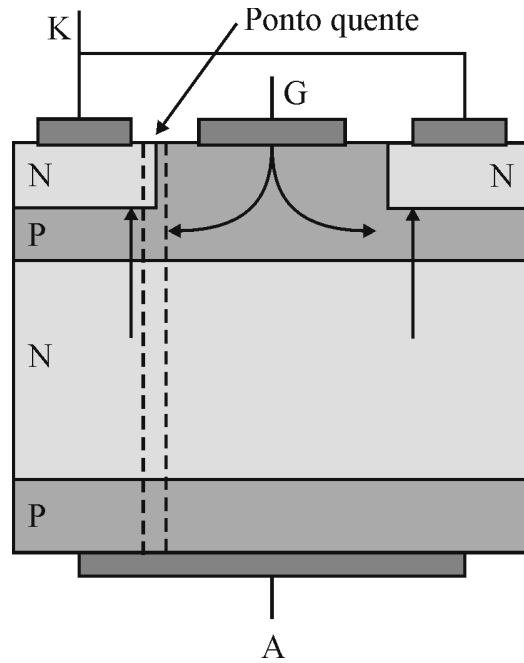


Figura 5.5 – Tiristor e a concentração de corrente no gatilho.

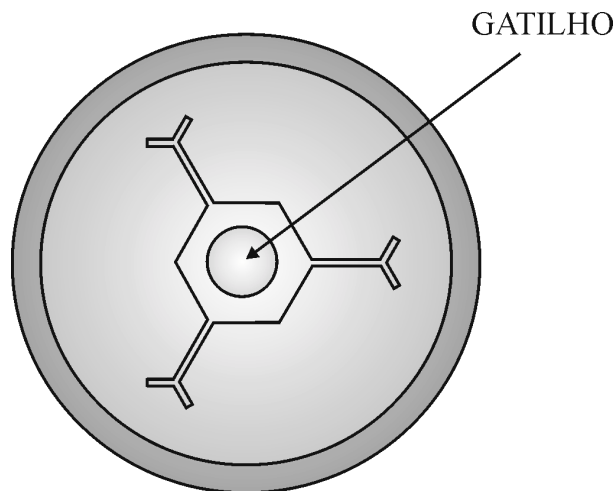


Figura 5.6 – Geometria do gatilho do tipo interdigitado.

As principais características elétricas dos tiristores são relacionadas e definidas a seguir, cujos valores desses parâmetros estabelecem limites de capacidade ou de operação do tiristor [1]:

V_{DRM} – Tensão Repetitiva de Pico Direta (Repetitive Peak Off-State Voltage): É o valor máximo instantâneo da tensão direta de bloqueio que o tiristor pode suportar, incluindo todas as tensões transitórias repetitivas. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C .

V_{DSM} – Tensão Não-Repetitiva de Pico Direta (Non-Repetitive Peak Off-State Voltage): Representa o valor máximo instantâneo da tensão direta de bloqueio que o tiristor pode suportar, de modo não repetitivo. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C e tempos de surtos da ordem de 5 ms.

V_{RRM} – Tensão Repetitiva de Pico Reversa (Repetitive Peak Reverse Voltage): Indica o valor máximo instantâneo da tensão reversa de bloqueio que o tiristor pode suportar, incluindo todas as tensões transitórias repetitivas. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C .

V_{RSM} – Tensão Não-Repetitiva de Pico Reversa (Non-Repetitive Peak Reverse Voltage): Representa o valor máximo instantâneo da tensão reversa de bloqueio que o tiristor pode suportar de modo não repetitivo. É, geralmente, especificada para

uma temperatura da junção de 125°C e tempos de surto da ordem de 5ms.

V_{TM} – Queda de Tensão em Estado de Condução (On State Voltage): É o valor máximo da tensão entre anodo e catodo para a corrente nominal de operação considerando meia onda senoidal.

I_{DRM} – Máxima Corrente Repetitiva de Fuga Direta (Repetitive Peak Off-State Current): Representa o valor máximo da corrente de fuga direta que flui pelo Tiristor. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C e é da ordem de miliamperes.

I_{RRM} – Máxima Corrente Repetitiva de Fuga Reversa (Repetitive Peak Reverse Current): Indica o valor máximo da corrente de fuga reversa que flui pelo tiristor. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C e é da ordem de miliamperes.

$I_{\text{T(RMS)}}$ – Valor Eficaz da Corrente do Tiristor (RMS On-State Current): Representa o valor máximo eficaz da corrente de condução, em condições normais de operação, de forma repetitiva. É, geralmente, especificada para uma meia onda senoidal de 180° de duração.

$I_{\text{T(AV)}}$ – Valor Médio da Corrente do Tiristor (Average On-State Current): Indica o valor médio da corrente de condução em

condições normais de operação de forma repetitiva. É, geralmente, especificada para uma meia onda senoidal de 180° de duração.

I_{TSM} – Corrente de Surto Direto (Surge On-State Current): É o maior valor da corrente direta de surto que o tiristor pode suportar. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C , para uma meia onda senoidal de 180° de duração de 5[ms].

I_H – Corrente de Manutenção (Holding Current): Representa o menor valor de corrente para manter o tiristor em estado de condução. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C e é da ordem de miliamperes.

I_L – Corrente de Travamento (Latching Current): Significa o menor valor de corrente direta necessária para que o pulso de disparo seja retirado do gatilho. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C e é da ordem de miliamperes.

I_{GT} – Corrente de Disparo do Gatilho (Gate Trigger Current): Indica o menor valor de corrente requerida pelo Gatilho para fazer o tiristor passar do estado de bloqueio direto para o estado de condução. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C e, é da ordem de miliamperes.

V_{GT} – Tensão de Disparo de Gatilho (Gate Trigger Voltage): É o menor valor de tensão requerido para produzir a corrente I_{GT} .

di/dt – Taxa de Variação da Corrente: Representa a máxima taxa de variação da corrente permissível para o tiristor para atingir o estado de condução com uma densidade de condução uniforme. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C .

dv/dt – Taxa de Variação de Tensão: Significa a máxima taxa de variação da tensão direta permissível para que o tiristor não entre em condução através do disparo capacitivo. É, geralmente, especificada para uma temperatura da junção de 125°C .

De forma idêntica ao que já foi mencionada para os diodos, na maior parte das aplicações dos tiristores em circuito de alta tensão, como nas válvulas dos compensadores estáticos, é necessário à associação de mais de um tiristor em série para que seja atingida a capacidade de bloqueio da válvula, seja em regime permanente ou transitório, conforme exposto no capítulo 3, para as válvulas de tiristores dos compensadores estáticos de Fortaleza e Mossoró, que fizeram parte da pesquisa para a avaliação da degradação de seus semicondutores.

As diferenças provenientes do processo de fabricação dos semicondutores resultam em diferentes características, que obrigam a introdução de circuitos externos, de modo a possibilitar a associação em série dos semicondutores, pois caso contrário não haveria uma equalização da tensão em cada uma das unidades.

Em um conjunto formado por tiristores em série, durante o período transitório do início da condução, os tiristores com

características mais lentas, irão disparar depois do que aqueles com característica mais rápidas, ficando os lentos submetidos transitoriamente a tensões superiores. Também no momento de bloqueio, os tiristores com características mais rápidas, ou seja, aqueles que bloqueiam primeiro ficarão também, transitoriamente, submetidos a tensões superiores. Para mitigar esse tipo de problema, um circuito de amortecimento (circuito snubber), formado por capacitor em série com resistor, é posto em paralelo com cada tiristor. Este circuito tem também a finalidade de amortecer variações de tensão, de modo que não haja disparo indevido do tiristor devido à dv/dt .

Podem ocorrer situações em que as aplicações dos tiristores requerem a associação de dois ou mais tiristores em paralelo, de modo que o conjunto suporte o fluxo de corrente a ser controlada, conforme foi mostrado no capítulo 3 para a válvula de tiristores do compensador estático da subestação de Fortaleza. Nessas situações, mesmo que os tiristores recebam, simultaneamente, a ordem para conduzirem, as diferenças de fabricação existentes entre eles pode levar à sobrecarga das unidades com características mais rápidas, o que, gradualmente, levará a suas degradações. Para a associação paralela de tiristores recomenda-se que sejam postos em paralelo semicondutores com características semelhantes.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DAS FALHAS DOS SEMICONDUCTORES

6.1 – INTRODUÇÃO

O conceito de falha foi apresentado no capítulo 4, sendo a falha caracterizada quando o componente deixa de desempenhar a função para a qual foi especificado. No caso dos semicondutores, a falha leva quase sempre ao curto-circuito da pastilha de silício.

Neste capítulo é feita a análise das danificações nas pastilha de silício de alguns semicondutores que falharam em serviço e foram retirados de operação. Os semicondutores foram abertos e

classificados de acordo com os danos encontrados, sendo observado que havia uma certa repetição de eventos.

Não foi possível correlacionar os danos nos tiristores com possíveis perturbações envolvendo o sistema elétrico ou a válvula de tiristores onde esses componentes estavam instalados, sendo, no entanto, todos originários dos compensadores estáticos que fizeram parte da pesquisa, instalados nas subestações da Chesf em Fortaleza e Mossoró.

6.2 – CLASSIFICAÇÃO DAS FALHAS

Embora o histórico fosse de que os semicondutores estavam falhados, antes de serem abertos, foram realizados ensaios que comprovaram que todas as unidades estavam em curto-circuito.

Depois que os semicondutores foram abertos, as falhas foram classificadas de acordo com o tipo e características dos danos observados sobre a pastilha semicondutora.

a) Falha tipo I: Tiristores tipo FT500AH-70, sem marcas de danos visíveis.

A Figura 6.1 ilustra dois tiristores falhados que não apresentam problemas físicos visíveis nas pastilhas dos semicondutores de potência, embora eles estejam em curto-circuito. Possivelmente, a causa da falha foi a ocorrência de sobretensões,

sendo ainda possível que uma análise microscópica da pastilha revele as marcas provocadas pelas sobretensões e o curto-circuito. Também é provável que o sistema de proteção da válvula tenha provocado o desligamento automático do compensador estático, antes que houvesse a evolução e a exposição de marcas visíveis do curto-circuito.

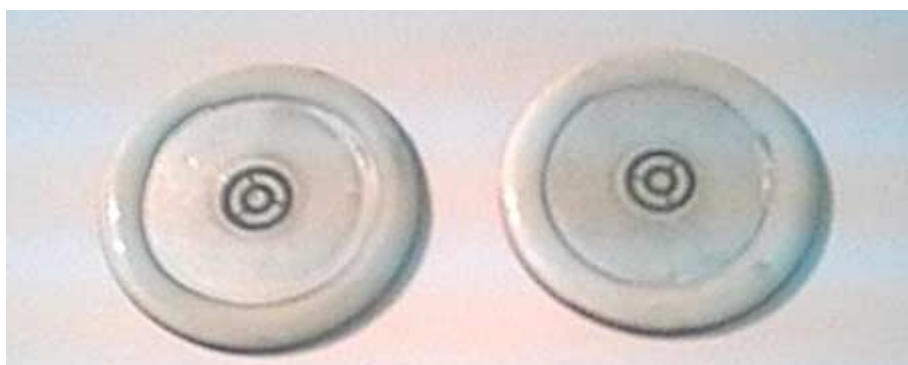


Figura 6.1 - Tiristor Tipo FT500AH-70 - Falha tipo I.

b) Falha tipo II: Diodo tipo FD500EV-70, sem marcas de danos visíveis.

De forma semelhante à falha do tipo I não foi possível a olho nu visualizar os danos nas superfícies das pastilhas semicondutores, mesmo estando os diodos em curto-circuito. Também é possível que os diodos tenham se degradados devido a sobretensões impostas pelo sistema. A figura 6.2 ilustra os diodos com a falha classificada como tipo II.

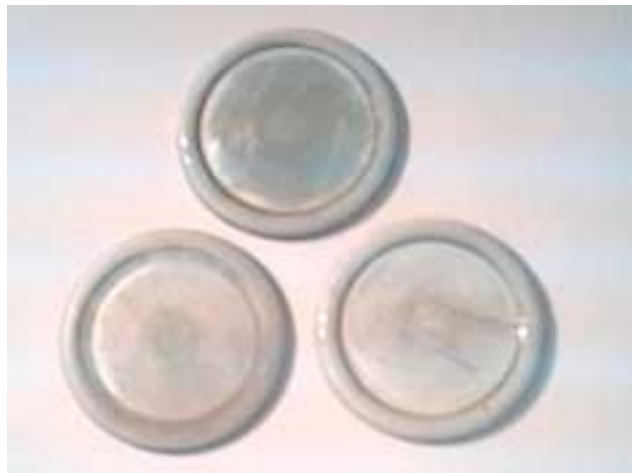


Figura 6.2 - Diodo tipo FD500EV-70 - Falha Tipo II.

c) Falha tipo III: Diodo tipo FD500EV-70, com marcas de sobrecorrentes.

A Figura 6.3 mostra um lote de nove diodos com áreas queimadas nas partes laterais das pastilhas. Os danos observados devem ter sido provocados por sobretensões seguidas de sobrecorrentes.



Figura 6.3 - Diodo tipo FD500EV-70 - Falha Tipo III.

d) Falha tipo IV: Tiristores tipo BstT68H280S15, danificados por di/dt.

Os tiristores da figura 6.4 mostram danos na região do gatilho provocados por elevadas taxas de crescimento da corrente (di/dt) no disparo dos tiristores, que excederam a capacidade de condução da corrente pelas pastilhas e, resultaram em pontos quentes e nas queimas das regiões centrais dos tiristores.

