TESE
962

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

Análise das Solicitações Impostas aos Pára-Raios Secundários dos Transformadores Abaixadores nos Pontos de Interconexão dos Sistemas de Alta Tensão

Antônio José de Souza

MARÇO DE 1998

ITAJUBÁ MG

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM

ANÁLISE DAS SOLICITAÇÕES IMPOSTAS AOS PÁRA-RAIOS SECUNDÁRIOS DOS TRANSFORMADORES ABAIXADORES NOS PONTOS DE INTERCONEXÃO DOS SISTEMAS DE ALTA TENSÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Aluno: ANTÔNIO JOSÉ DE SOUZA
Orientador: JOÃO ROBERTO COGO
Co-orientador: MANUEL LUÍS BARREIRA MARTINEZ

ITAJUBÁ - M.G.

MARÇO DE 1998

À minha esposa
Rita Helena

AGRADECIMENTOS

À Escola Federal de Engenharia de Itajubá - **EFEI** que possibilitou a realização deste trabalho, bem como à **CAPES**, pela bolsa de estudos do Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica.

Aos professores João Roberto Cogo e Manuel Luís Barreira Martinez, pela amizade, paciência e dedicação na orientação e co-orientação.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS iii

SUMÁRIO iv

RESUMO vii

ABSTRACT viii

CAPÍTULO 1 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR

1.1 - Introdução

1.1.1 - Aspectos Construtivos de um Transformador 01
1.1.2 - Conceituação do Problema 10

1.2 - Mecanismo de Transferência de Surtos 20

1.2.1 - Componente Transferida Eletrostaticamente 20

1.2.1.1 - Considerações Gerais e Equacionamento Simplificado 21
1.2.1.2 - Comentários sobre a influência da Capacitância Secundária 38
1.2.1.3 - Comentários sobre as conexões trifásicas 39
1.2.1.4 - Comentários sobre a influência das Impedâncias de Surto Secundárias 42

1.2.2 - Componente Transferida Eletromagneticamente 43

1.2.2.1 - Equacionamento via circuito no tempo 43
1.2.2.2 - Equacionamento via Componentes Simétricas 56

1.3 - Modelos de Transformadores para Estudo de Surtos Transferidos 70

1.3.1 - Modelos Completo e Simplificado 70

CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS PÁRA-RAIOS

2.1 - Pára-raios Convencionais a Carboneto de Silício 76

2.1.1 - Características Construtivas 76
2.1.2 - Desempenho Frente a Surtos Atmosféricos 89
2.1.3 - Desempenho Frente a Surtos de Manobra 92
2.1.4 - Desempenho Frente a Sobretensões Sustentadas 95

2.2 - Pára-raios a Óxido de Zinco ZnO 98

2.2.1 - Características Construtivas 98
2.2.2 - Desempenho Frente a Surtos Atmosféricos 130
2.2.3 - Desempenho Frente a Surtos de Manobra 134
2.2.4 - Desempenho Frente a Sobretensões Sustentadas 138

CAPÍTULO 3 - REQUISITOS PARA A COORDENAÇÃO DOS PÁRA-RAIOS PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO DE UM TRANSFORMADOR EQUACIONAMENTO SIMPLIFICADO

3.1 - Desempenho Frente a Descargas Atmosféricas Transferidas 146

3.1.1 - Nenhum dos Pára-raios Ligado aos Terminais do Transformador Atua 147
3.1.2 - Sistema Protegido por Pára-raios Ligado aos Terminais de A.T 151
3.1.3 - Sistema Protegido por Pára-raios Ligado aos Terminais de B.T. 162
3.1.4 - Sistema Protegido por Pára-raios Ligado aos Terminais de A.T e B.T. 171
3.1.5 -Cálculo Simplificado da Corrente de Descarga do Pára-raios de um Transformador 184
3.1.6 - Comentários e Conclusões 187

3.2 - Desempenho Frente a Descargas de Manobra Transferidas 190

3.2.1 - Introdução 190
3.2.2 - Condições a Serem Analisadas 191

3.2.3 - Nenhum Pára-raios Atua 194
3.2.4 - Pára-raios Atua 195
3.2.5 - Cálculo Simplificado da Corrente de Descarga do Pára-raios de um Transformador 216

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS COMPARATIVOS 220

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES 234

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 236

TABELAS E FIGURAS 238

ANEXOS 248

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar equações simplificadas em termos de corrente nos pára-raios, quando um impulso atinge os terminais do enrolamento do transformador de potência.

O comportamento transitório dos enrolamentos dos transformadores de potência são apresentados no Primeiro Capítulo, assim como, o modelo de transformadores para surtos transferidos.

O Segundo Capítulo apresenta análises das características construtivas dos pára-raios e do desempenho frente a surtos transferidos.

Subsequentemente, o Terceiro Capítulo apresenta os requisitos para a coordenação dos pára-raios primários e secundários do transformador. No Quarto Capítulo são feitas tabelas dos resultados obtidos com as equações simplificadas e são feitas comparações com os resultados simulados.

Finalmente, o Último Capítulo apresenta conclusões e as referências bibliográficas sobre os assuntos abordados ao longo deste texto.

ABSTRACT

This work objective is to present simplified equations in terms of currents in arresters, when an impulse wave hits in terminals of power transformer windings.

The behaviour of the power transformers windings in front transfered surges are presented in the First Chapter as well as the power transformers models for surge transfered studies.

In the Second Chapter are made analysis of design and performance characteristics of the arresters in front transfered surges.

Following, the Third Chapter presents requisites for arresters coordination in the primary and in the secundary terminals. In the Fourth Chapter are made tables of results obtained with simplified equations and comaparisons with simulated results of transient program.

Finally, in the Fifth Chapter are presented conclusions and bibliographycal references regarding all the aspects presented through this text.

CAPÍTULO 1

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DOS ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR

I.1- Introdução:

I.1.1. Aspectos construtivos de um transformador

De modo a melhor entender os fenômenos transitórios nos transformadores seja uma rápida análise de suas partes constituintes. Dentro deste contexto, e de maneira simplificada, as partes principais que compõem um transformador são:

I) Núcleo;

II) Enrolamentos;

III) Tanque; e

IV) Buchas de saída.

I - Núcleo do transformador:

O núcleo é um conjunto formado pelo circuito magnético e por todos os seus elementos construtivos. De acordo com o tipo de núcleo tem-se;

- Transformadores de núcleo envolvido: os enrolamentos envolvem as colunas do núcleo;

- Transformadores de núcleo envolvente ou, blindados: os enrolamentos estão parcialmente rodeados pelo núcleo.

Independentemente do tipo de núcleo, este é formado por chapas de aço especial, usualmente denominado aço para transformadores com espessuras de 0,35 ou 0,5 [mm]. Este aço contém silício em sua composição fato que proporciona características especiais de magnetização e perdas. Este material por ser condutor, sob a ação do fluxo magnético alternado, permite o aparecimento de condições para o surgimento de correntes parasitas. Portanto para minimizar o problema, o núcleo, ao invés de ser uma estrutura maciça, é construído pelo empilhamento de chapas finas, isoladas entre si, interligadas por tirantes e por faixas de fibra de vidro impregnadas com resina.

São usados dois tipos de aços para transformadores: aço laminado a quente e o aço laminado a frio. O aço laminado a frio apresenta condições magnéticas melhores em termos de fabricação, em relação ao aço laminado a quente; porém exige métodos especiais de empilhamento do núcleo.

Para isolar as chapas é usado papel de 0,03 [mm] de espessura e verniz. O isolamento de transformadores de potência é realizado com o auxílio de verniz por apresentar condutibilidade calorífica, resistência ao calor e resistência mecânica superior que a apresentada pelo isolamento feito com papel.

Em geral, o núcleo dos transformadores de potência maior que 100 [KVA] é construído com chapas de aço de 0,5 [mm] de espessura, dado que o manuseio de chapas com espessura de 0,35 [mm] é mais difícil de se realizar. Esquematicamente o núcleo de transformadores de núcleo envolvido trifásico com os seus enrolamentos estão representados na *Figura I.1.1.1*, onde o índice (1) representa os enrolamentos de Alta Tensão A.T., o índice (2) representa os enrolamentos de Baixa Tensão B.T., o índice (3) representa as colunas e o índice (4) representam as culatras (ou jugos) superior e inferior.

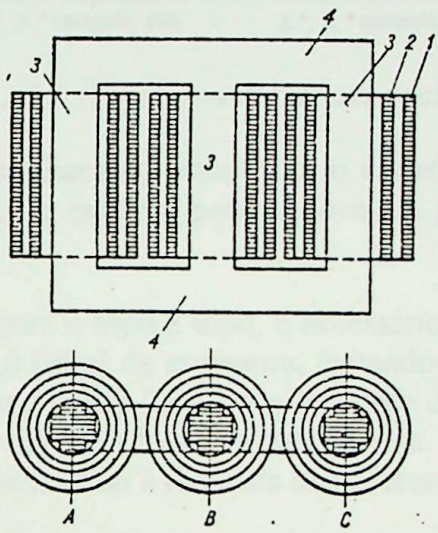


Figura I.1.1.1 Transformador trifásico de núcleo envolvido com enrolamentos concêntricos

Nos transformadores trifásicos de potência blindados, o núcleo possui três colunas principais, nas quais são colocados os enrolamentos e duas colunas adicionais, sem enrolamentos, situadas lateralmente *Figura I.1.1.2*. Assim consegue-se reduzir, a altura da culatra (já que o fluxo da coluna pode ramificar-se) e também, a diminuição do seu comprimento facilitando-se assim o transporte destes transformadores. No caso de o transformador conter cinco colunas, as reatâncias de sequência zero e de sequência positiva serão iguais, como também ocorre nos bancos formados por unidades monofásicas.

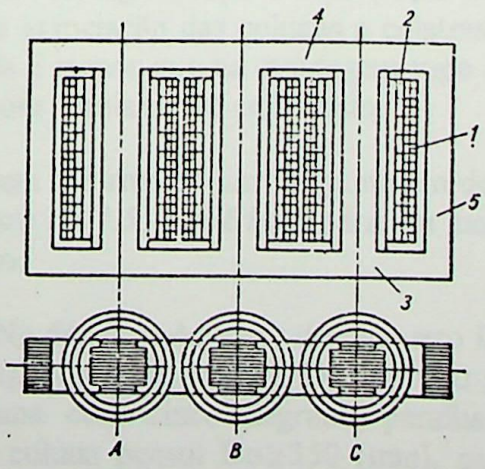


Figura I.1.1.2 Transformador trifásico de cinco colunas com enrolamentos concêntricos

O núcleo e as culatras podem ser ligados topo a topo ou de forma embricada. Na montagem topo a topo, as colunas e as culatras são feitas separadamente e ligadas por peças de fixação. Esta construção do núcleo facilita a colocação dos enrolamentos nas colunas; bastando

para isso retirar a culatra superior.Na montagem embricada, o núcleo é montado totalmente *Figura I.1.1.3*; razão pela qual que quando se coloca o enrolamento na coluna é necessário desmontar a culatra superior e após a colocação do enrolamento, montá-la novamente. Embora o segundo método seja o mais complicado, possui várias vantagens que são apresentadas a seguir:

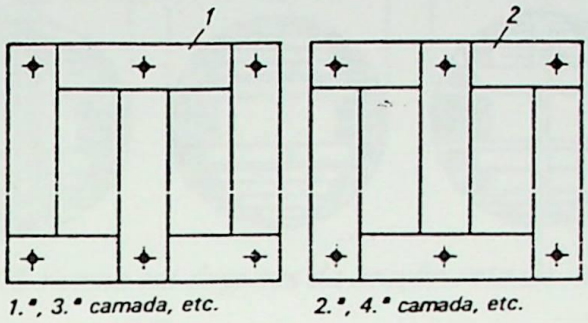


Figura I.1.1.3 Empilhamento de um núcleo embricado

1 - Durante a montagem do enrolamento embricado, o entreferro entre as chapas das colunas e das culatras pode ser reduzido ao mínimo, pois no local da junção uma camada é coberta pela chapa de uma outra camada.

Ao contrário, quando a montagem é topo a topo, é necessário colocar entre a coluna e a culatra, uma junta isolante, de 0,5 a 1,0 [mm] de espessura, evitando-se assim correntes de Foucault no local da junção representada na *Figura I.1.1.4* e o aumento de perdas suplementares e aumento excessivo da temperatura do ferro no local da junção. Na falta de uma junção isolante uma construção embricada a corrente a vazio é reduzida consideravelmente.

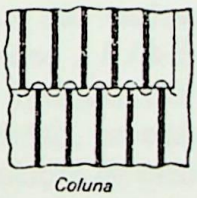


Figura I.1.1.4 Formação das correntes de Foucault na junção

2 - Durante a montagem embricada, a estabilidade mecânica do núcleo aumenta consideravelmente, enquanto na montagem topo a topo peças de fixação relativamente grossas são utilizadas para uma correta associação das colunas e culatras. Por isso o peso das peças de fixação na montagem embricada é menor que na montagem topo a topo. Devido estas vantagens apenas analisaremos o núcleo com enrolamento embricado.

A secção reta de uma coluna tem a forma de um polígono em degraus (dentes), inscrito em um círculo com diâmetro Do, *Figura I.1.1.5*, que é feito para um melhor aproveitamento do espaço disponível no interior do círculo.

O número de degraus Ng depende do valor do diâmetro Do; para Do≤100 [mm], Ng=4, para Do entre 100 e 500 [mm], Ng=5 ou 6; para Do até1000 [mm], Ng=9 ou 10. A *Figura I.1.1.5-a* representa uma coluna com cinco degraus, parafusada. Nos transformadores de potência, onde o diâmetro da coluna possui Do≥350 [mm], para melhorar a refrigeração do núcleo, são divididos em pilhas, isolados uns dos outros, por canais longitudinais de óleo com 6 [mm] de largura *Figura I.1.1.5-b*. Ainda nestes transformadores Do≥800 [mm], são colocados canais transversais de 10 a 12 [mm] de largura, *Figura I.1.1.5-c*.

Neste caso o núcleo consta de duas partes separadas. A secção ativa da culatra deverá ser idêntica a secção do núcleo, sendo aumentada de *5 a 10%* para redução do ferro da culatra; bem como a corrente a vazio.

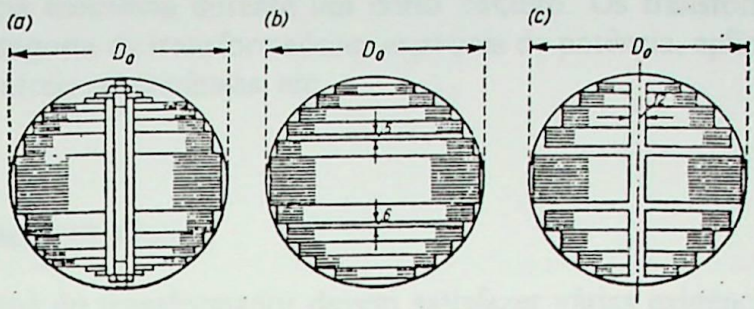


Figura I.1.1.5 Forma em degraus da secção reta de uma coluna

a - sem canais *b - com canais transversais* *c - com canais longitudinais e transversais*

Devido razões tecnológicas, a secção da culatra comparando-se com a do núcleo apresenta uma forma mais simples, visto que a repartição do fluxo magnético se faz de um modo desigual em função das secções destas partes, provocando perdas suplementares no ferro.São usadas nos transformadores de potência as culatras em forma de T ou em cruz *Figura I.1.1.6.*

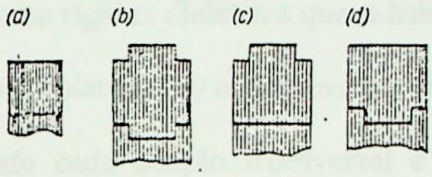


Figura I.1.1.6 Formas das secções das culatras

As culatras representadas na *Figura I.1.1.6-a* são usadas em transformadores de baixa potência.

As culatras representadas nas *Figuras I.1.1.6-b e c* são usadas em transformadores de média potência. Nos transformadores de potência são usadas as culatras em T com degraus dirigidos para baixo. Se a coluna possui canais, os canais das culatras devem coincidir com os canais da coluna, de forma a garantir a circulação de óleo.

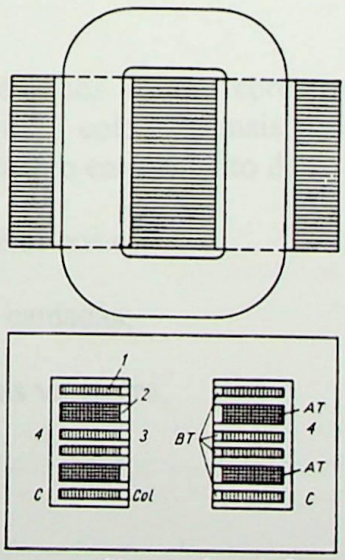


Figura I.1.1.7 Transformador monofásico de núcleo envolvente e enrolamentos alternados

Na *Figura I.1.1.7* é representado um transformador monofásico tipo envolvente ou seja blindado (3) a coluna (col.) situa-se no meio e as culatras (4) encontram-se nos dois lados da coluna envolvendo parcialmente o enrolamento. A secção das culatras é aproximadamente duas vêzes menor que a secção transversal da coluna implicando em uma ramificação do fluxo em duas partes. A secção transversal da coluna tem a forma retangular, em que os lados estão na *relação 1:2* aproximadamente.

A experiência demonstra que os transformadores com núcleo envolvido são mais fáceis de serem construídos que os transformadores com núcleo envolvente. Devido a facilidade de se montar e isolar os seus enrolamentos, sobretudo o de alta tensão (A.T), estes transformadores possuem alta resistência mecânica durante um curto circuito. Os transformadores com núcleo envolvente estão na categoria de transformadores especiais de potência, aplicando-se por exemplo em fornos elétricos, centrais subterrâneas, etc.

II - Enrolamento do transformador:

Os enrolamentos do transformador devem satisfazer várias exigências, entre as quais as que seguem:

i) - O enrolamento sob condições especificadas deve obedecer o regime térmico, pois o aumento excessivo de temperatura reduz nitidamente o tempo de vida do transformador;

ii) - O enrolamento deve suportar às solicitações eletrodinâmicas que se verificam durante um curto circuito brusco;

iii) - O enrolamento deve possuir uma rigidez dielétrica que o habilite a suportar sobretensões.

