

TESE

1060

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

**Roteiro para Especificação dos Componentes de um
Conversor de Corrente Alternada em Corrente Contínua**

ADRIANA APARECIDA DOS SANTOS IZIDORO

ITAJUBÁ - Junho

2000

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

**"ROTEIRO PARA ESPECIFICAÇÃO DOS
COMPONENTES DE UM CONVERSOR DE CORRENTE
ALTERNADA EM CORRENTE CONTÍNUA"**

ADRIANA APARECIDA DOS SANTOS IZIDORO

*Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia
de Itajubá como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.*

Orientador: Prof. Ângelo José Junqueira Rezek, Dr.
Co-Orientador: Prof. Jocélio Souza de Sá, Dr.

Itajubá, junho de 2000





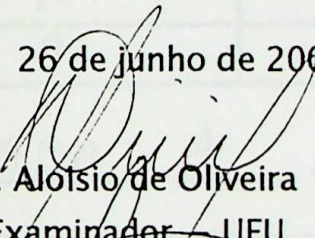
Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

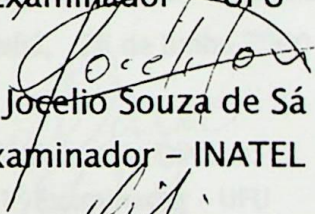
ANEXO I

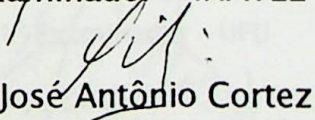
PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

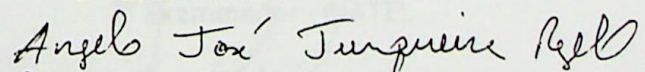
A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria 157 de 21 de junho de 2000, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "Roteiro para Especificação dos Componentes de um Conversor de Corrente Alternada em Corrente Contínua", apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração Automação e Sistemas Elétricos Industriais, satisfeitas as demais exigências regimentais, à Adriana Aparecida dos Santos Izidoro.

Itajubá, 26 de junho de 2000


Prof. Aloísio de Oliveira
1º Examinador - UFU


Prof. Jocelino Souza de Sá
2º Examinador - INATEL


Prof. José Antônio Cortez
3º Examinador - EFEI


Ângelo José Junqueira Resek
4º Examinador - EFEI (Orientador)



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

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Roteiro para Especificação dos Componentes de um Conversor de Corrente Alternada em Corrente Contínua"

Autora: Adriana Aparecida dos Santos Izidoro

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Resultado Médio: Conceito APROVADA A, ou seja, APROVADA

Observação _____

Itajubá, 26 de Junho 2000

Prof. Aloisio de Oliveira.

1º Examinador - UFU

Prof. Jocelio Souza de Sá.

2º Examinador - INATEL

Prof. José Antônio Cortez

3º Examinador - EFEI

Prof. Ângelo José Junqueira Resek

4º Examinador - EFEI (Orientador)

À minha filha Ana Helisa,
e ao meu esposo Paulo,
dedico.

Agradecimentos

A DEUS que me concedeu a graça da vida e a missão de trabalhar para tornar o mundo um lugar melhor, onde o ser humano seja a máxima prioridade de todas as comunidades.

Ao Prof. Angelo José Joaquim Pizer pela confiança depositada no aluno iniciante, pelo apoio humano e pedagógico e pelo profissionalismo demonstrado.

Ao Prof. João Souza de Sá pelo incentivo, paciência e prestatividade nos momentos oportunos e necessários para a realização da orientação deste trabalho.

A todos os funcionários dessa corporação multigrama, mas de forma direta os colegas do Núcleo de Apoio ao Trabalho, pela a disponibilização de uma estrutura satisfatória para o desenvolvimento das atividades de Extensão, Ensino e Pesquisa, Secretaria de Planejamento, que não deixaram esforços em todas as ocasiões.

Ao grande amigo Vinícius, que viveu esse compromisso e crescimento de forma determinante nos estudos de pós-graduação.

Ao meu marido que sempre esteve ao meu lado em todas as etapas desse trabalho.

A minha mãe, que sempre me incentivou e me deu o melhor exemplo de vida.

Aos meus pais e irmãos, que sempre me apoiaram e me incentivaram em todas as etapas desse trabalho.

A FFB, A CAPES, pelo apoio financeiro.

"Se caminhares durante toda sua vida, e um dia ao olhares para traz não achares nem um fruto produzido por tuas mãos, pare, reflita e lembre-se:

Nunca será tarde para fazer algo em prol da vida, tornando suas mãos instrumentos de paz e esperança. Sempre haverá um recomeço, sempre haverá um modo de fazer o que não foi feito".

Paulo Sérgio Izidoro

Agradecimentos

A DEUS que me concedeu o dom da vida e a missão de contribuir para tornar o mundo um lugar melhor, onde o ser humano seja a essência prioritária de todas as conquistas.

Ao Prof. Ângelo José Junqueira Rezek pela confiança depositada no esforço cotidiano, pelo apoio humano e pedagógico e pelo profissionalismo demonstrado.

Ao Prof. Jocélio Souza de Sá pela amizade, paciência e prestatividade nos momentos oportunos e também pela ética com que auxiliou na orientação deste trabalho.

A todos os funcionários desta conceituada instituição, que de forma direta ou indireta contribuíram com seu trabalho para a concretização do meu objetivo, salientando com especial carinho Ana (Laboratório de Eletrotécnica), Carlos e Amélia (Secretaria de Pós-Graduação) que não mediram esforços em todos os momentos.

Ao grande amigo Wendel, que com seu conhecimento e amizade foi determinante nas etapas finais deste trabalho.

Ao meu marido pelo incentivo, paciência, carinho e amor demonstrados em todas as etapas deste objetivo.

À minha filha, que apesar da pouca idade soube compreender com ternura a minha ausência em certos momentos.

Aos meus pais e irmão pela força e colaboração para que este trabalho fosse concluído.

À EFEI, à CAPES pelo suporte educacional e financeiro.

Sumário

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
Resumo	vii
Abstract	viii
1 Introdução	
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estrutura do Trabalho	4
2 Análise do Comportamento das Correntes em Conversores Controlados e Não Controlados	
2.1 Introdução	5
2.2 Tipos de Conversores	6
2.2.1 Conversores Não Controlados Ligados em Ponte Monofásica	7
2.2.2 Conversores Não Controlados Ligados em Ponte Trifásica	14
2.2.3 Conversores Controlados Ligados em Ponte Monofásica	24
2.2.4 Conversores Controlados Ligados em Ponte Trifásica	25
3 Especificação de Tiristores e Diodos	
3.1 Introdução	31
3.2 Especificação em termos de Correntes Normais (capacidade de condução de corrente)	31
3.2.1 Potência das Perdas na Junção	32
3.2.2 Temperatura da Junção	34

3.3	Especificação em termos de Correntes Anormais	42
3.4	Especificação em termos de Tensão	46
3.4.1	Sobretensões de Origem Interna	46
4	Desenvolvimento do roteiro para especificação dos componentes do conversor	
4.1	Introdução	50
4.2	Roteiro de Especificação dos Tiristores e Diodos	50
4.3	Roteiro de Especificação dos Fusíveis	52
4.4	Roteiro de Especificação do Elemento RC	54
4.5	Roteiro de Especificação do Transformador	56
5	Exemplo de Aplicação	
5.1	Introdução	59
5.2	Tiristor	59
5.3	Fusível	62
5.4	Transformador	64
5.5	Elemento RC	65
6	Conclusões	68
Anexo A	Curva da Impedância Térmica do Tiristor SKT760 e do Dissipador 2xP8/180F	70
Anexo B	Curvas Utilizadas na Especificação do Fusível	73
Anexo C	Curvas Utilizadas na Especificação do Elemento RC	76
	Referências Bibliográficas	79

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Conversor Controlado Ligado em Ponte Trifásica	3
Figura 2.1 - Conversor Não Controlado Ligado em Ponte Monofásica	7
Figura 2.2 - Formas de onda da tensão u_2 e u_d	8
Figura 2.3 - Formas de onda das correntes i_2 , i_d e nos diodos	9
Figura 2.4 - Conversor Não Controlado Ligado em Ponte Trifásica	14
Figura 2.5 - Comportamento das Tensões no lado de Corrente Alternada do Conversor	14
Figura 2.6 - Forma de onda da tensão u_d (tensão no lado de corrente contínua do transformador)	15
Figura 2.7 - Corrente no transformador do conversor	16
Figura 2.8 - Formas de onda das correntes	17
Figura 2.9a - Forma de onda das correntes de fase do transformador	19
Figura 2.9b - Formas de onda das correntes de linha	19
Figura 2.10 - Conversor Controlado Ligado em Ponte Monofásica	24
Figura 2.11 - Conversor Controlado Ligado em Ponte Trifásica	25
Figura 2.12 - Forma de onda de $u_{d\alpha}$ para $\alpha=30^\circ$	26
Figura 2.13 - Forma de onda de $u_{d\alpha}$ para $\alpha=45^\circ$	27

Figura 2.14 - Forma de onda de $u_{d\alpha}$ para $\alpha=75^\circ$, carga indutiva	28
Figura 2.15 - Conversor operando com $\alpha=90^\circ$ e alimentando carga indutiva	28
Figura 2.16 - Carga Indutiva e $\alpha =105^\circ$	29
Figura 2.17 - Forma de onda no lado de corrente contínua e de corrente alternada (fase a) do conversor para carga indutiva	30
Figura 3.1 - Curva de Condução de Corrente do Componente	33
Figura 3.2a - Forma de onda da corrente no componente	36
Figura 3.2b - Valor médio da corrente	36
Figura 3.3a - Comportamento real das perdas no componente	37
Figura 3.3b - Comportamento tomado como base para cálculo da temperatura	37
Figura 3.4 - Comportamento da temperatura	37
Figura 3.5 - Impedância térmica transitória do componente	38
Figura 3.6 - Impedância térmica transitória do dissipador	39
Figura 3.7a – Comportamento das perdas	40
Figura 3.7b - Comportamento das perdas pelo método da superposição	40
Figura 3.8 - Comportamento da temperatura da junção	42
Figura 3.9a - Proteção com fusíveis na fase	43
Figura 3.9b - Proteção com fusíveis de ramo	43
Figura 3.10 - Valores (I^2t) do fusível	45
Figura 3.11a - Comportamento da corrente	46
Figura 3.11b - Comportamento da tensão	46
Figura 3.12 - Limitação de Tensão através de Elementos RC	48

Figura 3.13 - Filtro para Limitação de Sobretensões	49
Figura 5.1 - Corrente I_d em função do tempo	60
Figura 5.2 - Tela do software para especificação de Tiristores e Diodos	61
Figura 5.3 - Mensagem emitida pelo programa	62
Figura 5.4 - Gráfico Comparativo	63
Figura 5.5 - Tela do software para especificação dos fusíveis	64
Figura 5.6 - Tela do software para especificação do Transformador	65

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Tabela de Condução	15
Tabela 2.2 - Comportamento das correntes	18
Tabela 2.3 - Valores de Referência	26
Tabela 5.1 - Valores de Tensão do Tiristor SKT760	60
Tabela 5.2 - Outros dados do Tiristor SKT760	60
Tabela 5.3 – Valores de Z_{th}	61

Resumo

O uso de conversores estáticos em sistemas elétricos industriais tem crescido acentuadamente nestas duas últimas décadas. Os conversores comutados pela rede, controlados e não controlados destacam-se devido à grande faixa de aplicação (acionamentos elétricos, eletroquímica, sistemas de suprimento de energia de centrais de telecomunicações, etc).

Uma vez definido o tipo de conversor, é de fundamental importância a escolha técnica e econômica otimizada de seus componentes.

O presente trabalho tem por finalidade o estabelecimento de um roteiro que pode ser tomado como base para especificação do conversor atendendo os objetivos descritos anteriormente.

Desta forma o trabalho aborda:

- especificação dos diodos ou tiristores em termos de corrente e de tensão a partir dos dados da carga e com base em listas técnicas de fabricantes;
- especificação dos dados do transformador do conversor;
- especificação básica dos dispositivos de proteção dos componentes do conversor contra solicitações resultantes de defeitos internos ao conversor (fusíveis e elemento RC).

O roteiro foi estabelecido para conversores ligados em ponte trifásica e ponte monofásica, principalmente para cargas indutivas.

Abstract

The use of static converters in industrial systems is increasing nowadays. The line-commutated controlled and no-controlled converters are greatly used due to the increasing concern of these ones (electric drives, electrochemical, telecommunications supply systems).

When the converter is defined, is the fundamental importance the optimized economic and technical choice of their components.

The present work has a objective the establishment of a procedure for the converter specification.

This way the work approaches:

- specification of diodes or thyristors as a function of the load voltage and current and using technical manufacturer lists;
- converter transformer specification data;
- protective converter specification against internal defects, using fuses and RC components.

The procedure has been specified for graetz three phase bridges and also for single phase bridges mainly in the cases of inductive loads.

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Motivação

Os conversores comutados pela rede sempre foram de grande utilização em sistemas elétricos industriais, abrangendo uma grande área de aplicação dentro dos mesmos, porém a partir de 1970 até os atuais o seu uso aumentou consideravelmente.

Conversores controlados e não controlados de alta potência apresentam um custo elevado e são mais sensíveis a solicitações anormais que outros equipamentos industriais. Desta forma este trabalho pretende apresentar um roteiro para especificação técnica e economicamente otimizada dos principais componentes do conversor.

1.2 - Objetivo

O objetivo desta dissertação é a implementação de um roteiro para especificar os principais componentes de um conversor comutado pela rede, considerando as características e princípio de funcionamento de cada um.

Os conversores para os quais foi desenvolvido este roteiro são os conversores ligados em ponte monofásica ou em ponte trifásica, controlados e não controlados, principalmente alimentando cargas indutivas.

Os componentes que deverão ser especificados estão relacionados abaixo:

- diodos e tiristores,

- transformadores,

- dispositivos de proteção: fusíveis e componentes RC do circuito snubber.

Para atender o objetivo geral mencionado anteriormente foi necessário definir alguns objetivos específicos:

- Especificação dos componentes (diodos e tiristores) em termos de solicitações provocadas por correntes normais.
- Especificação dos componentes em termos de correntes anormais (diodos e tiristores), neste caso a escolha do fusível para proteção dos componentes em termos de I^2t (solicitação térmica anormal de curta duração).
- Especificação dos componentes em termos de tensão, definindo U_{RRM} e U_{DRM} e sua relação com o elemento RC paralelo com o componente. Descreve-se ainda nesta fase a proteção do conversor contra sobretensões de origem externa.
- Definição da potência do transformador para diversos tipos de conversores.
- Quando for o caso, desenvolvimento de software adequado que permita a especificação técnica e econômica otimizada.

Na figura 1.1 a seguir tem-se a título de exemplo, um dos modelos de conversores que será abordado neste trabalho, ilustrando assim os principais componentes para os quais o roteiro de especificação foi desenvolvido.



1.3 - Estrutura de Trabalho

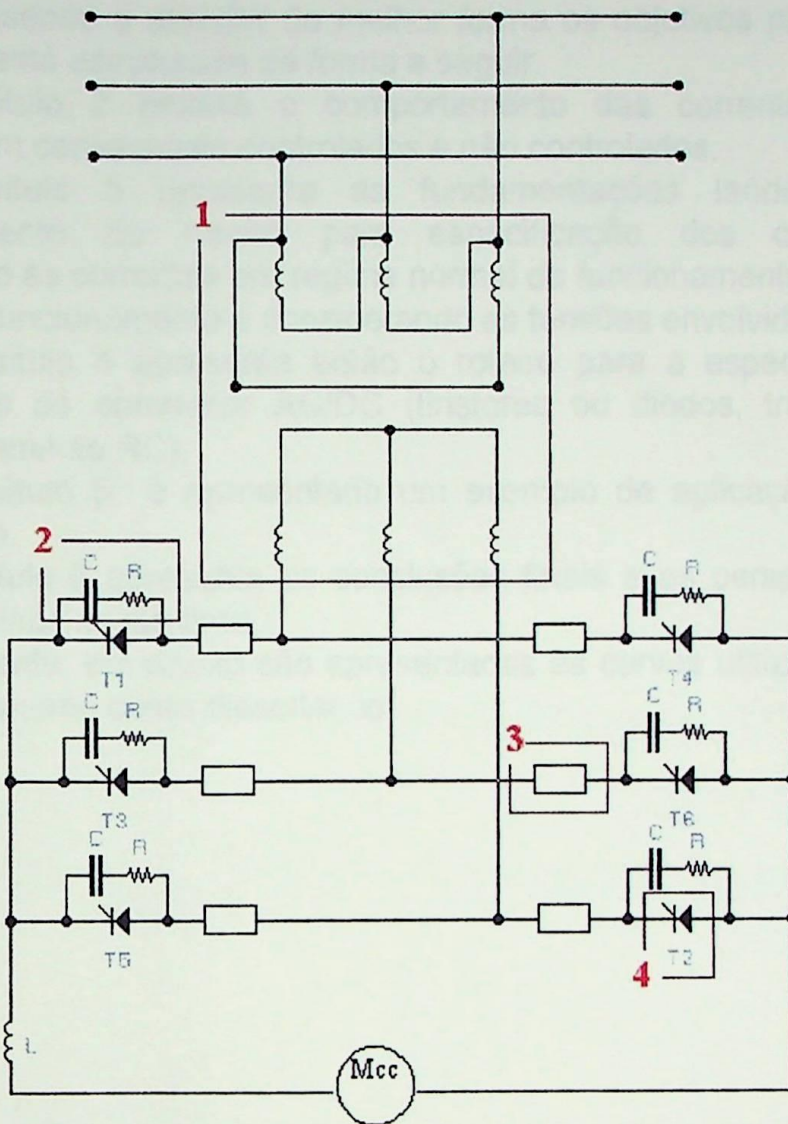


Figura 1.1 - Conversor Controlado Ligado em Ponte Trifásica

Este exemplo identifica os componentes para os quais o roteiro será desenvolvido:

- 1 - Transformador
- 2 - Elemento RC
- 3 - Fusível
- 4 - Tiristor, neste caso específico.

1.3 - Estrutura do Trabalho

Visando a atender da melhor forma os objetivos pretendidos, a dissertação está estruturada da forma a seguir.

O capítulo 2 analisa o comportamento das correntes e outras grandezas em conversores controlados e não controlados.

O capítulo 3 apresenta as fundamentações teóricas para o desenvolvimento do roteiro para especificação dos componentes, considerando as correntes em regime normal de funcionamento, em regime anormal de funcionamento e considerando as tensões envolvidas.

No capítulo 4 apresenta então o roteiro para a especificação dos componentes do conversor AC/DC (tiristores ou diodos, transformador, fusíveis e elemento RC).

No capítulo 5 é apresentado um exemplo de aplicação do roteiro desenvolvido.

O capítulo 6 apresenta as conclusões finais e as perspectivas para futuros trabalhos nessa área.

Finalmente, em anexo são apresentadas as curvas utilizadas durante o desenvolvimento desta dissertação.

2.2 - Tipos de Conversores

Os conversores são classificados em controlados e não controlados pela rede onde o termo "controlado pela rede" quer dizer que o trabalho e a entrada de energia dos componentes (diodos ou transistores) dependem de uma corrente alternada. Sendo assim é o conversor controlado pela rede neste caso significa que eles trabalham devido a corrente alternada com um ciclo de corrente contínua, ou seja permitem o fluxo de potência ativa nos dois sentidos.

Sendo abordados neste tópico os conversores controlados e não controlados que podem ser descritos da maneira a seguir.

Capítulo 2

Análise do Comportamento das Correntes em Conversores Controlados e Não Controlados

2.1 - Introdução

A partir da corrente de carga do conversor determina-se o comportamento da corrente no componente, cujo valor médio será de suma importância na definição do mesmo.

Apresenta-se a seguir os diversos tipos de conversores abordados neste trabalho, com os respectivos cálculos do valor médio das correntes nos componentes, lembrando que para este caso será dada maior ênfase a conversores alimentando carga indutiva, o que não quer dizer que a carga seja puramente indutiva e sim que o comportamento indutivo predomina sobre o resistivo ($L \gg R$).

Serão também apresentados cálculos dos valores das tensões e potências consideradas importantes para o desenvolvimento do trabalho.

2.2 - Tipos de Conversores

Os conversores aqui relatados são conversores comutados pela rede, onde o termo "comutado pela rede" quer dizer que o bloqueio e a entrada em condução dos componentes (diodos ou tiristores) dependem da rede de corrente alternada. Sendo assim o conversor comutado pela rede nada mais significa que eles interligam circuito de corrente alternada com um circuito de corrente contínua, ou seja permitem a fluxo de potência ativa nos dois sentidos.