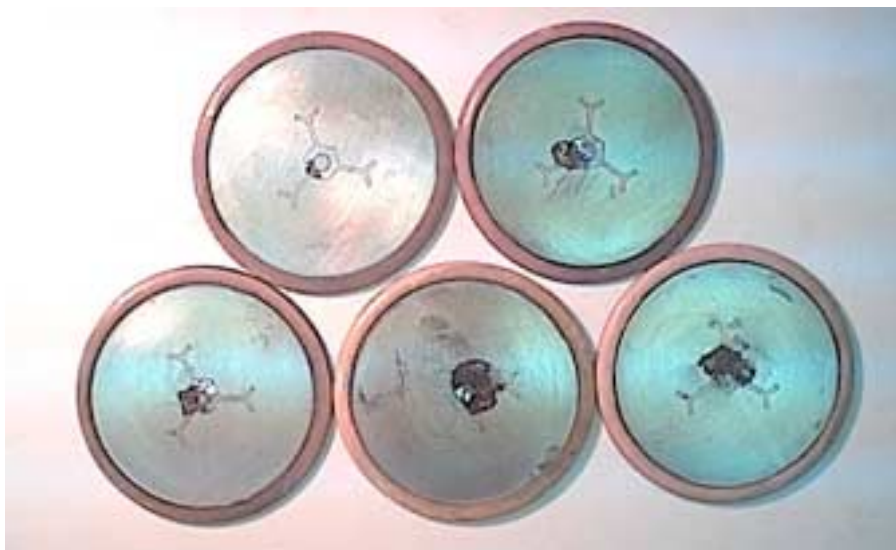


Figura 6.4 - Tiristores BstT68H280S15 - falha tipo IV.

e) Falha tipo V: Tiristores tipo BstT68H280S15, danificados por sobretensões.

A Figura 6.5 mostra, para os semicondutores de potência do tipo BstT68H280S15, falhas provocadas por sobretensões sem a existência de sobrecorrentes. Observa-se claramente que existe em cada tiristor uma região danificada entre a área central e a borda.



Figura 6.5 - Tiristores BstT 68H280S15 – falha tipo V.

f) Falha tipo VI: Tiristores tipo BstT68H280S15, danificados por sobretensões e sobrecorrentes.

A Figura 6.6 ilustra falhas provocadas por sobretensão com a existência de sobrecorrente, para os semicondutores de potência do tipo BstT 68H280S15. Nesses dois casos, ocorreram queimas nas partes laterais das pastilhas.



Figura 6.6 – Tiristores BstT 68H280S15 – falha tipo VI.

g) Falha tipo VII: Tiristores tipo BstT68H280S15, danificados sem marcas visíveis.

A Figura 6.7 ilustra, de forma semelhante às falhas apresentadas como do tipo I, tiristores falhados sem apresentar o problema físico na pastilha de modo visível. A causa mais provável das falhas destas pastilhas é que elas tenham sofrido algum tipo de sobretensão.



Figura 6.7 – Tiristores BstT 68H280S15 – falha tipo VII.

CAPÍTULO 7

PARÂMETROS DEFINIDORES DA DEGRADAÇÃO E INSTRUMENTO DE ENSAIO PARA A AVALIAÇÃO DO ESTADO DOS SEMICONDUTORES

7.1 – CONCEITUAÇÃO DO ESTADO DOS SEMICONDUTORES

Os semicondutores de potência são componentes não reparáveis, normalmente é considerado que eles podem assumir apenas dois estados: o estado normal ou o estado falhado. Esse princípio é levado em consideração nos projetos das válvulas de tiristores dos compensadores estáticos.

As válvulas são dimensionadas para que haja semicondutores adicionais em série, de modo que exista uma redundância de semicondutores em funcionamento. Os semicondutores em

redundância estão continuamente submetidos às solicitações de funcionamento como os demais, mas eles têm como objetivo evitar que haja o imediato desligamento do compensador caso ocorra falha de alguma unidade.

Normalmente, os dispositivos de supervisão e proteção das válvulas de tiristores são projetados para que sinalizem quando houver a falha de uma unidade semicondutora e, o compensador estático seja desligado automaticamente quando, não existindo mais unidades em redundância, ocorra uma nova falha dos semicondutores.

O que se observa de fato é que, mesmo mantendo o conceito dos semicondutores serem componentes não reparáveis, além dos estados normais e falhados, os semicondutores podem ser encontrados em operação com suas características elétricas alteradas, estando portando em estado degradado ou defeituoso. Os semicondutores que se encontram nesse estado, normalmente não são identificados pelos sistemas de supervisão das válvulas, o que eleva o risco de que ocorram desligamentos automáticos, motivados, principalmente pela perda da capacidade de bloqueio da válvula.

Diante do exposto, pode-se afirmar que os semicondutores podem assumir três estados: o estado normal, o estado defeituoso e o falhado, sendo as definições para cada um desses estados as seguintes:

Normal: O semicondutor apresenta suas características elétricas ou mecânicas conforme especificado pelo fabricante, desempenhando a função requerida e operando normalmente.

Defeituoso: O semicondutor ainda desempenha a sua função, continua operando, mas tem suas características elétricas ou mecânicas alteradas, não suportando determinadas solicitações de funcionamento, que suportaria caso estivesse no estado normal.

Falhado: O semicondutor não desempenha a função requerida, estando com alguma de suas características irreversivelmente alterada, normalmente com camadas semicondutoras em curto circuito.

7.2 – PARÂMETROS QUE POSSIBILITAM A AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DOS SEMICONDUCTORES

Os valores das características dos semicondutores, definidos pelos fabricantes, estabelecem limites de capacidade ou de operação. Essas características são propriedades inerentes e mensuráveis tais como propriedades elétricas, mecânicas e térmicas, podendo ser expressas como valores para um dado estado ou condição reconhecida.

No capítulo 5 foram apresentadas as principais características dos semicondutores. Algumas das características especificadas

podem facilmente ser medidas em campo e, possibilitam determinar o estado de degradação em que os semicondutores se encontram.

Para o desenvolvimento das pesquisas foram escolhidas as características relacionadas a seguir, para a determinação do estado dos diodos e tiristores dos compensadores estáticos:

Diodos: V_{RRM} – Tensão Repetitiva de Pico Reversa; I_{RRM} – Máxima Corrente Repetitiva de Fuga Reversa, associando esses parâmetros com a temperatura da junção.

Tiristores: V_{DRM} – Tensão Repetitiva de Pico Direta; I_{DRM} – Máxima Corrente Repetitiva de Fuga Direta; V_{RRM} – Tensão Repetitiva de Pico Reversa; I_{RRM} – Máxima Corrente Repetitiva de Fuga Reversa, associando esses parâmetros com a temperatura da junção.

As medições e análises desses parâmetros, para cada tipo de semicondutor, permitem determinar o grau de degradação com o tempo de funcionamento desses componentes, dando a oportunidade, dentro de uma intervenção programada na válvula de tiristores, de retirar as unidades mais degradadas e evitar que o compensador seja desligado intempestivamente, o que provocaria maiores transtornos operacionais e prejuízos econômicos para a empresa de transmissão.

As medições dessas características dos semicondutores requerem um instrumento de ensaio que permita aplicar e medir altas

tensões (na ordem de kilovolts) e medir baixas correntes (na ordem de miliamperes). O instrumento deve ter também um eficiente circuito de supervisão da corrente, de modo que estando o semicondutor degradado ou em curto-circuito, a aplicação da tensão seja interrompida antes que a corrente suba abruptamente, atingindo valores que venha provocar a evolução da degradação do semicondutor sob teste ou a danificação de outros componentes do circuito.

7.3 – INSTRUMENTO DE ENSAIO UTILIZADO PARA A AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DOS SEMICONDUCTORES

Para as medições das características dos semicondutores foi utilizado um instrumento de ensaio desenvolvido na Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, dentro do projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico firmado entre esta Universidade e a Chesf, intitulado Avaliação da Degradação de Semicondutores de Potência com Uso Contínuo dos Conversores [2] .

O diagrama em bloco da Figura 7.1 mostra o circuito do instrumento de ensaio desenvolvido, com todos os sistemas de aquisição de dados. O circuito é composto por quatro partes principais: (a) inversor de frequência, (b) transformador de alta tensão, (c) módulo de seleção do tipo de ensaio e (d) módulo de controle da temperatura do semicondutor sob ensaio. As partes (a) e (d) possuem malhas de controle independentes e são supervisionadas

por uma CPU, a qual recebe via teclado as referências de tensão, corrente e temperatura do ensaio.

O inversor de frequência tem a função de variar, de modo senoidal com frequência constante, a amplitude da tensão entregue ao lado de baixa tensão do transformador. Assim, no lado de alta obtém-se as tensões correspondentes às exigidas pelos ensaios de bloqueio direto e inverso.

O módulo de seleção é responsável pela aplicação da tensão direta ou reversa entre os terminais de anodo-catodo do semicondutor de potência sob ensaio (TUT).

O módulo de controle da temperatura fornece a corrente para o resistor de aquecimento que fornecerá calor ao o semicondutor sob ensaio e, se consiga a temperatura da junção correspondente àquelas exigidas no catálogo do fabricante.

Além de ser responsável pelo controle das malhas a CPU irá também administrar as informações obtidas e disponibilizá-las através de monitor de vídeo e impressora.

O conjunto dispõe de um sistema de aquisição de dados, com placas conversoras de alta velocidade e alta resolução, para operarem em conjunto com os diferentes tipos de sensores e amplificadores de sinais a serem utilizados nos circuitos de ensaios desenvolvidos, de forma que os sinais obtidos possam vir a ser tratados com técnicas avançadas de processamento de sinais

possibilitando avaliações mais profundas das características dos mesmos.

Essas técnicas de processamento de sinais visam a eliminar dos sinais aquisitados ruídos de medida bem como uma concentração de parâmetros referentes a esses mesmos sinais, possibilitando até a utilização de técnicas de inteligência artificial para um diagnóstico automático das características dos semicondutores avaliados.

Os valores das tensões e correntes medidas durante os ensaios são aquisitados pelo sistema com um intervalo de tempo de 50 μ s. O banco de dados formado permite que sejam traçadas as curvas características tensão x corrente, assim como curvas das tensões e das corrente em função do tempo.

O transformador de alta tensão possui a relação de transformação de 220/7500 V, de modo que o instrumento pode ensaiar semicondutores com diferentes características nominais, inclusive aqueles de geração mais recente, cujas tensões máximas repetitivas diretas e reversas atingem valores acima de 8000 V.

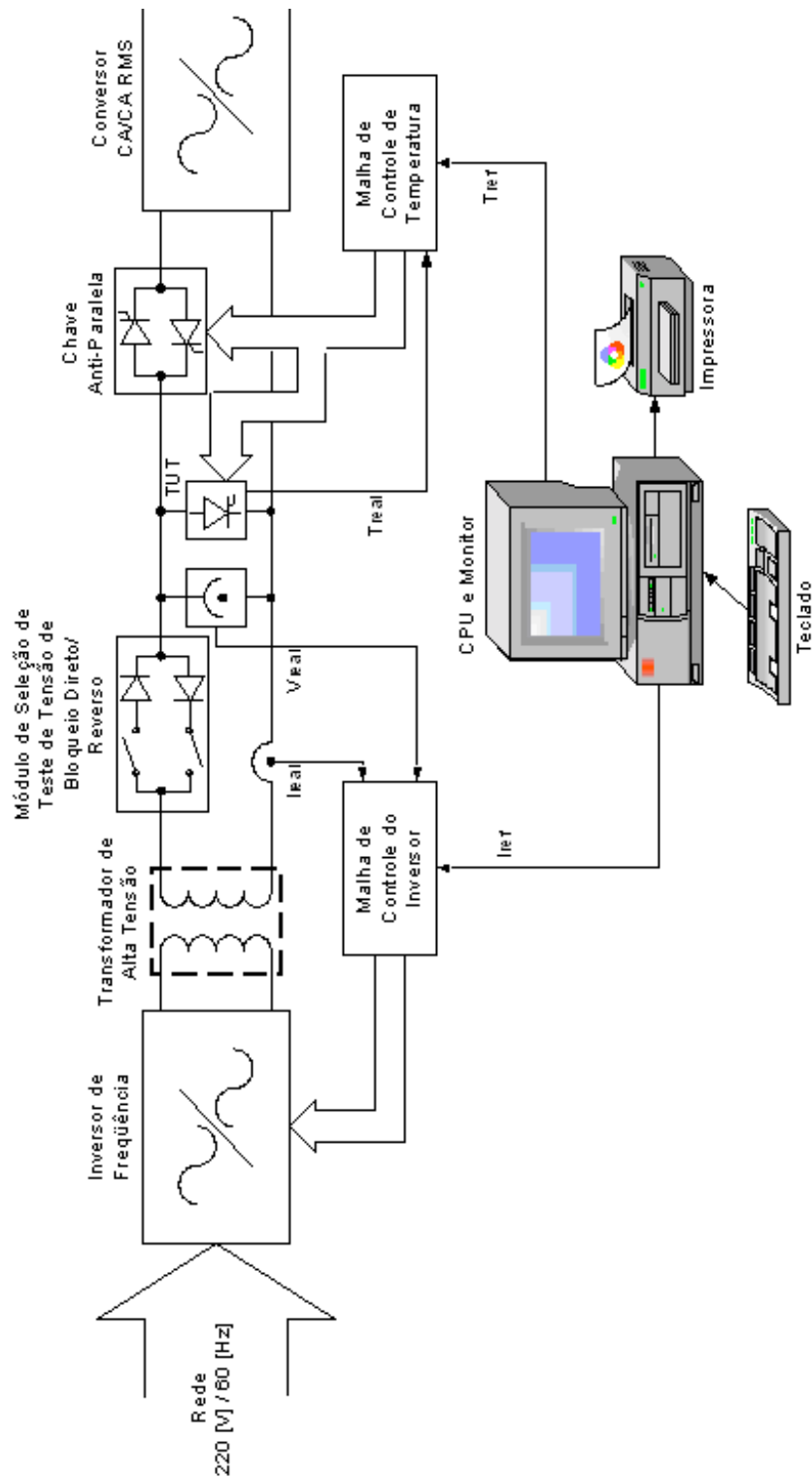


Figura 7.1 – Diagrama de blocos do instrumento de ensaios.