De acordo com a disposição relativa dos enrolamentos de A.T. e de B.T., seja:

- Enrolamentos concêntricos: onde cada secção transversal é representada por círculos com centro comum

- Enrolamentos alternados: onde as partes dos enrolamentos de A.T. e de B.T. se dispõem alternadamente, segundo a altura da coluna;

II.I - Enrolamento concêntrico:

Os enrolamentos concêntricos estão representados nas *Figuras I.1.1.1, I.1.1.2.* O enrolamento de B.T. normalmente é colocado mais próximo da coluna, devido a facilidade de isolamento, quando comparado com o enrolamento de A.T.

Os principais enrolamentos concêntricos são:

1) - Enrolamentos cilíndricos em camadas;

2) - Enrolamentos em hélice e suas variantes;

3) - Enrolamentos contínuos

- Enrolamentos cilíndricos em camadas:

Quando a secção da espira não é superior a 8 ou 10 [mm2], o enrolamento cilíndrico é realizado em várias camadas de fio de secção circular; quando a secção da espira é maior, utiliza-se fios de secção retangular normalmente dispostos em duas camadas *Figura I.1.1.8.* Uma camada do enrolamento é formada por espiras enroladas em hélice, segundo a geratriz do cilindro e justapostas. Assim a altura do enrolamento é igual a altura da camada.

Figura I.1.1.8 Enrolamento cilíndrico com duas camadas

Se o fio retangular for bobinado deitado, o lado maior do fio é colocado no sentido axial do enrolamento, se for bobinado ao alto, este é colocado no sentido radial.

Se a secção da espira ultrapassa 40-45 [mm2], esta é feita com vários condutores que se colocam, uns ao lado do outro, segundo a altura da coluna, de forma a ocuparem a mesma posição em relação ao campo de fugas.

Para melhorar o esfriamento, é deixado entre as camadas um espaço de 5 a 8 [mm], sendo que o valor mais elevado é para transformadores de alta potência.

Os enrolamentos cilíndricos são normalmente utilizados em transformadores onde a potência é menor que 560 [kVA].

- Enrolamentos em hélice:

São apresentados dois tipos a seguir:

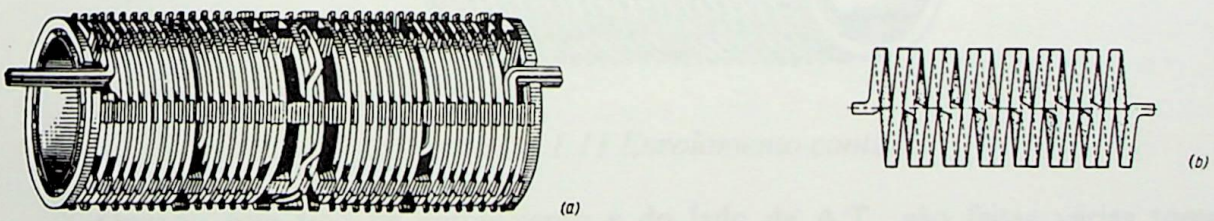


Figura I.1.1.9 Enrolamento em hélice
a - Simples b - Semi-helicoidal

a - Enrolamentos em hélice simples, onde tal como no enrolamento cilíndrico, as espiras são enroladas em hélice, mas entre duas espiras vizinhas em altura é deixado um espaço de 4,5 a 6,0 [mm] de largura *Figura I.1.1.9-a.*

b - Enrolamento semi-helicoidal, onde todos os conjuntos de duas espiras exceto as espiras finais, são reunidas em uma bobina sem canal *Figura I.1.1.9-b.*

Estes dois tipos de espiras são formados por dois fios de secção retangular paralelos, deitados no sentido radial do enrolamento e justapostos. Para que seja assegurada uma repartição mais uniforme de corrente entre os ramos em paralelo é feita a transposição dos fios. Na *Figura I.1.1.10* é representada a transposição de espiras do enrolamento em hélice, em três pontos segundo a sua altura. Transpõe-se A, chamada mediana, no ponto médio e duas transposições do

grupo B, executadas de forma que o enrolamento fique dividido em quatro partes, praticamente iguais, segundo a altura do enrolamento. Em uma espira em hélice, normalmente o número de condutores em paralelo varia entre 6 e 20. Este tipo de enrolamento é utilizado nos enrolamentos de B.T., dos transformadores de média potência, sobretudo nos transformadores de potência.

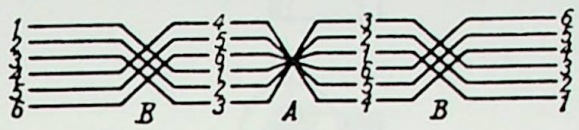


Figura I.1.1.10 Transposição de espiras de um enrolamento em hélice simples

- Enrolamentos contínuos:

Nos transformadores de alta tensão (acima 36,2 kV), utiliza-se este tipo de enrolamento. A diferença deste enrolamento com o em hélice é que o enrolamento contínuo é composto de uma série de bobinas planas (discos), separadas uma das outras por canais. Este tipo de enrolamento *Figura I.1.1.11* apresenta uma particularidade muito útil que se deve às suas bobinas serem unidas entre si sem soldagem, por intermédio de uma disposição especial de uma das bobinas em cada par. No caso da espira ser composta por vários condutores em paralelo, podemos recorrer à transposição dos fios, tal como no enrolamento em hélice.

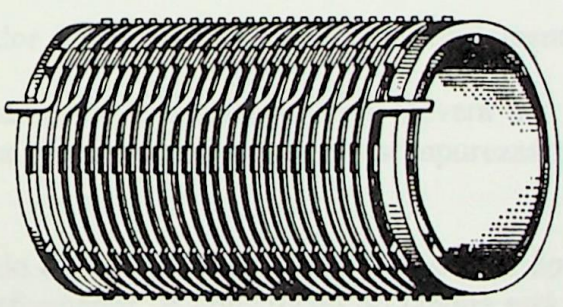


Figura I.1.1.11 Enrolamento contínuo

Quando este tipo de enrolamento é do lado de A.T., são feitas várias tomadas para realização da regulação da relação de transformação, entre os limites de *±5% ou de 2×(±2,5%)*. O isolamento dos enrolamentos é de fundamental importância, pois estes estão sujeitos a sobretensões, a que deverão suportar.

II.II.-.Os enrolamentos alternados:

Os enrolamentos alternados estão representados nas *Figuras I.1.1.7 e I.1.1.12*. As bobinas dos enrolamentos de A.T. e de B.T., alternam-se e estão dispostas de tal maneira que as bobinas dos enrolamentos de B.T. se encontram mais próximos das culatras. Este tipo de enrolamento é utilizado em transformadores blindados. Comparados com os enrolamentos concêntricos, apresentam sérias desvantagens como por exemplo: são mais difíceis de serem executados, não são resistentes aos curto-circuitos, e são difíceis de serem isolados, uns em relação aos outros e em relação a culatra. Devido a este motivo, o transformador mais utilizado é o de colunas, com enrolamentos concêntricos.

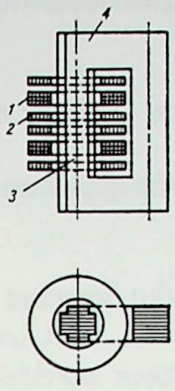


Figura I.1.1.12 Transformador monofásico de núcleo envolvido com enrolamentos sobre uma coluna. Enrolamentos alternados

III - Tanque de um transformador imerso em óleo:

Os transformadores imersos em óleo, nos quais a parte ativa: enrolamento e núcleo, estão imersos em um tanque contendo óleo,.são os mais utilizados.

Todos os transformadores de potência acima de 20 [kVA] e tensão acima de 6 [kV] são construídos de forma a trabalhar imersos em óleo isolante. Este óleo é utilizado com o objetivo de atender duas finalidades:

- Um perfeito isolamento entre os componentes do transformador; e

- Dissipar para o exterior o calor devido o efeito Joule dos enrolamentos, assim como no núcleo.

Para que o óleo atenda estas duas condições citadas, deverá ser testado e apresentar boas condições de trabalho, ou seja: livre de umidade e outras impurezas para garantir seu alto poder dielétrico.

Com o aquecimento do óleo este começa a circular dentro do tanque, assegurando assim a refrigeração natural do transformador. A construção do tanque está diretamente relacionada ao cálculo térmico do transformador. E de modo geral o tanque deve resistir a uma pressão manométrica da ordem de 0,5 [atm], bem como, é montado em uma armação de rodízios que deve suportar o peso total do transformador.

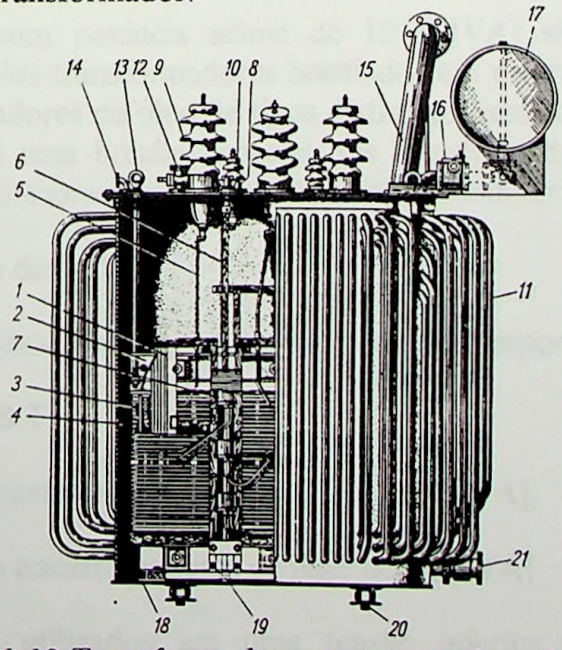


Figura I.1.1.13 Transformador com tanque de radiadores

Em função da potência do transformador torna-se difícil a sua refrigeração, sendo assim vem:

I - Transformadores de baixa potência (até 30 kVA) utilizam-se tanques lisos;

II - Em transformadores com potências mais elevadas (até 3 MVA), utilizam-se tanques com tubos em forma de aletas.

São soldados nas paredes dos tanques tubos com cerca de 50 [mm] de diâmetro dispostos sobre uma ou várias filas *Figura I.1.1.13*. Os tanques em chapas onduladas não são utilizadas devido apresentarem menor resistência mecânica e uma refrigeração do transformador pior, do que os tanques com tubos.

III - Os transformadores com potência até 10 [MVA] são refrigerados com radiadores de esfriamento natural adaptados às paredes da cuba.

Um radiador é constituído por uma caixa superior e uma caixa inferior 1 da *Figura I.1.1.14*, que são ligadas às paredes do tanque por meio de manilhas (2) nas quais são soldados duas filas de tubos (3), com cerca de 50 [mm] de diâmetro por 2 [mm] de espessura.

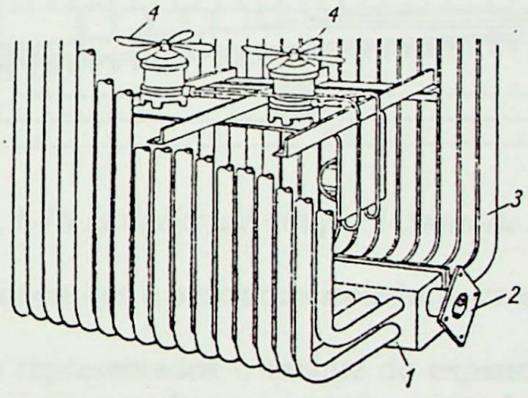


Figura I.1.1.14 Radiador tubular duplo com ventilação separada

Os radiadores são denominados radiadores simples, quando os tubos são dispostos de um lado da caixa, e denominados radiador duplo, quando os tubos são dispostos dos dois lados da caixa. Os radiadores são colocados segundo às tangentes as paredes do tanque ou radialmente. Na maior parte dos casos, utiliza-se um sistema de radiadores duplos do tipo radial.

IV - Nos transformadores com potência acima de 10 [MVA] são utilizados um ou dois ventiladores nos radiadores. Nos transformadores instalados em centrais hidroelétricas, o óleo é refrigerado por água, em radiadores de óleo de tipos distintos. Neste caso, utiliza-se a circulação forçada de óleo por meio de uma bomba especial. Os transformadores refrigerados por este processo possuem dimensões menores que os transformadores comuns.

V - Tampa do tanque e buchas de saída:

Na tampa são colocadas várias peças, sendo que as mais importantes são:

a - Buchas de saída de A.T. e B.T.;

b - Tanques de expansão nos transformadores de mais de 100 [kVA];

c - Tubo de escape de gás para transformadores de mais de 1 [MVA]

Nos transformadores utilizados em uma tensão inferior a 36,2 [kV], utilizam-se isoladores de porcelana impregnados em óleo ou ar. Na *Figura I.1.1.15* está representado um

isolador de 36,2 [kV], 275 [A]. Nos transformadores acima de 110 [kV], utilizam-se isoladores impregnados em óleo e, na sua cavidade interior é colocada uma série de cilindros de papel baquelizado, dispostos concentricamente de acordo com a *Figura I.1.1.15*.

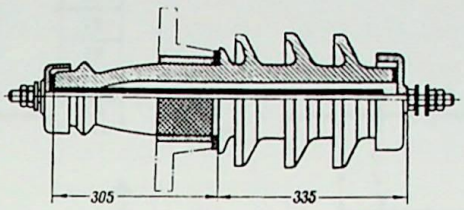


Figura I.1.1.15 Isolador de 36,2[kV] cheio de óleo

Nos transformadores com níveis de tensão iguais ou superiores a 110 [kV], utilizam-se isoladores impregnados em óleo e na sua cavidade interior são colocados uma série de cilindros de papel baquelizado, por exemplo dispostos concentricamente, conforme representado na *Figura I.1.1.16*.

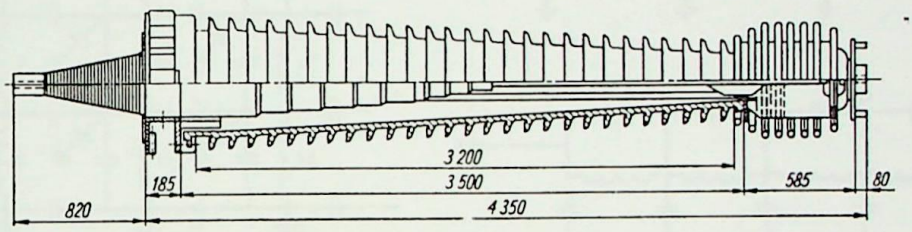


Figura I.1.1.16 Isolador de 400[kV] cheio de óleo

Em função da tensão as dimensões e pesos dos isoladores crescem rapidamente

Na *Figura I.1.1.13* estão representados o tanque de expansão *(índice 17)* e o tubo de escape do gás. O tanque é um recipiente em chapa, instalado acima da tampa da cuba e conectada à esta por meio de um tubo. O nível de óleo deve ser estabelecido de forma que o tanque esteja sempre cheio, considerando que a superfície de óleo no tanque de expansão é menor que a superfície do óleo no tanque, o fenômeno da oxidação do óleo em contato com o ar produz-se mais lentamente, assegurando assim uma proteção suficiente do óleo e do isolamento do transformador.

Entre o tanque e o tanque de expansão está colocado o relé de Buchholz *(índice 16 da Figura I.1.1.13)*, que indica qualquer acidente no transformador e permite desligá-lo da rede, em caso de falha.

O tubo de escape tem por função proteger o tanque de possíveis estragos no caso de curto-circuito, devido a formação de gás no interior do tanque e ao brusco aumento de pressão. Este tubo em aço, é normalmente inclinado, e uma de suas extremidades comunica-se com o tanque e a outra é fechada por um diafragma em vidro, sendo que para um determinado valor de pressão, o vidro é expulso e o gás com óleo é jogado para o meio externo. [6-7]

1.1.2- Conceituação do problema:

Em um transformador de potência durante o período transitório cada um dos enrolamentos comporta-se como uma complexa rede de resistências, indutâncias, capacitâncias

série e para terra, deste modo, nos cálculos de transitórios, a precisão dos resultados depende do grau de refinamento contido na modelagem matemática dos enrolamentos.