Serão abordados neste tópico os conversores controlados e não controlados que podem ser descritos da maneira a seguir:

1 - Conversores Não Controlados - são aqueles denominados retificadores e constituídos basicamente por componentes que possuem dois estados operacionais, mais conhecidos como diodos. Estes diodos podem estar em estado de bloqueio (representado por chave aberta) ou em condução (representado por uma chave fechada). A passagem de um estado para o outro, ou seja, do estado de condução para o estado de bloqueio só acontece quando a corrente elétrica no diodo se torna nula.

2 - Conversores Controlados - são aqueles que podem ser tanto retificadores como inversores, isto é, permitem que o fluxo de potência ativa tanto do lado de corrente alternada para o lado de corrente contínua como vice-versa. Este fluxo de potência pode ser controlado através da variação do valor médio da tensão do lado de corrente contínua do conversor, sendo que esta variação deve ser feita através do atraso da entrada de condução do semicondutor (tiristor) porque o valor médio é função da forma de onda da tensão. Da mesma forma que os diodos, os tiristores só passam do estado de condução para o de bloqueio se houver anulação da corrente.

Os tipos de conversores a serem abordados são:

1. Conversores Não Controlados Ligados em Ponte Monofásica
2. Conversores Não Controlados Ligados em Ponte Trifásica
3. Conversores Controlados Ligados em Ponte Trifásica
4. Conversores Controlados Ligados em Ponte Monofásica

2.2.1 - Conversores Não Controlados Ligados em Ponte Monofásica

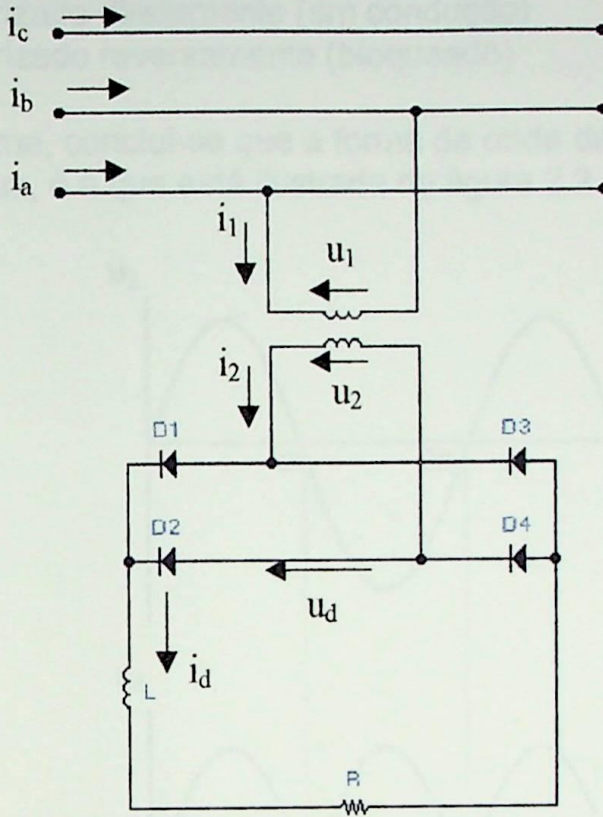


Figura 2.1 - Conversor Não Controlado Ligado em Ponte Monofásica

Na figura 2.1 tem-se:

u_d - tensão no lado de corrente contínua do conversor

u_2 - tensão no lado de corrente alternada do conversor

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \text{ sen } \omega t \quad (2.1)$$

Com base no comportamento da tensão u_2 mostrado na figura 2.2, conclui-se que:

Para valores de ωt entre 0 e π :

- D1 - em condução (polarizado diretamente)
- D2 - bloqueado (polarizado reversamente)
- D3 - bloqueado (polarizado reversamente)
- D4 - em condução (polarizado diretamente)

Para valores de ωt entre π e 2π :

- D1 - polarizado reversamente (bloqueado)
- D2 - polarizado diretamente (em condução)
- D3 - polarizado diretamente (em condução)
- D4 - polarizado reversamente (bloqueado)

Desta forma, conclui-se que a forma de onda da tensão u_d no lado de corrente contínua, é a que está ilustrada na figura 2.2.

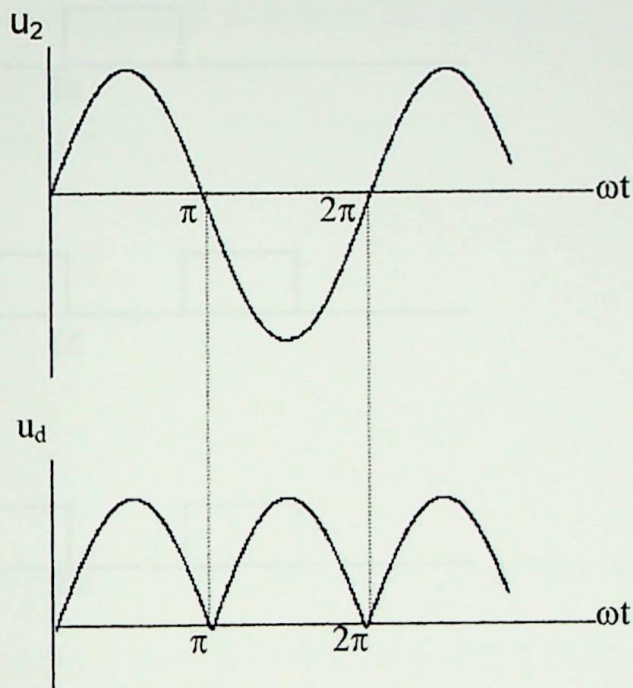


Figura 2.2 - Formas de onda da tensão u_2 e u_d

A figura 2.3 a seguir, mostra as formas de onda das correntes nos diodos e no lado de corrente alternada do conversor, com base no funcionamento descrito anteriormente.

CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS CORRENTES EM CONVERSORES CONTROLADOS E NÃO CONTROLADOS

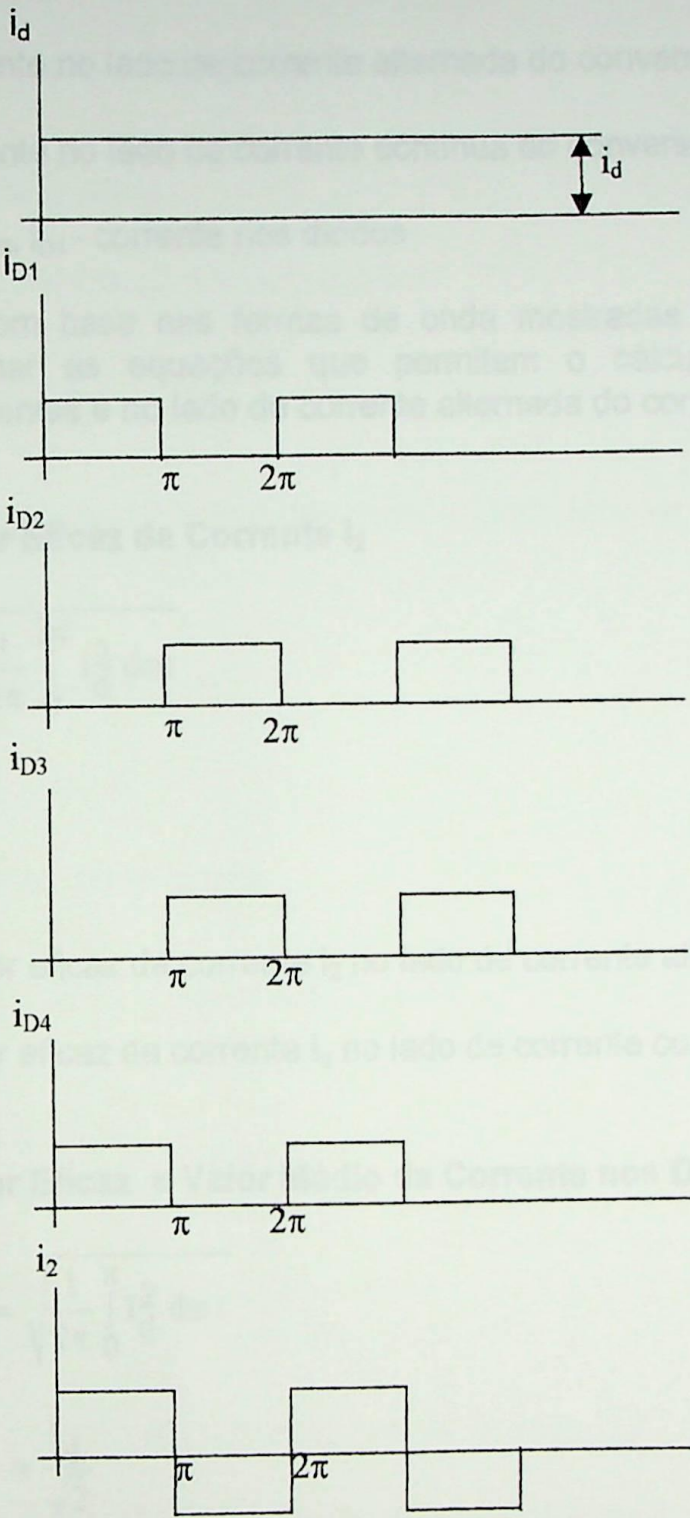


Figura 2.3 - Formas de onda das correntes i_2 , i_d e nos diodos

Na figura 2.3 tem-se que:

i_2 - corrente no lado de corrente alternada do conversor

i_d - corrente no lado de corrente contínua do conversor

$i_{D1}, i_{D2}, i_{D3}, i_{D4}$ - corrente nos diodos

Com base nas formas de onda mostradas na figura 2.3 pode-se determinar as equações que permitem o cálculo das correntes nos componentes e no lado de corrente alternada do conversor.

1 - Valor Eficaz da Corrente i_2

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d^2 d\omega t} \quad (2.2)$$

$$I_2 = I_d \quad (2.3)$$

Onde:

I_2 = valor eficaz da corrente i_2 no lado de corrente alternada do conversor

I_d = valor eficaz da corrente i_d no lado de corrente contínua do conversor

2 - Valor Eficaz e Valor Médio da Corrente nos Diodos

$$I_{D(ef)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_d^2 d\omega t} \quad (2.4)$$

$$I_{D(ef)} = \frac{I_d}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

$$I_D = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_d d\omega t \quad (2.6)$$

$$I_D = \frac{I_d}{2} \quad (2.7)$$

I_D - valor médio da corrente nos diodos

$I_{D(ef)}$ - valor eficaz da corrente nos diodos

3 - Potência Ativa

A potência ativa é definida por:

$$P_d = \frac{1}{T} \int_0^T u_d i_d dt \quad (2.8)$$

Neste caso, como a corrente é alisada tem-se:

$$i_d = I_d \quad (2.9)$$

Para tensão vale:

$$u_d = \sqrt{2} U_2 \text{ sen } \omega t \quad (2.10)$$

Desta forma resulta:

$$P_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_d \sqrt{2} U_2 \text{ sen } \omega t d\omega t \quad (2.11)$$

$$P_d = I_d \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \text{ sen } \omega t d\omega t \right] \quad (2.12)$$

$$P_d = U_d I_d \quad (2.13)$$

4 - Valor Médio da Corrente I_d e da Tensão U_d

A potência dissipada em uma resistência é dada por RI^2 , onde I é o valor eficaz da corrente na resistência. Como a corrente é alisada, os valores médio e eficaz são iguais.

$$P_d = R I_d^2 \quad (2.14)$$

Como

$$P_d = U_d I_d \quad (2.15)$$

Resulta:

$$I_d = \frac{U_d}{R} \quad (2.16)$$

Para o valor médio da tensão resulta:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \, d\omega t \quad (2.17)$$

$$U_d = 0,9 U_2 \quad (2.18)$$

Onde:

I_d - valor médio da corrente i_d no lado de corrente contínua do conversor

U_d - valor médio da tensão u_d no lado de corrente contínua do conversor

U_2 - valor eficaz da tensão u_2 no lado de corrente contínua do conversor

R - resistência

5 - Potência do Transformador do Conversor

Desprezando a corrente a vazio do transformador, as formas de onda das correntes tanto do primário quanto do secundário são as mesmas. Desta forma tem-se:

$$S_{TN} = U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (2.19)$$

$$S_{TN} = U_2 I_2 = \frac{U_d}{0,9} I_d \quad (2.20)$$

$$S_{TN} = 1,11 U_d I_d \quad (2.21)$$

$$S_{TN} = 1,11 P_d \quad (2.22)$$

S_{TN} - potência do transformador

U_2 - valor eficaz da tensão u_2

I_2 - valor médio da corrente i_2

U_d - valor médio da tensão u_d

I_d - valor médio da corrente i_d

6 - Fator de Potência

O fator de potência é a relação entre a potência ativa e os V.A necessários para produzi-la. Assim:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{U_d I_d}{1,11 U_d I_d} = 0,9 \quad (2.23)$$

FP - fator de potência conversor-carga

P - potência elétrica ativa

S - potência aparente

U_d - valor médio da tensão u_d

I_d - valor médio da corrente i_d



Figura 2.5 - Comportamento das Tensões no lado de Corrente Alternada do Conversor.

2.2.2 - Conversores Não Controlados Ligados em Ponte Trifásica

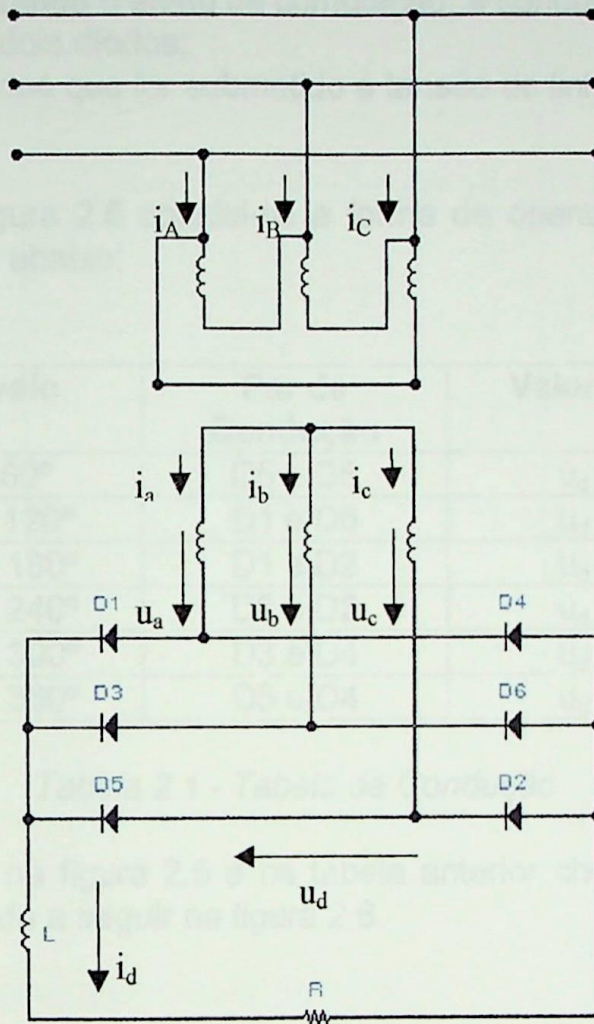


Figura 2.4 - Conversor Não Controlado Ligado em Ponte trifásica

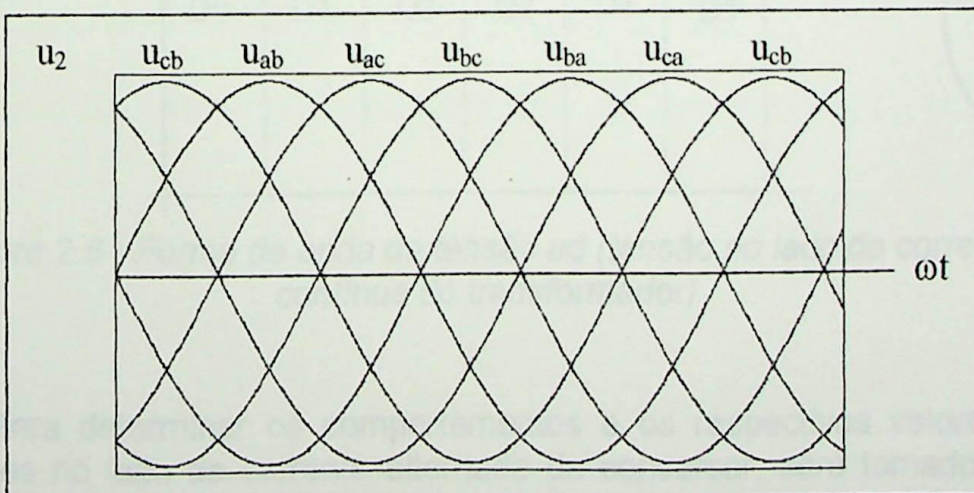


Figura 2.5 - Comportamento das Tensões no lado de Corrente Alternada do Conversor

A partir da configuração do conversor ilustrada na figura 2.4 e do comportamento das tensões de linha que alimentam o conversor é possível tirar algumas conclusões:

- Não considerando o efeito de comutação, a condução é estabelecida sempre através de dois diodos;
- O par de diodos que for submetido à tensão de linha mais positiva irá conduzir;

Através da figura 2.5 conclui-se a forma de operação do conversor, mostrada na tabela abaixo:

Intervalo	Par de Condução	Valor de u_d
0 a 60°	D5 e D6	$u_d = u_{cb}$
60° a 120°	D1 e D6	$u_d = u_{ab}$
120° a 180°	D1 e D2	$u_d = u_{ac}$
180° a 240°	D3 e D2	$u_d = u_{bc}$
240° a 300°	D3 e D4	$u_d = u_{ba}$
300° a 360°	D5 e D4	$u_d = u_{ca}$

Tabela 2.1 - Tabela de Condução

Baseando-se na figura 2.5 e na tabela anterior chega-se à forma de onda de u_d , mostrada a seguir na figura 2.6.

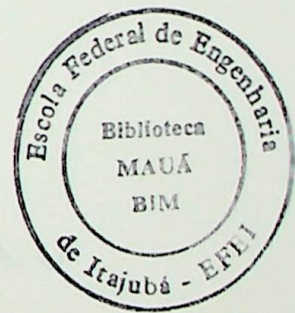
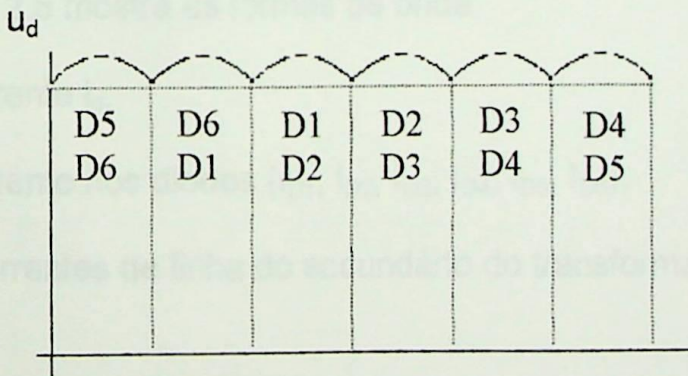


Figura 2.6 - Forma de onda da tensão u_d (tensão no lado de corrente contínua do transformador)

Para determinar os comportamentos e os respectivos valores das correntes no lado de corrente alternada do conversor, será tomado como referência o transformador, cuja conexão está mostrada na figura 2.7

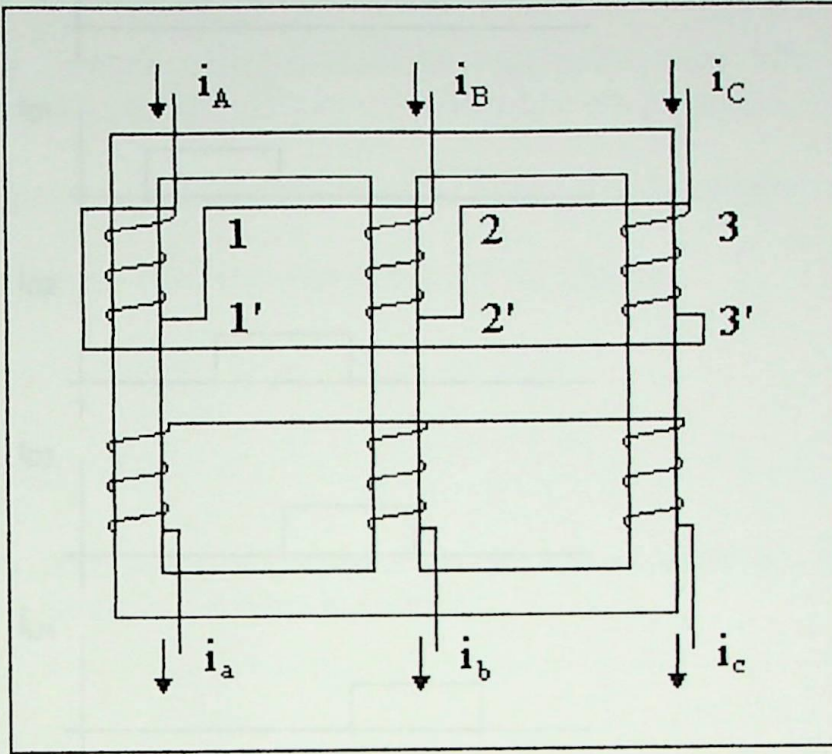


Figura 2.7 - Corrente no transformador do conversor

A figura 2.8 mostra as formas de onda:

- da corrente i_d ,
- da corrente nos diodos (i_{D1} , i_{D2} , i_{D3} , i_{D4} , i_{D5} , i_{D6}),
- das correntes de linha do secundário do transformador (i_a , i_b , i_c).