Para a medição da tensão de ensaio aplicada ao semicondutor, o instrumento possui um sensor de tensão de efeito Hall conectado no lado de alta tensão do transformador. O sensor Hall converte a corrente em seu primário, que é proporcional a alta tensão aplicada, em baixas tensões de saída, que são utilizadas pelos circuitos eletrônicos de aquisição de dados. Na figura 7.1, essa tensão é denominada por V_{real} .

A medição da corrente de ensaio também é feita através de um sensor tipo Hall conectado no lado de alta tensão do transformador. A tensão de saída do sensor Hall de corrente alimenta os circuitos eletrônicos de medição e aquisição de dados. Na figura 7.1, a saída desse sensor é denominada por I_{real} .

Para o compensador estático tipo CCT que fez parte das pesquisas, considerando a simplicidade do arranjo da válvula, permitindo a montagem e desmontagem da válvula com relativa facilidade, os ensaios dos semicondutores desse compensador foram realizados removendo cada semicondutor por vez, sendo remontadas as unidades consideradas aprovadas nos ensaios.

Para que fossem aplicadas as devidas pressões de contatos nos semicondutores ensaiados fora da válvula, uma prensa foi desenvolvida, onde os semicondutores foram inseridos e os ensaios realizados. A figura 7.2 ilustra a prensa utilizada.



Figura 7.2 – Prensa para ensaios dos semicondutores.

Esta prensa também se prestou para a realização dos ensaios de elevação de temperatura dos semicondutores. A base suporte inferior da prensa contém o resistor de aquecimento, cuja corrente é controlada pelo módulo de controle de temperatura. Na base superior da prensa foi fixado um sensor infravermelho para a medição da temperatura do semicondutor. Quando o sensor no lado superior media a temperatura de referência do ensaio, a corrente do resistor da base inferior era interrompida, pois o conjunto já tinha atingido a temperatura desejada.

No caso dos ensaios realizados no compensador estático tipo RCT, como o arranjo dos tiristores da válvula deste compensador é complexo, sendo cada módulo de tiristores, conforme mostra a figura 3.10, composto por oito níveis de tiristores e cada nível com quatro tiristores, formando cada par de tiristores um conjunto paralelo e

antiparalelo, o que resulta em um certo grau de dificuldade para a montagem e desmontagem desses componentes, o instrumento de ensaio foi desenvolvido de modo que os tiristores fossem ensaiados diretamente nos módulos, sem que houvesse inicialmente qualquer necessidade de desmontagem dos tiristores e modificação do arranjo dos módulos que formam a válvula. Para isso, foram desenvolvidas placas de interface entre a unidade de ensaio e os módulos, sendo essas placas colocadas no lugar das placas da eletrônica de tiristores.

CAPÍTULO 8

AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

8.1 – INTRODUÇÃO

Foram ensaiados 416 semicondutores pertencentes ao compensador estático do tipo RCT, instalado na subestação de Fortaleza, e 75 semicondutores pertencentes ao compensador estático do tipo CCT, instalado na subestação de Mossoró. A metodologia aplicada permitiu a identificação de semicondutores em diferentes estágios de degradação e, a retirada de operação das unidades consideradas defeituosas.

Os ensaios realizados constaram da aplicação de tensões V_{RRM} – Tensão Repetitiva de Pico Reversa (para diodos e tiristores) e de tensões V_{DRM} - Tensão Repetitiva de Pico Direta (para os

tiristores) e, observadas as características tensão x corrente de cada semicondutor de modo a possibilitar a classificação do estado desses componentes de acordo com a suportabilidade à tensão aplicada, levando em consideração que diferentes estágios de degradação fornecem diferentes curvas características. Os semicondutores degradados também apresentam correntes com diferentes amplitudes e formas de ondas.

Foram também realizados ensaios em semicondutores com diferentes temperaturas de junção, com o objetivo de verificar o comportamento da capacidade de bloqueio desses componentes com temperaturas de junção mais elevadas, de modo a se conhecer o comportamento do semicondutor em condições mais próximas das condições reais de operação.

Os valores limites de V_{RRM} , V_{DRM} , I_{RRM} e I_{DRM} estabelecidos pelos fabricantes, para cada tipo de semicondutor ensaiado, foram prefixados no programa de controle do instrumento de ensaios, de forma a assegurar que os semicondutores não estariam sendo estressados, durante a realização dos ensaios, com a violação de seus limites nominais.

8.2 – ENSAIOS NO COMPENSADOR ESTÁTICO TIPO CCT

A válvula do compensador estático tipo CCT é formada por tiristores dos tipos FT500AH-70 e FT1000BV-70 e por diodos dos tipos FD500EV-70 e FD1000A-56. Foram ensaiados 24 tiristores do

tipo FT500AH-70, 12 tiristores do tipo FT1000BV-70, 24 diodos do tipo FD500EV-70 e 15 diodos do tipo FD1000A-56. Os ensaios foram realizados com os tiristores na temperatura ambiente, que variou na faixa de 25 a 34°C.

8.2.1 – Ensaios nos Tiristores do Tipo FT500AH-70

De acordo com as especificações do fabricante, o tiristor tipo FT500AH-70 tem as tensões V_{RRM} e V_{DRM} iguais a 3500 volts e as correntes I_{RRM} e I_{DRM} limitadas em 30 miliamperes. Do total de 24 tiristores FT500AH-70, apenas um não suportou a aplicação da tensão V_{DRM} , com a corrente atingindo seu limite quando a tensão ainda era entorno de 3200V. A figura 8.1 mostra os resultados dos ensaios de tensão máxima direta para este tipo de tiristor.

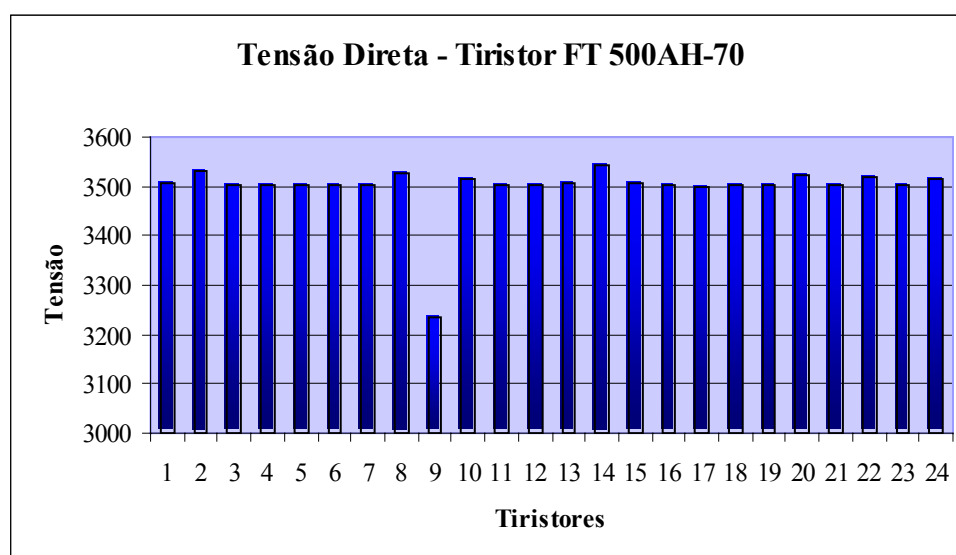


Figura 8.1- Tensões V_{DRM} suportadas pelos tiristores FT500AH-70.

Com relação à tensão V_{RRM} , todos os tiristores suportaram a tensão aplicada, inclusive àquele tiristor que não a tinha suportado no sentido direto. A figura 8.2 mostra os resultados dos ensaios de tensão máxima reversa.

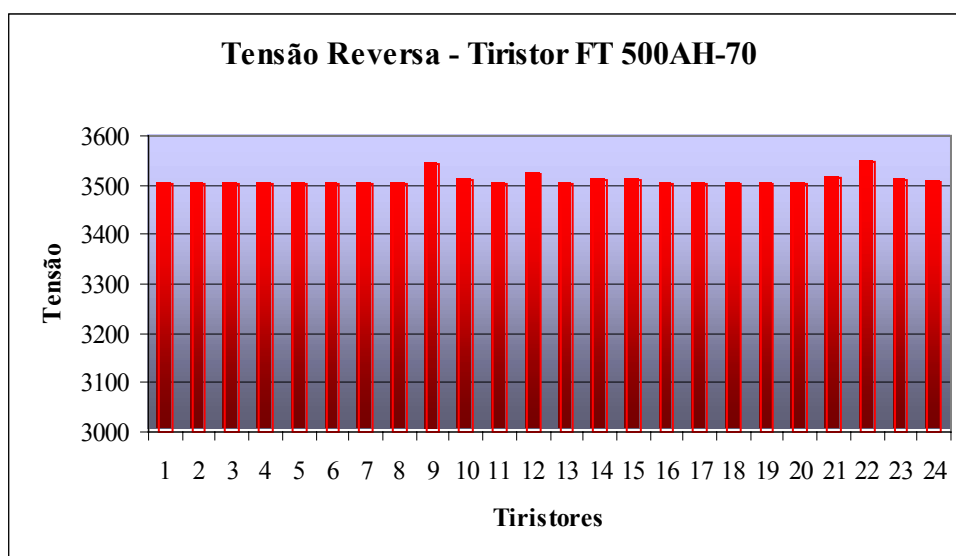


Figura 8.2 - Tensões V_{RRM} suportadas pelos tiristores FT500AH-70.

A figura 8.3 mostra a tela do instrumento de ensaio durante as aplicações das tensões V_{DRM} (tela do lado direito) e V_{RRM} (tela do lado esquerdo), no tiristor que não suportou a tensão V_{DRM} (o de número 9 nas figuras 8.1 e 8.2). As duas telas mostram as características tensão x corrente em cada uma das situações, sendo que a corrente obtida no ensaio da tensão direta foi suficiente para atuar a proteção do instrumento de ensaio, enquanto a característica tensão x corrente do ensaio com tensão reversa não diferencia das características dos tiristores em estado normal.

Este tiristor embora estivesse degradado, com suas características nominais alteradas, em condições de operações

normais do compensador, ele ainda desempenhava a suas funções, o que caracteriza o estado de defeituoso. Este tiristor defeituoso não era identificado pelo sistema de supervisão da válvula do compensador estático, pois em regime permanente, a máxima solicitação de tensão, quando este tiristor está bloqueado, fica em trono de 1360 V. Seria necessária uma evolução da degradação, levando ao estado de tiristor falhado, para que o sistema de supervisão identificasse a anormalidade do componente.

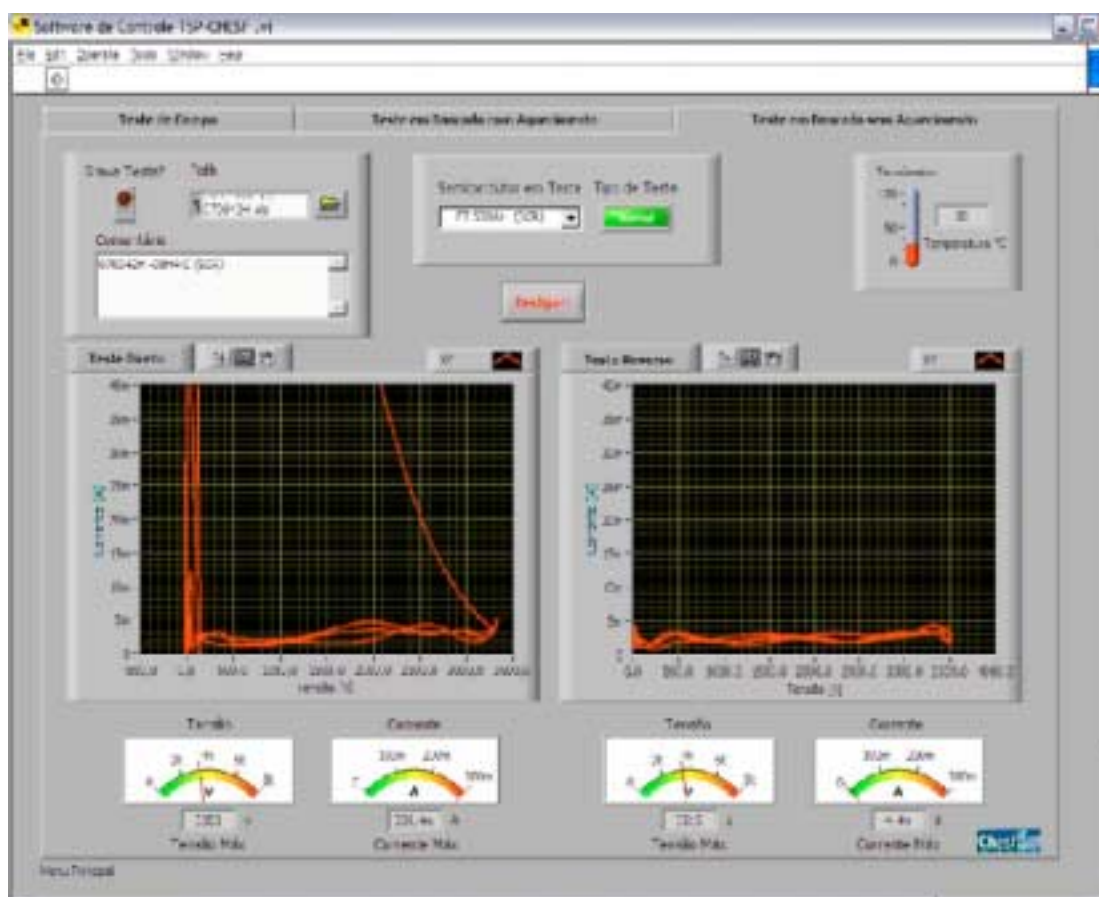


Figura 8.3 – Tela do instrumento de ensaio do tiristor de número 9, que não suportou a aplicação da tensão V_{DRM} .