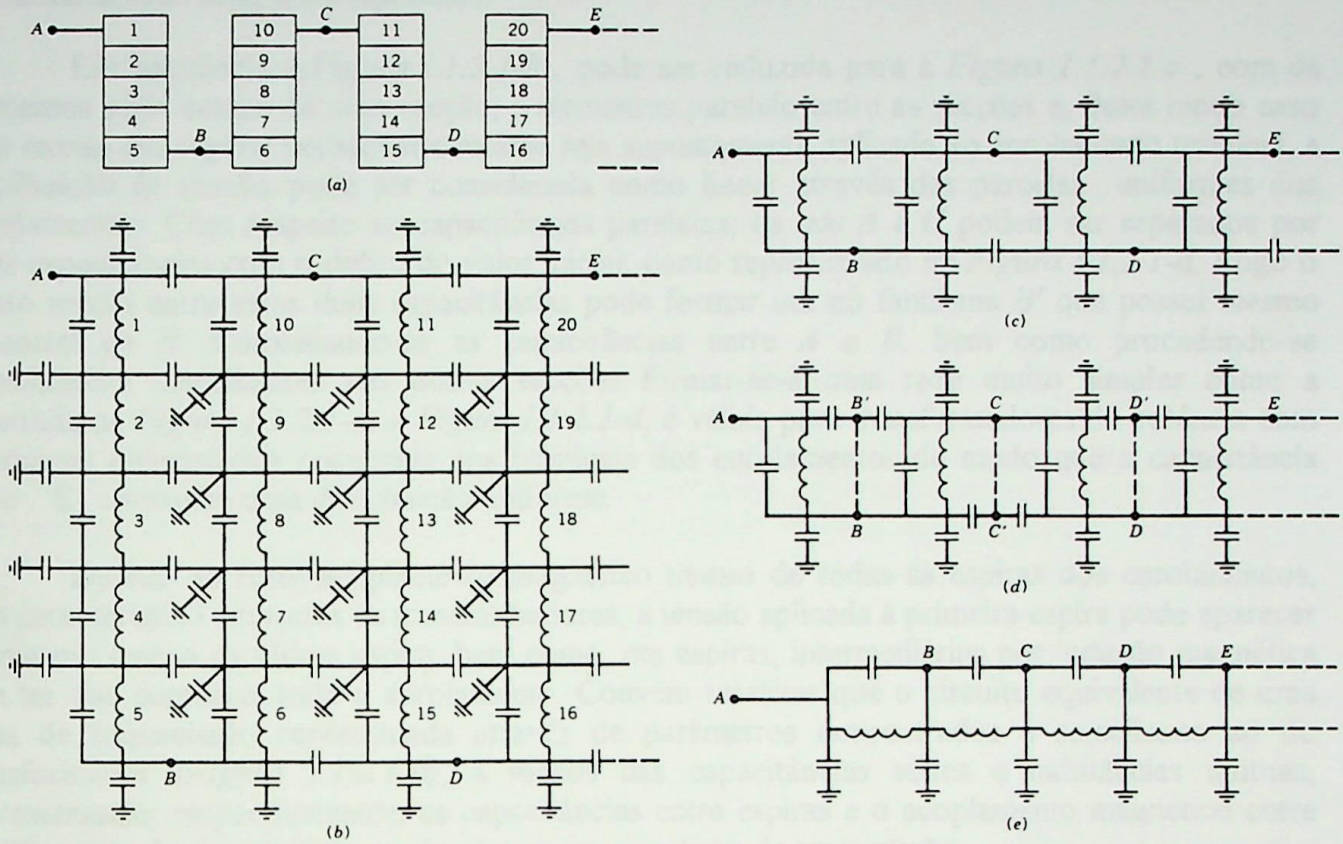


Figura 1.1.2.1 Representação do enrolamento do transformador de potência [3]

a - Secção transversal do enrolamento por espiras

b - Rede equivalente detalhada

c, d - Rede equivalente simplificada

e - Rede equivalente mais simplificada

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

Dentro deste contexto um modelo detalhado procura representar todas as espiras dos enrolamentos incluindo-se aí, entre outras as indutâncias e as capacitâncias entre espiras. Deste modo, um enrolamento pode ser representado como composto por uma série de espiras, tal como mostrado na *Figura I.1.2.1-a*, onde cada bloco retangular representa um corte transversal de uma espira. Neste modelo o *ponto A* representa a espira terminal de linha e o enrolamento continua da mesma maneira a partir do *ponto E*. Dentro deste contexto cada secção pode ser modelada por um circuito formado por indutâncias séries, capacitâncias séries e paralelas tal como mostrado na *Figura I.1.2.1-b*, no entanto apesar da rede vista ser suficientemente complicada, na forma apresentada, não foram representadas nesta figura todas as capacitâncias entre espiras, as indutâncias mútuas entre espiras e também nenhuma resistência. A rede mostrada na *Figura I.1.2.1-b* pode ser formada com base nas seguintes hipóteses:

1 - Espiras adjacentes servem como cobertura para ambos os campos magnético e elétrico. Isto é todos os acoplamentos magnéticos e elétricos podem ser descritos pelo acoplamento entre espiras adjacentes. *Por exemplo;* considerando-se três espiras a espira intermediária está completamente blindada pelas duas espiras adjacentes.

2 - Todas as outras superfícies condutoras, que estão acopladas capacitivamente a cada espira na bobina, são supostas no potencial terra e o acoplamento indutivo mútuo existente entre as estruturas a cada espira, é desprezado.

Em sequência a *Figura I.1.2.1-b* , pode ser reduzida para a *Figura 1.1.2.1-c* , com os elementos série dentro de uma secção, e elementos paralelo entre as secções e, deste modo caso uma tensão em regime permanente estável seja supostamente aplicada ao enrolamento terminal, a distribuição de tensão pode ser considerada como linear através das parcelas uniformes dos enrolamentos. Com respeito às capacitâncias paralelas, os *nós A* e *C* podem ser separados por duas capacitâncias com o dobro do valor inicial, como representado na *Figura I.1.2.1-d*. Logo o ponto médio entre estas duas capacitâncias pode formar um nó fantasma *B'* que possui mesmo potencial de *B*. Combinando-se as capacitâncias entre *A* e *B*, bem como procedendo-se combinações semelhantes nas outras secções formar-se-à uma rede muito simples como a mostrada na *Figura I.1.2.1-e. A Figura I.1.2.1-d*, é válida para transformadores de potência com blindagem eletrostática conectada aos terminais dos enrolamentos de modo que a capacitância série C_s apresente uma distribuição uniforme.

Devido ao forte acoplamento magnético mutuo de todas as espiras dos enrolamentos, fato característico em todos os transformadores, a tensão aplicada à primeira espira pode aparecer ao mesmo tempo na última espira, bem como, em espiras, intermediárias por indução magnética sem ter que percorrer todo o enrolamento. Convém ressaltar que o circuito equivalente de uma linha de transmissão representada através de parâmetros concentrados é semelhante ao do transformador *(Figura I.1.2.1-d)*, a menos das capacitâncias séries e indutâncias mútuas, representando, respectivamente, as capacitâncias entre espiras e o acoplamento magnético entre os diferentes elementos série que inexistem em uma linha de transmissão.

Conforme comentado, as capacitâncias e o acoplamento magnético das espiras, modificam profundamente os fenômenos de distribuição, pois tendem a forçar uma distribuição virtualmente instantânea do potencial ao longo do enrolamento ao se comparar com o tempo que seria requerido pela onda para viajar através do grande número de espiras do enrolamento, por exemplo, de A.T.. Deste modo, em termos de estudos de sistemas é possível concluir que os enrolamentos de um transformador quando solicitados por surtos podem ser representados por elementos concentrados.

No circuito representado na *Figura I.1.2.1-d*, quando o transformador de potência é atingido por um surto de tensão, a rede indutiva reage como um circuito aberto por um apreciável período de tempo, pois nenhuma corrente pode ser estabelecida em uma indutância subitamente. Por sua vez, a rede de capacitâncias reage como um curto-circuito e é rapidamente carregada. A corrente inicial de carregamento é duas vezes a corrente associada a onda que chega, caindo para zero quando as capacitâncias estão completamente carregadas. Este é denominado período inicial de solicitação do surto e, o transformador, para efeitos de estudos de sistemas, é modelado por um circuito formado por capacitâncias concentradas.

A distribuição de tensão estabelecida no período inicial pela rede de capacitâncias não persiste indefinidamente pois com o decorrer do tempo passa a circular corrente na rede de indutâncias fato que permite criar interações entre os campos magnético e elétrico o que possibilita estabelecimento de uma distribuição uniforme de tensão. Com isto, haverá uma série de oscilações amortecidas entre as indutâncias e as capacitâncias. Este período é denominado período intermediário de solicitação do surto. Neste caso o transformador, para estudos de sistemas, é modelado por um circuito formado por indutâncias e capacitâncias concentradas.

Quando a corrente passa a fluir através dos enrolamentos do transformador sem pertubações é atingido o período final de solicitação do surto. Comparando-se com o período

intermediário (considerando-se oscilações desprezíveis) vem que neste caso a indutância exerce um papel fundamental na representação dos enrolamentos. Logo, neste período, o transformador é modelado por um circuito composto somente de indutâncias concentradas. [1-2-5-8]

O desenvolvimento apresentado só é válido para o tempo de estudo da ordem de décimos de microsegundos, onde a corrente que flui pela indutância é desprezível. No interior do transformador podem ocorrer oscilações de altas frequências implicando em altos gradientes nos enrolamentos. Em sequência a análise desta distribuição é feita utilizando-se o *Método das Ondas Estacionárias*.

Método das Ondas Estacionárias

Considerando-se a *Figura I.1.2.2-a* abaixo, ou seja, a rede equivalente simplificada, mostrada na *Figura I.1.2.1-e*, tem-se agora a capacitância distribuída uniformemente ao longo da camada do enrolamento com número finito de malhas onde é assumindo que cada pequeno comprimento do condutor apresenta uma capacitância para a terra e para as espiras adjacentes.

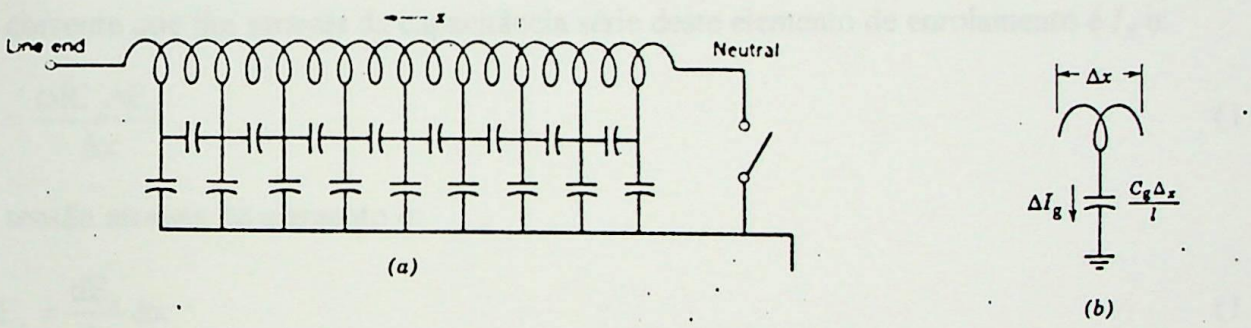


Figura I.1.2.2-a - Representação do enrolamento de um transformador [3]

b - Comprimento elementar Δx do enrolamento

O neutro do enrolamento pode ou não ser aterrado. Derivando-se a distribuição inicial de tensão, admitindo-se que nenhuma corrente circula pelo próprio enrolamento, isto é, somente a rede de capacitâncias é efetiva neste instante, e que sua resposta para uma frequência será a mesma para qualquer outra, seja C_g a capacitância para a terra vista da entrada do enrolamento e, C_s a capacitância série do enrolamento.

Dentro deste contexto, a capacitância para a terra por unidade de comprimento é dada por C_g/l e a capacitância série por unidade de comprimento, é dada por $C_s l$ onde l é o comprimento do enrolamento. A direção positiva para x, por convenção, é do neutro para o terminal da linha.

Considerando-se um elemento de enrolamento de comprimento Δx conforme *Figura I.1.2.2-b*. A capacitância para a terra é dada por $(C_g/l)\Delta x$ e a capacitância série é dada por $(C_s/\Delta x)l$. Logo no domínio da frequência é possível ter seguinte desenvolvimento:

A corrente que flui para a terra através deste elemento de enrolamento é ΔI_g, e:

$$\Delta I_g = \frac{C_g \Delta x \omega E}{l} \qquad (1.1.2.1)$$

onde:

$\omega = 2\pi f$ é a frequência angular da tensão E

Considerando que:

$$\frac{dI_g}{dx} = \frac{dI_s}{dx} \qquad (1.1.2.2)$$

É possível escrever que:

$$\Delta I_g = \frac{dI_s}{dx}\Delta x \qquad (1.1.2.3)$$

Combinando-se as equações *(I.1.2.1)* e *(I.1.2.3)* vem:

$$\frac{dI_g}{dx} = \frac{C_g \omega E}{l} \qquad (1.1.2.4)$$

A corrente que flui através da capacitância série deste elemento de enrolamento é I_S e:

$$I_s = \frac{\omega l C_s \Delta E_s}{\Delta x} \qquad (1.1.2.5)$$

A tensão através do elemento é:

$$\Delta E_s = \frac{dE_s}{dx}\Delta x \qquad (1.1.2.6)$$

Combinando as *equações (I.1.2.5) e (I.1.2.6) vem*:

$$I_s = l C_s \omega \frac{dE}{dx} \qquad (1.1.2.7)$$

Derivando-se a *equação (I.1.2.7)* vem:

$$\frac{dI_s}{dx} = l C_s \omega \frac{d^2E}{dx^2} \qquad (1.1.2.8)$$

Igualando-se as *equações (I.1.2.4)* e *(I.1.2.8)*, conforme a *equação (I.1.2.2)* vem:

$$\frac{C_g \omega E}{l} = l C_s \omega \frac{d^2E}{dx^2}$$

ou;

$$\frac{d^2E}{dx^2} - \frac{C_g}{l^2 C_s} E = 0 \qquad (1.1.2.9)$$

Esta equação é independente de ω, ou seja, da frequência, conforme anteriormente comentado.

Aplicando o operador diferencial de *Heaviside*: $p=d/dx$, obtém-se uma equação diferencial homogenea, ou seja,:

$$p^2E-\frac{C_g}{l^2C_s}E=0 \qquad \left(p^2-\frac{C_g}{l^2C_s}\right)E=0 \qquad (1.1.2.10)$$

Logo, vem que:

$$Y_H(x)=p^2-\frac{C_g}{l^2C_s} \qquad (1.1.2.11)$$

A equação característica é:

$$p^2-\frac{C_g}{l^2C_s}=0$$

Portanto, tem-se que:

$$p=\pm\frac{1}{l}\sqrt{\frac{C_g}{C_s}} \qquad (1.1.2.12)$$

Assim vem:

$$E(x)=A_1\varepsilon^{px}+A_2\varepsilon^{-px} \qquad (1.1.2.13)$$

Onde as constantes *A1 e A2* dependem das condições de contorno do problema.

Supondo que o neutro do transformador é aterrado,vem:

em x=0 $E=0$

em x=l $E=U$

Sendo U a amplitude do surto e, inserindo estas condições de contorno na *equação I.1.2.13* vem:

$0=A_1+A_2$

$U=A_1\varepsilon^{pl}+A_2\varepsilon^{-pl}$

Resolvendo o sistema de equações acima vem:

$A_2=-A_1$

$U=A_1\varepsilon^{pl}-A_2\varepsilon^{-pl}$

$U=A_1(\varepsilon^{pl}+\varepsilon^{-pl})$

$$A_1=\frac{U}{\varepsilon^{pl}-\varepsilon^{-pl}}$$

Fazendo:

$$pl = \alpha = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$$

Vem que:

$$A_1 = \frac{U}{\varepsilon^{\alpha} - \varepsilon^{-\alpha}} \qquad (1.1.2.14)$$

Sendo:

$$\operatorname{senh} x = \frac{\varepsilon^{x} - \varepsilon^{-x}}{2}$$

Fazendo $x=\alpha$, vem que:

$$2\operatorname{senh}\alpha = \varepsilon^{\alpha} - \varepsilon^{-\alpha}$$

Logo a *equação.I.1.2.14* pode ser representada da seguinte forma:

$$A_2 = -A_1 = \frac{U}{2\operatorname{senh}\alpha} \qquad (1.1.2.15)$$

Substituindo a *equação.I.1.2.15* na *equação I.1.2.13*, vem:

$$E = \frac{U}{2\operatorname{senh}\alpha}\varepsilon^{px} - \frac{U}{2\operatorname{senh} x}\varepsilon^{-px}$$

$$E = \frac{U}{2\operatorname{senh}\alpha}(\varepsilon^{px} - \varepsilon^{-px})$$

$$E = \frac{U}{2\operatorname{senh}\alpha} 2\operatorname{senh} px$$

$$E = U\frac{\operatorname{senh} px}{\operatorname{senh}\alpha}$$

$$\alpha = pl \rightarrow p = \frac{\alpha}{l}$$

Então finalmente vem:

$$E = U\frac{\operatorname{senh}\left(\frac{\alpha x}{l}\right)}{\operatorname{senh}\alpha} \qquad (1.1.2.16)$$

Considerando agora o transformador com neutro isolado, vêm as seguintes condições de contorno:

em x=l E=U

em x=0 $I_S=0$

Assim da *equação I.1.2.7* vem:

$$I_s = lC_s\omega \frac{dE}{dx} \qquad (1.1.2.17)$$

Substituindo a *equação I.1.2.13* na *equação I.1.2.17*, vem:

$$I_s = lC_s\omega \frac{d}{dx}(A_1\varepsilon^{px} + A_2\varepsilon^{-px})$$

$$I_s = lC_s\omega(A_1\varepsilon^{px} + A_2\varepsilon^{-px}) \qquad (1.1.2.18)$$

Com as condições de contorno: $I_S=0$ *em* $x=0$, vem:

$$0 = lC_s\omega(A_1\varepsilon^{o} - A_2\varepsilon^{0})$$

$$0 = lC_s\omega(A_1 - A_2)\varepsilon^{0}$$

Logo:

$$0 = lC_s\omega(A_1 - A_2)\varepsilon^{0} \qquad (1.1.2.19)$$

Portanto vem que:

$$A_1 = A_2$$

Substituindo a *equação I.1.2.19* na *equação I.1.2.13*,vem:

$$E = A_1\varepsilon^{px} + A_1\varepsilon^{-px}$$

$$E = A_1(\varepsilon^{px} + \varepsilon^{-px})$$

Relacionando a equação acima com a definição de função hiperbólica,vem:

$$E = A_1 \times 2\cosh px$$

Com as condições de contôrno: $x = l \quad E = U$, tem-se:

$$U = A_1 \times 2\cosh pl$$

$$A_1 = \frac{U}{2\cosh pl} \rightarrow A_1 = A_2 = \frac{U}{2\cosh\alpha} \qquad (1.1.2.20)$$

Substituindo a *equação I.1.2.20* na *equação I.1.2.13*, vem:

$$E = \frac{U}{2\cosh\alpha}\varepsilon^{px} + \frac{U}{2\cos\alpha}\varepsilon^{-px}$$

$$E = \frac{U}{2\cosh\alpha}(\varepsilon^{px} + \varepsilon^{-px})$$

$$E = \frac{U}{2\cosh\alpha} \times 2\cosh px$$

Então finalmente vem:

$$E = U\frac{\cosh\left(\frac{\alpha x}{l}\right)}{\cosh\alpha} \qquad (1.1.2.21)$$

As *equações I.1.2.16 e I.1.2.21*, descrevem a distribuição inicial de tensão para um enrolamento solicitado por um surto de tensão, onde U é a tensão para terra nos terminais do transformador. Esta tensão corresponde a duas vezes o valor do impulso incidente, ou se os pára-raios estão presentes no sistema esta tensão é a máxima tensão permitida por este equipamento de proteção. As duas equações citadas acima são inversamente proporcionais a $\alpha = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$.