Figura 2.8 - Formas de onda das correntes

CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS CORRENTES EM CONVERSORES CONTROLADOS E NÃO CONTROLADOS

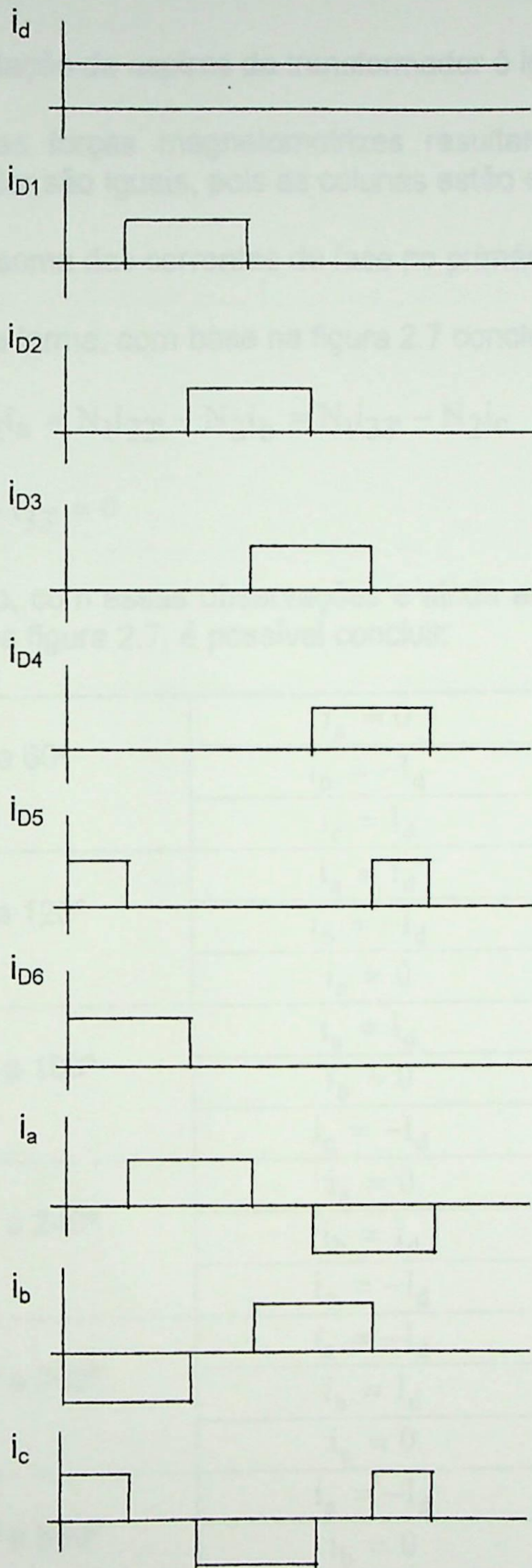


Figura 2.8 - Formas de onda das correntes

Para determinação das equações a seguir, foram feitas as seguintes considerações:

1 - relação de espiras do transformador é igual a um, ou seja, $N_1=N_2$;

2 - as forças magnetomotrizes resultantes nas três colunas do transformador são iguais, pois as colunas estão em paralelo;

3 - a soma das correntes de fase no primário do transformador é nula.

Desta forma, com base na figura 2.7 conclui-se:

$$N_1 i_{11'} - N_2 i_a = N_1 i_{22'} - N_2 i_b = N_1 i_{33'} - N_2 i_c \quad (2.24)$$

$$i_{11'} + i_{22'} + i_{33'} = 0 \quad (2.25)$$

Então, com essas observações e ainda analisando a disposição das correntes na figura 2.7, é possível concluir:

0° a 60°	$i_a = 0$	$i_{11'} = 0$
	$i_b = -I_d$	$i_{22'} = -I_d$
	$i_c = I_d$	$i_{33'} = I_d$
60° a 120°	$i_a = I_d$	$i_{11'} = I_d$
	$i_b = -I_d$	$i_{22'} = -I_d$
	$i_c = 0$	$i_{33'} = 0$
120° a 180°	$i_a = I_d$	$i_{11'} = I_d$
	$i_b = 0$	$i_{22'} = 0$
	$i_c = -I_d$	$i_{33'} = -I_d$
180° a 240°	$i_a = 0$	$i_{11'} = 0$
	$i_b = I_d$	$i_{22'} = I_d$
	$i_c = -I_d$	$i_{33'} = -I_d$
240° a 300°	$i_a = -I_d$	$i_{11'} = -I_d$
	$i_b = I_d$	$i_{22'} = I_d$
	$i_c = 0$	$i_{33'} = 0$
300° a 360°	$i_a = -I_d$	$i_{11'} = -I_d$
	$i_b = 0$	$i_{22'} = 0$
	$i_c = I_d$	$i_{33'} = I_d$

Tabela 2.2 - Comportamento das correntes

CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS CORRENTES EM CONVERSORES CONTROLADOS E NÃO CONTROLADOS

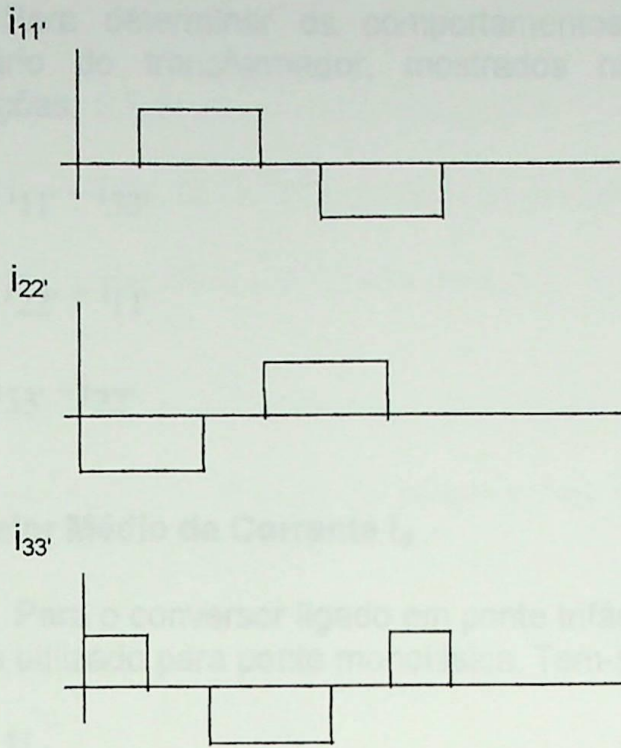


Figura 2.9a - Formas de onda das correntes de fase do transformador

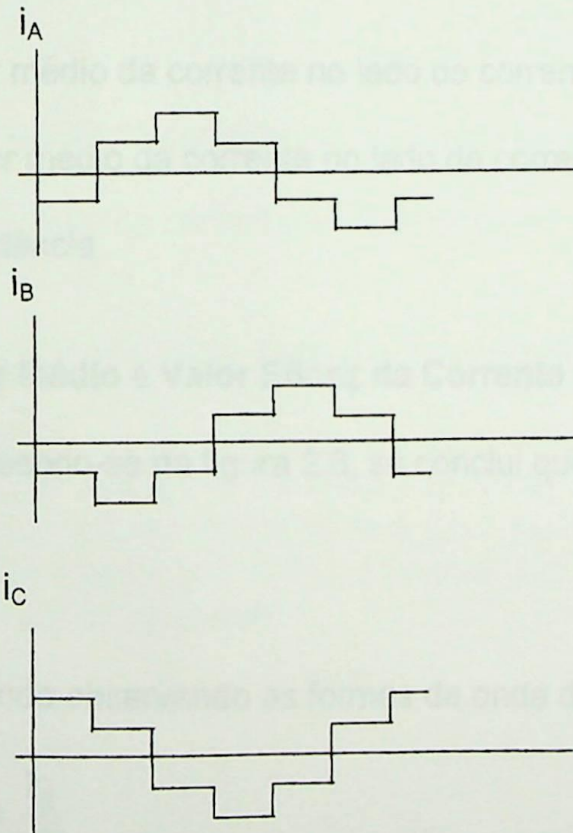


Figura 2.9b - Formas de onda das correntes de linha

Para determinar os comportamentos das correntes de linha do primário do transformador, mostrados na figura 2.9b, parte-se das equações:

$$i_A = i_{11'} - i_{33'} \quad (2.26)$$

$$i_B = i_{22'} - i_{11'} \quad (2.27)$$

$$i_C = i_{33'} - i_{22'} \quad (2.28)$$

1 - Valor Médio da Corrente i_d

Para o conversor ligado em ponte trifásica o raciocínio é o mesmo do que o utilizado para ponte monofásica. Tem-se então:

$$I_d = \frac{U_d}{R} \quad (2.29)$$

Onde:

I_d - valor médio da corrente no lado de corrente contínua do conversor

U_d - valor médio da corrente no lado de corrente contínua do conversor

R - resistência

2 - Valor Médio e Valor Eficaz da Corrente nos Diodos

Basendo-se na figura 2.8, se conclui que:

$$I_D = \frac{I_d}{3} \quad (2.30)$$

Ainda observando as formas de onda da figura 2.8, tem-se:

$$I_{D(ef)} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \quad (2.31)$$

Onde:

$I_{D(ef)}$ - valor eficaz da corrente nos diodos

I_d - valor médio da corrente no lado de corrente contínua do conversor

I_D - valor médio da corrente nos diodos

3 - Valor Eficaz da Corrente no Secundário do Transformador

Novamente, através de observações feitas nas formas de onda da figura 2.8 é possível concluir que:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_{\pi/6}^{\pi} I_d^2 d\omega t + \int_{4\pi/3}^{2\pi} I_d^2 d\omega t \right]} \quad (2.32)$$

$$I_2 = I_d \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.33)$$

I_2 - valor eficaz da corrente no secundário do transformador

I_d - valor médio da corrente no lado de corrente contínua do conversor

4 - Valor Eficaz da Corrente no Primário do Transformador

Tendo que o transformador está ligado em triângulo a corrente de fase é $i_{1(f)}$ e a corrente de linha é i_1 , e não esquecendo que a relação de espiras, como dito anteriormente é igual a um ($N_1 = N_2$).

Com estas informações e análise das formas de onda da figura 2.10 se torna fácil concluir que:

$$I_{1(f)} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.34)$$

Então o valor da corrente eficaz de linha será:



$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi/3} I_d^2 d\omega t + \int_{\pi/3}^{2\pi/3} I_d^2 d\omega t + \int_{2\pi/3}^{\pi} (2I_d^2) d\omega t + \int_{\pi}^{8\pi/6} I_d^2 d\omega t + \int_{8\pi/6}^{10\pi/6} I_d^2 d\omega t + \int_{10\pi/6}^{2\pi} (2I_d^2) d\omega t \right]} \quad (2.35)$$

$$I_1 = I_d \sqrt{2} \quad (2.36)$$

5 - Valor Médio da Tensão u_d

O valor médio da tensão u_d no lado de corrente contínua está ilustrado na figura 2.6 e a partir de então se conclui que a equação de U_d em função de U_2 (tensão de linha) fica:

$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2}U_2 \text{ sen } \omega t d\omega t \quad (2.37)$$

$$U_d = 1,35U_2 \quad (2.38)$$

U_d - valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor

U_2 - valor eficaz da tensão u_2 no lado de corrente alternada do conversor

6 - Potência Ativa

De análises anteriores observa-se que a potência ativa nada mais é que a expressão 2.37 multiplicada por I_d , obtendo então:

$$P_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} I_d \sqrt{2}U_2 \text{ sen } \omega t d\omega t \quad (2.39)$$

$$P_d = U_d I_d \quad (2.40)$$

P_d - potência ativa

U_d - valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor

I_d - valor médio da corrente no lado de corrente contínua do conversor

7 - Potência do Transformador do Conversor

As potências nominais dos enrolamentos primários e secundários são iguais, porque as formas de onda das correntes de fase do primário e secundário também são iguais.

$$S_{TN} = 3U_{2f}I_2 \quad (2.41)$$

$$S_{TN} = 3 \frac{U_2}{\sqrt{3}} I_2 \quad (2.42)$$

$$S_{TN} = \frac{3}{\sqrt{3}} \frac{U_d}{1,35} I_d \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.43)$$

$$S_{TN} = 1,05U_d I_d \quad (2.44)$$

$$S_{TN} = 1,05P_d \quad (2.45)$$

Onde:

S_{TN} - potência do transformador do conversor

P_d - potência da carga

U_d - valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor

I_d - valor médio da corrente no lado de corrente contínua do conversor

8 - Fator de Potência

O fator de potência é:

$$FP = \frac{P_d}{S_{TN}} \quad (2.46)$$

Da equação 2.45 tem-se S_{TN} , logo:

$$FP = \frac{P_d}{1,05P_d} \quad (2.47)$$

Simplificando a equação acima, vem:

$$FP = \frac{1}{1,05} = 0,95 \quad (2.48)$$

2.2.3 - Conversores Controlados Ligados em Ponte Monofásica

Os conversores controlados ligados em ponte monofásica devem ser analisados da mesma maneira que os conversores não controlados ligados em ponte monofásica, já que a forma de onda não muda, ela apenas será deslocada, como foi dito anteriormente. Sendo assim todas as equações descritas para o conversor não controlado são válidas para o conversor controlado.

A seguir a figura 2.10 ilustra este conversor.

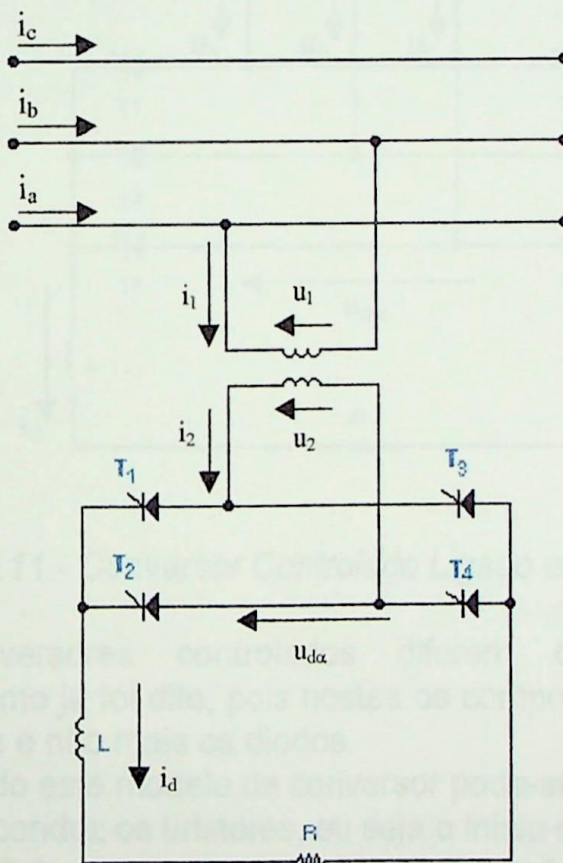


Figura 2.10 - Conversor Controlado Ligado em Ponte Monofásica

2.2.4 - Conversores Controlados Ligados em Ponte Trifásica

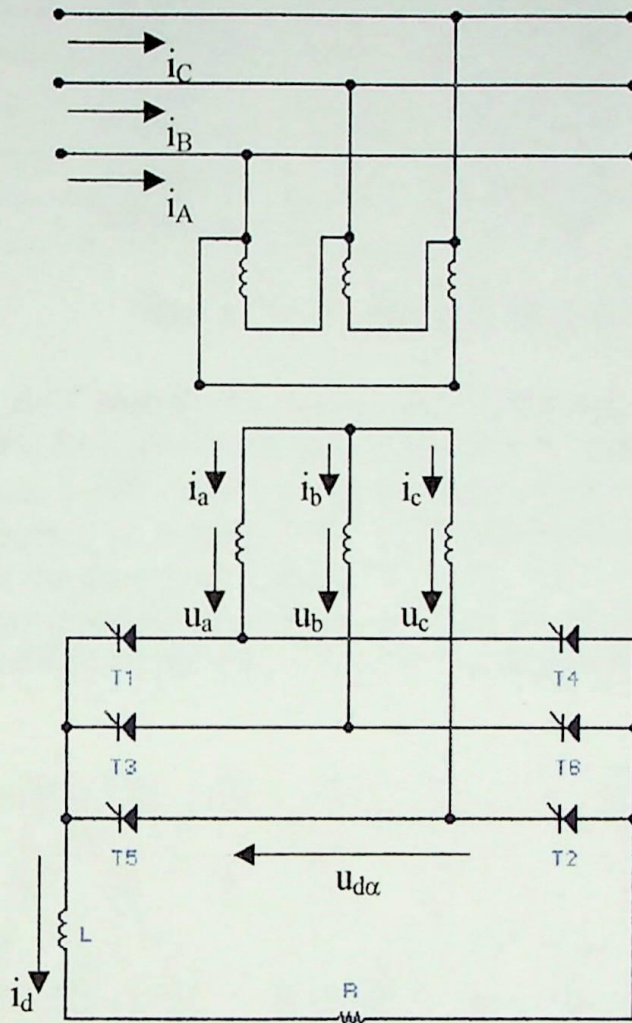


Figura 2.11 - Conversor Controlado Ligado em Ponte Trifásica

Os conversores controlados diferem dos conversores não controlados, como já foi dito, pois nestes os componentes de chaveamento são os tiristores e não mais os diodos.

Analisando este modelo de conversor pode-se começar a descrever a maneira como conduz os tiristores, ou seja o início da condução do mesmo.

A tabela 2.3 mostra os valores de ωt tomados como referência para contagem do ângulo de disparo de cada tiristor.

Como já foi afirmado anteriormente, o conversor controlado permite a variação do valor médio da tensão no lado de corrente contínua. Esta variação é feita através de alteração na forma de onda. Observe que se os diodos são substituídos por tiristores, a entrada em condução dos mesmos pode ser atrasada, ou seja a forma de onda da tensão pode ser modificada.

Denomina-se ângulo de disparo o ângulo contado a partir do ponto onde o diodo entraria em condução e que vai definir o instante no qual o tiristor é disparado, ou seja entra em condução.

Tiristor 1	$\omega t = 60^\circ$
Tiristor 2	$\omega t = 120^\circ$
Tiristor 3	$\omega t = 180^\circ$
Tiristor 4	$\omega t = 240^\circ$
Tiristor 5	$\omega t = 300^\circ$
Tiristor 6	$\omega t = 0^\circ$

Tabela 2.3 - Valores de Referência

A figura 2.12 mostra os pontos de referência para contagem do ângulo de disparo de cada tiristor (x). O exemplo é tomado para um ângulo de disparo α igual a 30° . Observe que se cada tiristor fosse disparado uma única vez (um pulso), o conversor não entra em condução, pois o circuito é fechado através de dois tiristores (T1T6, T1T2, T2T3, T3T4, T4T5, T5T6). Para que esta condição seja satisfeita o tiristor é submetido à um segundo disparo sempre à 60° do primeiro. A figura 2.12 ilustra esta condição.