Outro tiristor deste mesmo lote de tiristores FT500AH-70 ensaiados, o de número 11 nas figuras 8.1 e 8.2, mesmo tendo suportado as tensões de bloqueio direto e reverso, apresentou um comportamento da corrente diferente dos demais tiristores, evidenciando um estado de degradação. A figura 8.4 mostra a curva característica tensão x corrente deste tiristor, quando aplicada a tensão direta, onde se observa que antes de ser atingida a tensão V_{DRM} existe uma tendência de crescimento da corrente entre o anodo e o catodo. Esse comportamento diferencia-se, significativamente, do comportamento de um tiristor em estado normal, por exemplo o de número 23 nas figuras 8.1 e 8.2, onde se observa que não existe tendência ao crescimento da corrente na tensão V_{DRM} , conforme mostra a figura 8.5.

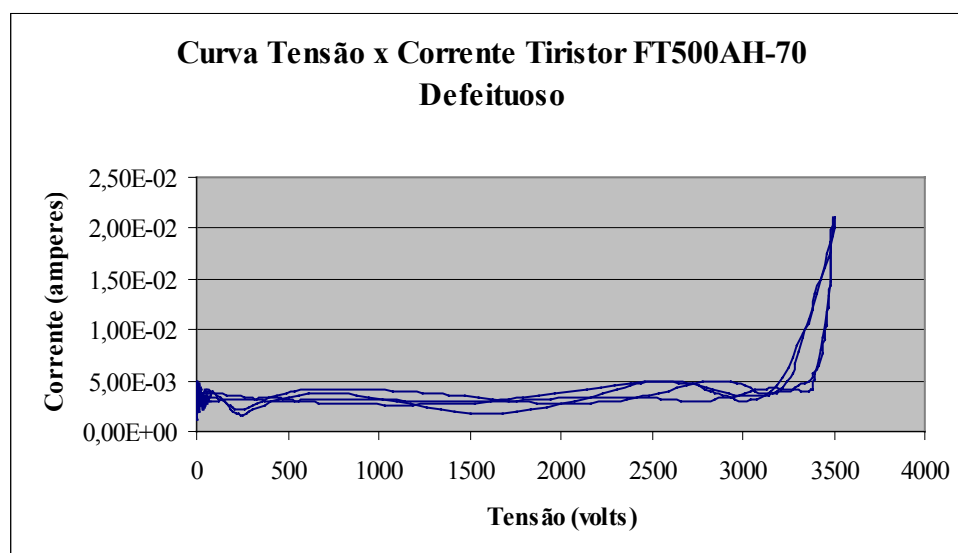


Figura 8.4 – Curva característica tensão x corrente tiristor de número 11, em estado defeituoso.

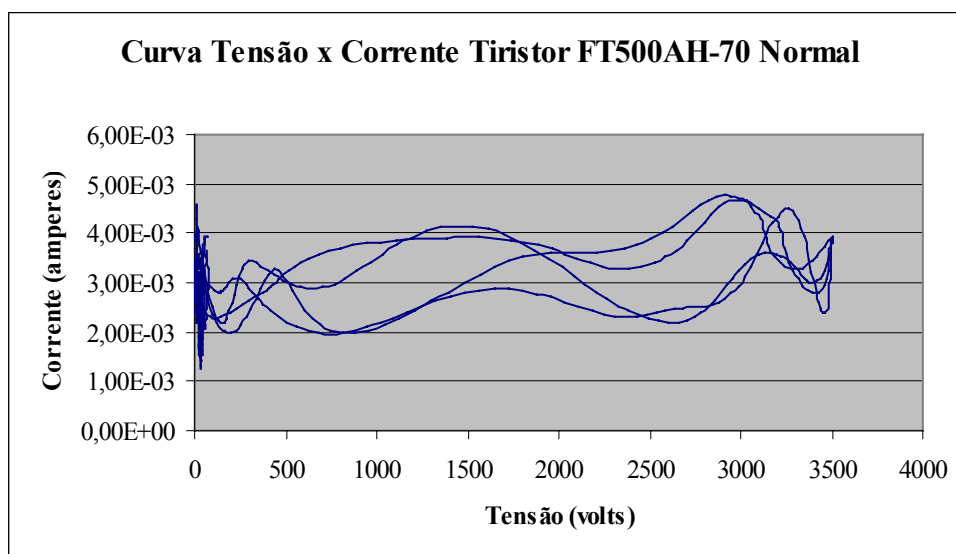


Figura 8.5 – Curva característica tensão x corrente tiristor de número 23, em estado normal.

As figuras 8.6 e 8.7 mostram respectivamente, as formas de ondas das tensões de polarização direta e das correntes associadas dos tiristores de números 11 e 23 em função do tempo.

Analisando as formas de ondas das tensões de polarização direta e das respectivas correntes em função do tempo dos tiristores de números 11 e 23, verifica-se que, quando a tensão entre o anodo e o catodo do tiristor defeituoso (número 11) atinge aproximadamente 3200 V, a corrente começa a aumentar, com a mesma forma de onda da tensão, assumindo característica resistiva. Para o tiristor 23, em bom estado, o aumento do valor da tensão, até o valor da V_{DRM} ser atingida, não provoca aumento significativo da corrente.

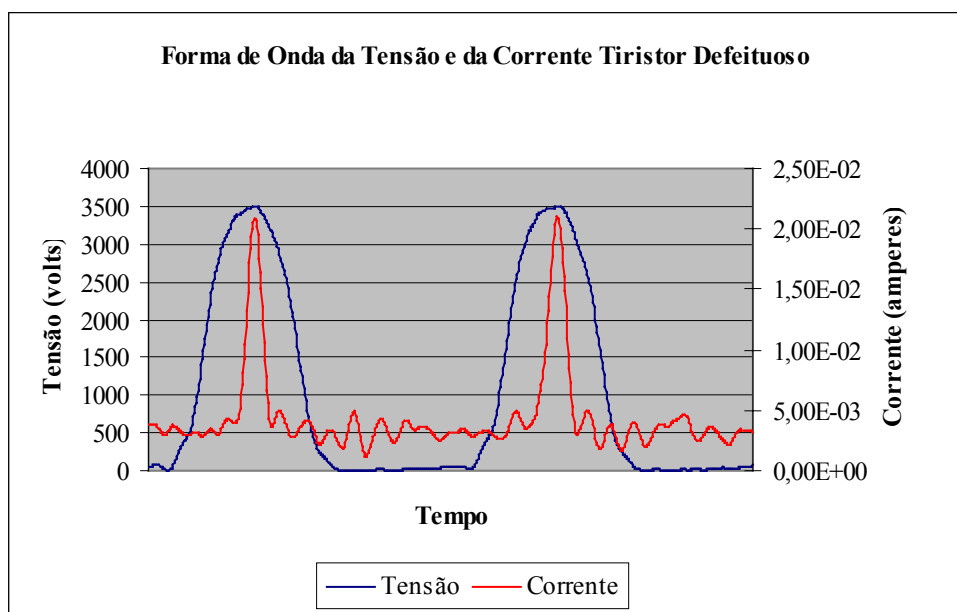


Figura 8.6 – Forma de onda da tensão e da corrente do tiristor de número 11.

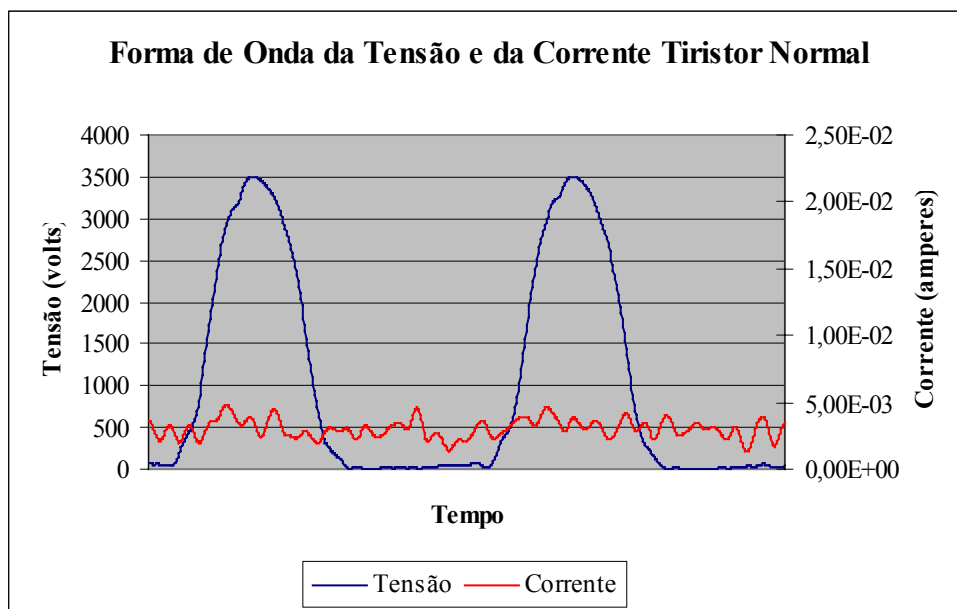


Figura 8.7 – Forma de onda da tensão e da corrente do tiristor de número 23.

8.2.2 – Ensaios nos Tiristores do Tipo FT1000BV-70

O fabricante do tiristor tipo FT1000BV-70 especifica as tensões V_{RRM} e V_{DRM} iguais a 3500 volts e as correntes I_{RRM} e I_{DRM} limitadas em 30 miliamperes. Foram ensaiados 12 tiristores desse tipo, mas nem todas as unidades suportaram as tensões máximas de bloqueios direto e reverso. As figuras 8.8 e 8.9 mostram os gráficos das tensões V_{DRM} e V_{RRM} aplicadas a estes tiristores.

Foram encontrados dois tiristores defeituosos. O tiristor de número 6 não suportou as tensões V_{DRM} e V_{RRM} e o tiristor de número 10 não suportou a tensão V_{RRM} . Como a tensão máxima de operação destes tiristores fica entorno de 1360 V, eles ainda conseguiam bloquear com sucesso as tensões diretas e reversas a que estavam submetidos quando em operação. Mas as evoluções das degradações observadas, levariam essas unidades semicondutoras a falharem em serviço.

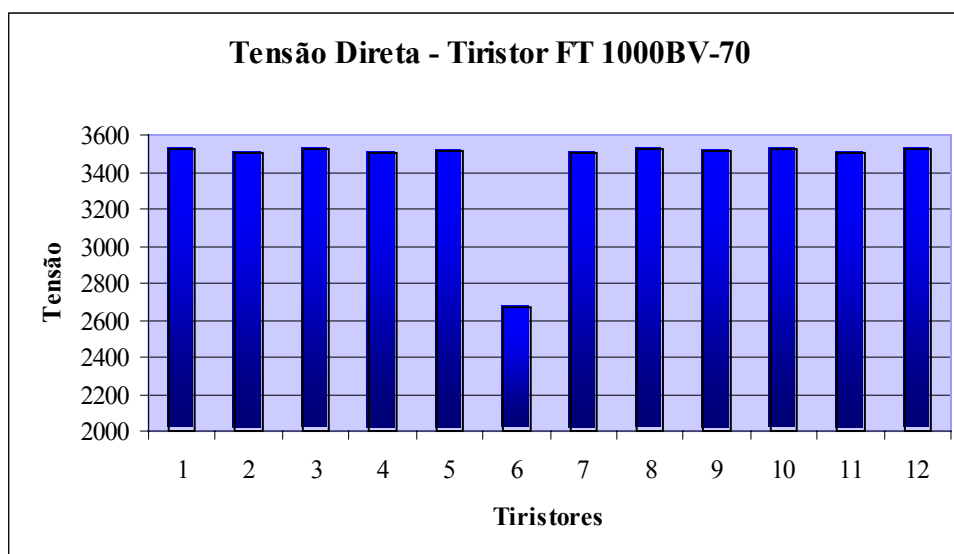


Figura 8.8 – Tensões V_{DRM} suportadas pelos tiristores FT1000BV-70.

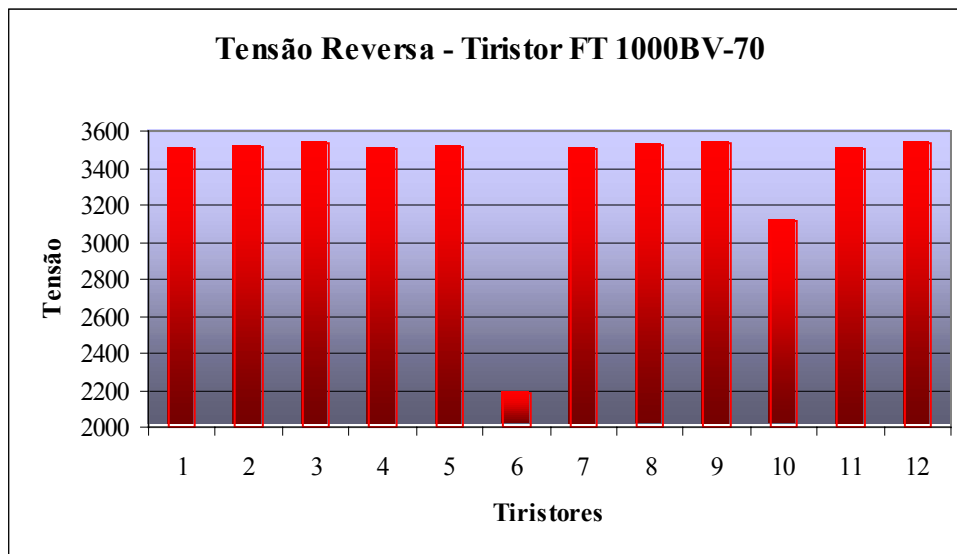


Figura 8.9 - Tensões V_{RRM} suportadas pelos tiristores FT1000BV-70.

8.2.3 – Ensaio nos Diodos dos Tipos FD500EV-70 e FD1000A-56

Os ensaios realizados nos diodos contemplaram 24 unidades do tipo FD500EV-70 e 15 do tipo FD1000A-56. O fabricante destes semicondutores especifica as tensões V_{RRM} respectivamente de 3500 V e 2500 V, e para ambos a mesma corrente máxima repetitiva de fuga reversa igual a 30 mA. As figuras 8.10 e 8.11 mostram os gráficos das tensões aplicadas respectivamente aos diodos de tipo FD500EV-70 e aos de tipo FD1000A-56.