Na *Figura 1.1.2.3*, estão representados as curvas que mostram a distribuição inicial de tensão em função de α. Nos gráficos apresentados, tem-se que, quanto menor a relação entre a capacitância para terra C_g e a capacitância série C_s, mais uniforme será a distribuição inicial de tensão.

Ainda na *Figura I.1.2.3* para *alfa igual a zero*, ou seja, a capacitância para terra (C_g) zero, a característica é uma linha reta (tensão de distribuição uniforme). Com a elevação de alfa menos uniforme é a distribuição de tensão e mais tensão é concentrada no fim do enrolamento. Esta é a razão a prover isolamento extra nas bobinas e espiras nos terminais de linha dos enrolamentos. Esta prática não é utilizada pois são alterados os elementos concentrados do circuito equivalente representado na *Figura I.1.2.1-e*, portanto é utilizada a blindagem eletrostática. Convém ressaltar, que estas características são baseadas em enrolamentos nos quais as espiras são uniformente distribuídas.

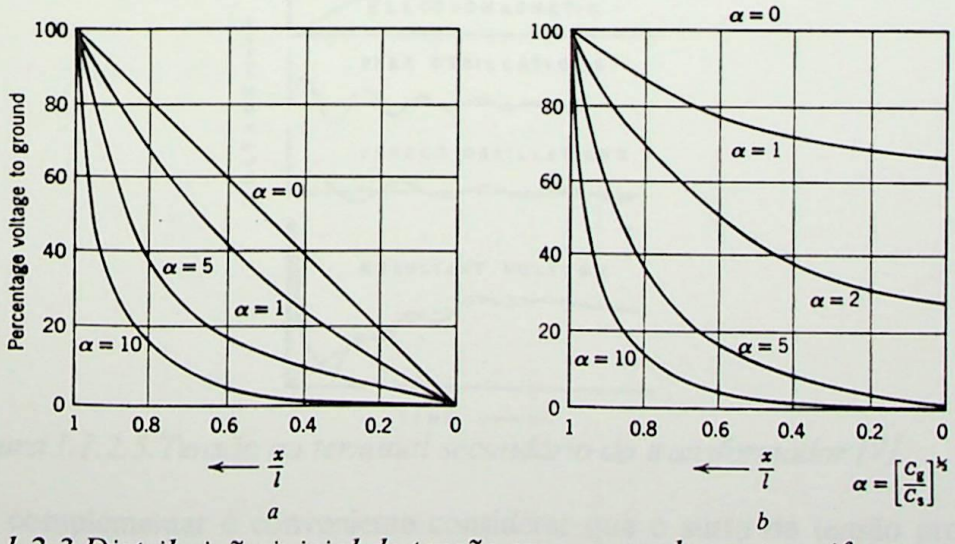


Figura I.1.2.3 Distribuição inicial de tensão em um enrolamento uniforme em resposta a um surto de tensão a- Neutro Aterrado, b- Neutro Isolado [3]

As excursões de tensão em cada ponto do enrolamento durante as oscilações quase sempre permanecem dentro de um envelope formado por uma distribuição inicial refletida conforme representado na *Figura I.1.2.4* a seguir:

Uma vez modelado o enrolamento de um transformador, bem como, com o auxílio deste modelo, estudada a distribuição de tensão resultante após a aplicação de um surto, é possível concluir que, pelo menos a primeira vista, para efeito dos estudos de sistemas um transformador pode ser representado por um circuito a parâmetros concentrados. [1-2-3-4]

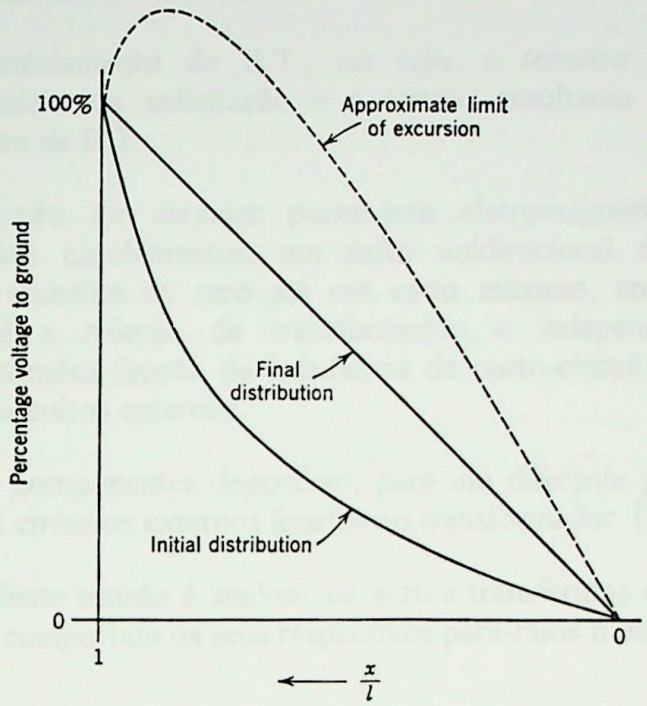


Figura I.1.2.4 Distribuição inicial de surto de tensão e o envelope de oscilações com $\alpha = 5$ *[3]*

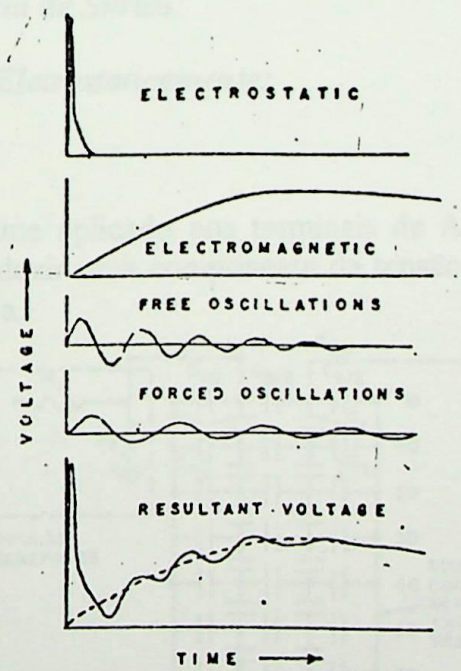


Figura I.1.2.5. Tensão no terminal secundário do transformador [9]

De modo complementar é conveniente considerar que o surto de tensão produzido no terminal de B.T. do transformador por uma onda viajante retangular é o resultado da superposição de *quatro componentes* conforme representado de maneira ilustrativa na *Figura I.1.2.5.*

Deste modo, no momento da solicitação do terminal de linha pelo do surto atmosférico, uma tensão de origem eletrostática, ou seja, a *primeira componente*, é produzida nos terminais do enrolamento de B.T. . Esta tensão depende da relação das capacitâncias do enrolamento de B.T. para o enrolamento de A.T. e para a terra, e é independente da relação de transformação.

De modo paralelo, ocorre uma oscilação livre no enrolamento de A.T., ou seja, a *segunda componente*, que consiste em oscilações harmônicas amortecidas que, por sua vez, induzem uma oscilação correspondente no enrolamento de B.T. A indução é acompanhada dos campos eletrostáticos e eletromagnéticos desses harmônicos,.e é dependente das constantes distribuídas e da relação de transformação dos enrolamentos.

A oscilação livre do enrolamento de B.T., ou seja, a *terceira componente*, se origina imediatamente após o início da solicitação e a tensão resultante depende das constantes distribuídas do enrolamento de B.T. .

Através da indução de caracter puramente eletromagnético, ou seja, a *quarta componente* entre os dois enrolamentos, um surto unidirecional é produzido no circuito secundário. Esta tensão aumenta de zero até um certo máximo, então decai para zero e é diretamente proporcional a relação de transformação e independente das capacitâncias distribuídas pois é uma simples função da indutância de curto-circuito do transformador e da impedância de surto dos circuitos externos.

Todas as *quatro* componentes dependem, para um diferente grau, das impedâncias de surto e comprimentos dos circuitos externos ligados ao transformador. [9]

Sendo assim o objetivo deste estudo é analisar os surtos transferidos entre os enrolamentos do transformador e como se comportam os seus respectivos pára-raios frente às estas solicitações.

I.2 - Mecanismos de Transferência de Surtos:

I.2.1 - Componente Transferida Eletrostaticamente:

Um surto de frente íngrime aplicado nos terminais de A.T. de um transformador por exemplo estrela-delta tende a produzir uma componente de tensão transferida eletrostaticamente entre os terminais do delta e a terra.

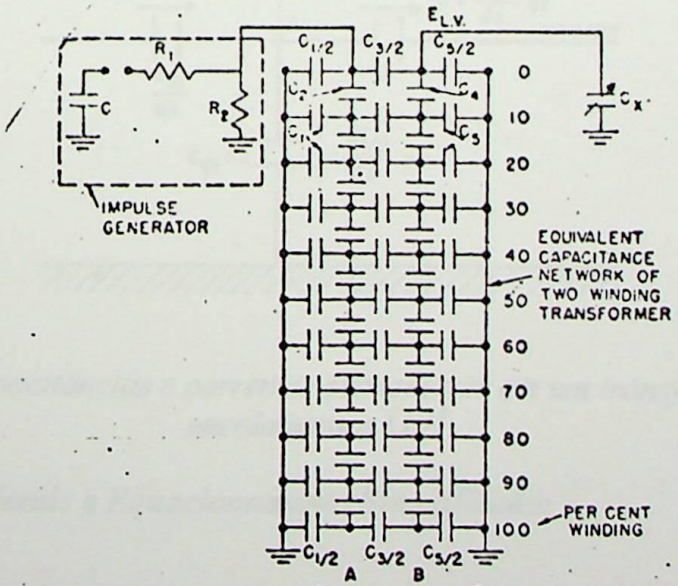


Figura I.2.1.1 - Circuito capacitivo equivalente para determinação do surto de tensão transferido eletrostaticamente em um transformador de dois enrolamentos [10]

A amplitude desta componente depende das capacitâncias efetivas entre os enrolamentos e entre os enrolamentos e a terra, da natureza da impedância inicial da carga para esta faixa de tensão,

frequência e da configuração do barramento que conecta a carga e o transformador. Dentro deste contexto, a componente eletrostática é independente da relação entre espiras. No entanto sua amplitude depende do tempo de frente do surto aplicado e evidentemente seu valor máximo corresponde a uma frente vertical.

De modo a ilustrar os fenômenos associado à transferência eletrostática seja a rede de capacitâncias mostrada na *Figura I.2.1.1.* A coluna de capacitâncias A representa o enrolamento de A.T. (assumido como primário) e a coluna de capacitores B representa o enrolamento de B.T. (secundário) que está localizado entre o enrolamento de A.T. e o núcleo. Sob estas condições as capacitâncias $C_{HG} = 10C_1$, $C_{SH} = C_2/10$, $C_{SL} = C_4/10$ e $C_{LG} = 10C_5$ que, representam as capacitâncias do enrolamento de A.T. para o tanque, capacitâncias séries do enrolamento de A.T., capacitância entre os enrolamentos de A.T e de B.T., capacitâncias séries do enrolamento de B.T., e capacitância do enrolamento de B.T. e o núcleo respectivamente. A capacitância C_X modela uma capacitância que pode se encontrar ligada ao terminal de B.T e corresponde por exemplo, a capacitância das buchas de B.T. Dentro deste contexto, os resultados de medições apresentados contemplam a aplicação de impulsos íngremes com forma 0,75 x 200 [μs] através de um gerador de impulso miniaturizado conforme, complementarmente mostra a *Figura I.2.1.1.*
Deste modo, é possível determinar a distribuição de tensão na rede de capacitâncias da *Figura I.2.1.1* fato passível de confirmação, conforme mostrado na *Figura I.2.1.2*, segundo o equacionamento simplificado desenvolvido analíticamente a seguir.

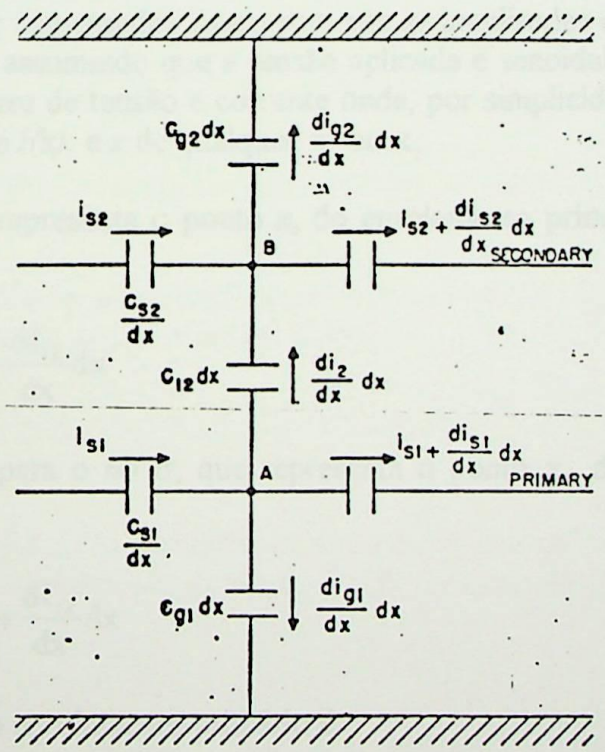


Figura I.2.1.2 - Capacitâncias e correntes elementares em um transformador de dois enrolamentos [10]

I.2.1.1 - Considerações Gerais e Equacionamento Simplificado:

Notação:

De modo a determinar analíticamente as componentes transferidas eletrostaticamente por um transformador sejam as seguintes considerações.

Todas as distâncias dos enrolamentos x podem ser calculada a partir da bucha de linha do transformador e expressas em por cento do total do comprimento de cada enrolamento. Desta forma $x=0$ refere ao início de linha, e $x=100$ por cento ao fim do enrolamento, respectivamente. O enrolamento solicitado pelo surto incidente sempre será designado como o enrolamento primário e referido com o *subscrito 1*. Logo, o enrolamento primário, portanto pode ser ou o enrolamento de A.T. ou o de B.T. do transformador. No outro enrolamento, conforme *Figuras I.2.1.1* e *I.2.1.2*, a análise se prende a um transformador de dois enrolamentos (não solicitado) será designado como o enrolamento secundário, e referido com o *subscrito 2*. Podendo pois, ser ou o enrolamento de A.T. ou o de B.T. do transformador.

A capacitância total para a terra do enrolamento é designada por C_g , e a capacitância série total por C_s . Assim, por exemplo, C_{g1} é a capacitância total do primário. C_{12} é a capacitância entre os dois enrolamentos. E denota tensão; e I corrente, respectivamente.

Equacionamento:

Deste modo seja a *Figura I..2.1.2* representativa de um transformador de dois enrolamentos modelado frente uma distribuição inicial de tensão como uma rede de capacitâncias distribuídas, dotada de uma altura *dx* em relação ao eixo dos enrolamentos. Neste caso o núcleo e o tanque são aterrados, e os enrolamentos são assumidos como uniformes. Desde que a rede compreenda somente capacitâncias, conforme mostrado, todas as correntes estarão em fase e adiantadas das tensões, que também estão em fase, de $\pi / 2$ *radianos*. Portanto, por facilidade a notação complexa pode ser dispensada.. Logo somente as amplitudes de correntes I e tensões E, precisam ser consideradas, assumindo que a tensão aplicada é senoidal é possível ainda trabalhar em termos de valores eficazes de tensão e corrente onde, por simplicidade E é considerado como representativo de $E(x)$, I de $I(x)$, e x de qualquer x_1 ou x_2.

Para o *nó A*, que representa o ponto x, do enrolamento primário, aplicando-se a lei de Kirchoff, vem:

$$I_{s1} = \left(I_{s1} + \frac{dI_{s1}}{dx} dx \right) + \frac{dI_{g1}}{dx} + \frac{dI_{12}}{dx} dx \qquad (1.2.1.1)$$

De modo similar, para o *nó B*, que representa o ponto x_2 do enrolamento secundário vem:

$$I_{s2} = \left(I_{s2} + \frac{dI_{s2}}{dx} dx \right) + \frac{dI_{g2}}{dx} + \frac{dI_{12}}{dx} dx \qquad (I.2.1.2)$$

A equação de tensão para o enrolamento primário é:

$$\frac{dE_1}{dx} dx = \frac{dx}{C_{s1}} \int I_{s1} dt \qquad (I.2.1.3)$$

Na *equação I.1.2.1* substituindo o símbolo da integral pelo operador $1/\omega$ e eliminando o termo complexo, conforme anteriormente discutido vem:

$$\frac{dE_1}{dx} = -\frac{1}{\omega C_{s1}} I_{s1} \qquad (I.2.1.4)$$

O enrolamento secundário possui uma equação semelhante a *equação I.2.1.4*.

Considerando agora que:

$$\frac{dI_{g1}}{dx}dx = C_{g1}dx\frac{dE_1}{dt}$$

É possível obter que:

$$\frac{dI_{g1}}{dx}dx = \omega C_{g1}E_1 dx \qquad \text{(I.2.1.5)}$$

Bem como, expressões semelhantes para I_{g2} *e* I_{12}.

Agora é conveniente a introdução das capacitâncias paralelas C_{p1} *e* C_{p2}, definidas por:

$$C_{p1} = C_{g1} + C_{12} \text{ e } C_{p2} = C_{g2} + C_{12} \qquad \text{(I.2.1.6)}$$

Manipulando-se as equações anteriores são obtidas duas equações diferenciais de tensão $E_1(x)$ e $E_2(x)$ para os enrolamentos primário e secundário respectivamente:

$$\frac{d^2E_1(x)}{dx^2} - \frac{C_{p1}}{C_{s1}}E_1(x) + \frac{C_{12}}{C_{s1}}E_2(x) = 0 \qquad \text{(I.2.1.7)}$$

$$\frac{d^2E_2(x)}{dx^2} - \frac{C_{p2}}{C_{s2}}E_2(x) + \frac{C_{12}}{C_{s2}}E_1(x) = 0 \qquad \text{(I.2.1.8)}$$

As *equações I.2.1.7 e I.2.1.8* são simétricas com respeito aos *subscritos 1 e 2* fato esperado uma vez que existe uma simetria da rede de capacitâncias.