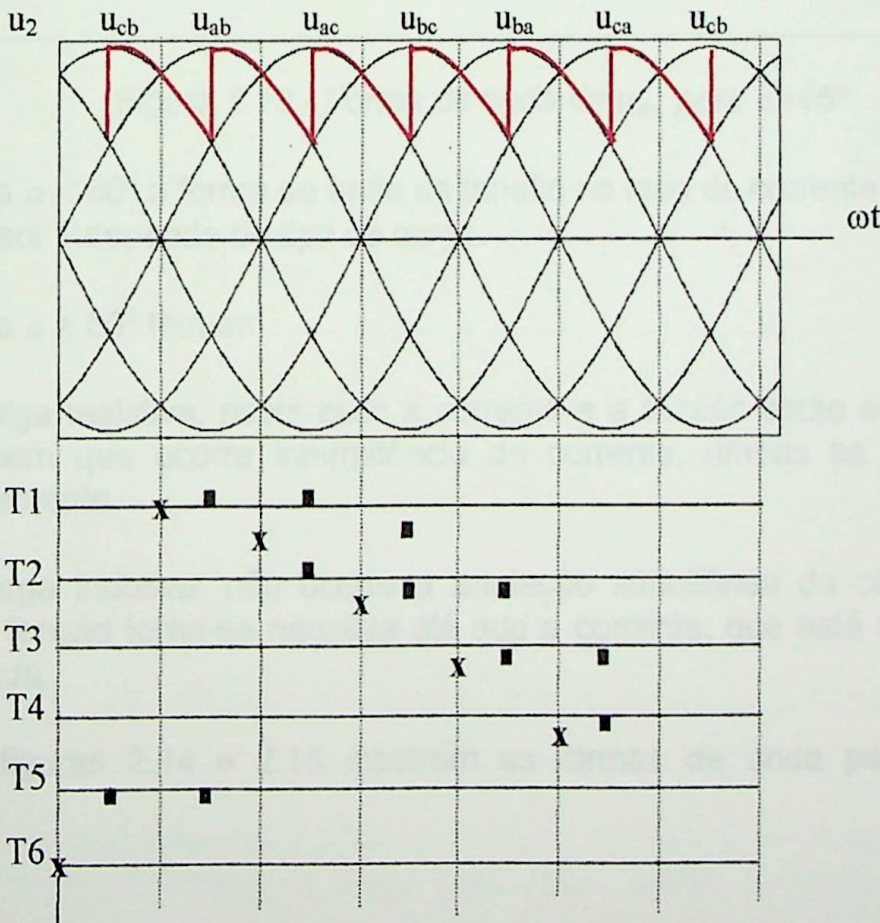


Figura 2.12 - Forma de onda de $u_{d\alpha}$ para $\alpha=30^\circ$

A contagem do ângulo de disparo também pode ser feita de forma mais simples, ou seja toma-se como referência para cada contagem de α , para cada onda de tensão de linha (u_{ab} , u_{ac} , u_{bc} ,...) o ponto onde a condução seria iniciada se no lugar de tiristores existissem diodos. A figura 2.13 ilustra este tipo de contagem.

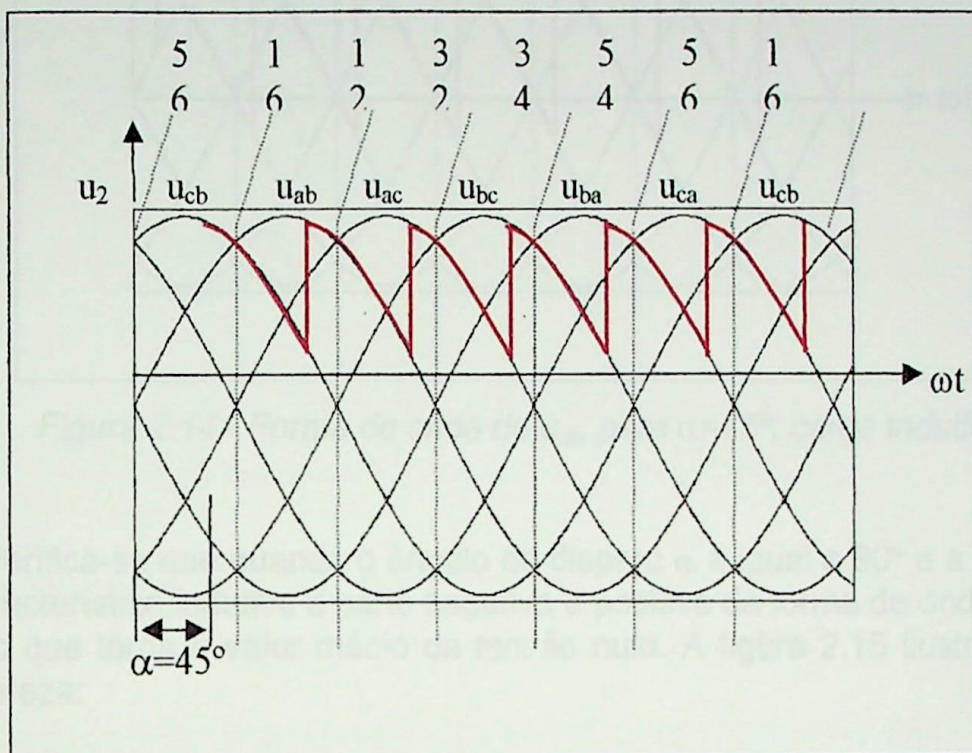


Figura 2.13 - Forma de onda de $u_{d\alpha}$ para $\alpha=45^\circ$

Para $\alpha \leq 60^\circ$ a forma de onda da tensão no lado de corrente contínua do conversor independe do tipo de carga.

Para $\alpha > 60^\circ$ tem-se:

- carga resistiva: neste caso a corrente e a tensão estão em fase o que faz com que ocorra intermitência de corrente, ambas se anulam simultaneamente.

- carga indutiva: não ocorre a anulação simultânea da corrente e tensão. A tensão torna-se negativa até que a corrente, que está atrasada, seja anulada.

As figuras 2.14 e 2.15 mostram as formas de onda para carga indutiva.

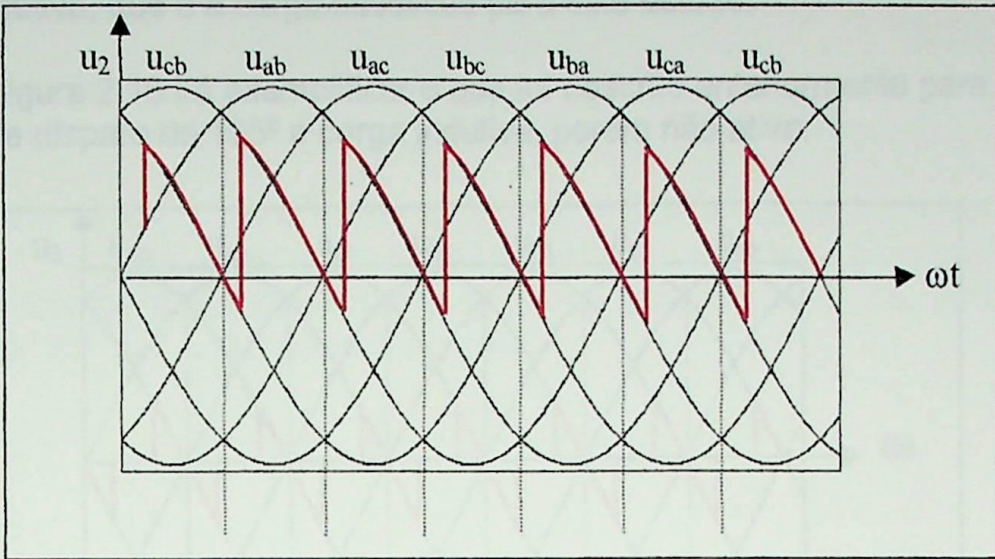


Figura 2.14 - Forma de onda de $u_{d\alpha}$ para $\alpha=75^\circ$, carga indutiva

Verifica-se que quando o ângulo de disparo α é igual a 90° e a carga tem característica indutiva a parte negativa e positiva da forma de onda são iguais o que torna o valor médio da tensão nulo. A figura 2.15 ilustra isto com clareza:

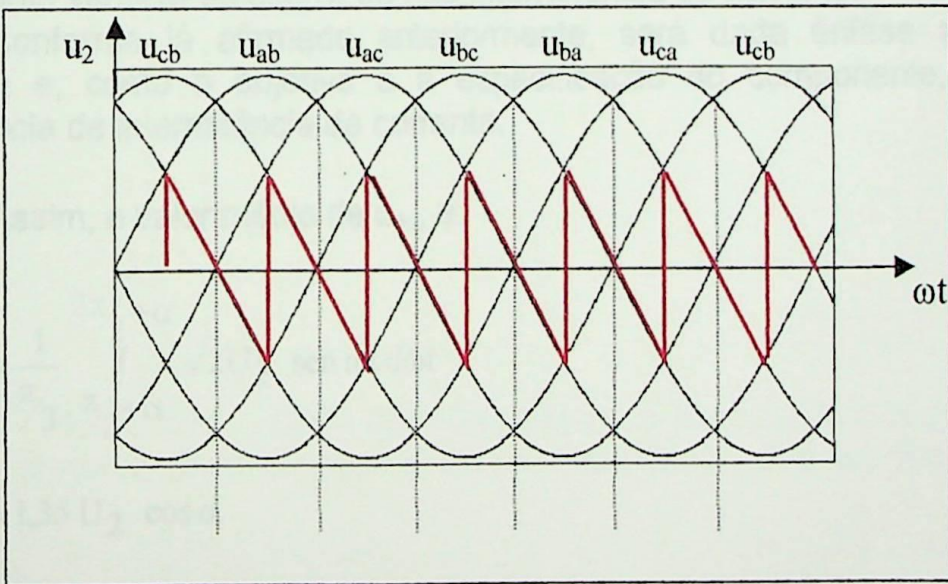


Figura 2.15 - Conversor operando com $\alpha=90^\circ$ e alimentando carga indutiva

Para $\alpha > 90^\circ$ além das cargas já citadas (resistiva e indutiva), aparece um terceiro tipo de carga, a carga ativa. Será citado o comportamento

desses três tipos distintos de carga, porém, somente será detalhada a carga indutiva, que é a carga escolhida para este estudo.

A figura 2.16 irá exemplificar o que foi descrito anteriormente para um ângulo de disparo de 105° e carga indutiva, porém não ativa.

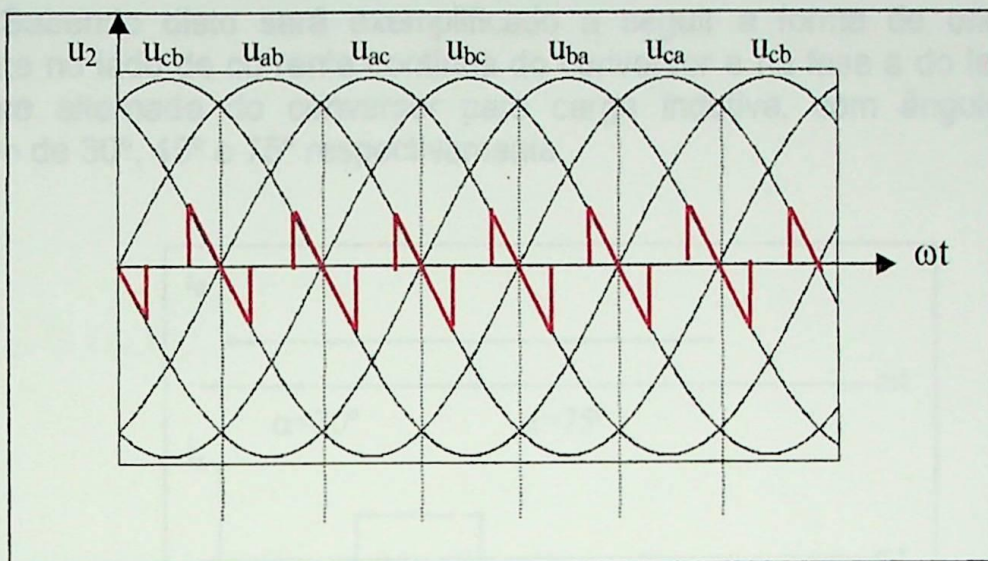


Figura 2.16 - Carga Indutiva e $\alpha = 105^\circ$

Para estabelecer a equação que define o valor médio da tensão $u_{d\alpha}$ é importante verificar se ocorre ou não intermitência de corrente.

Conforme já afirmado anteriormente, será dada ênfase a carga indutiva e, como o objetivo é a especificação do componente, a não ocorrência de intermitência de corrente.

Assim, o valor médio de $u_{d\alpha}$, é:

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3+\alpha}^{2\pi/3+\alpha} \sqrt{2}U_2 \text{ sen } \omega t \, d\omega t \quad (2.50)$$

$$U_{d\alpha} = 1,35 U_2 \cos \alpha \quad (2.51)$$

$U_{d\alpha}$ - valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor

U_2 - valor eficaz da tensão no lado de corrente alternada do conversor

α - ângulo de disparo

A forma de onda da corrente no lado de corrente contínua do conversor depende de dois fatores. São eles:

- característica da carga
- ângulo de disparo

Sabendo disto será exemplificado a seguir a forma de onda da corrente no lado de corrente contínua do conversor e na fase a do lado de corrente alternada do conversor para carga indutiva, com ângulos de disparo de 30° , 45° e 75° respectivamente.

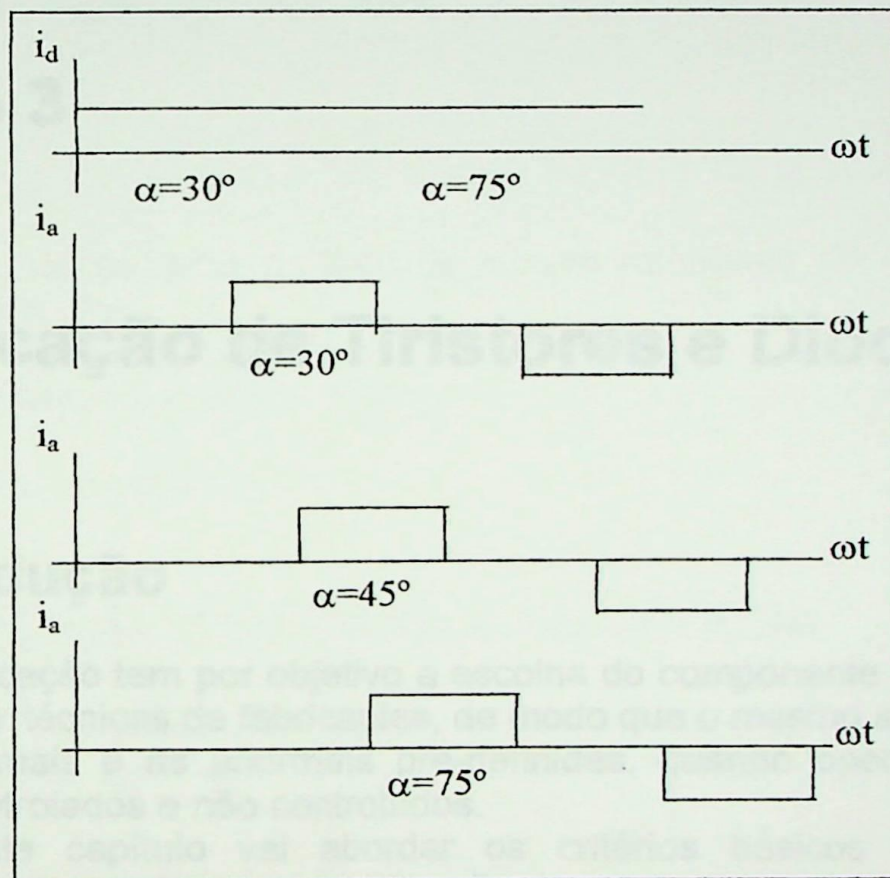


Figura 2.17 - Forma de onda no lado de corrente contínua e de corrente alternada (fase a) do conversor para carga indutiva

durante o processo de condução não ultrapassar o valor máximo especificado pelo fabricante.

A passagem de corrente pelo componente provoca perdas na junção que resultam na elevação de temperatura de mesmo. O componente estará corretamente especificado em termos de capacidade de condução de corrente se durante a operação a temperatura da junção não ultrapassar o valor máximo admissível definido pelo fabricante. A ultrapassagem desta temperatura afeta a vida e capacidade de trabalho do componente.

O procedimento para determinação da elevação de temperatura consiste em estabelecer uma relação entre a corrente de carga do conversor e as perdas na junção e, posteriormente, entre as perdas e a correspondente elevação de temperatura.

Capítulo 3

Especificação de Tiristores e Diodos

3.1 - Introdução

A especificação tem por objetivo a escolha do componente (diodo ou tiristor) em listas técnicas de fabricantes, de modo que o mesmo suporte as solicitações normais e as anormais pré-definidas, quando operando em conversores controlados e não controlados.

O presente capítulo vai abordar os critérios básicos a serem observados no que se refere a especificação do componente em termos de correntes normais e anormais e em termos de solicitações de tensão.

3.2 - Especificação em termos de correntes normais (capacidade de condução de corrente)

A especificação do componente em termos de capacidade de condução de corrente tem por objetivo garantir que a temperatura da junção

durante o processo de condução não ultrapasse o valor máximo especificado pelo fabricante.

A passagem de corrente pelo componente provoca perdas na junção que resultam na elevação de temperatura da mesma. O componente estará corretamente especificado, em termos de capacidade de condução de corrente, se durante a operação a temperatura da junção não ultrapassar o valor máximo admissível definido pelo fabricante. A ultrapassagem desta temperatura coloca em risco a capacidade de bloqueio do componente.

O procedimento para determinação da elevação da temperatura consiste em estabelecer uma relação entre a corrente de carga do conversor e as perdas na junção, e, posteriormente, entre as perdas e a correspondente elevação da temperatura.

$$I_d \longrightarrow P_J \longrightarrow \sigma_j$$

I_d - Valor médio da corrente no lado de corrente contínua do conversor (corrente de carga) (A)

P_J - potência das perdas na junção (W)

σ_j - temperatura da junção (°C)

3.2.1 - Potência das Perdas na Junção

A potência das perdas na junção é definida pelo valor médio do produto dos valores instantâneos da corrente e da respectiva queda de tensão na junção.

$$P_J = \frac{1}{T} \int_0^t i(t)u(t) dt \quad (3.1)$$

A relação entre a corrente e a respectiva queda de tensão na junção pode ser obtida através da curva de condução do componente, curva esta obtida experimentalmente.

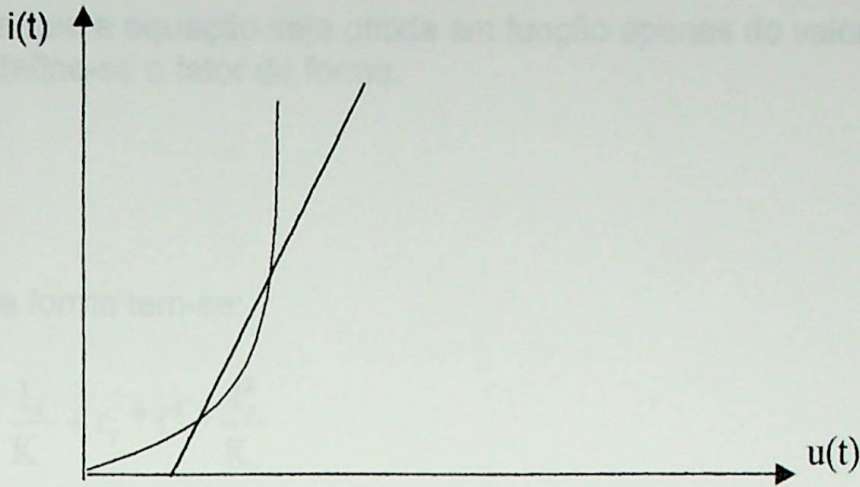


Figura 3.1 - Curva de Condução de Corrente do Componente

A figura 3.1, que relaciona a corrente de condução com a respectiva queda de tensão, pode ser representada pela equação da secante à curva em pontos definidos pela normalização pertinente.

$$u = U_{T0} + r_T i \quad (3.2)$$

Se os termos da equação forem multiplicadas por i :

$$u i = U_{T0} i + r_T i^2 \quad (3.3)$$

Substituindo a equação 3.3 na equação 3.1 resulta:

$$P_J = \frac{1}{T} \int U_{T0} i \, dt + \frac{1}{T} \int r_T i^2 \, dt \quad (3.4)$$

ou ainda

$$P_J = U_{T0} \left[\frac{1}{T} \int i \, dt \right] + r_T \left[\frac{1}{T} \int i^2 \, dt \right] \quad (3.5)$$

O termo $\frac{1}{T} \int i \, dt$ é o valor médio da corrente na junção, enquanto que o termo $\frac{1}{T} \int i^2 \, dt$ é o valor eficaz elevado ao quadrado.

$$P_J = U_T I_{TAV} + r_T I_{ef}^2 \quad (3.6)$$

Para que a equação seja obtida em função apenas do valor médio da corrente, define-se o fator de forma:

$$f = \frac{I_{ef}}{I_{TAV}} \quad (3.7)$$

Desta forma tem-se:

$$P_J = U_{T0} * \frac{I_d}{K_c} + r_T * f^2 * \frac{I_d^2}{K_c} \quad (3.8)$$

P_J - Perdas na Junção

U_{T0} - Tensão de depleção

I_d - Valor médio da corrente no lado de corrente contínua do conversor

K_c - Fator que depende do tipo de conversor

$K_c = 2$ para ponte monofásica

$K_c = 3$ para ponte trifásica

r_T - Resistência aparente no sentido direto

f = Fator de forma, que depende do tipo do conversor

$f = \sqrt{3}$ para ponte trifásica

$f = \sqrt{2}$ para ponte monofásica

3.2.2 - Temperatura da Junção

Quando a junção é submetida às perdas P_J , sua elevação de temperatura é definida pela equação 3.9 mostrada abaixo.

$$P_J dt = C dt + A \tau dt \quad (3.9)$$

Nesta equação o termo Cdt define a parcela das perdas responsável pela elevação de temperatura, enquanto que o termo $A\tau dt$ define a parcela das perdas transferida para o ambiente.