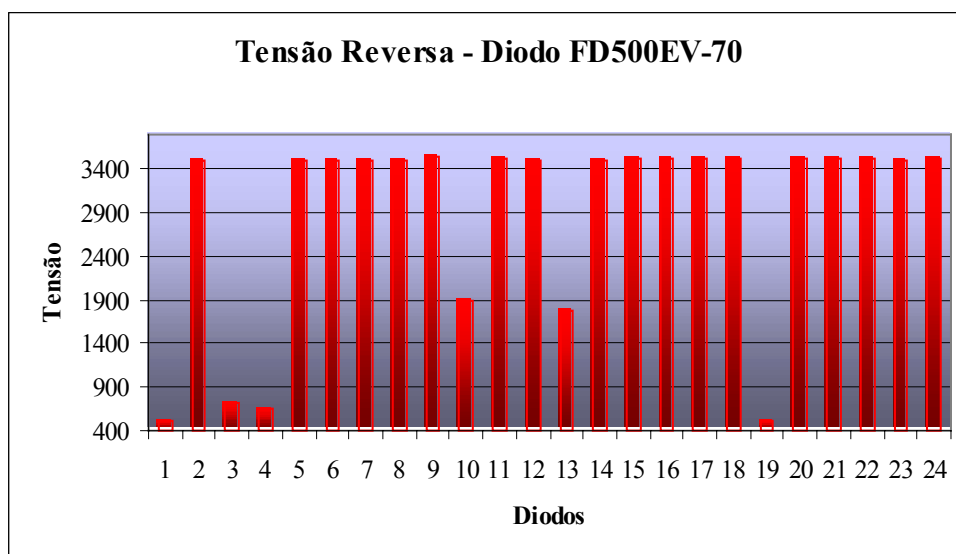


Figura 8.10 - Tensões reversas suportadas pelos diodos FD500EV-70.

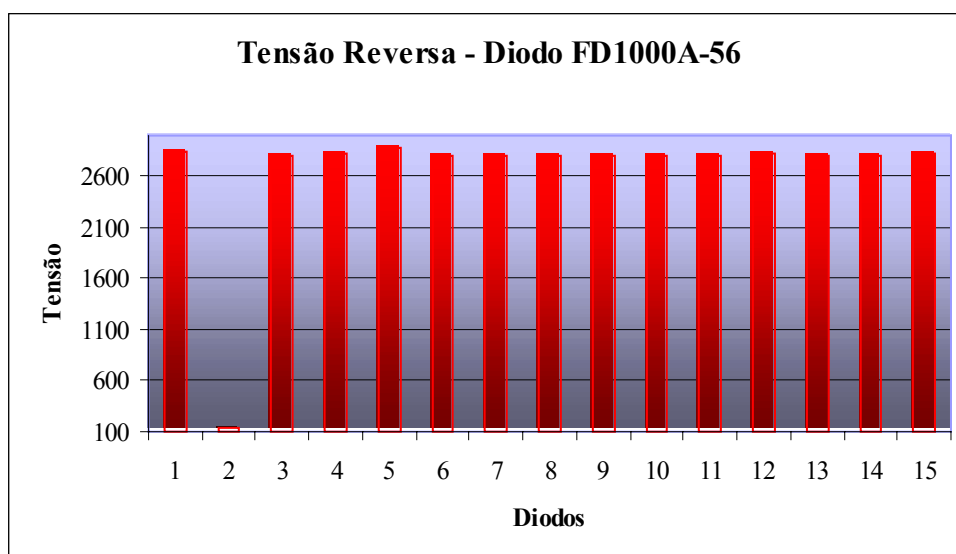


Figura 8.11 – Tensões reversas suportadas pelos diodos FD1000A-56.

A análise dos resultados dos ensaios revelou a existência de quatro diodos do tipo FD500EV-70 falhados (unidades de números 1,3,4 e 19), e dois deste mesmo tipo defeituosos (unidades de

números 10 e 13). Com relação aos diodos tipo FD1000A-56 foi encontrada a unidade de número 2 falhada.

O sistema de supervisão dos semicondutores do compensador estático tinha identificado, antes da realização dos ensaios, a existência de semicondutores falhados na válvula associada aos diodos do tipo FD500EV-70 de números 1, 3 e 4, estando esta válvula já fora de serviço antes do início da programação dos ensaios. No entanto, o sistema de supervisão não tinha identificado o estado de degradação do diodo tipo FD500EV-70 de número 19 e, do diodo tipo FD1000A-56 de número 2. Estas unidades provavelmente estavam defeituosas e, quando da aplicação da tensão de ensaio a degradação evoluiu, levando estes componentes a perderem suas capacidades de bloqueio, não mais desempenhando a função especificada.

A figura 8.12 mostra as formas de onda da tensão e da corrente do diodo do tipo FD500EV-70 de número 3. Em regime de operação normal, este diodo é submetido a uma tensão reversa máxima de 1360 V. Pelo gráfico da tensão e da corrente, a máxima corrente reversa especificada para esse tipo de diodo foi atingida com a tensão reversa por volta de 770 V, o que evidencia que o diodo não mais suportava a tensão de operação do compensador, o que caracteriza o estado de falha. Ressalta-se também que a corrente assumia sua forma senoidal, acompanhado o subimento da tensão já a partir dos 310V.

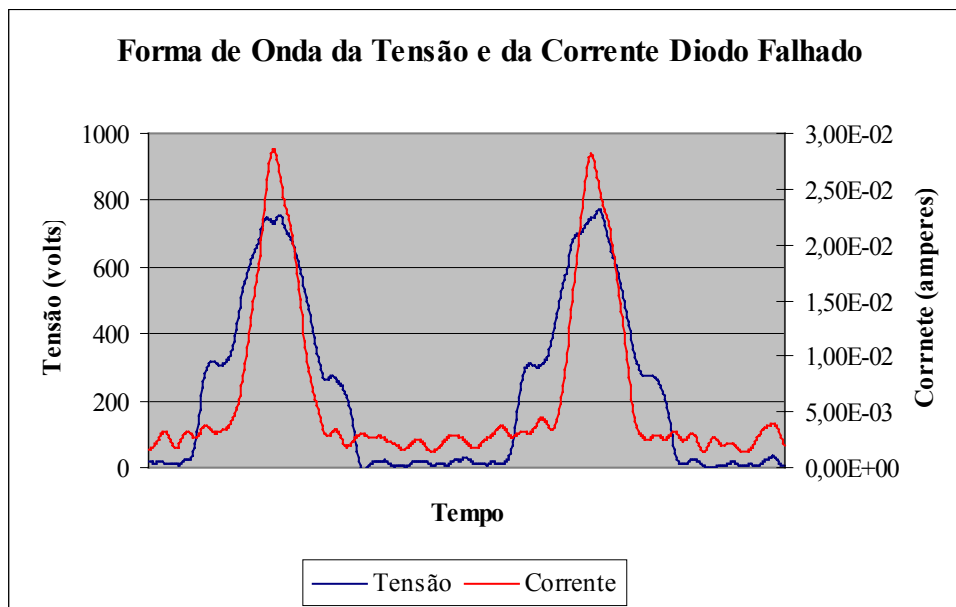


Figura 8.12 - Forma de onda da tensão e da corrente do diodo FD500EV-70 de número 3, em estado falhado.

8.3 – ENASIOS NO COMPENSADOR ESTÁTICO TIPO RCT

A válvula de tiristores do compensador estático (CE) do tipo RCT que fez parte da pesquisa é formada por um único tipo de tiristor, com as seguintes características, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante: V_{DRM} e V_{RRM} iguais a 4,2 kV, I_{DRM} e I_{RRM} iguais a 250 mA.

Conforme citado no capítulo 7, devido à complexidade da válvula, os ensaios foram realizados com todos os tiristores montados diretamente na válvula, sendo o instrumento de ensaio conectado no lugar dos cartões da eletrônica de tiristores e, os ensaios realizados por nível dos módulos de tiristores.

Em cada nível de tiristores, aplicou-se primeiro a tensão numa polaridade, quando dois tiristores foram submetidos à tensão V_{DRM} e dois a tensão V_{RRM} , sendo, em seguida invertida a polaridade da tensão aplicada, quando foi verificada a capacidade de bloqueio desses mesmos tiristores no sentido inverso ao do primeiro ensaio. Caso alguma anormalidade fosse encontrada durante os ensaios, as conexões que fazem o paralelo dos tiristores seriam removidas para identificação da unidade com problema.

As figuras 8.13 e 8.14 mostram os resultados dos ensaios realizados em cada nível dos módulos da válvula de tiristores do compensador estático. Na primeira seqüência de ensaios, todos os tiristores suportaram as tensões aplicadas. Na segunda seqüência de ensaios, foram identificados dois níveis que continham tiristores com a capacidade de bloqueio inferior ao especificado, caracterizando a existência de unidades defeituosas (tiristores dos níveis 10 e 15).

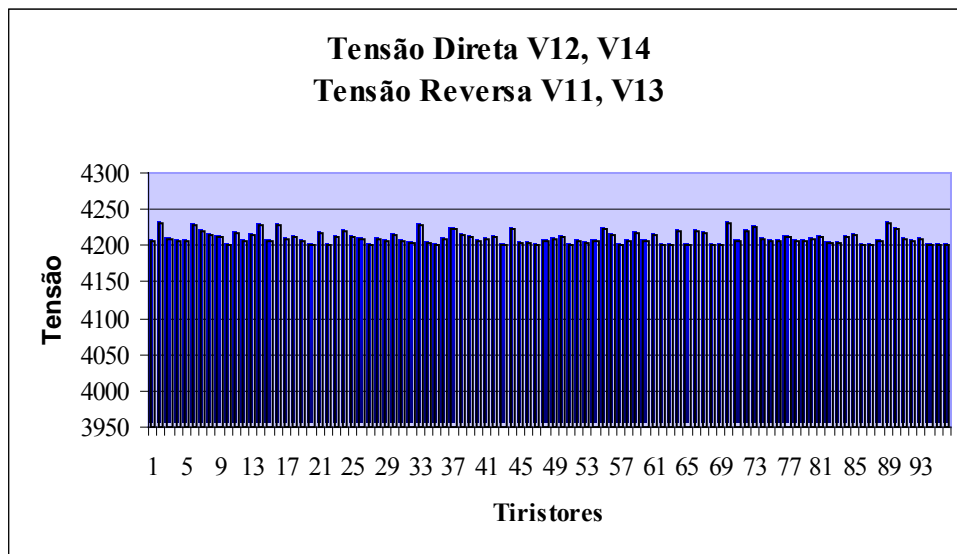


Figura 8.13 – Primeira seqüência de ensaios da válvula do CE tipo RCT.

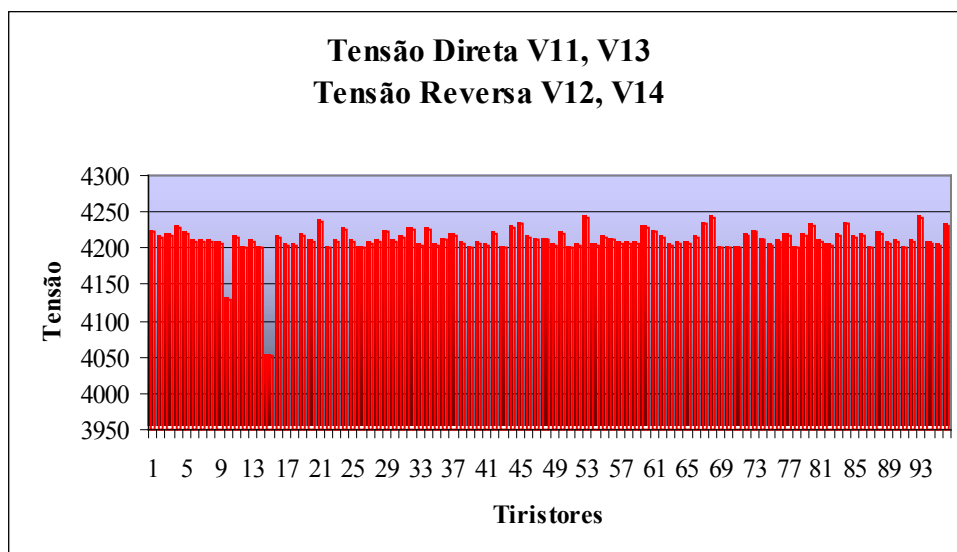


Figura 8.14 – Segunda seqüência de ensaios da válvula do CE tipo RCT.

A figura 8.15 mostra a curva típica da tensão x corrente obtida do ensaio realizado em cada nível dos módulos de tiristores, com todos os semicondutores do nível em estado normal, suportando as tensões V_{DRM} e V_{RRM} , e as correntes com valores bem abaixo do

máximo especificado para estas tensões. A capacidade de bloqueio dos tiristores, suportando as tensões aplicadas, demonstra que os semicondutores estão em bom estado.