A distribuição de tensão no segundo enrolamento $E_2(x)$ é obtida da *equação I.2.1.7* em termos da distribuição do enrolamento primário $E_1(x)$:

$$E_2(x) = \frac{C_{p1}}{C_{12}}E_1(x) - \frac{C_{s1}}{C_{12}}\frac{d^2E_1(x)}{dx^2} \qquad \text{(I.2.1.9)}$$

Substituindo-se a *equação I.2.1.9* e sua derivada segunda na *equação I.2.1.8*, finalmente é obtida a equação diferencial para a distribuição de tensão $E_1(x)$ ao longo do enrolamento primário:

$$\frac{d^4E_1(x)}{dx^4} - A\frac{d^2E_1(x)}{dx^2} + BE_1(x) = 0 \qquad \text{(I.2.1.10)}$$

na qual por simplicidade vem:

$$A = \frac{C_{p1}}{C_{s1}} + \frac{C_{p2}}{C_{s2}} \qquad \text{(I.2.1.11)}$$

$$B = \frac{C_{g1}C_{p2} + C_{g2}C_{12}}{C_{s1}C_{s2}} \qquad \text{(I.2.1.12)}$$

A mesma equação diferencial pode ser obtida para o enrolamento secundário, simplesmente pela substituição de $E_2(x)$ por $E_1(x)$, neste caso, vem:

$$B = \frac{C_{g2}C_{p1} + C_{g1}C_{12}}{C_{s1}C_{s2}}$$

Solução Geral:

A equação diferencial de quarta ordem com coeficientes constantes, ou seja, a *equação I.2.1.10* apresenta a seguinte solução geral:

$$E_1(x_1) = D_1\varepsilon^{\beta x} + D_2\varepsilon^{-\beta x} + D_3\varepsilon^{\gamma x}D_4\varepsilon^{-\gamma x} \qquad \text{(I.2.1.13)}$$

Onde as constantes de atenuação $\pm\beta$ *e* $\pm\gamma$, que são quantidades reais, são dadas por:

$$\beta = \gamma = \sqrt{\frac{A}{2} \pm \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}} \qquad \text{(I.2.1.14)}$$

As quatro constantes de integração *D_1 a D_4* são determinadas pelas condições de contorno nos quatro terminais do enrolamento. Para quase todos os casos práticos tem-se $\beta > \gamma \geq 4$, e portanto todas as reflexões, de neutro podem ser desprezadas, desde que sejam considerados somente pontos suficientemente distantes do neutro, por exemplo com abscissa $0 \leq x \leq 80$ por cento em ambos enrolamentos primário e no secundário. Os pontos próximos ao neutro não apresentam tensão apreciável, e são portanto de nenhum interesse prático. Considerando que, o enrolamento é *semi-infinito* é possível retirar duas condições de contorno, e desde já $D_1 = D_3 = 0$, logo a solução geral simplificada da equação diferencial homogenea a coeficientes constantes *equação I.2.1.10* é dada por:

$$E_1(x) = D_2\varepsilon^{-\beta x} + D_4\varepsilon^{-\gamma x} \qquad \text{(I.2.1.15)}$$

As condições de contorno portanto agora são simplificadas consideravelmente, desde que somente as tensões, ou correntes, nos terminais de linha do primário e do secundário precisam ser consideradas.

Dentro deste contexto, estes terminais podem ser:

1. aterrados;

2. isolados;

3. ligados a terra através de uma capacitância de carga C_X;

4. ligados a outro terminal de um mesmo enrolamento.

Como o primário é por definição, o enrolamento solicitado, uma das condições de contorno obtida, substituindo $x = 0$ na *equação I.2.1.15* resulta na solução expressa pela *equação I.2.1.16*.

$$D_4 = E_1(0) - D_2 \qquad \text{(I.2.1.16)}$$

onde: $E_1(0)$ é a tensão aplicada.

Dentre as várias condições do terminal secundário sejam pois:

Terminal de linha secundário aterrado:

Considerando x = 0 na *equação I.2.1.9*, e na *equação I.2.1.15*, obtém-se a expressão da tensão terminal de linha secundário $E_2(0)$ que por condição de contorno é igual a zero.

$$E_2(0) = \frac{(C_{p1} - \gamma^2 C_{s1})}{C_{12}} E_1(0) - \frac{(\beta^2 - \gamma^2)}{C_{12}} C_{s1} D_2 = 0 \qquad \text{(I.2.1.17)}$$

A solução do sistema de *equações I.2.1.16 e I.2.1.17* permite obter os valores de D_2 e D_4 cuja substituição na *equação I.2.1.15*, permite obter a distribuição de tensão do enrolamento primário.

$$E_1(x) = \frac{E_1(0)}{(\beta^2 - \gamma^2) C_{s1}} \left[(C_{p1} - \gamma^2 C_{s1}) \varepsilon^{-\beta x} + (\beta^2 C_{s1} - C_{p1}) \varepsilon^{-\gamma x} \right] \qquad \text{(I.2.1.18)}$$

A distribuição de tensão eletrostática no enrolamento primário de um transformador de dois enrolamentos é portanto a soma de duas exponenciais decrescentes. A abscissa para o máximo de tensão é igual a:

$$x_{1máx} = \frac{Ln[\beta(\gamma^2 C_{s1} - C_{p1})] - Ln[\gamma(\beta^2 C_{s1} - C_{p1})]}{\beta - \gamma} \qquad \text{(I.2.1.19)}$$

e o máximo de tensão igual:

$$E_{1máx} = \frac{E_1(0)}{(\beta^2 - \gamma^2) C_{s1}} \left[\frac{(C_{p1} - \gamma^2 C_{s1})(\gamma^2 C_{s1} - C_{p1})}{\beta^{2^2} (C_{s1} - C_{p1})} \varepsilon^{-\frac{\beta^2}{\gamma(\beta-\gamma)}} + \gamma^2 (C_{s1} - C_{p1}) \varepsilon^{-\frac{\beta}{(\beta-\gamma)}} \right] \qquad \text{(1.2.1.20)}$$

O gradiente máximo absoluto é encontrado no terminal de linha, ou seja, para x = 0 é igual a:

$$\frac{dE_1(0)}{dx} = -\frac{E_1(0)}{\beta + \gamma} \left(\frac{C_{p1}}{C_{s1}} + \beta\gamma \right) \qquad \text{(I.2.1.21)}$$

A distribuição de tensão ao longo do enrolamento secundário é obtida pela substituição da *equação I.2.1.18* na *equação I.2.1.9*:

$$E_2(x) = -\frac{(C_{p1} - \beta^2 C_{s1})(C_{p1} - \gamma^2 C_{s1})}{(\beta^2 - \gamma^2) C_{12} C_{s1}} E_1(0)(\varepsilon^{-\gamma x} - \varepsilon^{-\beta x}) \qquad \text{(I.2.1.22)}$$

ou seja, proporcional a tensão existente no terminal de linha do enrolamento primário conforme a seguir:

$$E_2(x) = K E_1(0)(\varepsilon^{-\gamma x} - \varepsilon^{-\beta x}) \qquad \text{(I.2.1.23)}$$

onde:

$$K = -\frac{(C_{p1} - \beta^2 C_{s1})(C_{p1} - \gamma^2 C_{s1})}{(\beta^2 - \gamma^2) C_{12} C_{s1}}$$

A distribuição de tensão no secundário é a diferença de duas exponenciais. Ela é zero no terminal de linha aumenta para um máximo e então decresce novamente. A abscissa para o máximo de tensão é igual a:

$$x_{2máx} = \frac{\ln\beta - \ln\gamma}{\beta - \gamma} = \frac{\ln(\beta/\gamma)}{\beta - \gamma} \qquad \text{(I.2.1.24)}$$

e o máximo de tensão é igual a:

$$E_{2máx} = \frac{(C_{p1} - \beta^2 C_{s1})(C_{p1} - \gamma^2 C_{s1})}{(\beta^2 - \gamma^2) C_{12} C_{s1}} E_1(0) \left[\left(\frac{\beta}{\gamma}\right)^{-\frac{\beta}{\beta-\gamma}} - \left(\frac{\beta}{\gamma}\right)^{-\frac{\gamma}{\beta-\gamma}} \right] \qquad \text{(I.2.1.25)}$$

O gradiente tem um máximo no terminal de linha igual a:

$$\frac{dE_{2máx}}{dx} = -\frac{(C_{p1} - \beta^2 C_{s1})(C_{p1} - \gamma^2 C_{s1})}{(\beta^2 - \gamma^2) C_{12} C_{s1}} E_1(0)(\beta - \gamma) \qquad \text{(I.2.1.26)}$$

e um mínimo no interior do enrolamento em duas vezes a abscissa de tensão máxima, neste caso o valor do gradiente mínimo é:

$$\frac{dE_{2mín}}{dx} = \frac{(C_{p1} - \beta^2 C_{s1})(C_{p1} - \gamma^2 C_{s1})}{(\beta^2 - \gamma^2) C_{12} C_{s1}} E_1(0) \left[-\beta . \left(\frac{\beta}{\gamma}\right)^{-\frac{2\beta}{\beta-\gamma}} + \gamma . \left(\frac{\beta}{\gamma}\right)^{-\frac{2\gamma}{\beta-\gamma}} \right] \qquad \text{(I.2.1.27)}$$

Em valor absoluto o gradiente do terminal de linha sempre será maior que o gradiente no interior do enrolamento.

Terminal de linha secundário isolado:

A corrente no enrolamento secundário é:

$$I_{s2} = \omega C_{s2} \frac{dE_2(x)}{dx} = \frac{\omega C_{s2}}{C_{12}} \left[\beta (C_{p1} - \beta^2 C_{s1}) D_2 \varepsilon^{-\beta x} + \gamma (C_{p1} - \gamma^2 C_{s1}) D_4 \varepsilon^{-\gamma x} \right] \qquad \text{(I.2.1.28)}$$

Esta corrente é zero no terminal de linha, ou seja para o x = 0. Este fato e a *equação I.2.1.16* definem as duas condições de contorno do problema. Deste modo a distribuição de tensão no primário resulta em:

$$E_1(x) = \frac{E_1(0)}{(\beta^3 - \gamma^3) C_{s1} - (\beta - \gamma) C_{p1}} \left[\gamma (C_{p1} - \gamma^2 C_{s1}) \varepsilon^{-\beta x} - \beta (C_{p1} - \beta^2 C_{s1}) \varepsilon^{-\gamma x} \right] \qquad \text{(I.2.1.29)}$$

Logo a distribuição de tensão é a soma de duas exponenciais decrescentes, e como $\beta > \gamma$ vem que a tensão do primário em um dado ponto é sempre maior para o caso isolado do que para o caso do secundário aterrado no terminal de linha.

O gradiente máximo absoluto de tensão aparece no terminal de linha, ou seja, para x = 0 é igual a:

$$\frac{dE_{1máx}}{dx} = -E_1(0)\frac{\beta\gamma(\beta+\gamma)}{\beta^2+\gamma^2+\beta\gamma-\frac{C_{p1}}{C_{s1}}} \qquad \text{(I.2.1.30)}$$

A distribuição de tensão ao longo do enrolamento secundário é:

$$E_2(x) = \frac{(\beta^2 C_{s1} - C_{p1})(C_{p1} - \gamma^2 C_{s1})E_1(0)}{C_{12}\left[(\beta^3-\gamma^3)C_{s1} - (\beta-\gamma)C_{p1}\right]}\left[-\gamma\varepsilon^{-\beta x} + \beta\varepsilon^{-\gamma x}\right] \qquad \text{(I.2.1.31)}$$

ou seja é, proporcional a tensão existente no terminal de linha do enrolamento primário conforme a seguir:

$$E_2(x) = K'E_1(0)\left[-\gamma\varepsilon^{-\beta x} + \beta\varepsilon^{-\gamma x}\right] \qquad \text{(I.2.1.32)}$$

onde:

$$K' = \frac{(\beta^2 C_{s1} - C_{p1})(C_{p1} - \gamma^2 C_{s1})}{C_{12}\left[(\beta^3-\gamma^3)C_{s1} - (\beta-\gamma)C_{p1}\right]}$$

A distribuição de tensão no secundário é a diferença de duas exponenciais. Ela é máxima no terminal de linha e a partir daí decrescente.

A abscissa para o máximo de tensão é igual a zero:

$$x_{2máx} = 0 \qquad \text{(I.2.1.33)}$$

e o máximo de tensão é igual a:

$$E_{2máx} = \frac{C_{12}E_1(0)}{C_{p2} + \sqrt{\frac{C_{s2}(C_{g1}C_{p2} + C_{g2}C_{12})}{C_{s1}}}} \qquad \text{(I.2.1.34)}$$

É evidente que a presença de uma capacitância série secundária implica na redução da amplitude da tensão transferida eletrostaticamente quando comparada com os valores determinados pelas capacitâncias entre enrolamentos e entre enrolamento e terra. Deste modo, em alguns casos a tensão eletrostática máxima transferida é calculada a partir da expressão:

$$E_{2máx} = \frac{C_{12}E_1(0)}{C_{12}+C_{g2}} = \frac{C_{12}E_1(0)}{C_{p2}} \qquad \text{(I.2.1.35)}$$

mas a análise presente mostra que tal método pode conduzir a um erro considerável em muitos casos práticos.

No ponto terminal aterrado do enrolamento secundário o gradiente de tensão é zero. No entanto, é conveniente ressaltar que o gradiente máximo é encontrado exatamente no mesmo ponto $x_{2máx}$, relacionado com a máxima tensão para o terminal secundário aterrado, conforme *equação I.2.1.24*.

Terminal de linha aterrado através de um capacitor

Quando o terminal de linha é aterrado através de um capacitor C_x, flui para dentro deste enrolamento uma corrente $I_{s2}(0)$ que resulta em uma tensão $E_2(0)$ com relação a terra. A condição de contôrno é portanto:

$$E_2(0) = -\frac{I_{s2}(0)}{\omega C_x} \qquad \text{(I.2.1.36)}$$

o sinal negativo aparece devido a convenção da omissão do operador *j*.

A distribuição de tensão ao longo do enrolamento primário é:

$$E_1(x) = E_1(0)\frac{(C_{p1}-\gamma^2 C_{s1})(R+\gamma)\varepsilon^{-\beta x}+(\beta^2 C_{s1}-C_{p1})(R+\beta)\varepsilon^{-\gamma x}}{C_{s1}\left[\beta^3-\gamma^3+R(\beta^2-\gamma^2)-(\beta^2-\gamma^2)C_{p1}\right]} \qquad \text{(I.2.1.37)}$$

no qual, por conveniência, vem:

$$R = \frac{C_x}{C_{s2}} \qquad \text{(I.2.1.38)}$$

Convém ressaltar que quando a capacitância de carga C_X é infinita, o terminal de linha secundário é aterrado: de fato, para R=infinito a *equação I.2.1.37* vem a ser igual a *equação I.2.1.18*. Quando a capacitância de carga é zero, o terminal de linha secundário é isolado: de fato para R=0 a *equação I.2.1.32* vem a ser igual a *equação I.2.1.29*.

A distribuição de tensão ao longo do secundário é:

$$E_2(x) = \frac{E_1(0)C_{s1}C_{12}\left[-(R+\gamma)\varepsilon^{-\beta x}+(R+\beta)\varepsilon^{-\gamma x}\right]}{C_{s2}\left\{C_{s1}\left[\beta^3-\gamma^3+R(\beta^2-\gamma^2)\right]-(\beta-\gamma)C_{p1}\right\}} \qquad \text{(I.2.1.39)}$$

A tensão no terminal de linha do secundário, ou seja, para x = 0, que é igual a tensão sobre o capacitor C_X é:

$$E_2(0) = \frac{C_{s1}C_{12}E_1(0)}{C_{s2}\left\{C_{s1}\left[\beta^2+\gamma^2+\beta\gamma+R(\beta+\gamma)\right]-C_{p1}\right\}} \qquad \text{(I.2.1.40)}$$

A tensão máxima no secundário aparece no ponto de abscissa:

$$x_{2máx} = \frac{1}{\beta-\gamma}\left[\ln\frac{\beta}{\gamma}+\ln\frac{R+\gamma}{R+\beta}\right] \qquad \text{(I.2.1.41)}$$

Dentro deste contexto, o caso de um secundário curto-circuitado pode ser tratado em uma primeira aproximação pela presente análise. De fato, a parcela curto circuitada do secundário pode ser modelada como uma capacitância igual a capacitância efetiva deste enrolamento que por sua vez é solicitado considerando a linha primária aterrada. O enrolamento primário nesta análise pode ser considerado aterrado haja vista que apresenta uma tensão fixa.