Quanto maior a temperatura da junção em relação ao ambiente, maior a parcela transferida. Quando o equilíbrio térmico é atingido a diferença de temperatura é tal que toda a potência é transferida para o ambiente.

A solução, considerando a temperatura ambiente é:

$$\tau_J = \frac{P_J}{A} (1 - e^{-t/T}) + \tau_{amb} \quad (3.10)$$

$$T = \frac{C}{A} \quad (3.11)$$

τ_J - Temperatura da junção

τ_{amb} - Temperatura ambiente

P_J - Potência de perdas na junção

C - capacidade calorífica

A - fator que define a transmissão de calor da junção para o ambiente

T - constante de tempo de aquecimento

t - tempo

Tomando-se:

$$R_{th} = \frac{1}{A} \quad (3.12)$$

R_{th} - resistência térmica

Resulta

$$\tau_J = P_J R_{th} (1 - e^{-t/T}) + \tau_{amb} \quad (3.13)$$

O conversor pode operar em dois tipos de regime distintos:

- regime contínuo

- regime intermitente

A partir de agora teremos que distinguir os dois tipos de regime para prosseguir com a análise que está sendo feita.

1 - Conversor Operando em Regime Contínuo

Se o conversor opera em regime contínuo, ou seja $t \gg T$, a equação (3.13) torna-se:

$$\tau_J = P_J R_{th} + \tau_{amb} \quad (3.14)$$

O valor da resistência térmica R_{th} depende do componente e do dissipador.

$$R_{th} = R_{thjc} + R_{thca} \quad (3.15)$$

R_{thjc} - resistência térmica do componente

R_{thca} - resistência térmica do dissipador

É usual que o fabricante forneça o valor da resistência térmica do componente em função da forma de onda da corrente, ou seja, o valor real da resistência térmica é corrigido em função da forma e duração da corrente. Tal fato baseia-se no descrito a seguir.

As perdas na junção não são calculadas com base na forma de condução do componente, porém a partir de um valor médio de corrente.

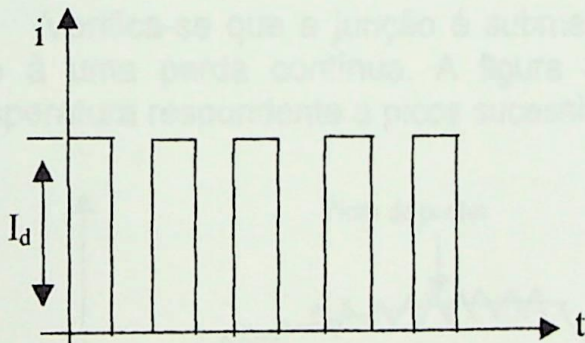


Figura 3.2a - Forma de onda da corrente no componente

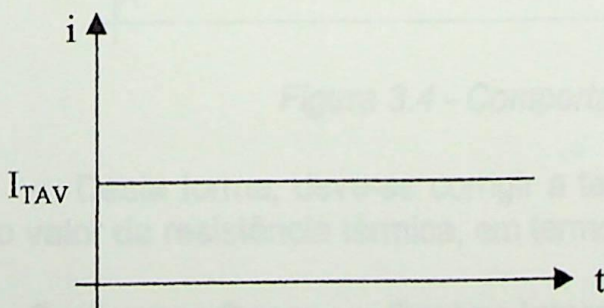


Figura 3.2b - Valor médio da corrente

A partir da forma de onda da corrente a figura 3.3a mostra o comportamento real das perdas no componente, enquanto a figura 3.3b

mostra o comportamento tomado como base para o cálculo da temperatura (a partir do valor médio).

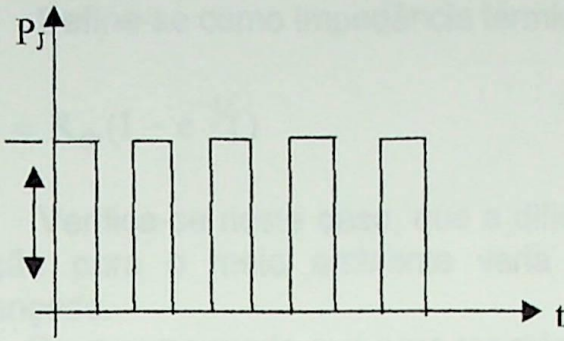


Figura 3.3a - Comportamento real das perdas no componente

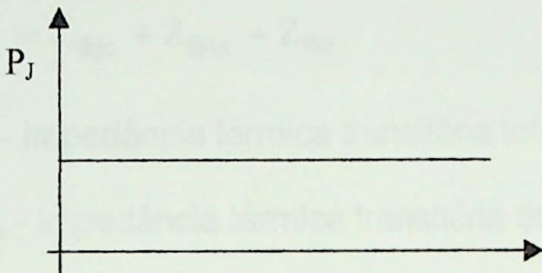


Figura 3.3b - Comportamento tomado como base para cálculo da temperatura

Verifica-se que a junção é submetida a diversos picos de perdas e não à uma perda contínua. A figura 3.4 mostra o comportamento da temperatura respondente a picos sucessivos de perdas e a perda contínua.

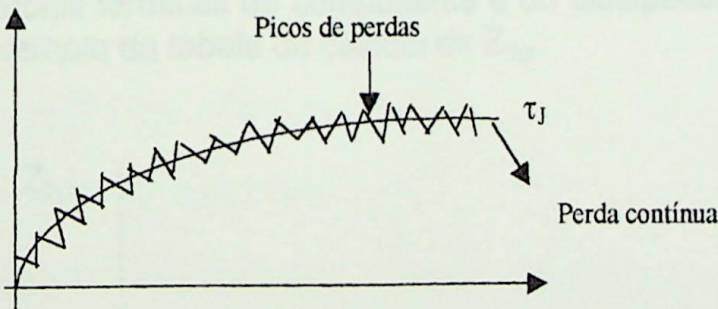


Figura 3.4 - Comportamento da temperatura

Desta forma, deve-se corrigir a temperatura da junção, o que é feito no valor da resistência térmica, em termos das formas de onda.

2 - Conversor Opera em Regime Intermitente

Se o conversor opera com carga variável ou em regime intermitente, ($t < 3T$), a equação (3.8) não pode ser simplificada, ou seja:

$$\tau_J = P_J R_{th} (1 - e^{-t/T}) + \tau_{amb} \quad (3.16)$$

Define-se como impedância térmica transitória

$$Z_{th} = R_{th} (1 - e^{-t/T}) \quad (3.17)$$

Verifica-se neste caso, que a dificuldade de transmissão de calor da junção para o meio ambiente varia até que o regime contínuo seja alcançado.

Do mesmo modo que para resistência térmica tem-se:

$$Z_{th} = Z_{thjc} + Z_{thca} + Z_{thz} \quad (3.18)$$

Z_{th} - impedância térmica transitória total

Z_{thjc} - impedância térmica transitória do componente

Z_{thca} - impedância térmica transitória do dissipador

Z_{thz} - fator de correção da impedância em função da forma de onda da corrente

As figuras (3.5) e (3.6) a seguir mostram os comportamentos das impedâncias térmicas do componente e do dissipador em função do tempo e um exemplo da tabela de cálculo de Z_{thz} .

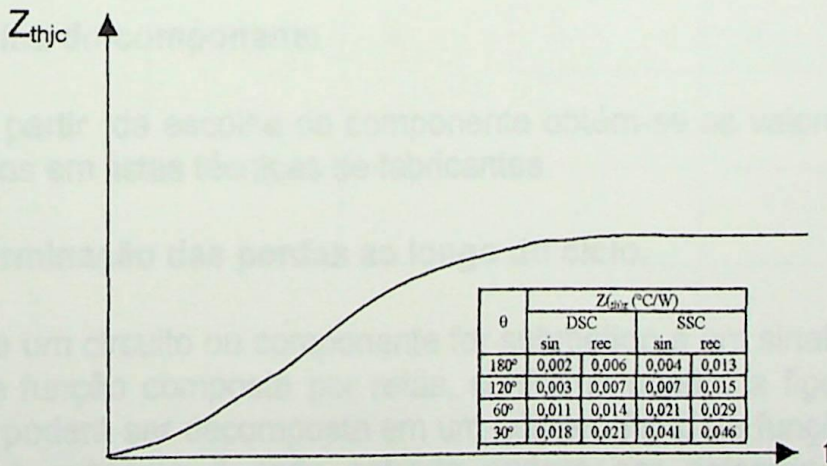


Figura 3.5 - Impedância térmica transitória do componente

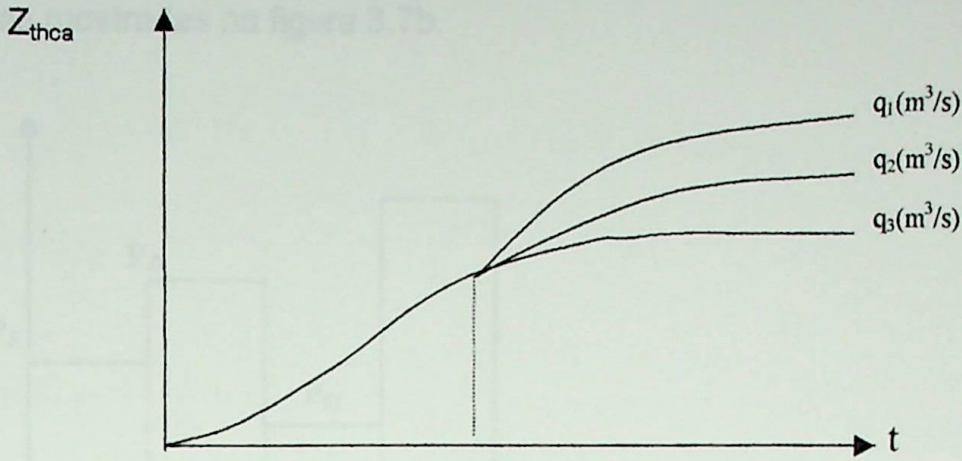


Figura 3.6 - Impedância térmica transitória do dissipador

A figura 3.5 mostra que a impedância térmica transitória do dissipador é função da vazão de ar no painel do conversor, a partir de um determinado intervalo de tempo.

O perfil de temperatura da junção é calculado conforme o roteiro a seguir.

1 - Entrada de dados

a - Correntes e Intervalos de tempo

I_{d1} -----de $t = 0$ até $t = t_1$
 I_{d2} -----de $t = t_1$ até $t = t_2$
 I_{d3} -----de $t = t_2$ até $t = t_3$

 I_{dn} -----de $t = t_{n-1}$ até $t = t_n$

b- Escolha do componente

A partir da escolha do componente obtém-se os valores de U_{T0} e r_T fornecidos em listas técnicas de fabricantes.

2 - Determinação das perdas ao longo do ciclo.

Se um circuito ou componente for submetido a um sinal representado por uma função composta por retas, conforme mostra a figura 3.7a. Esta entrada poderá ser decomposta em um número finito de funções degrau ou rampa. A resposta à cada entrada poderá ser determinada conforme equação de regime permanente e a solução completa é obtida utilizando-se o teorema da superposição. Desta forma, se as perdas têm o

comportamento mostrado na figura 3.7a elas poderão ser substituídas pelas formas mostradas na figura 3.7b.

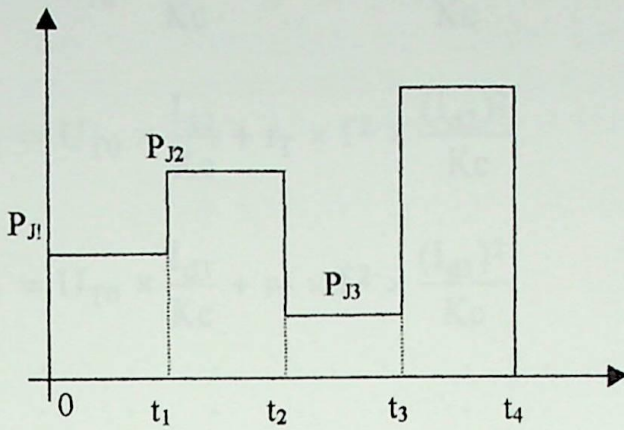


Figura 3.7a – Comportamento das perdas

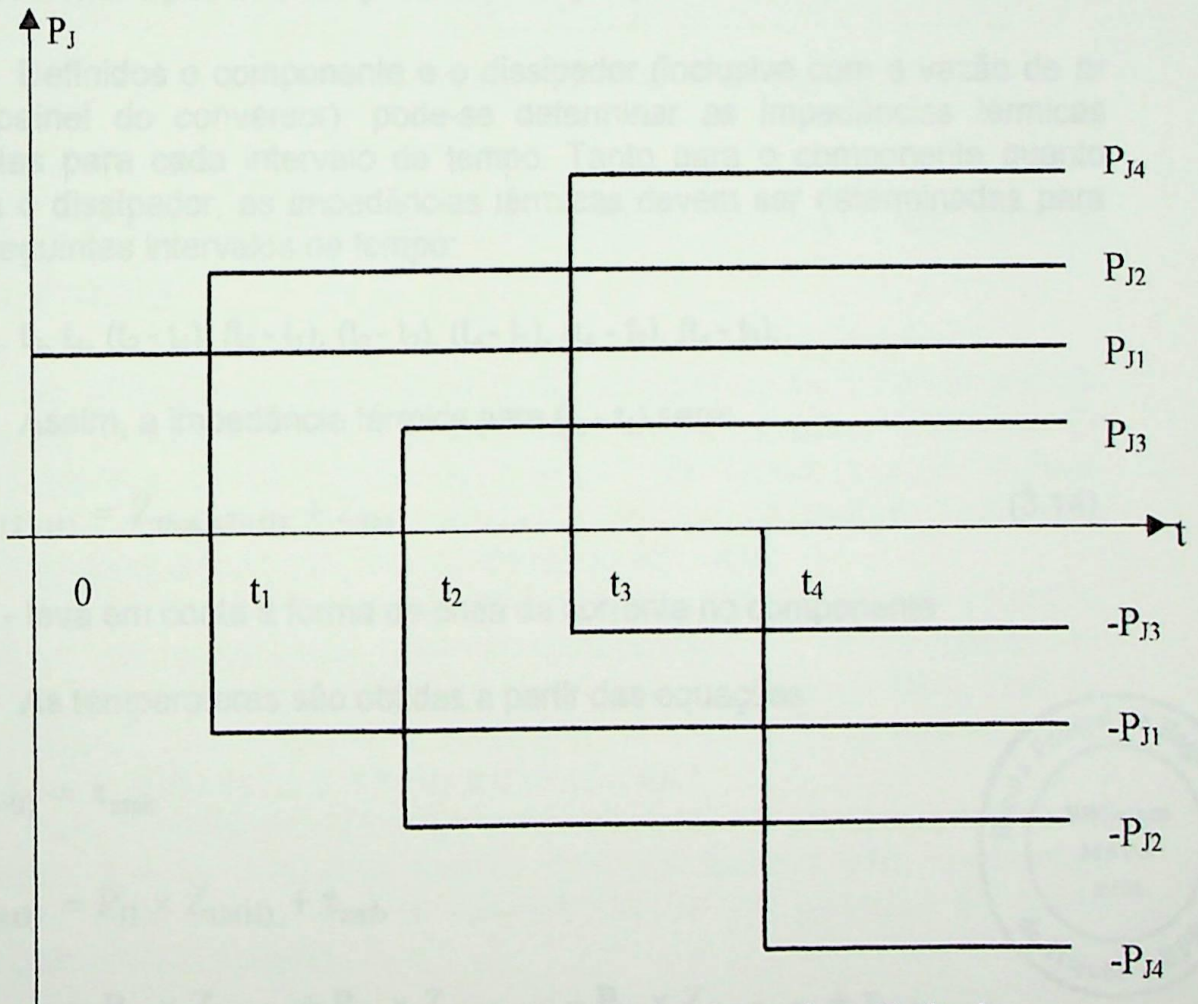


Figura 3.7 - Comportamento das perdas pelo método da superposição

Através das fórmulas a seguir determina-se as perdas desejadas.

$$P_{J1} = U_{T0} \times \frac{I_{d1}}{Kc} + r_T \times f^2 \times \frac{(I_{d1})^2}{Kc}$$

$$P_{J2} = U_{T0} \times \frac{I_{d2}}{Kc} + r_T \times f^2 \times \frac{(I_{d2})^2}{Kc}$$

$$P_{J3} = U_{T0} \times \frac{I_{d3}}{Kc} + r_T \times f^2 \times \frac{(I_{d3})^2}{Kc}$$

· · · · ·

$$P_{Jn} = U_{T0} \times \frac{I_{dn}}{Kc} + r_T \times f^2 \times \frac{(I_{dn})^2}{Kc}$$

3 - Determinação das temperaturas da junção

Definidos o componente e o dissipador (inclusive com a vazão de ar no painel do conversor), pode-se determinar as impedâncias térmicas válidas para cada intervalo de tempo. Tanto para o componente quanto para o dissipador, as impedâncias térmicas devem ser determinadas para os seguintes intervalos de tempo:

$t_1, t_2, t_3, t_4, (t_2 - t_1), (t_3 - t_1), (t_3 - t_2), (t_4 - t_1), (t_4 - t_2), (t_4 - t_3).$

Assim, a impedância térmica para $(t_2 - t_1)$ será:

$$Z_{th(t_2-t_1)} = Z_{thca(t_2-t_1)} + Z_{thz} \tag{3.14}$$

Z_{thz} - leva em conta a forma de onda da corrente no componente

As temperaturas são obtidas a partir das equações.

$$\tau_{J(t=0)} = \tau_{amb}$$

$$\tau_{J(t=t_1)} = P_{J1} \times Z_{th(t_1)} + \tau_{amb}$$

$$\tau_{J(t=t_2)} = P_{J1} \times Z_{th(t_2)} + P_{J2} \times Z_{th(t_2-t_1)} - P_{J1} \times Z_{th(t_2-t_1)} + \tau_{amb}$$



$$\tau_{J(t=t3)} = P_{J1} \times Z_{th(t3)} + P_{J2} \times Z_{th(t3-t1)} + P_{J3} \times Z_{th(t3-t2)} - P_{J1} \times Z_{th(t3-t1)} - P_{J2} \times Z_{th(t3-t2)} + \tau_{amb}$$

Se a temperatura da junção não ultrapassar o valor máximo admissível, o componente e dissipador são adequados (tecnicamente) ao conversor. A figura 3.8 mostra o comportamento da temperatura da junção.

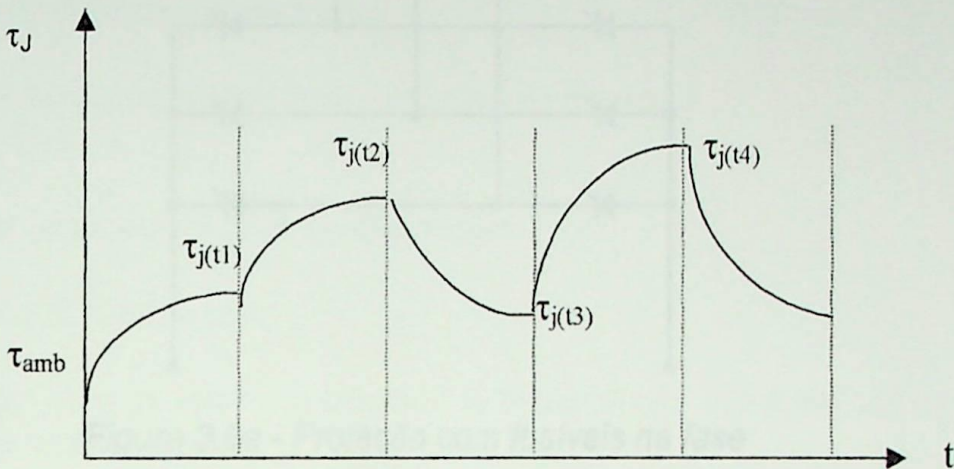


Figura 3.8 - Comportamento da temperatura da junção

3.3 - Especificação em termos de correntes anormais

Na utilização de tiristores ou diodos de potência deve-se dar atenção especial à proteção destes componentes contra correntes anormais. Os equipamentos convencionais de proteção de cabos, transformadores, motores e equipamentos semelhantes contra sobrecorrentes, geralmente, não são adequados para proteção de semicondutores.