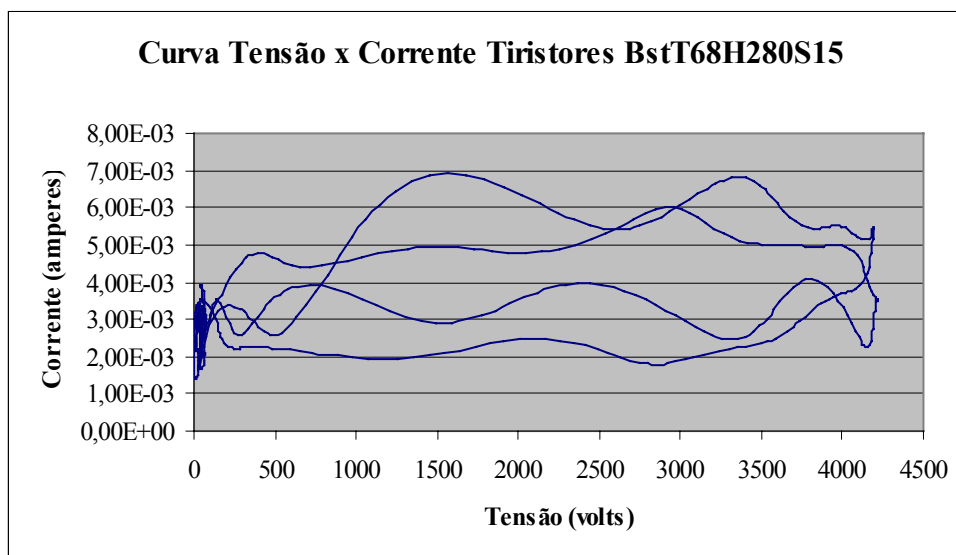


Figura 8.15 – Curva tensão x corrente típica de tiristores BstT68H280S15.

Analisando as tensões e correntes em função do tempo dos mesmos tiristores da figura 8.15, conforme mostra a figura 8.16, observa-se que o valor máximo da corrente ocorre quando do crescimento da tensão aplicada. Esta corrente tem características de uma corrente capacitiva, devendo ser resultado do aumento das regiões de depleções das junções dos tiristores, que apresentam características capacitivas.

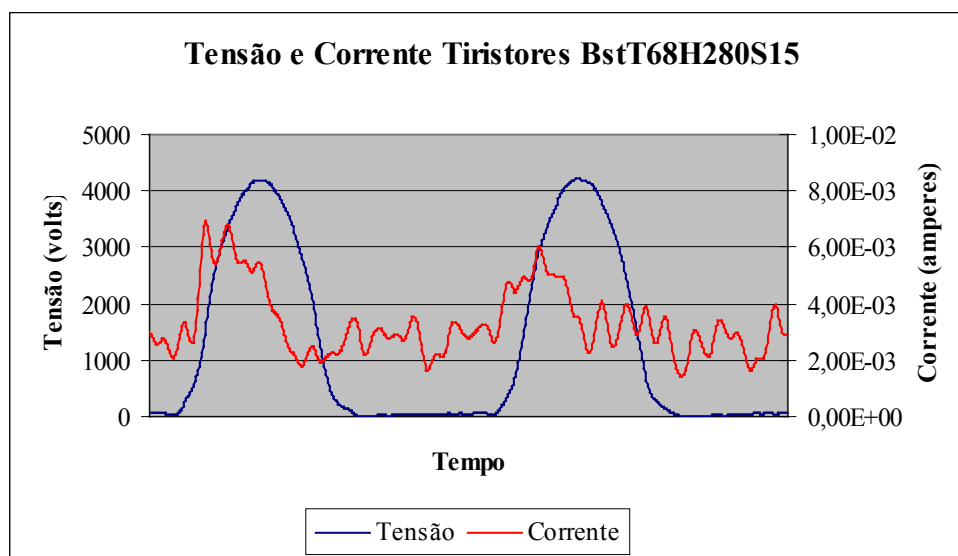


Figura 8.16 - Formas de onda da tensão e corrente tiristores BstT68H280S15 em bom estado.

Foram ensaiados tiristores com diferentes estado de contaminação superficial (poeira) da porcelana, não se observando aumento significativo no valor da corrente de fuga para aquelas unidades com maior contaminação. No entanto, para estas unidades mais contaminadas, observou-se uma maior distorção na forma de onda da corrente, sendo possível que essa distorção seja provocada por pequenas descargas superficiais, que aumentaram o nível de ruído das medições.

Os ensaios realizados nos tiristores danificados mostram significativas alterações nas curvas tensões x correntes, tanto no sentido direto com no sentido reverso. A figura 8.17 mostra essas curvas características das tensões direta e reversa, de um tiristor que

falhou devido a problemas de mau contato elétrico nos cartões da eletrônica de tiristores.

A análise das tensões e correntes no tempo, figuras 8.18 e 8.19, mostra que no sentido direto, o tiristor chegou a suportar 560 V, quando, abruptamente, entrava em condução, reduzindo a tensão anodo-catodo. A entrada em condução do tiristor permitia a elevação da corrente entre esses terminais anodo-catodo.

A degradação desse tiristor provocou uma grande redução da tensão V_{BO} , comprometendo totalmente a sua capacidade de bloqueio. No sentido reverso, a capacidade de bloqueio do tiristor estava ainda mais comprometida, não suportando mais que 250 V, mas o tiristor não entrou no processo de condução como o observado na tensão de sentido direto.

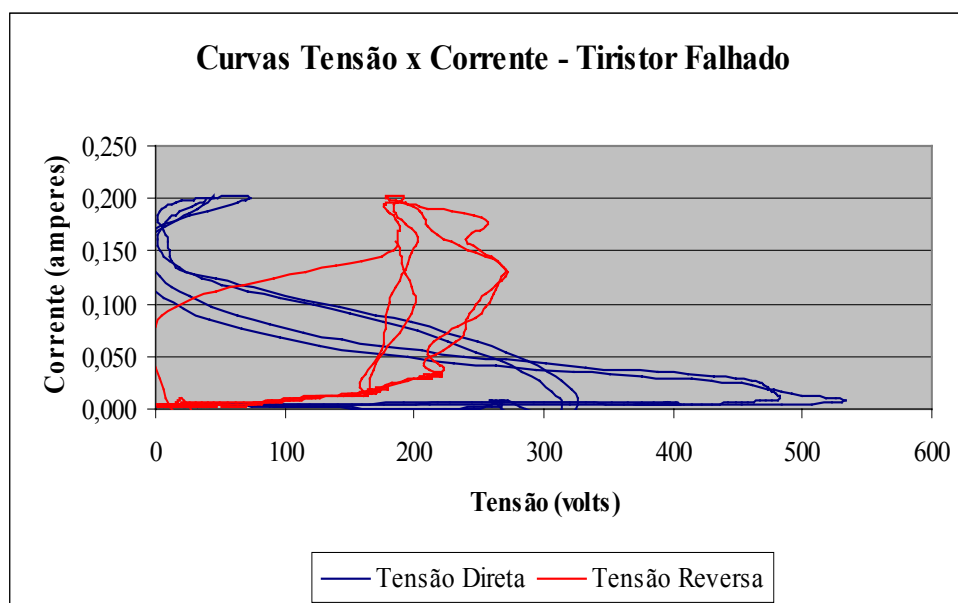


Figura 8.17 – Característica tensão x corrente tiristor falhado.

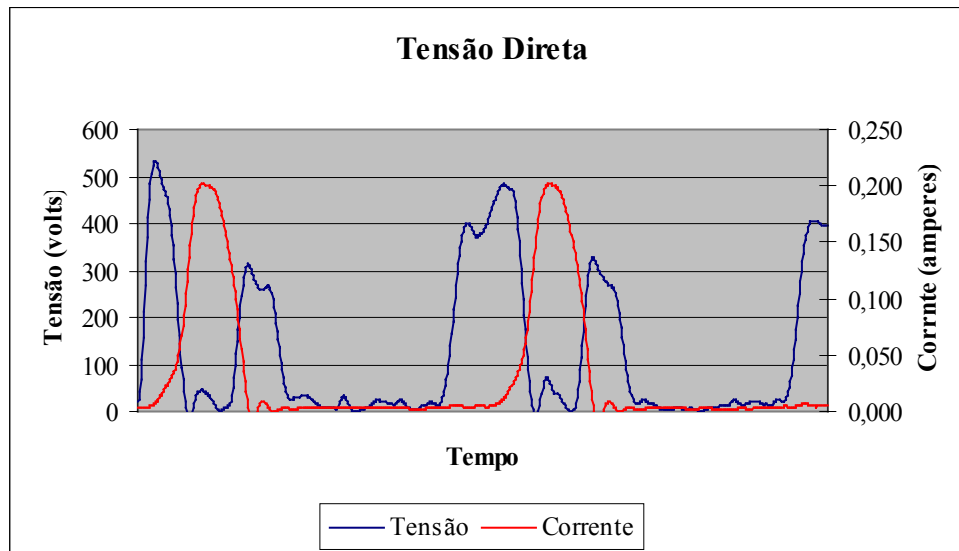


Figura 8.18 – Formas de onda da tensão e da corrente direta de um tiristor falhado.

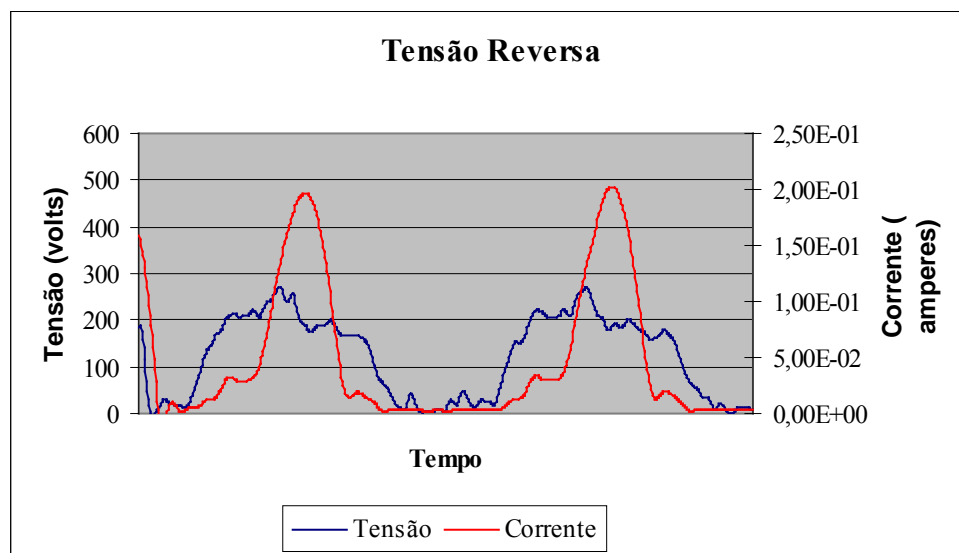


Figura 8.19 - Formas de onda da tensão e da corrente reversa de um tiristor falhado.

8.4 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CAPACIDADE DE BLOQUEIO

Algumas das principais características dos semicondutores são especificadas, associando-se uma temperatura de referência. A literatura [10] apresenta que observações experimentais constataram que a corrente reversa de diodos aumenta aproximadamente 7%/°C. No entanto, pouco já foi publicado sobre o comportamento das correntes reversas e diretas e capacidade de bloqueio dos tiristores quando aquecidos.

Os ensaios realizados nas pesquisas desenvolvidas no presente trabalho, visaram a conhecer como semicondutores classificados de acordo com os critérios apresentados no capítulo 7, como bons ou falhados na temperatura ambiente, comportam-se quando as temperaturas das junções estão próximas das temperaturas em que normalmente estes dispositivos operam.

Os resultados dos ensaios que serão apresentados, foram realizados em um diodo falhado do tipo FD500EV-70, um tiristor em bom estado do tipo FT500AH-70, pertencentes ao compensador estático do tipo CCT e, um tiristor do tipo BstT68H280S15, em bom estado, do compensador estático do tipo RCT.

A figura 8.20 mostra as duas curvas características de tensão reversa do diodo FD500EV-70 nas temperaturas de 35°C e 85°C. Como o diodo estava com a sua capacidade de bloqueio comprometida, a corrente de ensaio não ultrapassou 350 mA. No

entanto, observa-se que para a temperatura de 85°C a capacidade de bloqueio foi bastante reduzida, não suportando o diodo mais que uma tensão reversa de aproximadamente 500V, enquanto que a 35°C chegou a suportar 980 V.

Com relação à corrente, para o gradiente da temperatura de 50°C, ocorreu uma variação de aproximadamente 313%, o que corresponde a 6,26%/°C, não diferenciando muito do valor citado na literatura, mesmo estando o diodo com sua capacidade de bloqueio comprometida.

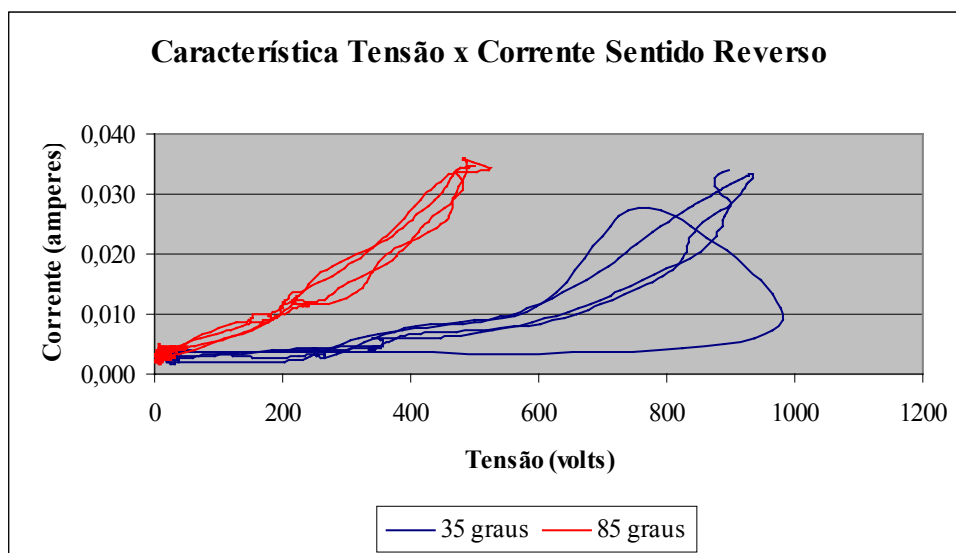


Figura 8.20 - Característica tensão x corrente sentido reverso do diodo FD500EV-70.

Os ensaios realizados no tiristor FT500AH-70 mostram que o tiristor manteve sua capacidade de bloqueio direto e reverso dentro dos valores de sua especificação, conforme mostram as figuras 8.21 e 8.22.