Considerando as análises acima vem que a tensão primária e secundária corresponde a soma algébrica de duas funções exponenciais decrescentes, com expoentes de β e γ. Deste modo, de modo simplificado a partir da *equação I.2.1.34*, a máxima tensão transferida ($E_{B.T.}$) para o terminal de linha de B.T., no caso terminal isolado, para um degrau unitário de tensão no primário é dado pela equação:

$$E_{B.T.} = \frac{C_{HL}}{C_{HL} + C_{LG} + \sqrt{\frac{C_{SL}[C_{HG}(C_{HL} + C_{LG}) + C_{LG}C_{HL}]}{C_{SH}}}} \qquad \text{(I.2.1.42)}$$

Similarmente, quando o terminal de linha de B.T. é aterrado através do capacitor C_X a *equação I.2.1.42* , resulta em:

$$E_{B.T.} = \frac{C_{SH}C_{HL}}{C_{SL}\{C_{SH}[\beta^2 + \gamma^2 + \beta\gamma + R(\beta + \gamma)] - (C_{HG} + C_{HL})\}} \qquad \text{(I.2.1.43)}$$

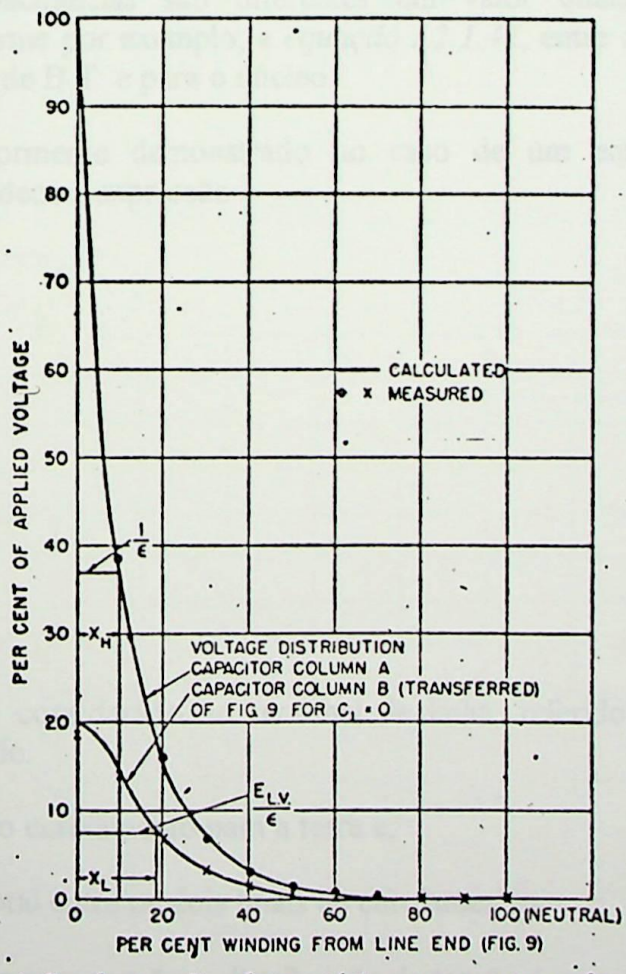


Figura I.2.1.3 - Distribuição da tensão eletrostática para o transformador da Figura I.2.1.1 [10]

Na *equação 1.2.1.43*, vem:

$$R = \frac{C_X}{C_{SL}}$$

que é a relação entre a capacitância terminal para a capacitância série do enrolamento de B.T. .

Deste modo utilizando o circuito da *Figura I.2.1.1* são obtidos os resultados de tensão transferida eletrostaticamente, mostrado a seguir, um para $C_{HG} = 0$ e outro para $C_{HG} = 2.000$ [μ μF], para as demais capacitâncias fixas:

Com:

$C_{SH} = 20$ [μμF]; $C_{HL} = 3.000$ [μμF]; $C_{SL} = 40$ [μμF]; $C_{LG} = 6.000$ [μμF]

Na *Figura I.2.1.3* para $C_{HG} = 0$ e C_X=0 é mostrada a distribuição de tensão calculada e medida ao longo do enrolamento, modelado por um circuito capacitivo, de A.T. (coluna A) e do enrolamento de B.T. (coluna B). Como é evidente a maior parte da tensão é distribuída ao longo de uma pequena parte dos enrolamentos e, uma grande parte do enrolamento de B.T., ou seja, os capacitores da coluna B podem ser considerados como envolvidos quando comparados com o enrolamento de A.T., ou seja os capacitores da coluna A.

No entanto, conforme por exemplo a *equação I.2.1.34* no cálculo da magnitude da tensão transferida do terminal de A.T. para o terminal de B.T., as capacitâncias efetivas devem ser determinadas. Estas capacitâncias são diferentes em valor quando comparadas com as capacitâncias totais conforme por exemplo, a *equação I.2.1.42*; entre os enrolamentos de A.T. e de B.T. e do enrolamento de B.T. e para o núcleo.

Conforme anteriormente demonstrado no caso de um enrolamento monofásico, a distribuição de tensão obedece a expressão:

$$E(x) = \varepsilon^{-\alpha x}$$

e,

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$$

Onde:

x é a distância do ponto considerado ao terminal de linha, referido para o comprimento do enrolamento igual a unidade.

C_g é a capacitância total do enrolamento para a terra e,

C_s é a capacitância série total entre os dois finais de enrolamentos.

Em quase todos os casos $\alpha \geq 4$ e a distribuição de tensão é uma exponencial.

É evidente que o termo $X = 1/\alpha$ para a abscissa do ponto de tensão é igual a $1/\varepsilon = 36{,}8\%$ da tensão no terminal de linha. O termo $X = 1/\alpha$ também representa a área sob a curva da tensão de distribuição, que é dada por:

$$\int_0^1 \varepsilon^{-\alpha x} dx = \frac{1}{\alpha}(1-\varepsilon^{-\alpha})$$

desde que $\varepsilon^{-\alpha} << 1$.

A quantidade X conforme acima definida é denominada de *"Constante Espacial"* do enrolamento. Um procedimento semelhante pode ser aplicado em primeira aproximação para o caso de dois enrolamentos, mesmo se as distribuições de tensão do primário e do secundário não forem exponenciais. De fato, a capacitância efetiva é determinada pela área sob a curva de distribuição de tensão pois, esta área é bem aproximada pelo valor da*"Constante Espacial"* X.

Considerando que as capacitâncias efetivas podem ser determinadas com o auxílio de $C_{ef} = C_{en}/\alpha$, vem que na Figura I.2.1.3. distribuição de tensão no enrolamento de A.T. fornece $X_H = 0{,}103$ e $\alpha_H = 9{,}7$, ou seja, uma capacitância efetiva entre os enrolamentos de A.T. e de B.T. de $C_{HL}/\alpha_H = 3.000/9.7 = 310[\mu\mu F]$.

A distribuição de tensão no enrolamento de B.T. fornece $X_L = 0.185$ e $\alpha_L = 5{,}4$, ou uma capacitância efetiva entre o enrolamento de B.T. e a terra de $C_{LG}/\alpha_L = 6.000/5{,}4 = 1.110[\mu\mu F]$. Assim a tensão eletrostática transferida para o terminal de linha de B.T., obtida através de uma simplificação da *equação I.2.1.42*, em por unidade (p.u.), vem:

$$E_{B.T.} = \frac{\frac{C_{HL}}{\alpha_H}}{\frac{C_{HL}}{\alpha_H} + \frac{C_{LG}}{\alpha_L}} = \frac{310}{310+1.110} = 0{,}218 \qquad (1.2.1.44)$$

Este valor pode ser comparado com 0,203, ou seja o valor calculado usando a *equação I.2.1.42*, e com o valor medido de 0,19.

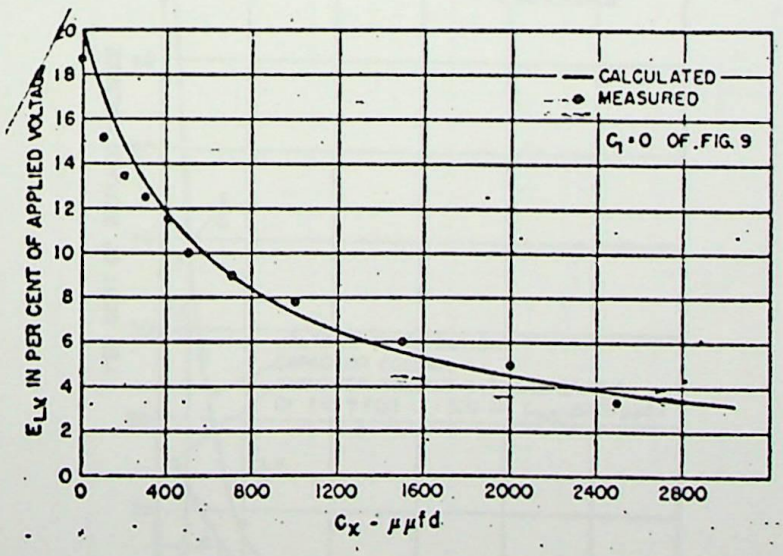


Figura I.2.1.4 - Tensão transferida eletrostaticamente $E_{B.T.}$ em função da capacitância C_x da Figura I.2.1.1 [10]

Na *Figura I.2.1.4* são apresentados as tensões resultantes no terminal de B.T. em função da capacitância terminal de B.T. externa. Para fins de comparação, é mostrada uma característica calculada baseada na *equação I.2.1.43*. É evidente que mesmo uma capacitância terminal C_X relativamente pequena reduz consideravelmente a tensão eletrostática transferida. De fato, esta tensão para $C_X = 500$ [$\mu\mu F$] é igual a uma metade do valor para $C_X = 0$. Os resultados anteriores

são os mesmos para um surto aplicado para a rede da *Figura I.2.1.1.* através da impedância de surto de 50 [Ω] ou de 400 [Ω].

Assumindo que não ocorrem modificações na distribuição de tensão entre os enrolamentos de A.T. ou de B.T. em função de C_X e que as capacitâncias efetivas permanecem imutáveis, é possível extender a *equação I.2.1.44* para incluir o efeito da capacitância conforme a seguir:

$$E_{B.T.} = \frac{\dfrac{C_{HL}}{\alpha_H}}{\dfrac{C_{HL}}{\alpha_H} + \dfrac{C_{LG}}{\alpha_L} + C_X} \qquad \text{(I.2.1.45)}$$

C_X = 1.000 [μμF] resulta em uma tensão transferida de $E_{B.T.}$= 0,125 [p.u.] sendo medido o valor 0,075 [p.u.].

Nas *Figuras I.2.1.5 e I.2.1.6* são mostrados os resultados para C_{HG} conforme *Figura I.2.1.1* entre 0 e 2.000 [μμF]. A curva calculada na *Figura I.2.1.6* se baseia, novamente na *equação I.2.1.43.* Neste caso a tensão transferida para o secundário é reduzida em 15% pela capacitância adicional do enrolamento de A.T. para a terra.

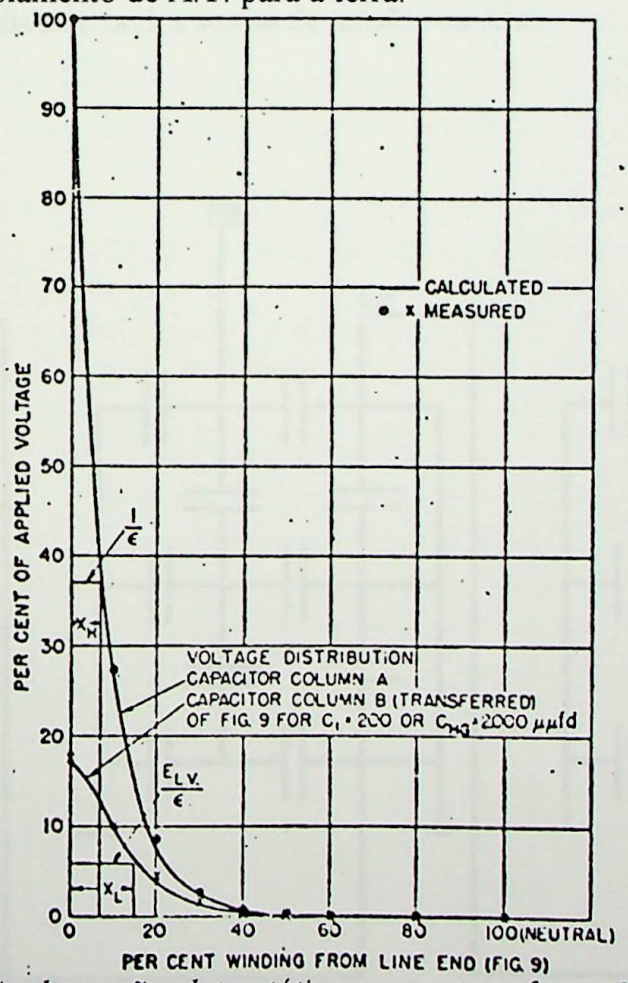


Figura I.2.1.5 - Distribuição da tensão eletrostática para o transformador da Figura I.2.1.1 [10]

Se no método da *equação I.2.1.44* as capacitâncias efetivas de C_{HL}/α_H = 210 [μμF] e C_{LG}/α_L = 890 [μμF] forem utilizadas tal como determinado na *Figura I.2.1.5*, então para o

enrolamento de B.T. a capacitância terminal $C_X = 0$ e $C_X = 1.000[\mu\mu F]$ as tensões de surto transferidos $E_{B.T.}$ em [p.u.] .são respectivamente 0,19 [p.u.] e 0,10 [p.u.] e medidos 0,18 [p.u.] e 0,07 [p.u.]. Extendendo estes estudos para outros arranjos de rede e valores de capacitâncias são obtidos valores semelhantes.

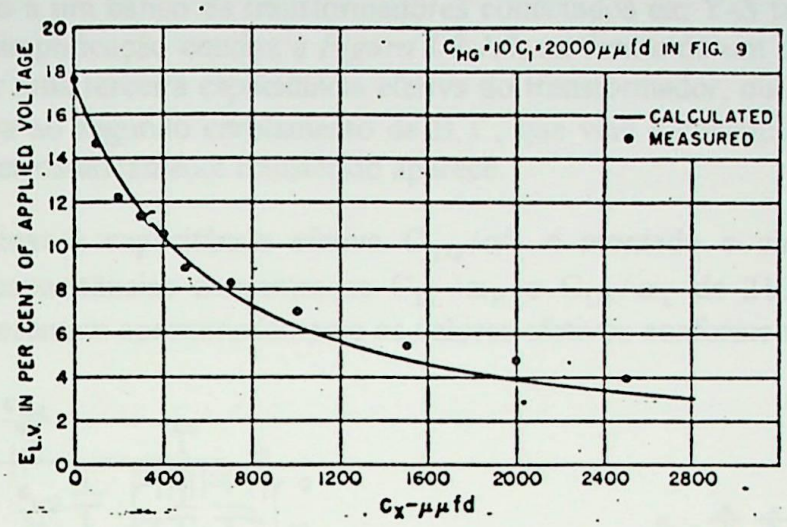


Figura I.2.1.6 - Tensão transferida eletrostaticamente $E_{B.T.}$ em função da capacitância C_x da Figura I.2.1.1 [10]

Uma posterior simplificação da *equação I.2.1.44* resulta no método usualmente utilizado no cálculo da transferência eletrostática dos surtos de tensão, ou seja:

$$E_{B.T.} = \frac{C_{HL} E_{AT}}{C_{HL} + C_{LG} + C_X} \qquad \text{(I.2.1.46)}$$

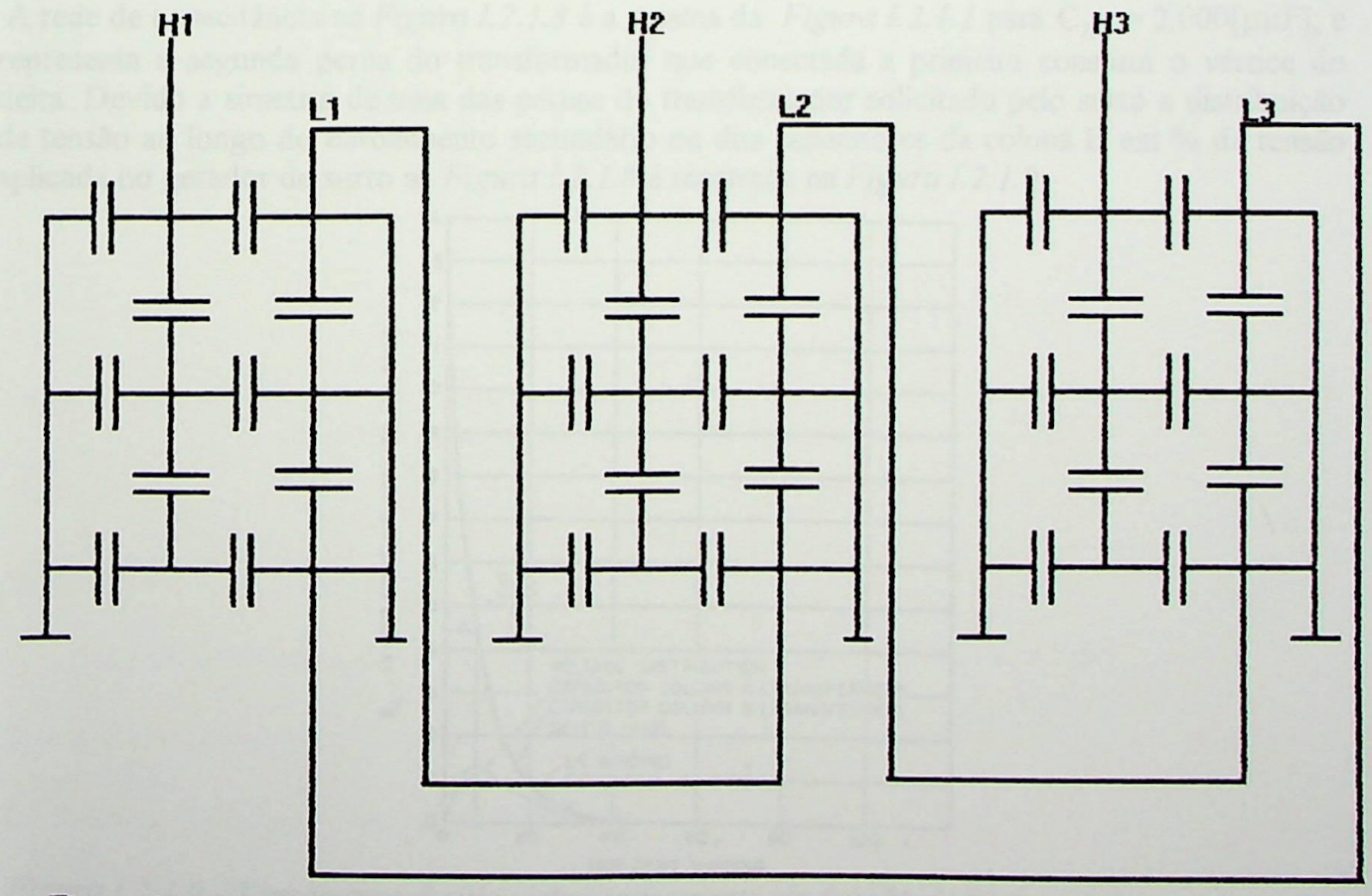


Figura I.2.1.7 - Circuito equivalente trifásico para a tensão transferida eletrostaticamente através de um banco de transformadores Y-Δ

É conveniente ressaltar que a aplicação da *equação I.2.1.46* no exemplo anterior para $C_X = 0$ resulta em 0,33 [p.u.], ou seja, implica em um erro de 67% para $C_{HG} = 0$ e 91% para $C_{HG} = 2.000[\mu\mu F]$.