O princípio básico para especificação dos equipamentos de proteção, consiste na comparação dos comportamentos e características do equipamento de proteção com os do semicondutor. O componente deve ser especificado para suportar a solicitação provocada pela passagem da corrente de curto-circuito até que a proteção atue.

Para proteção de elementos semicondutores são usados, geralmente, fusíveis rápidos, pois para mesma corrente nominal eles apresentam atuação mais rápida que os fusíveis usados na proteção de outros componentes do sistema.

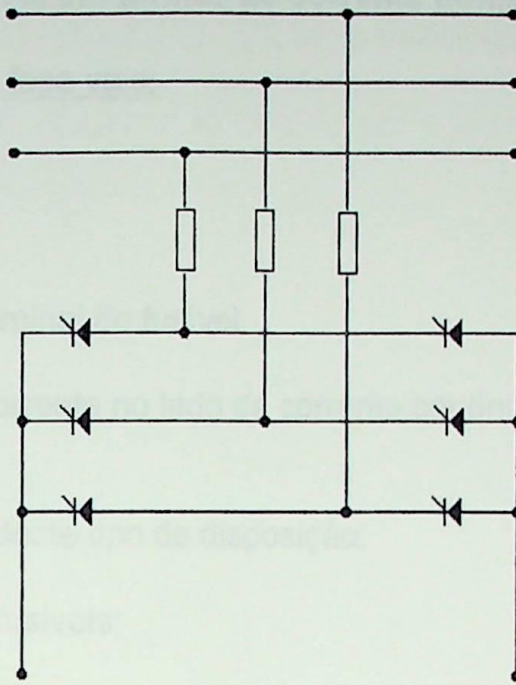


Figura 3.9a - Proteção com fusíveis na fase

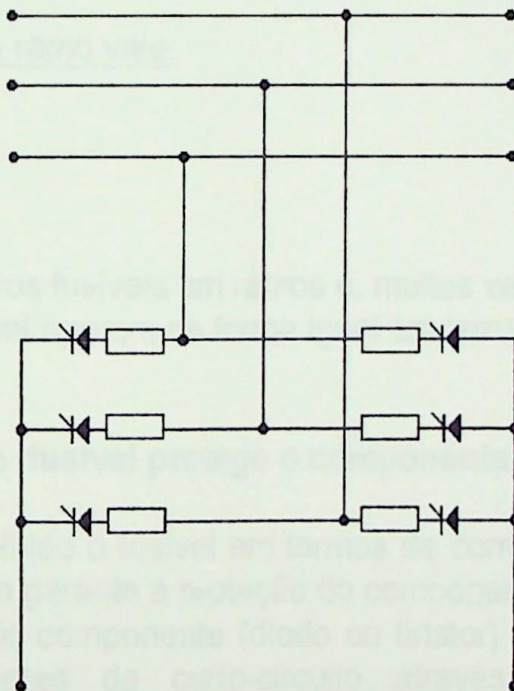


Figura 3.9b - Proteção com fusíveis de ramo

Tanto para os fusíveis de fase quanto para os fusíveis de ramo, o roteiro sugerido para especificação dos mesmos é o seguinte:

1 - Escolha do fusível em termos de corrente nominal.

- Para o fusível de fase vale:

$$I_{N(\text{fusível})} \geq I_d \sqrt{\frac{2}{3}} \tag{3.15}$$

$I_{N(\text{fusível})}$ - corrente nominal do fusível

I_d - valor médio da corrente no lado de corrente contínua

As vantagens deste tipo de disposição:

- número menor de fusíveis;
- no desligamento de um curto-circuito, os tiristores não são solicitados com a tensão de desligamento.

- Para o fusível de ramo vale:

$$I_{N(\text{fusível})} \geq \frac{I_d}{\sqrt{3}} \tag{3.16}$$

A disposição dos fusíveis em ramos é, muitas vezes, a mais favorável, pois o tiristor e fusível operam de forma igual em termos de corrente.

2 - Verificação se o fusível protege o componente

Uma vez escolhido o fusível em termos de corrente nominal, deve-se verificar se o mesmo garante a proteção do componente.

O fabricante do componente (diodo ou tiristor) fornece a capacidade de suportar correntes de curto-circuito através de uma grandeza denominada (I^2t).

Se um fusível atua devido à circulação da corrente de curto-circuito I_k (figura 3.10) o fusível sofrerá fusão até o tempo t_s , denominado tempo de fusão. Este tempo é tanto menor, quanto mais rápido for o crescimento da corrente de curto circuito.

Para fusão do elo é necessário um valor definido de (I^2t), que para tempos de fusão pequenos é aproximadamente independente do comportamento da corrente. Após o intervalo de tempo t_s a corrente de

curto circuito cai a zero no instante t_g . Este processo é denominado de extinção. O tempo de extinção $t_g - t_s$ é tanto maior, quanto maiores forem o valor de pico da corrente antes da extinção e o valor da tensão no circuito em curto. O fator de potência do circuito em curto também influencia no tempo de extinção.

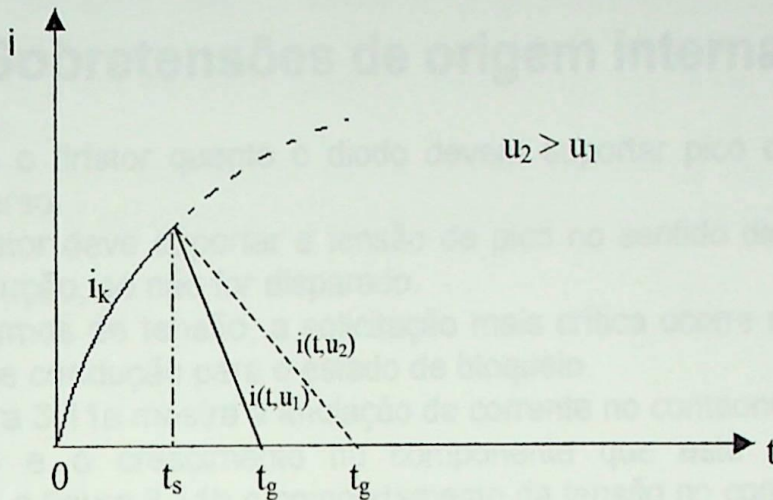


Figura 3.10 - Valores (I^2t) do fusível.

Tempo de Fusão:
$$(I^2t)_S = \int_0^{t_g} i^2 dt \quad (3.17)$$

Tempo de Extinção:
$$(I^2t)_L = \int_0^{t_g} i^2 dt \quad (3.18)$$

Tempo Total:
$$(I^2t)_{total} = \int_0^{t_g} i^2 dt \quad (3.19)$$

ou
$$(I^2t)_{total} = (I^2t)_S + (I^2t)_L \quad (3.20)$$

Todos os valores (I^2t) indicados dependem da temperatura do elemento fusível antes da ocorrência do curto-circuito.

Resumindo, tem-se que a atuação do fusível consiste na fusão do elo seguida da extinção do arco voltaico, desta forma, o fabricante do fusível fornece $(I^2t)_{fusível}$ em função da tensão nominal do mesmo, uma vez que a tensão influi diretamente no tempo de extinção do arco. Em termos gerais tem-se que quanto maior a tensão nominal do fusível, menor será o tempo de extinção e conseqüentemente o valor $(I^2t)_{fusível}$.

3.4 - Especificação em termos de tensão

A definição mais importante do diodo ou tiristor em termos de tensão refere-se aos valores de pico que devem ser suportados repetidamente nos sentidos de condução e de bloqueio.

3.4.1 - Sobretensões de origem interna

Tanto o tiristor quanto o diodo devem suportar pico de tensão no sentido reverso.

O tiristor deve suportar a tensão de pico no sentido direto sem que ocorra condução, se não for disparado.

Em termos de tensão, a solicitação mais crítica ocorre na passagem do estado de condução para o estado de bloqueio.

A figura 3.11a mostra a anulação da corrente no componente que está bloqueando e o crescimento no componente que está assumindo a condução e a figura 3.11b o comportamento da tensão no componente que está sendo bloqueado.

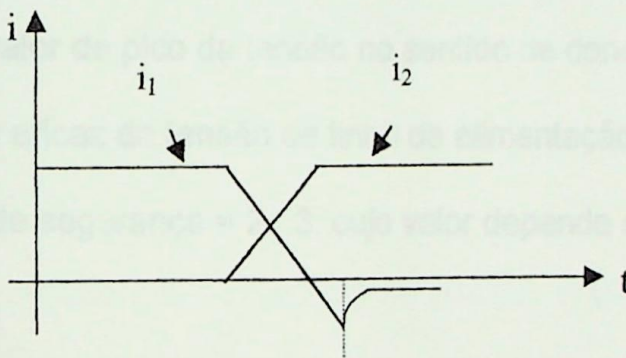


Figura 3.11a - Comportamento da corrente

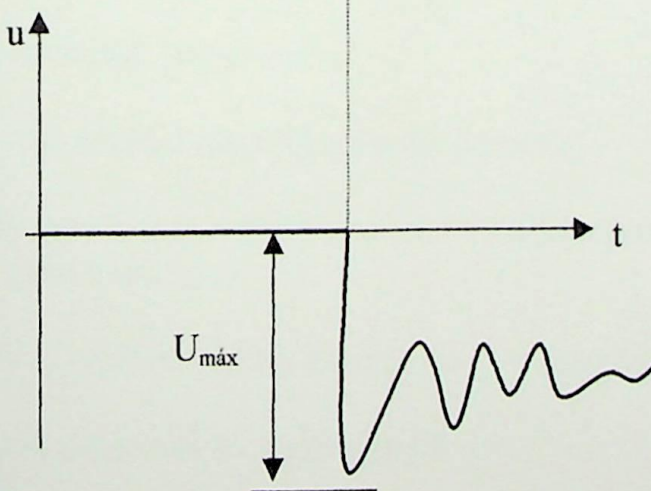


Figura 3.11b - Comportamento da tensão

Ao final da condução o tiristor acumula uma quantidade de cargas na junção que depende do valor da corrente de condução e do gradiente da corrente durante o bloqueio. Esta quantidade de cargas é responsável pela corrente reversa. Uma vez que as cargas são eliminadas da junção, a corrente reversa é anulada provocando, devido à característica indutiva do circuito, a sobretensão mostrada na figura 3.11b.

O componente deverá suportar esta sobretensão sem perder a capacidade de bloqueio. Para limitar este valor de sobretensão são usados elementos RC em paralelo com o componente conforme será descrito posteriormente.

Desta forma deve existir um compromisso entre a especificação do elemento RC e a sobretensão que o componente deve suportar.

Isto resulta que:

$$U_{RRM} = U_{DRRM} = \sqrt{2} \times U_2 \times f_s \tag{3.21}$$

U_{RRM} - valor de pico da tensão no sentido de bloqueio do tiristor

U_{DRRM} - valor de pico da tensão no sentido de condução do tiristor

U_2 - valor eficaz da tensão de linha de alimentação do conversor

f_s - fator de segurança = 2...3, cujo valor depende do elemento RC

Figura 3.12 - Limitação de Tensão através de Elemento RC

Para especificação dos elementos RC, devem ser observadas as seguintes grandezas e condições:

- 1 - tipo de conexão do conversor;
- 2 - tensão máxima admissível pelo componente;
- 3 - corrente inversa, que ocorre no tiristor na passagem do estado de condução para bloqueio;
- 4 - indutância equivalente de do sistema de alimentação do conversor;
- 5 - tensão de alimentação do conversor;
- 6 - corrente de descarga do capacitor quando da entrada do tiristor em condução.

Circuito RC

Consiste na colocação de elementos RC ligados em paralelo com o tiristor, conforme mostra a figura abaixo.

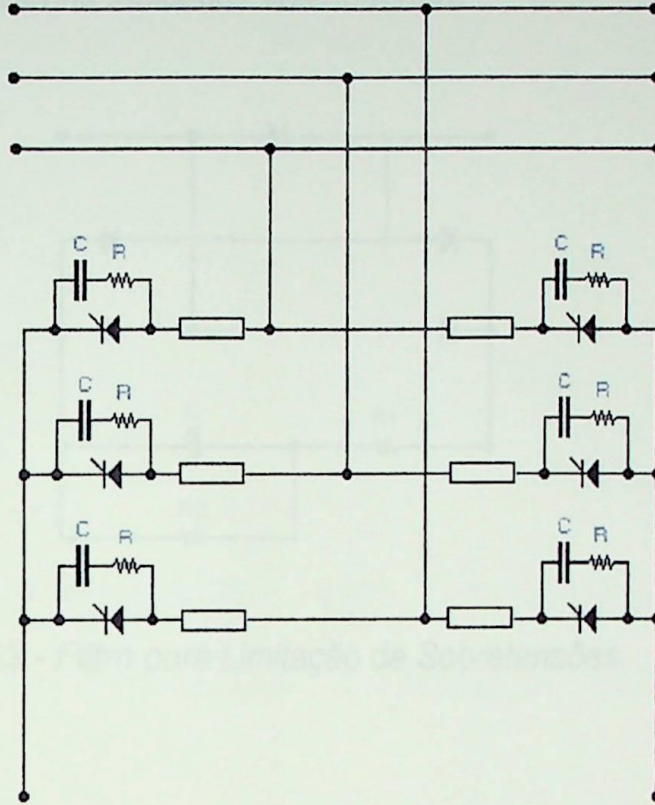


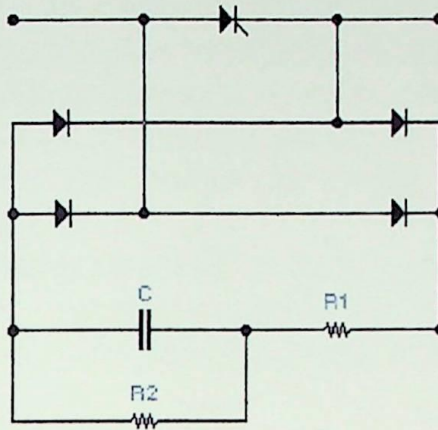
Figura 3.12 - Limitação de Tensão através de Elementos RC

Para especificação dos elementos RC, devem ser observados as seguintes grandezas e condições:

- 1 - tipo de conexão do conversor;
- 2 - tensão máxima admissível pelo componente;
- 3 - corrente inversa, que circula no tiristor na passagem do estado de condução para bloqueio;
- 4 - indutância equivalente do sistema de alimentação do conversor;
- 5 - tensão de alimentação do conversor;
- 6 - corrente de descarga do capacitor quando da entrada do tiristor em condução.

Uma opção para o circuito RC, porém não muito utilizada é o circuito ponte.

Em paralelo com cada tiristor pode ser usada a configuração usada na figura 3.13, que é recomendada principalmente para vários tiristores em paralelo por ramo. Os critérios para escolha dos componentes são basicamente os mesmos indicados anteriormente.



3.13 - Filtro para Limitação de Sobretensões

Como será usado o computador de maior capacidade, os programas deverão considerar possibilidades similares. Uma vez desenvolvido anteriormente a especificação de dados ou roteiro deve ser feita de maneira que a temperatura de junção não ultrapasse o valor máximo especificado pelo fabricante.

Para a especificação deve-se levar em conta o seguinte roteiro:

- escrita do log dado ou roteiro para verificação se o mesmo atende as especificações técnicas especificadas;
- determinação do comportamento da corrente que circula através do dado ou transistor durante o período de condução;
- determinação das perdas no período durante o processo de

Capítulo 4

Desenvolvimento do roteiro para especificação dos componentes do conversor

4.1 - Introdução

O roteiro foi estabelecido para conversores controlados e não controlados, ligados em ponte trifásica ou monofásica, cujo principal enfoque foi dado a cargas indutivas

Neste capítulo será relatado o desenvolvimento individualizado do roteiro de especificação, roteiro este que será demonstrado com um exemplo no capítulo seguinte.

4.2 - Roteiro de Especificação dos Tiristores e Diodos

Para a especificação dos diodos ou tiristores foi desenvolvido um software, tendo como base o catálogo com dados técnicos da SEMIKRON.

Caso seja usado componentes de outros fabricantes, os mesmos deverão apresentar características similares. Como foi mencionado anteriormente a especificação do diodo ou tiristor deve ser feita de maneira que a temperatura da junção não ultrapasse o valor máximo especificado pelo fabricante.

Para a especificação deve-se levar em conta o seguinte roteiro:

- escolha de um diodo ou tiristor para verificação se o mesmo atende às solicitações térmicas operacionais;
- determinação do comportamento da corrente que circula através do diodo ou tiristor durante o período de condução;
- determinação das perdas na junção durante o processo de condução;
- cálculo da temperatura virtual da junção de modo a verificar se o componente escolhido atende às solicitações térmicas de condução, através da comparação com a temperatura máxima admissível.

Facilitando o roteiro os usuários do mesmo poderão fazer uso de um software onde tem-se como dados de entrada o seguinte:

- Comportamento da corrente em função do tempo

I_{d1}	t_1
I_{d2}	t_2
.	.	.
.	.	.
.	.	.
I_{dn}	t_n

- Tipo de Conversor
 - Ponte Monofásica
 - Ponte Trifásica

- Valores de:

- U_{TO}
- r_T
- τ_{Jadm}
- τ_{amb}

Feita a entrada de dados o programa calcula os intervalos de tempo e o devolve à tela principal para que o usuário entre com os valores de Z_{th} a

partir dos mesmos, lembrando que o embasamento do programa foi feito com o Manual da SEMIKRON.

Assim que os valores de Z_{th} forem digitados o programa inicia o cálculo das perdas e da temperatura da junção, comparando o resultado com a temperatura máxima admissível fornecida pelo fabricante. Com esta comparação estabelecida o programa emitirá uma mensagem:

- Se $\tau_J > \tau_{Jadm}$

" O componente escolhido não é adequado, analise o gráfico comparativo!"

- Se $\tau_J < \tau_{Jadm}$

"A especificação está correta, veja gráfico comparativo!"

O programa também mostra um gráfico comparativo das temperaturas.

4.3 - Roteiro de Especificação dos Fusíveis

O roteiro para a especificação dos fusíveis foi feito com a implementação de um software, do mesmo modo que foi feito para os diodos e tiristores.

Tem-se então a seguinte seqüência para a especificação deste componente de proteção:

1 - Entrada de dados

- Comportamento da corrente em função do tempo

I_{d1} t_1

I_{d2} t_2

· · ·

· · ·

· · ·

I_{dn} t_n

- Tipo de Conversor
 - Ponte Monofásica
 - Ponte Trifásica

- Disposição do Fusível
 - Fusível de Ramo
 - Fusível de Fase

CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO DO ROTEIRO PARA ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DO CONVERSOR

Primeiramente o programa determina os valores eficazes das correntes, cuja fórmula para o cálculo é a seguinte:

$$I_{1(ef)} = I_{d1} \cdot K$$

$$I_{2(ef)} = I_{d2} \cdot K$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$I_{n(ef)} = I_{dn} \cdot K$$

onde:

$I_{1(ef)}, I_{2(ef)}, \dots, I_{n(ef)}$ - correntes eficazes

$I_{d1}, I_{d2}, \dots, I_{dn}$ - correntes de entrada

K - fator que depende do tipo de conversor e da disposição do fusível

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad \text{- ponte trifásica e fusível de fase}$$

$$K = \sqrt{\frac{1}{3}} \quad \text{- ponte trifásica e fusível de ramo}$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{- ponte monofásica e fusível de ramo}$$

$$K = 1 \quad \text{- ponte monofásica e fusível de fase}$$

Determinado o valor eficaz de cada corrente, o programa calcula o valor eficaz total, conforme equação abaixo:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{I_{1(ef)}^2 \cdot t_1 + I_{2(ef)}^2 \cdot t_2 + \dots + I_{n(ef)}^2 \cdot t_n}{\sum t}}$$

Feito o cálculo da corrente eficaz total, é efetuada a comparação desta corrente com a corrente nominal do fusível

$$I_{N \text{ fusível}} > I_{ef}$$

Se esta condição é satisfeita o fusível é adequado salvo uma pequena comparação que deve ser feita graficamente, onde se deve comparar se todos os pontos ficam à esquerda da curva de fusão do fusível e após finalizada esta verificação, o $(I^2t)_{\text{fusível}}$ escolhido deve ser comparado com o $(I^2t)_{\text{tiristor}}$, lembrando que nesta curva o $(I^2t)_{\text{fusível}}$ já é o total, isto é:

$$(I^2t)_{\text{fusão}} + (I^2t)_{\text{extinção}}$$

As curvas usadas para as verificações citadas acima estão em anexo.

4.4 - Roteiro de Especificação do Elemento RC

No caso do elemento RC a especificação é feita de maneira gráfica, sendo neste caso dispensável um software para a especificação do mesmo.