Para o gradiente de temperatura de 52°C , no bloqueio direto, a corrente aumentou 1,86 vezes, o que corresponde a $1,66\%/^{\circ}\text{C}$. No bloqueio reverso, para o mesmo gradiente da temperatura, a corrente aumentou 1,65 vezes, o que corresponde a taxa de $1,25\%/^{\circ}\text{C}$.

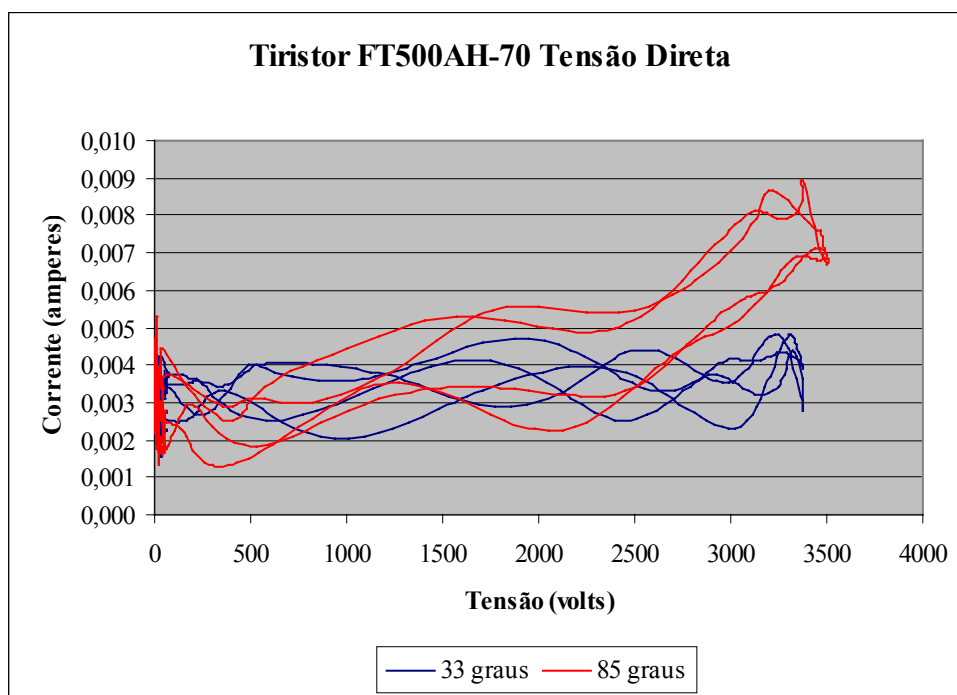


Figura 8.21 – Comparação das características tensão x corrente do tiristor tipo FT500AH-70, com diferentes temperaturas, na tensão de bloqueio direto.

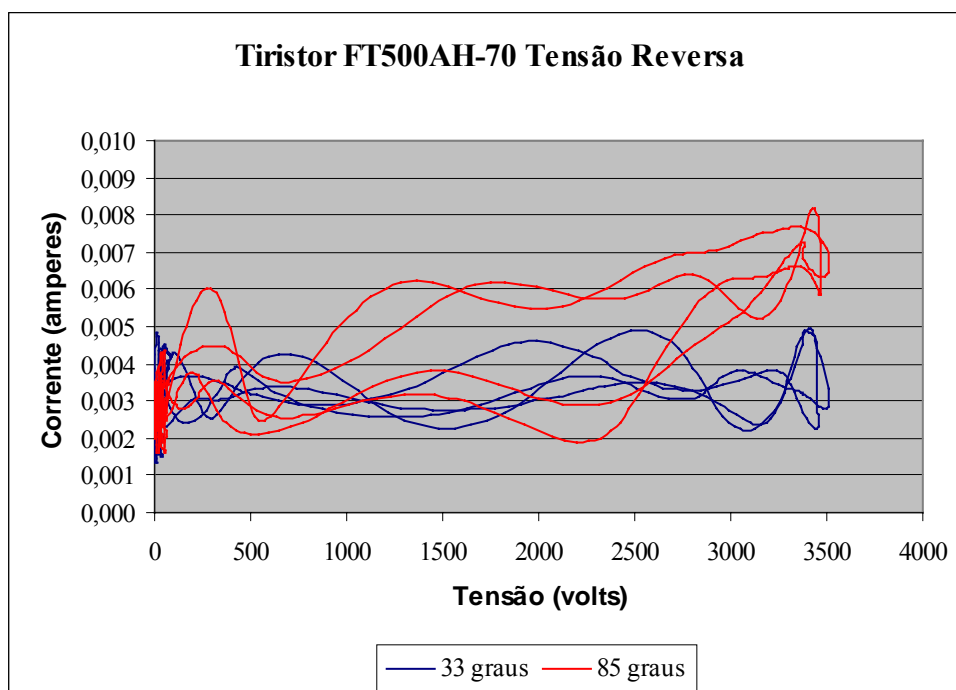


Figura 8.22 – Comparação das características tensão x corrente do tiristor tipo FT500AH-70, com diferentes temperaturas, na tensão de bloqueio reverso.

Os ensaios realizados no tiristor tipo BstT68H280S15 mostram que foi mantida a capacidade de bloqueio do tiristor para uma temperatura de junção de 94°C, conforme mostram as figuras 8.23 e 8.24.

Para a realização dos ensaios, aqueceu-se o tiristor até obter-se uma diferença de 70°C entre cada ensaio. Na aplicação da tensão de bloqueio direto foi encontrada uma taxa de crescimento da corrente de 1,63%/°C e na aplicação da tensão de bloqueio reverso a taxa de 1,67%/°C. Essas taxas são da mesma ordem de grandeza da taxa encontrada no ensaio de tensão no sentido direto do tiristor do tipo FT500AH-70 (1,66%/°C).

Com o tiristor aquecido, as correntes máximas de bloqueio direto e reverso foram da mesma ordem de grandeza, em torno de 12 mA, tendo elas mais que duplicadas para o gradiente de temperatura de 70°C.

As formas de onda das tensões no sentido direto e correntes associadas são mostradas nas figuras 8.25 e 8.26. Com o tiristor aquecido a 94°C, a forma de onda da corrente se aproxima da forma de onda da tensão, quando comparada com a forma de onda com o tiristor a 24°C. A corrente ainda mantém suas características capacitivas, conforme já observado anteriormente para esse tipo de tiristor.

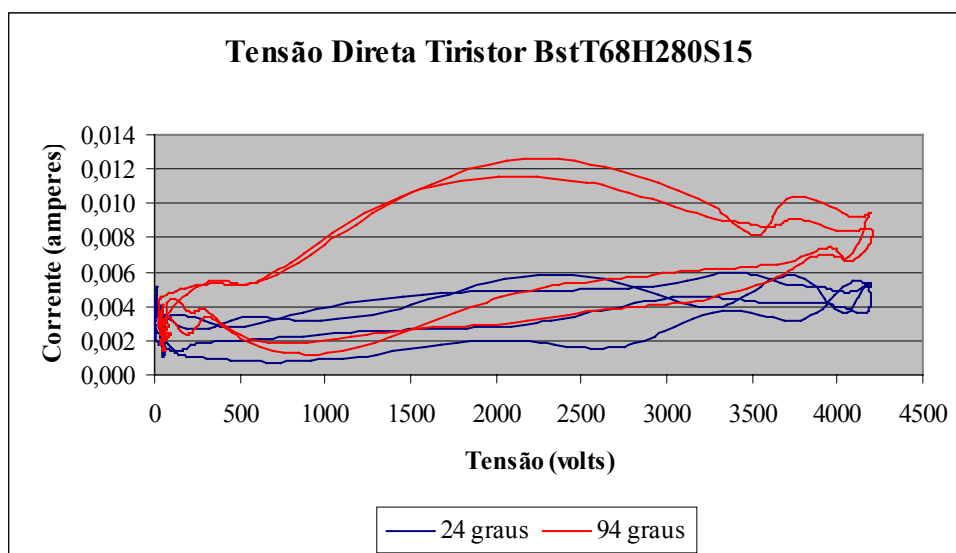


Figura 8.23 - Comparação das características tensão x corrente do tiristor tipo BstT68H280S15, com diferentes temperaturas, na tensão de bloqueio direto.

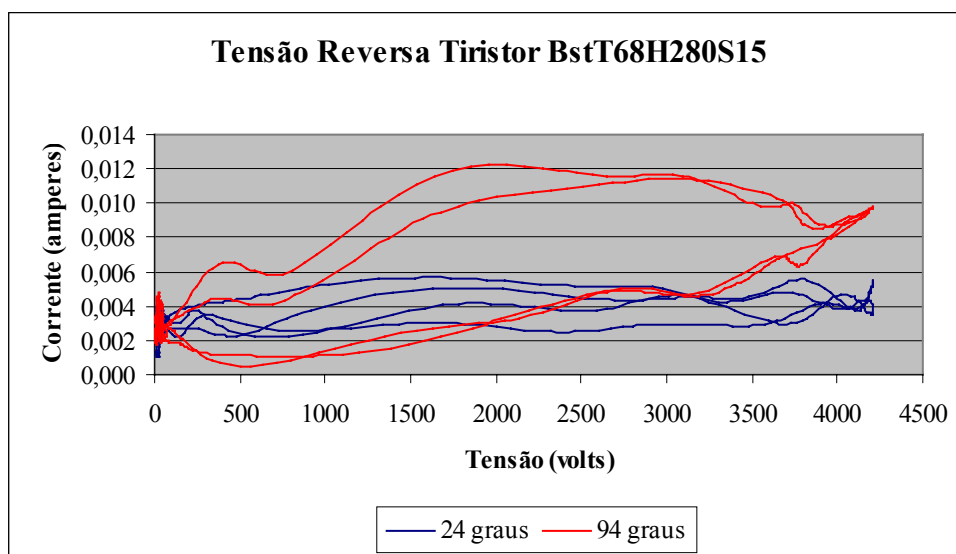


Figura 8.24 - Comparação das características tensão x corrente do tiristor tipo BstT68H280S15, com diferentes temperaturas, na tensão de bloqueio reverso.

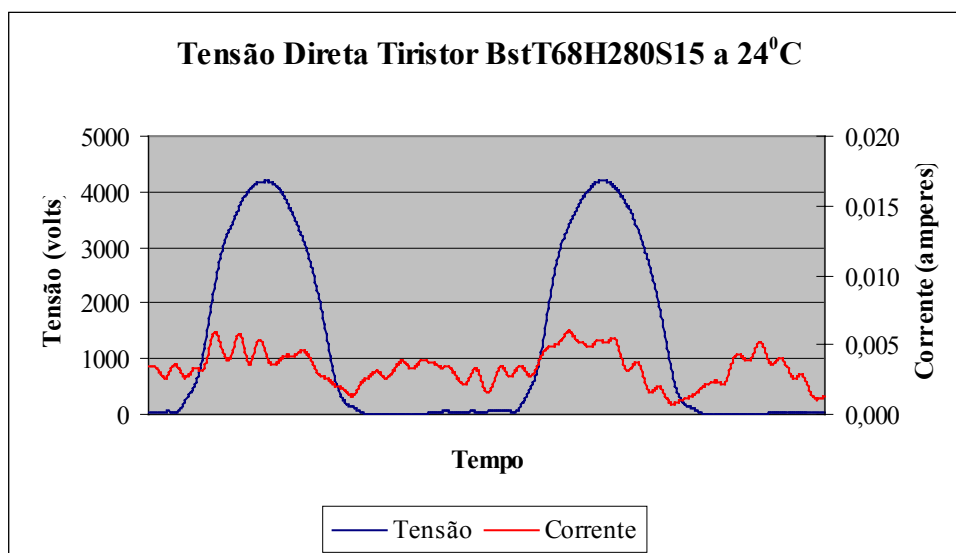


Figura 8.25 – Forma de onda da tensão e da corrente tiristor tipo BstT68H280S15 a 24°C.

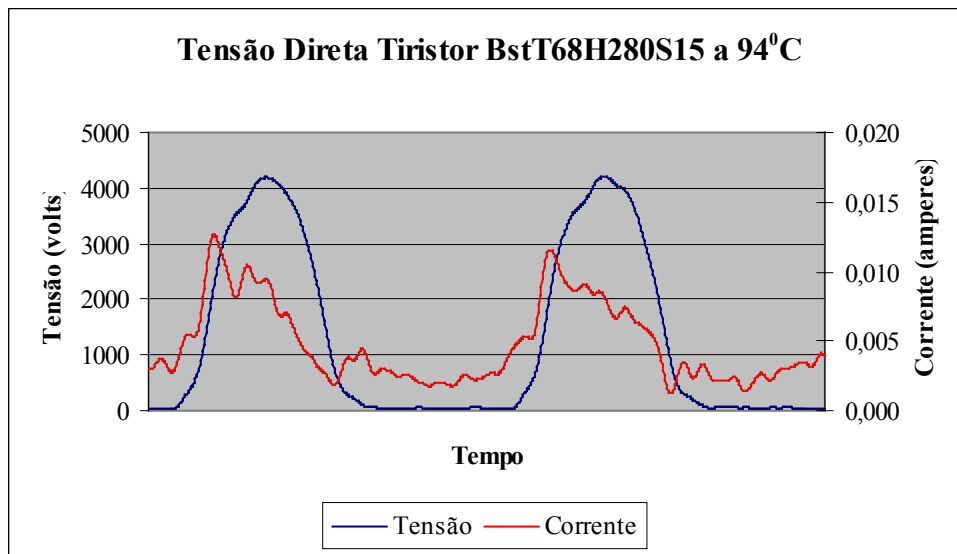


Figura 8.26 - Forma de onda da tensão e da corrente tiristor tipo BstT68H280S15 a 94°C.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O crescimento da demanda por energia elétrica exige a expansão dos sistemas elétricos, com a incorporação de novas tecnologias que proporcionem a melhoria da qualidade dos serviços. Por outro lado, o desenvolvimento de novas metodologias de manutenção para os equipamentos já em operação, é uma necessidade indispensável para a melhoria do desempenho operacional desses equipamentos. O compensador estático, por sua importância para o sistema elétrico, valor econômico do investimento e receita associada para a empresa de transmissão, é um dos equipamentos que melhor se enquadra a este contexto.