Com respeito a um banco de transformadores conectados em Y-Δ tal como indicado na *Figura I.2.1.7* cuja simplificação conduz a *Figura I.2.1.8*, na forma de um circuito de ensaio, é necessário considerar uma terceira capacitância efetiva do transformador, ou seja, C'_{LG}/α'_L. Esta capacitância é relativa ao segundo enrolamento de B.T., que vem a constituir a extremidade do delta na qual surto eletrostáticamente transferido aparece.

Para determinar a capacitância efetiva C'_{LG}/α'_L é montado o circuito mostrado na *Figura I.2.1.8*. As capacitâncias concentradas C_{HL}/α_H e C_{LG}/α_L de 210[μμF] e 890[μμF] respectivamente representam aproximadamente os valores efetivos conforme mostrado na *Figura I.2.1.5*.

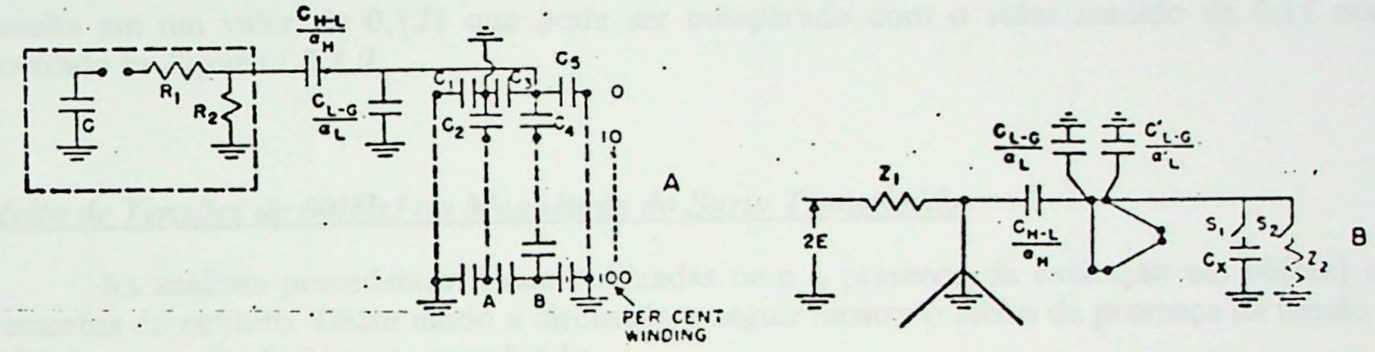


Figura I.2.1.8 - Circuito equivalente para a tensão transferida eletrostaticamente através de um banco de transformadores Y-Δ [10]

A rede de capacitância na *Figura I.2.1.8* é a mesma da *Figura I.2.1.1* para $C_{HG} = 2.000[\mu\mu F]$, e representa a segunda perna do transformador que conectada a primeira constitui o vértice do delta. Devido a simetria de uma das pernas do transformador solicitado pelo surto a distribuição de tensão ao longo do enrolamento secundário ou dos capacitores da coluna B em % da tensão aplicada no gerador de surto na *Figura I.2.1.8* é mostrada na *Figura I.2.1.9*.

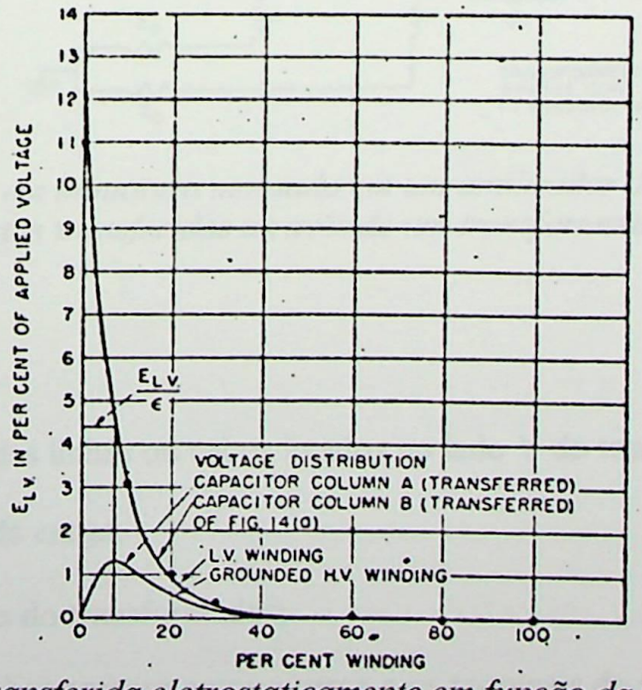


Figura I.2.1.9 - Tensão transferida eletrostaticamente em função da % do enrolamento para a simulação do transformador Y-Δ [10]

A remoção do terra da coluna A possui um efeito desprezível nos resultados, como pode ser verificado pelas *equações I.2.1.1 a I.2.1.41*. De modo similar ao anteriormente realizado segundo a *Figura I.2.1.9* é obtido $\alpha'_L = 14{,}2$. Logo, a capacitância efetiva C'_{LG}/α'_L é de 630[μμ F] onde $C'_{LG} = C_{HL} + C_{LG}$. Este cálculo de C'_{LG} assume que o capacitor da coluna A está essencialmente no potencial zero ao longo de toda a coluna e desse modo estabelece a locação de um dos planos de terra. De fato, as *equações I.2.1.1.1 a I.2.1.41* fornecem uma tensão máxima de 0,014 ao longo da coluna A em X = 6,8% do fim de linha. O cálculo da tensão transferida usando a equação aproximada, ou seja:

$$E_{BT} = \frac{\dfrac{C_{HL}E_{AT}}{\alpha_H}}{\dfrac{C_{HL}}{\alpha_H} + \dfrac{C_{LG}}{\alpha_L} + \dfrac{C_{LG}}{\alpha_L}} = \frac{210}{210+890+630} \qquad (1.2.1.47)$$

Resulta em um valor de 0,121 que pode ser comparado com o valor medido de 0,11 como mostrado na *Figura I.2.1.9*.

***Efeito de Tensões de 60[Hz] na Magnitude do Surto Transferido*:**

As análises precedentes foram realizadas com a presença da excitação em 60[Hz] dos elementos do circuito. Deste modo a discussão a seguir mostra o efeito da presença da tensão de 60[Hz] na magnitude do surto transferido.

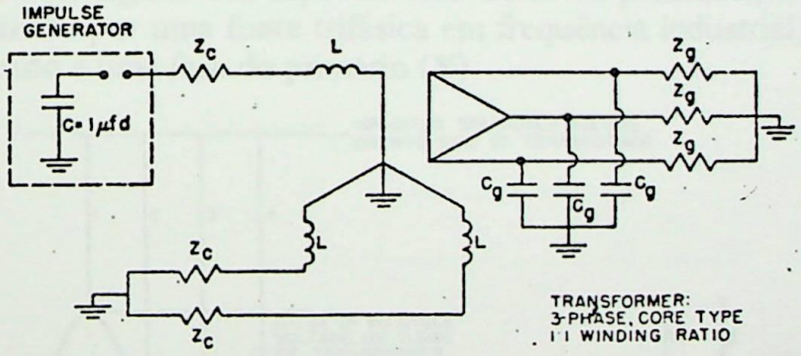


Figura I.2.1.10 - Sistema em miniatura montado em um analisador de transitórios para estudos de surtos transferidos através de um transformador [10]

Onde:

Z_c - Impedância de surto das linhas ou cabos ligados no lado Y do transformador;

Z_g - Impedância de surto da carga;

L - Indutância de dispersão do transformador;

C_g - Capacitância total do barramento entre a carga e os terminais do transformador e

Relação de transformação: 1:1.

Quando um surto viaja através de uma linha de transmissão o valor da tensão na mesma é igual ao valor da soma da amplitude do surto e do valor instantâneo da tensão em frequência industrial.

Ao atingir os terminais do transformador o surto viajante é limitado pela atuação do pára-raios, quando o mesmo existir, no seu correspondente nível de proteção. Logo, o surto que é transferido para o correspondente terminal secundário do transformador é igual a diferença entre o nível de proteção do pára-raios e o valor instantâneo da tensão em frequência industrial. O surto transferido, calculado segundo os procedimentos anteriormente descritos, é então adicionado a tensão instantânea em frequência industrial existente no terminal secundário do transformador.

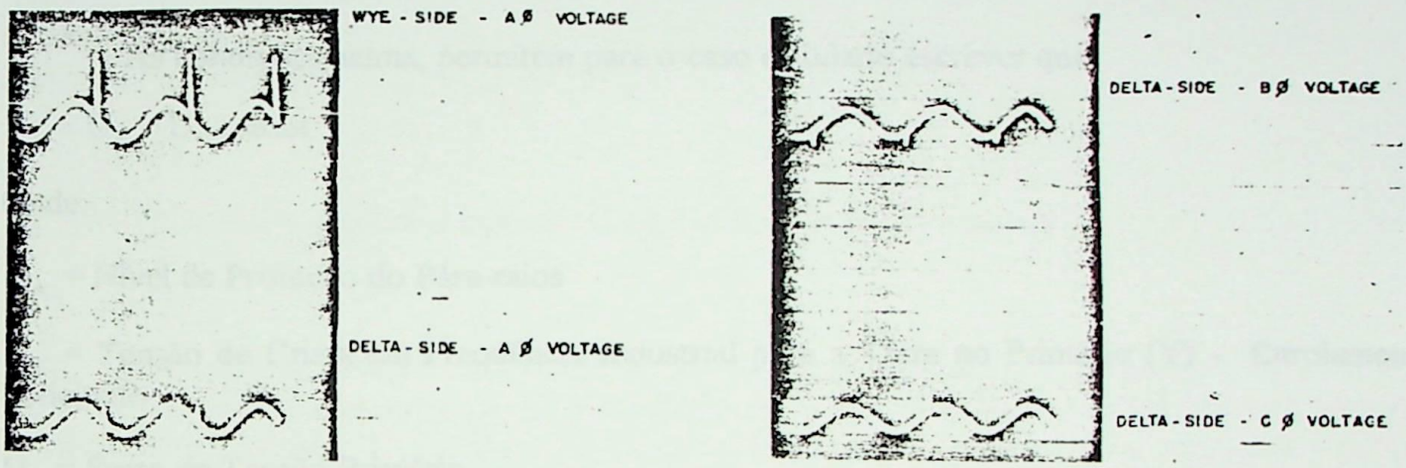


Figura I.2.1.11 - Oscilogramas típicos do analisador de transitórios [10]

De modo descrever alguns dos aspectos relevantes do problema, o circuito indicado na *Figura I.2.1.10*, energizado por uma fonte trifásica em frequência industrial, é solicitado por um impulso de tensão aplicado a uma fase do primário (Y).

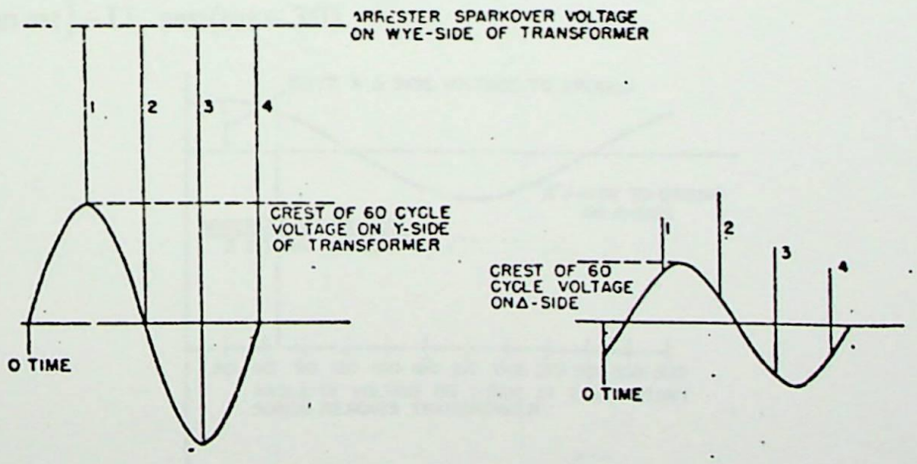


Figura I.2.1.12 - Surto transferido eletrostaticamente através de um transformador Y-Δ com a excitação em frequência industrial [10]

Na *Figura I.2.1.11* estão indicados os oscilogramas de um caso representativo, ilustrando as amplitudes e as fases das tensões de surto no primário e em todos os três terminais do secundário. O impulso de tensão aplicado em diferentes posições da onda em frequência industrial fato que, em tese, permite simular a operação de um pára-raios primário. No caso específico, resultados indicam que a tensão máxima no secundário é igual a tensão do pára-raios do primário dividido por três vezes a relação de espiras mais a tensão de crista em frequência industrial fase-neutro no lado delta.

Na *Figura I.2.1.12* surto é mostrado em quatro posições diferentes no tempo sobrepostos a uma tensão em frequência industrial sendo indicados as correspondentes tensões secundárias.

A maior amplitude da tensão de surto aplicada ao pára-raios é obtida sob a polaridade negativa da tensão em frequência industrial quando o surto tem polaridade positiva e vice-versa. Desde que a tensão no secundário em delta está também no meio ciclo negativo (no caso somente 30° da crista), a tensão total que pode ocorrer não é máxima. A tensão no primário será limitada em um valor constante (Nível de proteção do pára raios) mas a tensão de surto superiposta na tensão do secundário em delta variará senoidalmente, dependendo do ângulo de incidência do surto de tensão em frequência industrial.

As condições acima, permitem para o caso estudado escrever que:

$$U_S = U_A - U_Y \operatorname{sen} \omega t$$

Onde:

U_A = Nível de Proteção do Pára-raios

U_Y = Tensão de Crista em Frequência Industrial para a Terra no Primário (Y) - Enrolamento Solicitado

U_S = Surto de Tensão Primário

Considerando conforme observado nos estudos anteriores que V_S é transferida para os terminais do secundário através da relação $1/3n_T$ onde n_T é a relação de espiras, a tensão no lado secundário é igual a:

$$U_{S\Delta} = \frac{1}{3n_T}\left[U_A - U_Y \operatorname{sen} \omega t\right] + U_\Delta \operatorname{sen}(\omega t - 30) \qquad (1.2.1.48)$$

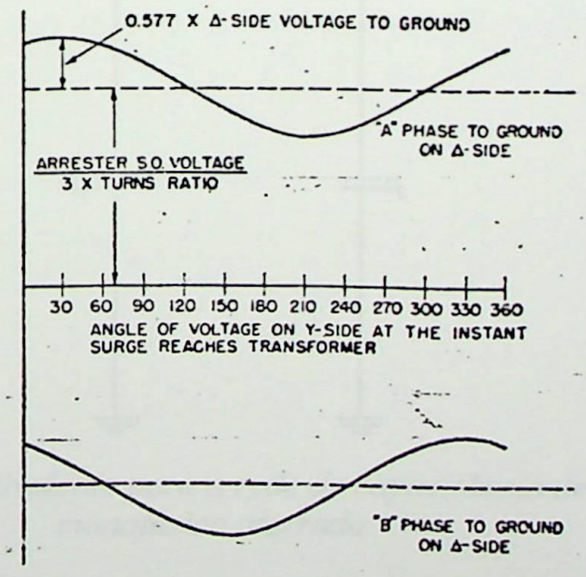


Figura I.2.1.13 - Efeito da tensão em frequência industrial no surto transferido através de um transformador Y-Δ [10]

Onde:

U_Δ = Tensão de crista em frequência industrial para a terra no lado secundário (Δ)

$$U_Y = \sqrt{3} n_T U_\Delta$$

Portanto:

$$U_{S\Delta} = \frac{U_A}{3n_T} + 0{,}577 U_\Delta \operatorname{sen}(\omega t - 60) \qquad (1.2.1.49)$$

Fato mostrado na *Figura I.2.1.13.* [10]

A *equação I.2.1.49* é uma simplificação da *equação I.2.1.48* para:

$$\frac{C_{HL}}{C_{HL} + C_L} \sqrt{3} n = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

I.2.1.2 - Comentários sobre a influência da Capacitância Secundária

Nas subestações os transformadores são usualmente localizados ao ar livre. As distâncias entre os terminais da carga e os do secundário do transformador é mantida tão curta quanto possível, variando entre 15 e 75[m]. As ligações podem ser feitas por cabos em paralelo ou por barramentos aéreos com fases isoladas. Todos estes métodos de ligação introduzem uma capacitância apreciável no circuito secundário que não pode ser desprezada nas análises. A capacitância média do barramento com fases isoladas é de 83[μμF/m],.enquanto a capacitância do cabo varia com o tipo, classe de tensão e tamanho.

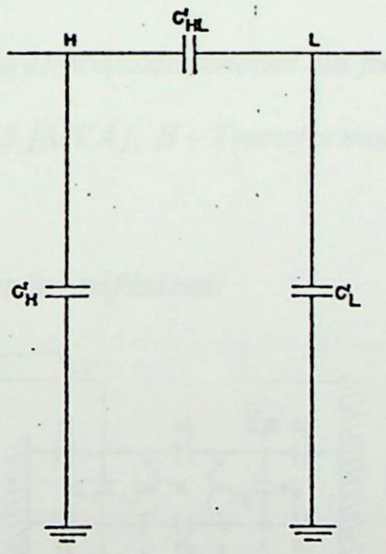


Figura I.2.1.14 - Circuito equivalente para a rede de capacitância de um transformador monofásico aterrado

Para uma visualização do efeito da capacitância externa, é conveniente representar a rede de capacitâncias distribuídas do transformador pelo equivalente constante concentrado de secção-pi representado na *Figura I.2.1.14*, com uma capacitância externa C_X introduzida no terminal secundário para representar a capacitância do barramento ou cargas. A tensão máxima E_2, conforme anteriormente demonstrado vem a ser:

$$E_2 = \frac{C'_{HL}}{C'_{HL}+C'_L+C_X} E_1 \qquad (1.2.1.50)$$

As *Figuras I.2.1.15(A e B)* mostram a variação da amplitude da componente eletrostática da tensão E_2 com a capacitância terminal C_X . A *Figura I.2.1.15(A)* mostra também, em pontos pretos, resultados de medidas reais em um transformador. Assumindo que a instalação sob análise é feita de barramentos isolados com 15[m], que constitue a combinação que introduz a mínima capacitância, vem que a amplitude da componente eletrostática é reduzida de 17,5 para 5,6% da amplitude do surto primário. Caso os cabos de mesmo comprimento sejam utilizados para esta função, e assumindo quatro cabos por fase 1.500 MCM (Mil Circular Mil), a amplitude da componente eletrostática no terminal secundário é da ordem de 0,17% do valor da amplitude do surto do primário.