O roteiro neste caso foi desenvolvido seguindo os seguintes passos:

1 - Introdução

O cálculo apresentado a seguir baseia-se em um método clássico adotado pela General Electric para a determinação do circuito snubber (elemento RC). Os gráficos que serviram de base para definição dos elementos foram tomados do Manual de Eletrônica da GE.

2 - Roteiro para especificação do elemento RC (snubber)

2.1 - Parâmetros tomados como base

Em função das condições operacionais do circuito bem como do diodo ou tiristor especificado, tem-se:

$$U_{RRM}$$

$$U_{MAX}$$

$$[dv/dt]_{MAX}$$

onde:

U_{RRM} - tensão de pico reversa do diodo

U_{MAX} - maior valor de pico de tensão esperado

$[dv/dt]_{MAX}$ - gradiente máximo de tensão limitado pelo circuito RC

2.2 - Determinação do elemento RC

Inicialmente determina-se a seguinte relação:

$$\underline{v} = \frac{U_{RRM}}{U_{MÁX}} \quad (4.1)$$

O valor de \underline{v} é levado até a curva 1 da figura 1 (anexo C), obtendo-se um fator de amortecimento:

ε = fator de amortecimento

Para determinar a constante de tempo RC do snubber utiliza-se o ábaco mostrado na figura 2 (anexo C).

Ligando-se os pontos A e B, cujo os valores são:

$$A = \frac{\left| \frac{dv}{dt} \right|_{MAX}}{U_{RRM}} \quad (4.2)$$

$$B = \varepsilon$$

obtém-se:

$$R \cdot C$$

Para determinar-se o valor de R utiliza-se novamente a figura 1. Neste caso, para o mesmo fator de amortecimento (ε), a curva (2) da figura (1) fornece a relação α , sendo:

$$\alpha = R \cdot \frac{I_p}{U_{MAX}} \quad (4.3)$$

onde:

R - valor ôhmico da resistência

I_p - valor limite de corrente de descarga do capacitor sobre o diodo ou tiristor

É importante observar que em alguns casos o capacitor não se descarregará sobre o diodo ou tiristor, podendo então a resistência ser dispensada. Todavia, a inclusão do resistor aqui sugerido não reduz a eficiência do circuito RC na sua operação normal

O valor limite de corrente de descarga do capacitor sobre o diodo ou tiristor sugerido no artigo "Richtlinien für die Bemessung der Trägerspeichereffekt-Beschaltung von Thyristoren", Von Gerd Thiele, ETZ-A Bd.90 (1969) H.14 - Anforderungen der Elektronik na die Netzwechselfspannung, é:

$$I_p = 80[A]$$

Da equação (4.3) obtém-se o valor de R.

O valor do capacitor é obtido da equação (4.5) abaixo.

$$C = \frac{R \cdot C}{R} \tag{4.5}$$

onde:

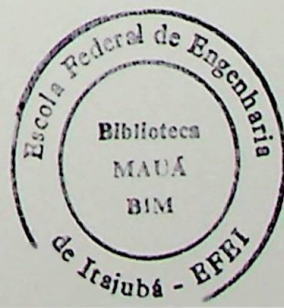
R . C - valor obtido na figura 2 (anexo C)

R - valor obtido na equação (4.3)

Assim, concluindo, temos os valores de R e C, o circuito snubber.

4.5 - Roteiro de Especificação do Transformador

Sabe-se que o transformador tem sua potência distinta para cada tipo de conversor, sendo assim o software que especifica o transformador deve sem dúvida alguma levar isto em consideração.



Entrada de dados

- Comportamento da corrente
- Tipo de Conversor
 - Ponte Monofásica e Não Controlado
 - Ponte Monofásica e Controlado
 - Ponte Trifásica e Não Controlado
 - Ponte Trifásica e Controlado

- Intervalos de Tempo

t	a	t ₁
t ₁	a	t ₂
t ₂	a	t ₃
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
t _n	a	t _{n+1}

- U_d

Com esses dados o programa segue os seguintes passos:

1 - Calcula o valor de I_d através da equação abaixo:

$$I_d = \sqrt{\frac{I_{d1}^2 \cdot t_1 + I_{d2}^2 \cdot t_2 + \dots + I_{dn}^2 \cdot t_n}{\sum t}} \quad (4.6)$$

2 - Calcula o ângulo α (para conversor controlado)

Para conversor controlado e ponte monofásica

$$U_{d\alpha} = 0,9 U_2 \cos\alpha \quad (4.7)$$

Para conversor controlado e ponte trifásica

$$U_{d\alpha} = 1,35 U_2 \cos\alpha \quad (4.8)$$

3 - Calcula S_{TN}

Para ponte monofásica e conversor não controlado

$$S_{TN} = 1,11 U_d I_d \quad (4.9)$$

Para ponte monofásica e conversor controlado

$$S_{TN} = 1,11 U_d I_d \cos \alpha \quad (4.10)$$

Para ponte trifásica e conversor não controlado

$$S_{TN} = 1,05 U_d I_d \quad (4.11)$$

Para ponte trifásica e conversor controlado

$$S_{TN} = 1,05 U_d I_d \cos \alpha \quad (4.12)$$

Recomenda-se, que a impedância percentual do transformador do conversor seja maior que 7%, com o objetivo de limitar o gradiente de corrente durante a comutação.

5.1 - Introdução

Este capítulo contém um exemplo de aplicação para a especificação do tiristor, tiristor, elemento RC e transformador.

O software desenvolvido para esta aplicação foi programado em Visual Basic versão 5.0 e sua função é determinar o tiristor, tiristor e o transformador, assumindo que o elemento RC será especificado pelo usuário gráfico em questão.

5.2 - Tiristor

Será analisado o tiristor MCT760 encontrado aproximadamente do manual da SEMIKRON. Sua especificação irá comprovar a eficácia dos resultados do programa. As curvas referentes a esse componente estão no anexo A.

Os dados do tiristor especificado estão relacionados na tabela a seguir.

Esses dados serão utilizados nas especificações de todos os componentes.

Capítulo 5

Exemplo de Aplicação

5.1 - Introdução

Este capítulo contém um exemplo de aplicação para a especificação do tiristor, fusível, elemento RC e transformador.

O software desenvolvido para esta aplicação foi programado em Visual Basic versão 5.0 e sua função é especificar o tiristor, fusível e o transformador, enquanto que o elemento RC será especificado pelo método gráfico em questão.

5.2 - Tiristor

Será analisado o tiristor SKT760 escolhido aleatoriamente do manual da SEMIKRON. Sua especificação irá comprovar a eficácia dos resultados do programa. As curvas referentes a esse componente estão no anexo A.

Os dados do tiristor escolhido estão relacionados na tabelas a seguir.

Esses dados serão utilizados nas especificações de todos os componentes.

1 - Tensão

U_{RRM} (V)	400	800	1200	1400	1600	1800
U_{DRRM} (V)	400	800	1200	1400	1600	1800
dv/dt (V/ μ s)	500	500	500	1000	1000	1000

Tabela 5.1 - Valores de Tensão do Tiristor SKT760

2- Outros Dados

R_{thjc} ($^{\circ}$ C/W)	Contínuo - dissipador duplo	0,038
	Senoidal 180 $^{\circ}$ - dissipador duplo	0,040
	Retangular 120 $^{\circ}$ - dissipador duplo	0,045
I^2t (A^2s)	845000	
U_{TO} (V)	0,92	
r_T (m Ω)	0,3	
τ_{jadm} ($^{\circ}$ C)	125 $^{\circ}$	

Tabela 5.2 - Outros dados do Tiristor SKT760

Os valores de corrente e tempo estão mostrados na figura abaixo.

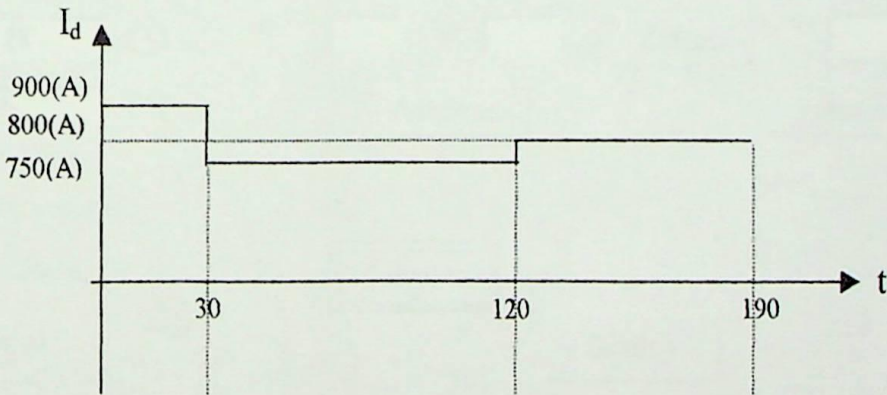


Figura 5.1 - Corrente I_d em função do tempo

- $I_{d1} = 900(A)$ durante 30 (s) - $t=0$ a $t=30(s)$
- $I_{d2} = 750(A)$ durante 90 (s) - $t=30$ a $t=120(s)$
- $I_{d3} = 800(A)$ durante 70 (s) - $t=120$ a $t=190(s)$

Na curva da impedância térmica do tiristor SKT760, (anexo A, figura1) percebe-se que a impedância térmica para valores de tempo acima de 10(s) é praticamente constante.

A tabela a seguir contém todos os valores de impedância térmica.

Tempo (s)	Z_{thlc} ($^{\circ}\text{C/W}$)	Z_{thca} ($^{\circ}\text{C/W}$)	$Z_{thtotal}$ ($^{\circ}\text{C/W}$)
$t_1=30$	0,03875	0,06	0,09875
$t_2=120$	0,03875	0,082	0,12075
$t_{21}=90$	0,03875	0,075	0,11375
$t_3=190$	0,03875	0,088	0,12675
$t_{31}=160$	0,03875	0,084	0,12275
$t_{32}=70$	0,03875	0,07	0,10875

Tabela 5.3 - Valores de Z_{th}

O processo é cíclico e se repete a cada 5 minutos.

A seguir tem-se a tela do programa com os dados de entrada e os valores de temperatura já calculados.

Intervalos

Entre com os dados do tiristor:

U_{T0} (V)

r_T (m ohms)

T_{jadm} ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} ($^{\circ}\text{C}$)

Corrente (A)

Tempo (s)

Intervalos de Tempos (s)

Z_{th} ($^{\circ}\text{C/W}$)

Tipo de Conversor

Monofásico

Trifásico

T_{j0} ($^{\circ}\text{C}$) = 45 T_{j1} ($^{\circ}\text{C}$) = 96,25125 T_{j2} ($^{\circ}\text{C}$) = 93,99081 T_{j3} ($^{\circ}\text{C}$) = 100,2185

Figura 5.2 - Tela do software para especificação de Tiristores e Diodos

Assim que as temperaturas são calculadas e comparadas à temperatura máxima admissível, o programa emite uma mensagem dizendo se a especificação está ou não correta.

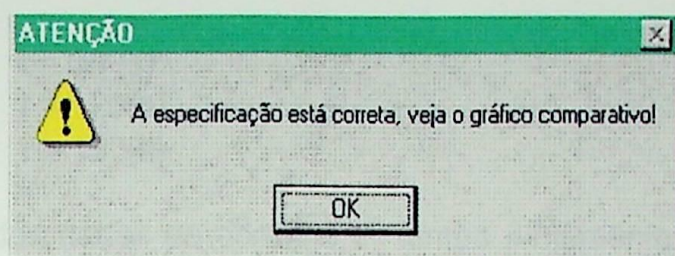


Figura 5.3 - Mensagem emitida pelo programa

A figura 5.4 mostra o gráfico comparativo das temperaturas.

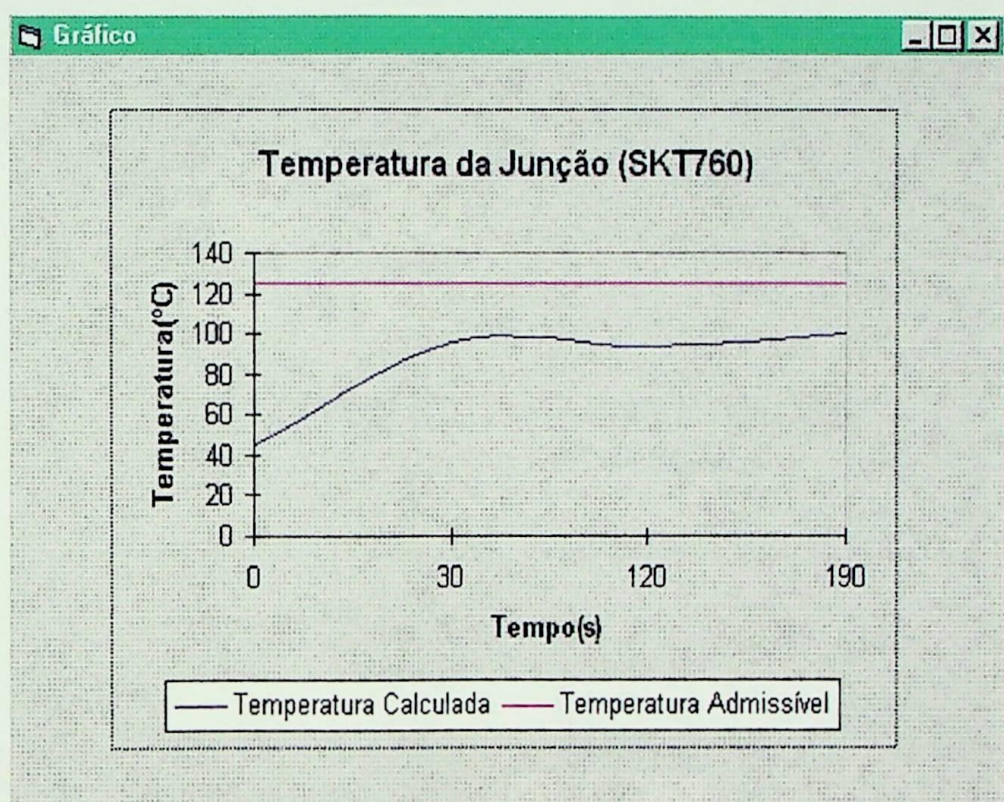


Figura 5.4 - Gráfico Comparativo

5.3 - Fusível

Para exemplificar a especificação do fusível foi necessário utilizar, além do software implementado, um método gráfico cujas curvas estão no anexo B.

No software é necessário conhecer os valores das correntes I_d e dos tempos t . Estes valores são os mesmos utilizados anteriormente, ou seja

$$I_{d1} = 900 \text{ (A)}$$

$$I_{d2} = 750 \text{ (A)}$$

$$I_{d3} = 800 \text{ (A)}$$

t = 0 até t = 30 (s)
 t = 30 até t = 120(s)
 t = 120 até t = 190(s)

A partir dos dados de corrente e tempo juntamente com o tipo de conversor a ser usado e o modo como os fusíveis estão dispostos, calcule o valor da corrente eficaz:

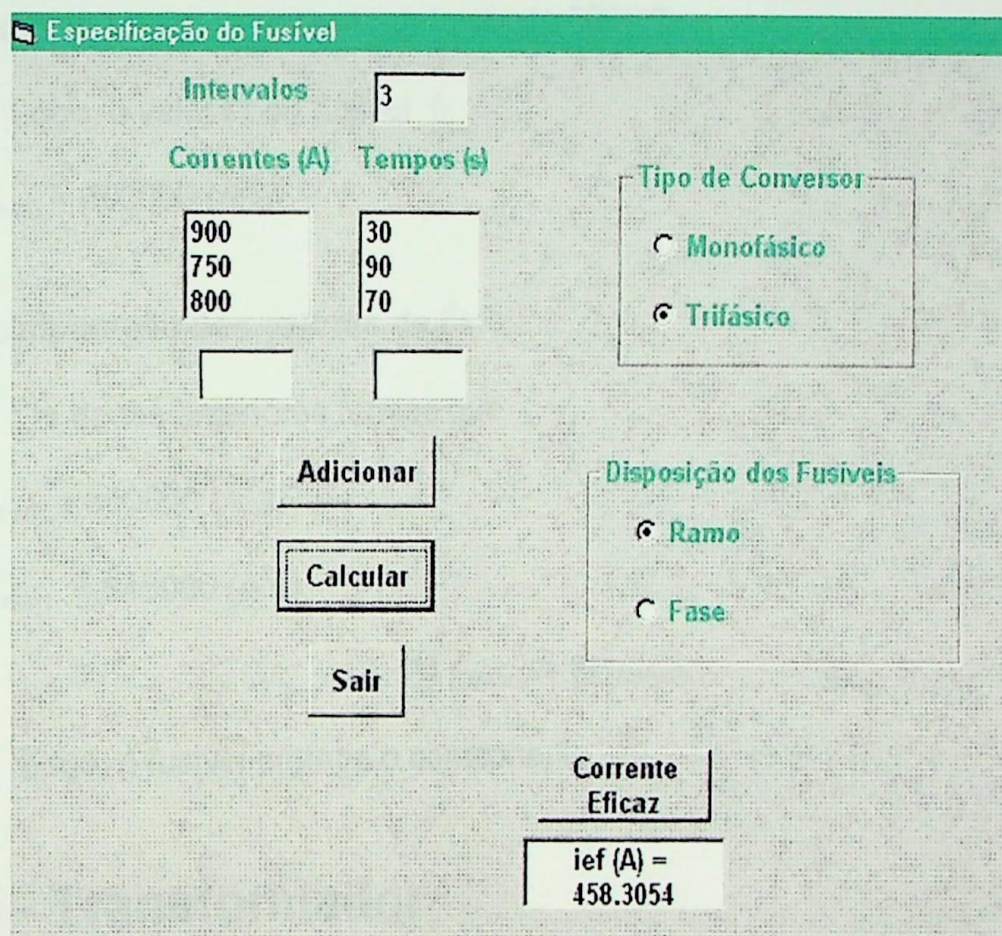


Figura 5.5 - Tela do software para especificação de Fusíveis

A partir do valor de corrente eficaz calculado torna-se necessário seguir alguns passos para especificação do fusível.

1 - Encontrar o valor da corrente nominal do fusível

Na curva 1 do anexo B escolhe-se um fusível com corrente nominal acima do valor de corrente eficaz calculado acima.

Para este caso o valor de corrente nominal escolhido é $I_N = 500(A)$.

Logo,

$$I_N > I_{ef}$$



Verificada esta comparação, se ela for verdadeira o fusível já está especificado, porém é recomendável que se compare o valor I^2t do fusível com o valor I^2t do tiristor. Este valor I^2t do fusível é conseguido através da curva 2 do anexo B.

2 - Encontrar o valor I^2t do fusível.

Este valor I^2t do fusível é conseguido através da curva 2 do anexo B.

Para o nosso caso este valor é tomado da curva para 500(V), devido à tensão do transformador utilizado ser de 500(V).

Logo, o valor I^2t do fusível é:

$$I^2t_{(\text{fusível})} = 600000 \text{ (A}^2\text{s)}$$

3 - Comparação dos valores de I^2t

De dados anteriores tem-se que

$$I^2t_{(\text{fusível})} = 600000 \text{ (A}^2\text{s)}$$

$$I^2t_{(\text{tiristor})} = 845000 \text{ (A}^2\text{s)}$$

$$I^2t_{(\text{tiristor})} > I^2t_{(\text{fusível})}$$

Logo, o fusível protege o componente.