Cada compensador estático tem sua característica particular de operação, sendo, portanto, indispensável, desde a fase de projeto

que, os equipamentos sejam especificados de acordo com a situação em que passarão a operar. Para a válvula de tiristores, esta condição é indispensável, considerando que o desempenho da válvula é, fortemente, influenciado pelo projeto do compensador como um todo, incluindo o sistema de disparo dos tiristores e proteções associadas. A grande diferença entre as taxas de falhas dos semicondutores dos dois compensadores que fizeram parte das pesquisas evidencia essa necessidade.

O desempenho operacional do compensador estático pode ser melhorado com a introdução da metodologia de manutenção preventiva apresentada neste trabalho, com a realização periódica de ensaios que avaliem o estado dos semicondutores, de modo a se reduzir o risco de desligamentos automáticos do compensador devido a falhas resultante da evolução da degradação dos semicondutores.

A realização de manutenções preventivas com a periodicidade a ser definida por cada empresa de transmissão, baseada no histórico de cada equipamento, contemplando as medições das tensões máximas repetitivas de bloqueio direto e reverso para os tiristores e da tensão máxima repetitiva de bloqueio reverso para os diodos e, das correntes associadas a cada tensão aplicada, permite avaliar o estado dos semicondutores, e retirar de operação aquelas unidades classificadas com defeituosas, que em operação, apesar de desempenharem suas funções, teriam suas degradações evoluídas para o estado de falha.

A realização dos ensaios não assegura que os semicondutores não irão falhar entre a realização de uma manutenção e outra. Mas a realização dos ensaios permite a retirada de operação de forma programada de unidades que, certamente, irão falhar, reduzindo, portanto, o risco de desligamentos automáticos.

Considerando os valores econômicos envolvidos, com grande diferença de valor para a parcela variável entre uma intervenção realizada no equipamento de forma programada e uma intervenção após o desligamento por falha do equipamento, a implantação da metodologia de avaliação da degradação dos semicondutores se justifica também do ponto de vista econômico.

A temperatura é outro importante parâmetro a ser considerado na avaliação da degradação dos semicondutores, pois pode justificar as eventuais sinalizações intermitentes de falha de semicondutores, informadas pelos sistemas de supervisão de estado dos semicondutores, existentes nos compensadores estáticos. Conforme visto na análise dos resultados dos ensaios realizados nas pesquisas, o aumento da temperatura implica no aumento da corrente de fuga dos semicondutores e para aquelas unidades defeituosas, provoca a redução na capacidade de bloqueio.

A constituição de um banco de dados a partir dos ensaios realizados nos semicondutores, permite a formação do histórico de cada equipamento e o fornecimento de informações para o dimensionamento de reserva técnica e até mesmo o estabelecimento de tendência com relação a expectativa de vida útil.

Entretanto, a realização de ensaios numa válvula de tiristores normalmente envolve um grande número de dados, sendo extremamente conveniente a existência de um sistema de gerenciamento das informações, diretamente atrelado ao sistema de aquisição de dados de ensaios. Esse sistema, como proposição, além de gerenciar o banco de dados, poderia ainda na fase de realização dos ensaios, utilizando técnicas de inteligência artificial, classificar os semicondutores de acordo com o nível de degradação em que se encontram.

Para trabalhos futuros, que dêem continuidade às pesquisas sobre a degradação de semicondutores, propomos o desenvolvimento de um classificador, utilizando a Teoria dos Conjuntos Aproximados (“Rough Sets”), desenvolvida por Zdzislaw Pawlak [14]. Os atributos a serem considerados no desenvolvimento do sistema devem ser os seguintes: tensão repetitiva de pico direta (V_{DRM}); tensão repetitiva de pico reverso (V_{RRM}); corrente máxima repetitiva de fuga direta (I_{DRM}); corrente máxima repetitiva de fuga reversa (I_{RRM}) e a temperatura do semicondutor. O resultado seria a classificação dos semicondutores em Normal; Defeituoso ou Falhado.

Também como proposta, sugerimos o aperfeiçoamento dos sistemas de supervisão dos semicondutores, parte integrante dos compensadores estáticos, de modo que eles próprios pudessem identificar os semicondutores defeituosos, oferecendo o recurso da

manutenção preditiva, onde por meio das medições ou por controle estatístico, a aproximação da ocorrência de uma falha poderia ser prevista.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Almeida, J. L. A. de, – Eletrônica Industrial – Livros Érica Editora Ltda, 4ª edição, 1988.
- [2] Borges da Silva, L. E., Lambert, G., Silva, V., Noronha, I. – Relatórios Projeto de P&D – Avaliação da Degradação de Semicondutores de Potência com Uso Contínuo dos Conversores – Universidade Federal de Itajubá e Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, 2003.
- [3] Borges da Silva, L. E., Reis, L. O., Silva, V. – Eletrônica de Potência e Aplicações Vol 1 – Universidade Federal de Itajubá, 2000.
- [4] Bose, B. K. , – Power Electronics – A Technology Review. IEEE Proceedings , Vol. 80, N^o 8, pgs 1303 - 1330, 1992.
- [5] Branco Filho, G. – Dicionário de Termos de Manutenção, Confiabilidade e Qualidade – Associação Brasileira de Manutenção - Abraman, 1996.
- [6] Erinmez, I. A.. (Editor)– Static VAR Compensators, Working Group 38-01 Task Force N^o 2, CIGRE 1986.

- [7] Gutman, R. , Keane, J. J., Rahman, M. , Veraas, O. – Application and Operation of a Static VAR System on a Power System – American Electric Power Experience. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 1PAS-104, N^o 7, pgs 1868 - 1880, 1985.

- [8] Gyugyi, L. – Fundamentals of Thyristor-Controlled Static Var Compensator in Electric Power System Applications. Electronics Technology Division, Westinghouse R&D Center, 1987.

- [9] Gyugyi, L. , Taylor Jr., E. – Characteristics of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators for Power Transmission System Applications – IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, N^o 5, pgs 1795 - 1804, 1980.

- [10] Millman, J. , Halkias, C. – Integrated Electronics – Analog and Digital Circuits and Systems – McGraw-Hill, 1972.

- [11] Miller, T. J. E. - Reactive Power Control in Electric Systems. John Wiley & Sons, 1982.

- [12] Müller, R. , Schwarz, E. – Confiabilidade – Tabelas e Nomogramas para Uso Prático – Editora Nobel, 1^a edição, 1987.

- [13] Nunes, R. de A. F. – Modelos Probabilísticos em Sistemas Elétricos – EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1995.

- [14] Pawlak, Z. – Rough Sets Theoretical Aspects of Reasoning about Data - Kluwer Academic Publishers, 1991.

- [15] Peterson, T., Reichert, K. – Analysis and Optimization of SVC Use in Transmission Systems. Electra N^o 148, pgs 117 – 123, 1993.

- [16] Sheblé, G. – Reactive Power: Basics, Problems and Solutions IEEE Tutorial Course, 87EH0262-6-PWR, 1987.

- [17] Stevenson Jr., W. D., - Elementos de Análise de Sistemas de Potência – Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda, 1978.

- [18] Watanabe, E. H. , Barbosa, P. G. , Almeida, K. C. , Taranto, G. N. – Tecnologia Facts – Tutorial – SBA Contrle & Automação Vol. 9 N^o 1, 1998.

- [19] Working Group 14.01 Task Force N02 – Valves for Static VAR Compensators - CIGRE, Electra N^o 150, pgs 107 - 111, 1993.

- [20] Working Group 14.17 – Semiconductor Power Device for Use in HVDC and FACTS Controllers - CIGRE, Electra N^o 171, pgs 145 - 146, 1997.
- [21] Zúñiga, P. , Ramírez, J. M. – FACTS: Soluciones Modernas para la Industria Eléctrica – Avance y Perspectiva vol. 20, pgs 235 – 244, 2001.

ANEXO – CARACTERÍSTICAS DOS SEMICONDUCTORES

Dados Técnicos Nominais do Tiristor - tipo BstT68H280S15	Valor
V_{DRM} - Tensão repetitiva de pico direta	4,2 kV
V_{RRM} - Tensão repetitiva de pico reverso	4,2 kV
I_{DRM} – Corrente máxima repetitiva de fuga direta ($T_j=90^{\circ}C$)	250 mA
I_{RRM} – Corrente máxima repetitiva de fuga reversa ($T_j=90^{\circ}C$)	250 mA
$I_{T(RMS)}$ – Corrente eficaz de condução ($T_j=25^{\circ}C$)	2200 A
I_{TSM} – Corrente de surto de condução	23000 A
V_{TM} – Queda de tensão máxima no estado de condução ($T_j=90^{\circ}C$)	2 V
dv/dt – Taxa crítica de crescimento da tensão direta ($T_j=90^{\circ}C$)	1 kV/ μ s
di/dt – Taxa crítica de crescimento da corrente de condução ($T_j=90^{\circ}C$)	50 A/ μ s
I^2t - Capacidade máxima de não repetitiva no sentido direto	$2,65 \cdot 10^6 A^2s$
I_{GT} – Corrente mínima de gatilho	400 mA
I_H – Corrente mínima de condução ($T_j=25^{\circ}C$)	250 mA
t_q – Tempo de comutação	600 μ s
Faixa de operação contínua da temperatura de junção	$-30^{\circ}C$ a $+120^{\circ}C$

TABELA 1

Dados Técnicos Nominais do Tiristor - tipo FT1000BV-70	Valor
V_{DRM} - Tensão repetitiva de pico direta	3,5 kV
V_{RRM} - Tensão repetitiva de pico reverso	3,5 kV
V_{DSM} - Tensão não repetitiva de pico direta	3,5 kV
V_{RSM} - Tensão não repetitiva de pico reverso	3,75 kV
I_{DRM} - Corrente máxima repetitiva de fuga direta ($T_j=125^{\circ}C$)	120 mA
I_{RRM} - Corrente máxima repetitiva de fuga reversa ($T_j=125^{\circ}C$)	120 mA
$I_{T(RMS)}$ - Corrente eficaz de condução	1570 A
I_{TSM} - Corrente de surto de condução	20000 A
V_{TM} - Queda de tensão máxima no estado de condução	2,8 V
dv/dt - Taxa crítica de crescimento da tensão direta	1 kV/ μ s
di/dt - Taxa crítica de crescimento da corrente de condução ($T_j=125^{\circ}C$)	200 A/ μ s
I^2t - Capacidade máxima de não repetitiva no sentido direto	$16,7 \cdot 10^5 A^2s$
I_{GT} - Corrente mínima de gatilho ($T_j=25^{\circ}C$)	250 mA
Faixa de operação contínua da temperatura de junção	$-40^{\circ}C$ a $+125^{\circ}C$

TABELA 2

Dados Técnicos Nominiais do Tiristor - tipo FT500AH-70	Valor
V_{DRM} - Tensão repetitiva de pico direta	3,5 kV
V_{RRM} - Tensão repetitiva de pico reverso	3,5 kV
V_{DSM} - Tensão não repetitiva de pico direta	3,5 kV
V_{RSM} - Tensão não repetitiva de pico reverso	3,5 kV
I_{DRM} - Corrente máxima repetitiva de fuga direta ($T_j=125^{\circ}C$)	30 mA
I_{RRM} - Corrente máxima repetitiva de fuga reversa ($T_j=125^{\circ}C$)	30 mA
$I_{T(RMS)}$ - Corrente eficaz de condução	500 A
I_{TSM} - Corrente de surto de condução	5000 A
V_{TM} - Queda de tensão máxima no estado de condução	2,85 V
dv/dt - Taxa crítica de crescimento da tensão direta	0,2 kV/ μ s
di/dt - Taxa crítica de crescimento da corrente de condução ($T_j=125^{\circ}C$)	100 A/ μ s
I^2t - Capacidade máxima de não repetitiva no sentido direto	$16,7 \cdot 10^5 A^2s$
I_{GT} - Corrente mínima de gatilho ($T_j=25^{\circ}C$)	200 mA
Faixa de operação contínua da temperatura de junção	-40 $^{\circ}C$ a +125 $^{\circ}C$

TABELA 3

Dados Técnicos Nominais do Diodo - tipo FD1000A- 56	Valor
V_{RRM} - Tensão repetitiva de pico reverso	2,5 kV
V_{RSM} - Tensão não repetitiva de pico reverso	2,8 kV
I_{RRM} – Corrente máxima repetitiva de fuga reversa ($T_j=150^{\circ}\text{C}$)	30 mA
$I_{T(RMS)}$ – Corrente eficaz de condução	1000 A
I_{TSM} – Corrente de surto de condução	14000 A
V_{TM} – Queda de tensão máxima no estado de condução ($T_j=25^{\circ}\text{C}$)	1,6 V
I^2t - Capacidade máxima de não repetitiva no sentido direto	$510 \cdot 10^3 \text{ A}^2\text{s}$
Faixa de operação contínua da temperatura de junção	-40°C a $+150^{\circ}\text{C}$

TABELA 4

Dados Técnicos Nominais do Diodo - tipo FD500EV-70	Valor
V_{RRM} - Tensão repetitiva de pico reverso	3,5 kV
V_{RSM} - Tensão não repetitiva de pico reverso	3,8 kV
I_{RRM} – Corrente máxima repetitiva de fuga reversa ($T_j=150^{\circ}\text{C}$)	30 mA
$I_{T(RMS)}$ – Corrente eficaz de condução	500 A
I_{TSM} – Corrente de surto de condução	8000 A
V_{TM} – Queda de tensão máxima no estado de condução ($T_j=25^{\circ}\text{C}$)	1,85 V
I^2t - Capacidade máxima de não repetitiva no sentido direto	$270 \cdot 10^3 \text{ A}^2\text{s}$
Faixa de operação contínua da temperatura de junção	-40°C a $+150^{\circ}\text{C}$

TABELA 5