5.4 - Transformador

$$U_2 = 500 \text{ (V)}$$

De acordo com sugestão de fabricantes:

$$U_{d\alpha} = U_2$$

Para a especificação do transformador os dados de entrada são:

$$I_{d1} = 900 \text{ (A) durante } 30 \text{ (s)}$$

$$I_{d2} = 750 \text{ (A) durante } 90 \text{ (s)}$$

$$I_{d3} = 800 \text{ (A) durante } 70 \text{ (s)}$$

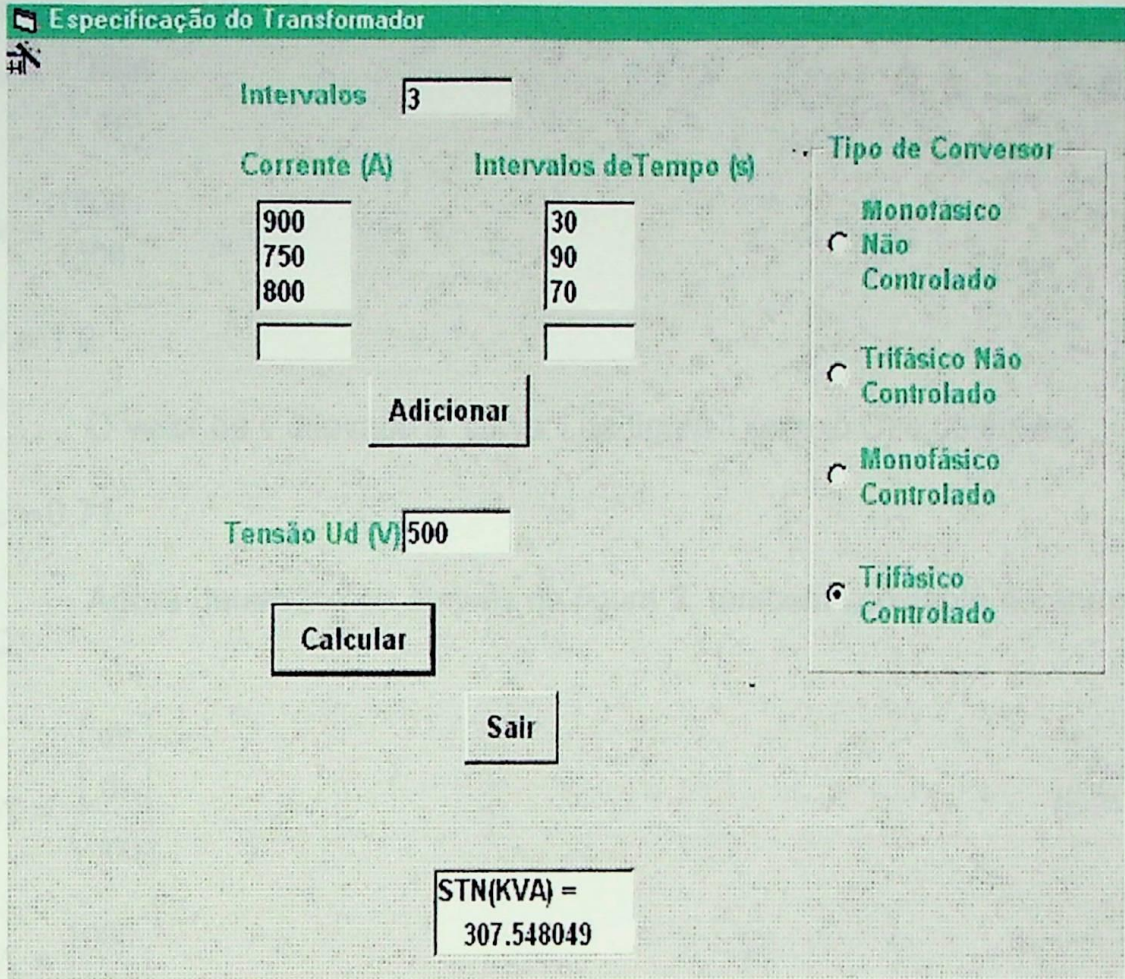


Figura 5.6 -Tela do software para especificação do Transformador

STN (transformador escolhido) > STN (transformador calculado)

5.5 - Elemento RC

$$U_2 = 500(V)$$

$$U_{RRM} = U_{DRRM} = \sqrt{2} \times U_2 \times f_s \quad (5.1)$$

$$U_{RRM} = 1767,77(V)$$

Da tabela 5.1 tem-se que:

$$U_{RRM} = 1800 (V)$$

$$U_{m\acute{a}x} = 1400 (V)$$

$$(dv/dt) = 1000 \text{ (V/}\mu\text{s)}$$

$$v = \frac{U_{RRM}}{U_{m\acute{a}x}} \quad (5.2)$$

$$v = \frac{1800}{1500}$$

$$v = 1,2$$

O valor de v é levado à curva 1 da figura 1 (anexo C) e obtém-se:

$$\varepsilon = 0,71$$

Agora determina-se através da figura 2, também constante no anexo C.

$$A = \frac{\left[\frac{dv}{dt} \right]}{U_{RRM}} \quad (5.3)$$

$$A = \frac{1000}{1800}$$

$$A = 0,56$$

Ainda da figura 1, obtém-se o valor de B utilizando a curva 2.

$$B = \varepsilon$$

$$B = 0,71$$

Ligando-se os pontos A e B na figura 2, tem-se:

$$R.C = 4 \text{ } [\mu\text{s}] \quad (5.4)$$

Para calcular o valor de R utiliza-se novamente a figura 1 e para o mesmo valor de ε , obtém-se o valor de α .

Logo,

$$\alpha = 0,65$$

Sendo assim,

$$\alpha = R \cdot \frac{I_p}{1400} \quad (5.5)$$

$$I_p = 80 \text{ (A) - sugerido}$$

então,

$$R = 11,38 \text{ } [\Omega]$$

Da equação 5.4 obtém-se o capacitor.

$$C = \frac{4}{11,38}$$

$$C = 0,35 \text{ } [\mu\text{F}]$$

Assim, sugere-se a seguinte especificação:

$$R = 11,38 \text{ } [\Omega]$$

$$C = 0,35 \text{ } [\mu\text{F}]$$

Capítulo 6

Conclusões

Esta dissertação apresentou um roteiro para especificação dos componentes de um conversor comutado pela rede, controlado ou não controlado. Norteou este trabalho o objetivo de estabelecer tal roteiro, de modo que possa ser usado a partir dos dados da carga e com base em listas técnicas de fabricantes.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho e principalmente em sua fase final, verificou-se que:

- Fabricantes de conversores adotam um método bem mais simples para determinação da capacidade de condução de corrente, pois independentemente do comportamento da carga trabalha-se sempre com a resistência térmica. Nesta dissertação oferece-se a possibilidade de um cálculo mais exato, pois para cargas intermitentes o método se baseia na impedância térmica.
- Inicialmente pretendeu-se criar um banco de dados para os componentes (diodos e tiristores) para otimizar ainda mais a especificação. Isto todavia não foi viável no tempo disponível, pois o armazenamento dos valores de impedância térmica é bastante trabalhoso.

- Na definição da proteção contra curto-circuito, a preocupação foi apenas com aqueles de origem interna, protegidos por fusíveis extra-rápidos. Ficou fora do escopo a proteção externa do conversor, proteção esta que é feita com disjuntores extra-rápidos.
- A contribuição fundamental deste trabalho é a criação de um software para analisar a capacidade de condução de corrente com auxílio do método da superposição e utilizando-se dos valores de impedância térmica do tiristor ou diodo e do respectivo dissipador.

Recomenda-se um ampliação deste trabalho com:

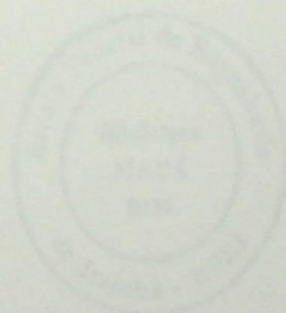
- Criação do banco de dados dos componentes
- Especificação da proteção externa do conversor considerando-se a seletividade com a proteção interna.

Curva da Impedância Térmica do
Tiristor SKT750 e do Dissipador
2xP8/150F

Anexo A

Curva da Impedância Térmica do Tiristor SKT760 e do Dissipador 2xP8/180F

Figura 1 – Impedância Térmica Transiente X Tempo



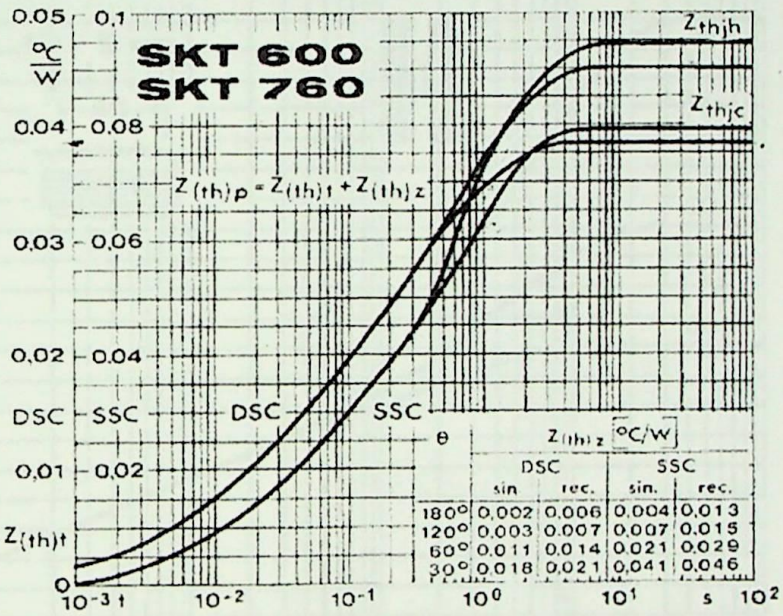


Figura 1 – Impedância Térmica Transitória X Tempo



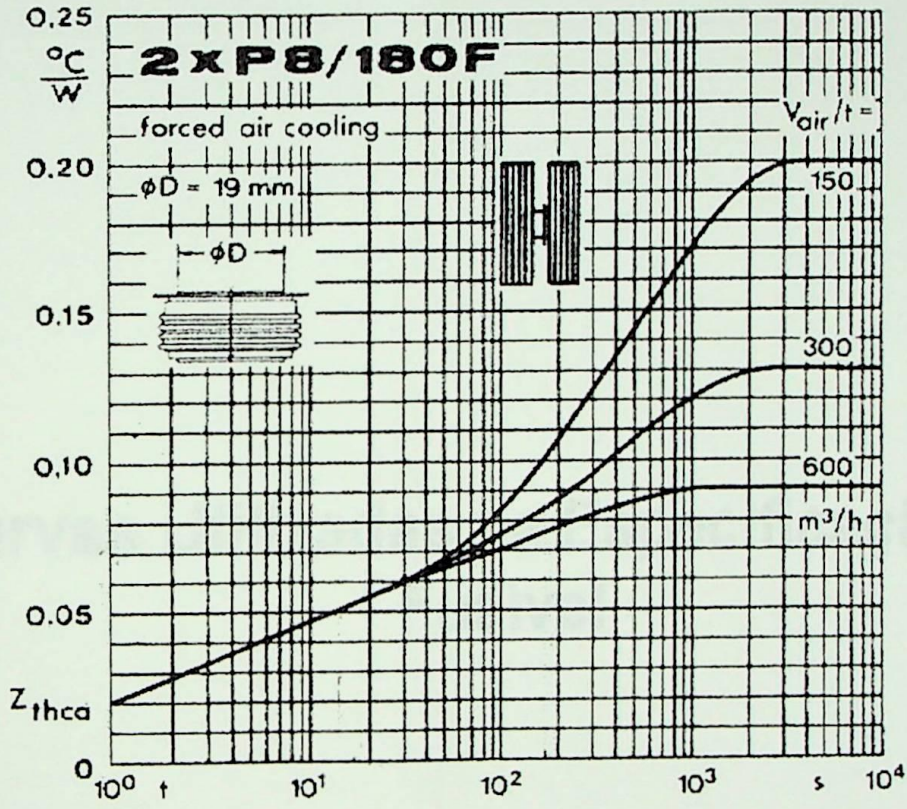


Figura 2 – Impedância Térmica Transitória do Dissipador x Tempo

Anexo B

Curvas Utilizadas na Especificação do Fusível

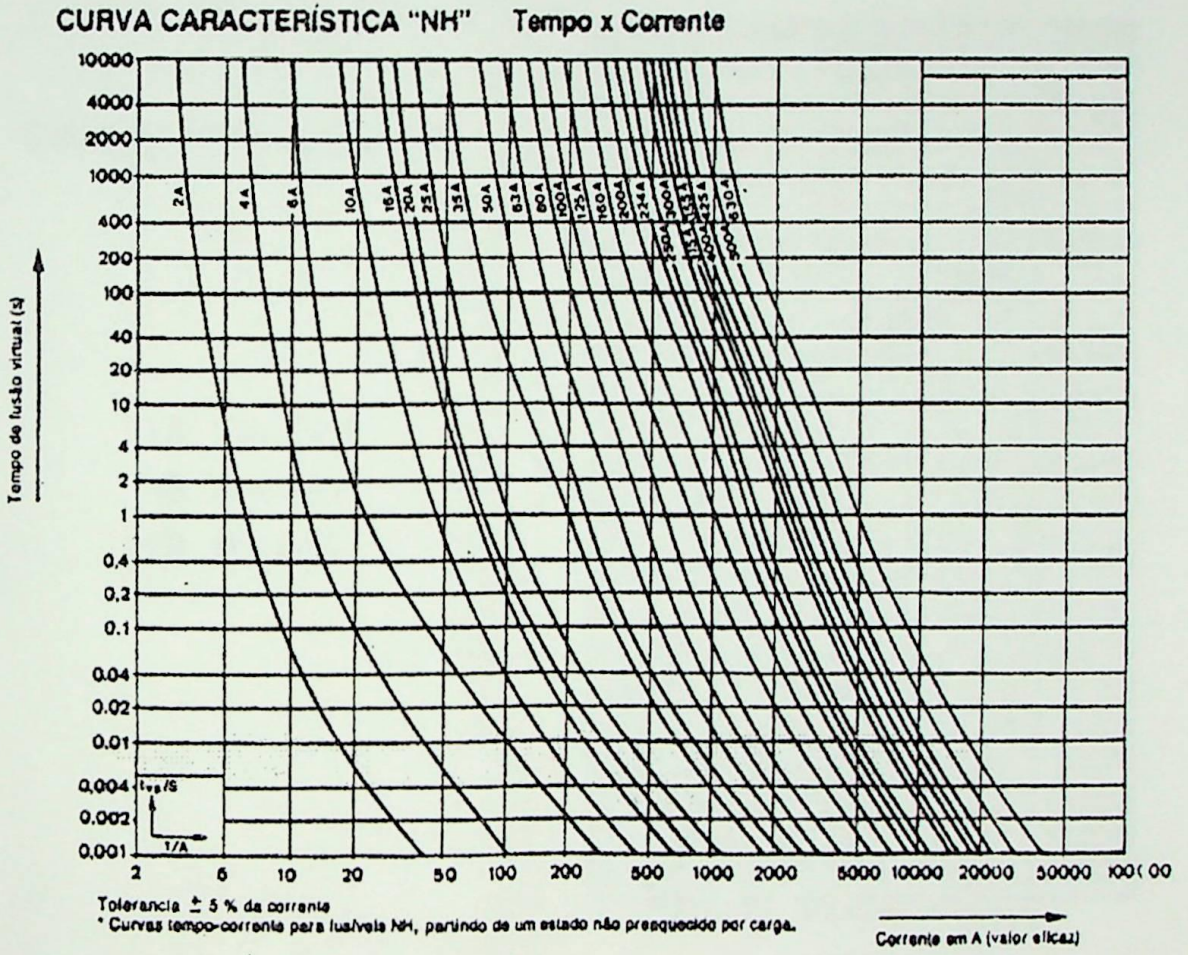


Figura 1 – Valor da Corrente Nominal do Fusível

CURVA DE SELETIVIDADE "NH"

- ① $I^2t \sim (500 \text{ V})$
- ② $I^2t \sim (380 \text{ V})$
- ③ $I^2t \sim (4\text{ms})$

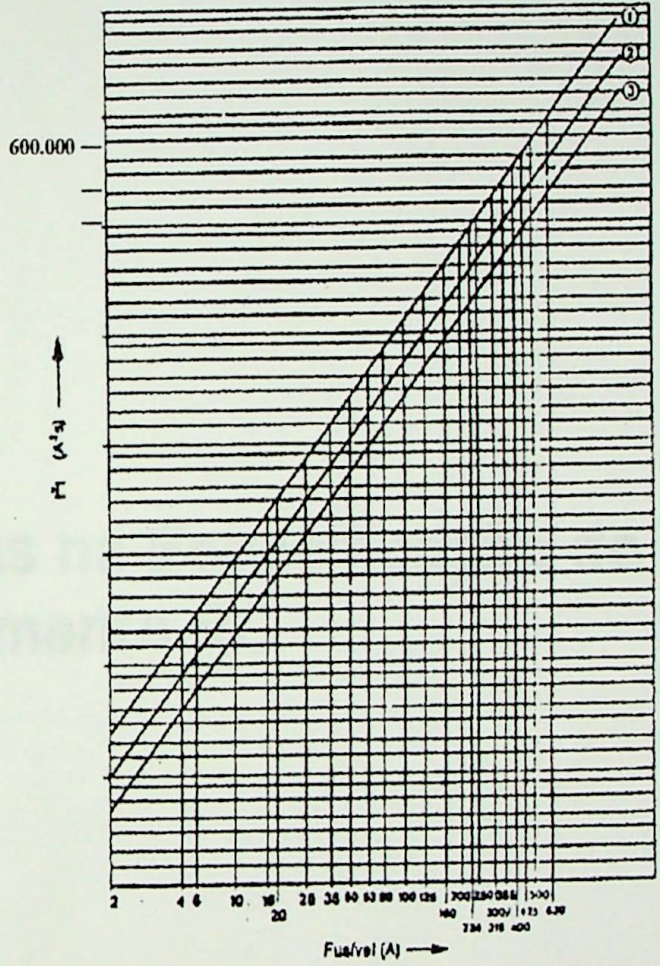


Figura 2 – Valores I^2t do fusível

Anexo C

Curvas Utilizadas na Especificação do Elemento RC

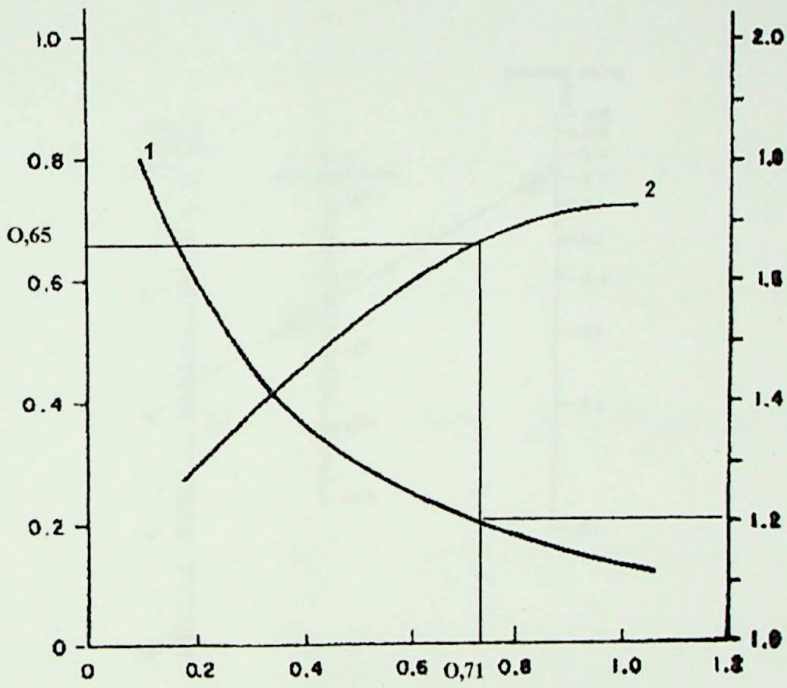


Figura 1 – Valores de α e ε

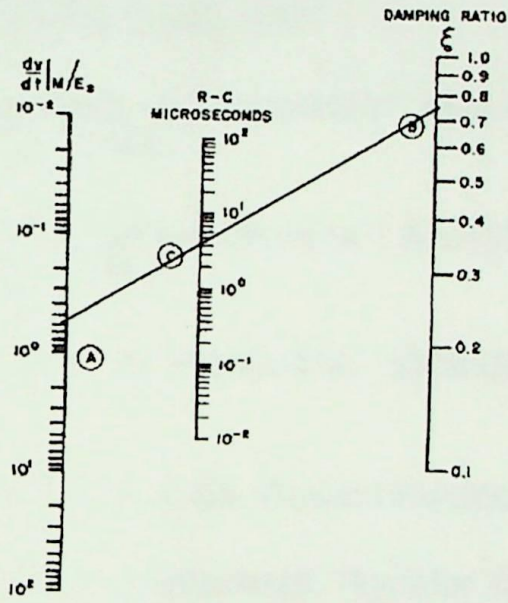


Figura 2 – Valores de R.C

Referências Bibliográficas

- [1] Rezek, A. J. J.. “Análise em Regime Permanente e Transitório de um Sistema de Conversão de Energia Elétrica AC/DC”. Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá/MG, junho, 1986.
- [2] Santos Júnior, Mozart Jesus Fialho . “Visual Basic 4.0”, Editora Gráfica Terra Ltda, Goiânia/GO, 1995.
- [3] Sá, J. S. “Conversores Controlados”. Apostila, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1986.
- [4] Sá, J. S. “Acionamentos Elétricos”. Apostila, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1981.
- [5] Semicondutores de Potência'90, SEMIKRON Semicondutores Ltda,1990.
- [6] Manual de Eletrônica da GE, General Electric, 1972.
- [7] Möltgen, G. “Line Commutated Thyristor Converters”, Siemens Aktiengesellschaft Pitman Publishing, London, 1972.
- [8] Kostenko, M. “Máquinas Elétricas”, Volume 1, Edições Lopes da Silva, Porto – 1979.