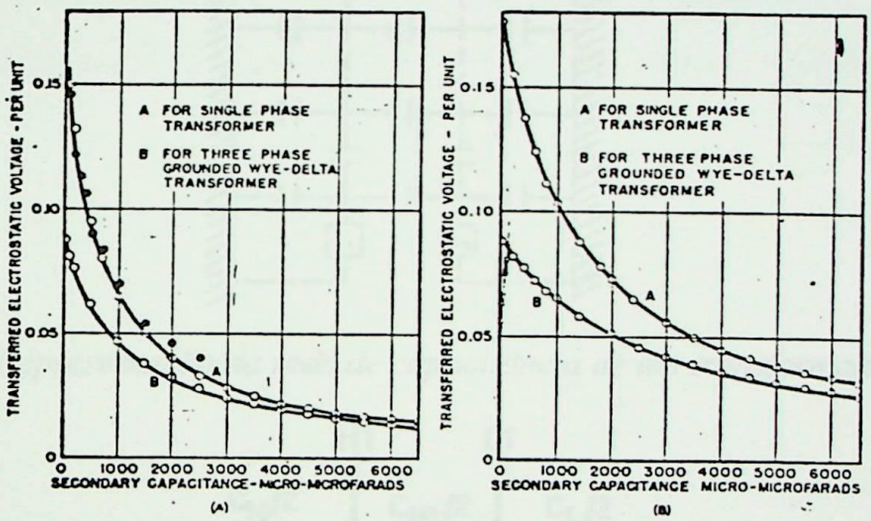


Figura I.2.1.15 - Tensão transferida eletrostaticamente em função da capacitância secundária.

A - Transformador de 145 [MVA]; B - Transformador de 100[MVA] [11]

1.2.1.3 - Comentários sobre as conexões trifásicas:

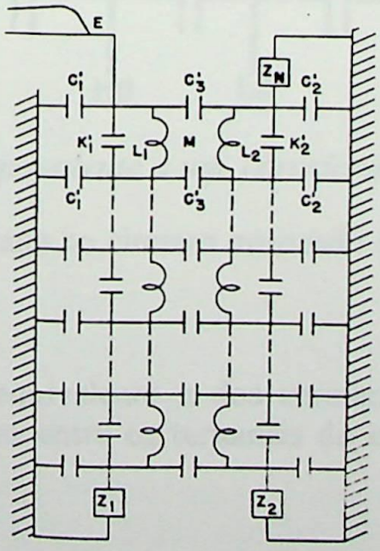


Figura I.2.1.16 - Representação da rede de um transformador monofásico

Conforme anteriormente abordado frente a surtos os enrolamentos de um transformador podem ser modelados por um circuito de indutâncias, capacitâncias conforme mostra a *Figura I.2.1.16*.

Ainda considerando que o circuito capacitivo é efetivo somente na fase subtransitória da transferência de surtos, o circuito da *Figura I.2.1.17* pode ser transformado no circuito mostrado na *Figura I.2.1.17*.

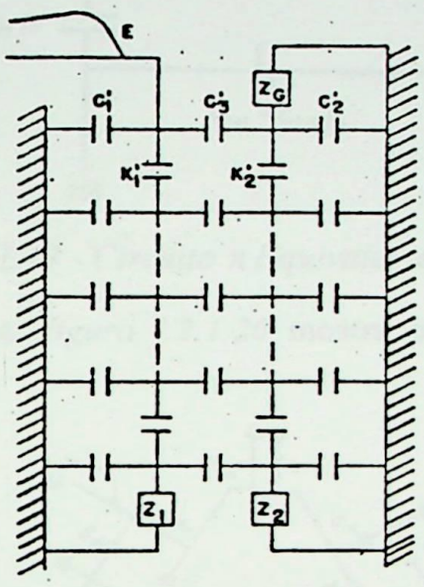


Figura I.2.1.17 - Representação da rede de capacitância de um transformador monofásico

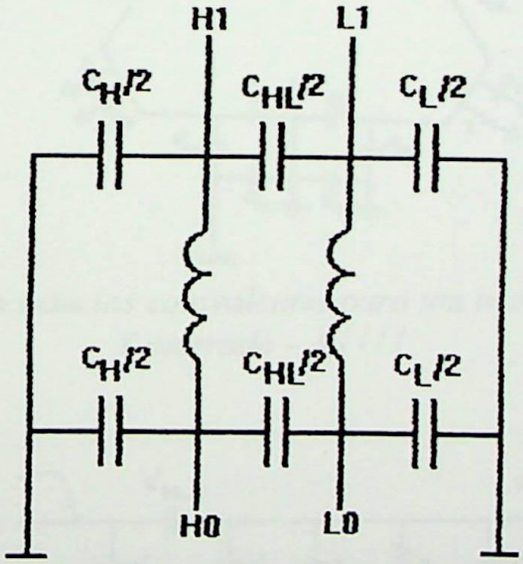


Figura I.2.1.18 - Circuito π Equivalente a um Transformador de Dois Enrolamentos

A *Figura I.2.1.18* pode ser transformada no circuito mostrado na *Figura I.2.1.19*.

Finalmente considerando o equivalente π dos enrolamentos de um transformador e a divisão das capacitâncias concentradas entre os terminais do enrolamento é possível construir o circuito mostrado na *Figura I.2.1.18*.

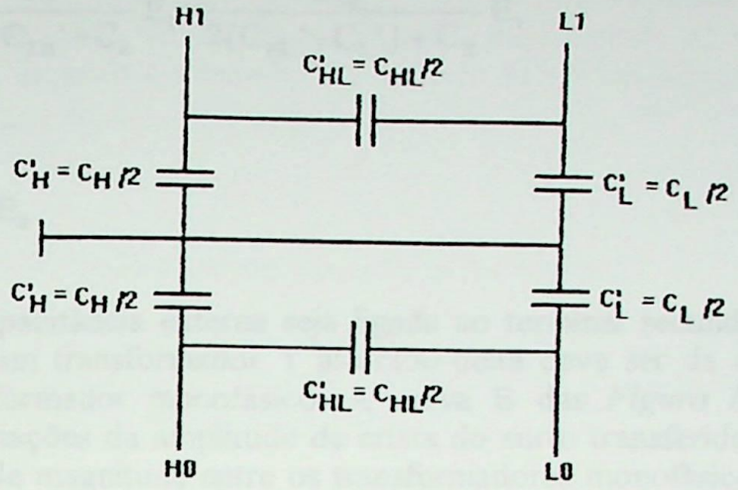


Figura I.2.1.19 - Circuito π Equivalente Modificado

Dentro deste contexto, a *Figura I.2.1.20* mostra o circuito equivalente para bancos trifásicos Y - Delta.

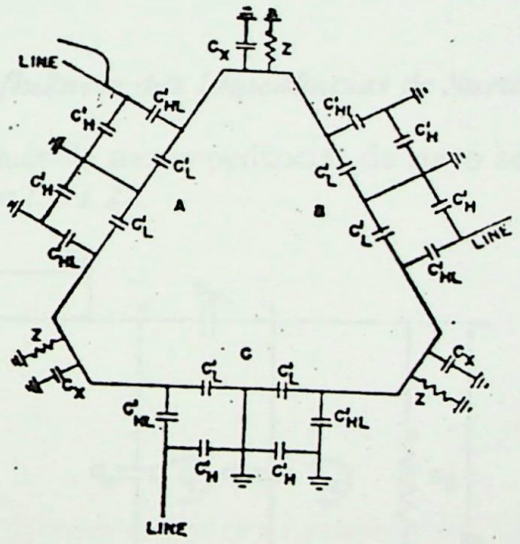


Figura I.2.1.20 - Rede de capacitâncias equivalentes para um transformador trifásico ligado em Y aterrado - Δ [11]

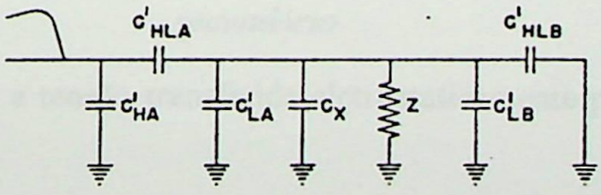


Figura I.2.1.21 - Circuito equivalente para a rede de capacitâncias para um transformador trifásico ligado em Y aterrado - Δ

O resultado de sua simplificação é mostrada na *Figura I.2.1.21.*

Considerando o equacionamento anteriormente desenvolvido é possível obter a amplitude da tensão secundária, transferida eletrostaticamente conforme a seguir:

$$E_2 = \frac{C_{HLA}'}{C_{HLA}'+C_{HLB}'+C_{LA}'+C_{LB}'+C_x} E_1 = \frac{C_{HL}'}{2(C_{HL}'+C_L')+C_X} E_1$$

ou seja:

$$E_2 = \frac{C_{HL}}{2\{(C_{HL}+C_L)+C_X\}} E_1 \qquad \text{(I.2.1.51}$$

Caso nenhuma capacitância externa seja ligada ao terminal secundário, a amplitude do surto transferido E_2, em um transformador Y aterrado-delta deve ser da ordem da metade da amplitude para um transformador monofásico. A curva B das *Figura I.2.1.15(A)* e *Figura I.2.1.15(B)* indicam as variações da amplitude de crista do surto transferido com a capacitância externa C_X . A diferença de magnitude entre os transformadores monofásicos e trifásicos vem a ser menos proeminente para a capacitância externa $C_x > 2.000[\mu\mu F]$.

Raciocínio e equacionamento semelhante pode ser elaborado para outras conexões de transformadores.

I.2.1.4 - Comentários Sobre a Influência das Impedâncias de Surto Secundárias:

De modo a analisar a influência das impedâncias de surto secundárias, seja o modelo de transformador mostrado na *Figura I.2.1.22*.

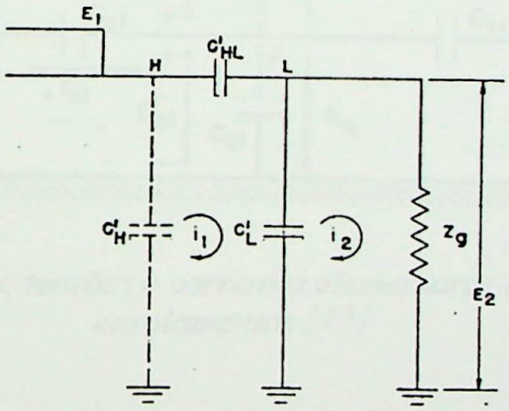


Figura I.2.1.22 - Circuito equivalente da Figura I.2.1.14 com a impedância de surto Z_g no secundário

Dentro deste contexto, a tensão transferida eletrostaticamente para o secundário é dada por:

$$E_2 = \frac{C'_{HL}}{C'_{HL}+C'_L} E_1 \varepsilon^{-\left(\frac{1}{Z_g(C'_{HL}+C'_L)}\right)} \qquad (1.2.1.52)$$

onde as capacitâncias C'_H, C'_{HL} e C'_L são respectivamente as capacitâncias equivalentes do: enrolamento primário para a terra, do enrolamento primário para o enrolamento secundário, e do enrolamento de secundário para a terra.

Conforme mostra a *equação I.2.1.52* os parâmetros relativos a amplitude da tensão transferida são funções basicamente das capacitâncias do circuito equivalente e dentro deste

contexto a amplitude da componente eletrostática E_2 não é influenciada pelo valor da impedância de surto da carga. A constante de tempo da função exponencial é, contudo, diretamente proporcional a impedância de surto secundária Z_g; e, deste modo impedâncias de surto reduzidas produzem transitórios rápidos.[11]

I.2.1.5 - Comentários sobre Transformadores de Três Enrolamentos

De maneira similar, conforme mostra o circuito da *Figura I.2.1.23* é possível equacionar o comportamento de um transformador de três enrolamentos, no entanto, este fato, dado ao caracter simplificado adotado não é objeto deste texto.[13]

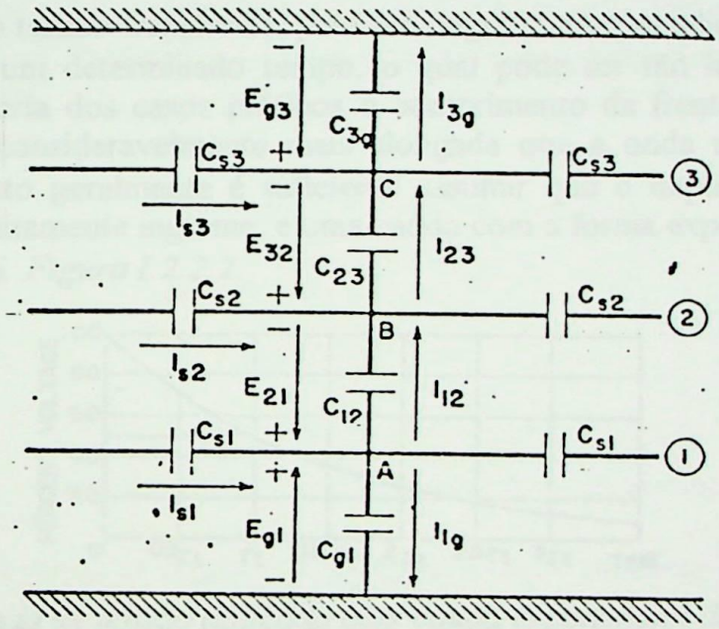


Figura I.2.1.23 - Capacitâncias, tensões e correntes elementares em um transformador de três enrolamentos [13]

I.2.2 - Componente Transferida Eletromagneticamente:

I.2.2.1 - Equacionamento via circuito equivalente no tempo:

A componente eletromagnética da tensão transferida do primário para o secundário e para o terciário é o resultado do acoplamento mútuo entre os enrolamentos.

Existe uma série de possibilidades para determinar o comportamento dos surtos transferidos eletromagneticamente. No entanto de modo a simplificar o equacionamento deste problema é conveniente utilizar o *sistema por unidade [p.u.]*.

A análise matemática desenvolvida inicialmente considera um transformador monofásico com todos os três neutros aterrados, cujos resultados serão aplicados *a posteriori* aos transformadores trifásicos.

Considerando os terminais de linha secundário e terciário estão isolados, e aplicando um impulso unitário de tensão ao primário, vem que a componente eletromagnética de tensão transferida nos terminais isolados atingirá instantaneamente um valor próximo a 1 [p.u.] (que é, igual a tensão do primário multiplicada pela relação de espiras).

Após a tensão transferida alcançar um valor máximo ela decai lentamente enquanto que a corrente no primário cresce atingindo um valor constante. A constante de tempo relativa deste processo é dada pela *equação I.2.2.1*:

$$T_M = \frac{M}{R_1} \qquad (1.2.2.1)$$

onde M é a indutância própria do enrolamento primário e R_1 é a impedância de surto da linha ou cabo ligado ao primário, ver *Figura I.2.2.1*.Esta constante de tempo é sempre muito grande da ordem de milisegundos [ms].

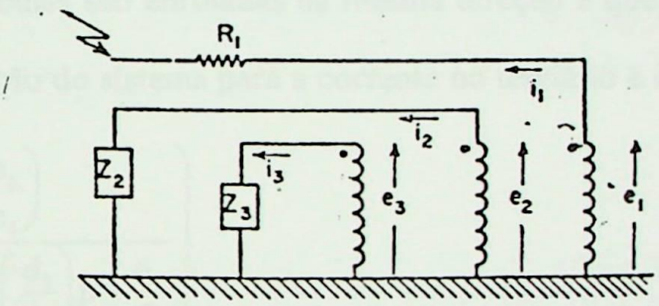


Figura I.2.2.1 - Transformador de 3 enrolamentos com cargas terminais

Visto que todas as ondas de impulso de interesse prático têm uma cauda inferior a 100 [μ s], é possível assumir que a constante de tempo T_M é infinita quando comparado com a duração do impulso aplicado. A suposição de que as auto-indutâncias mútuas de todos os enrolamentos, bem como as indutâncias entre os enrolamentos são infinitamente grandes e que, portanto, as correntes de magnetização são nulas, simplifica muito a análise matemática, e leva à um cálculo ligeiramente conservativo das tensões transferidas eletromagneticamente.

Na prática raramente os terminais de um transformador se encontram sempre isolados, pois como é mostrado na *Figura I.2.2.1*, diversos tipos de cargas podem estar ligadas a eles.

A impedância do terminal primário é a resistência R_1, devido ser sempre assumido que o primário é solicitado através da linha de transmissão que, por sua vez, possui uma impedância de surto equivalente a uma resistência de por exemplo 400 [Ω].

As impedâncias dos terminais secundário e terciário são impostas, pelos equipamentos ligados a estes enrolamentos. Uma linha de transmissão, um cabo longo (no mínimo algumas centenas de metros), sendo que o valor da impedância de surto para o cabo é inferior a 30 [Ω].

As buchas dos transformadores, os barramentos e um disjuntor aberto são representados por meio de capacitâncias. Um cabo curto (com algumas centenas de metros) pode ser inicialmente considerado equivalente a uma capacitância, mas as reflexões nos terminais remotos do cabo podem ser introduzidos em um tempo superior, correspondendo a duas vezes o comprimento do cabo dividido pela velocidade da luz, por exemplo 150 [m/μs].

Um transformador pequeno pode ser representado por uma capacitância da ordem centenas de [μμF] que representa a capacitância efetiva do transformador e a capacitância das

buchas. Com estas considerações finais, serão analisadas analitica e experimentalmente as várias combinações apresentadas na *Tabela I*, ou seja:

Caso	Primário	Secundário	Terciário
A	R_1	R_2	R_3
B	R_1	∞	R_3
C	R_1	R_2	∞

Tabela I - Impedâncias terminais estudadas para a tensão transferida eletromagneticamente

Na prática, como quase sempre ocorre, um ou ambos terminais de linha não solicitados estão conectados a uma carga, sendo que as indutâncias de dispersão entre os enrolamentos fazem uma parte importante na análise.

O crescimento da tensão transferida, para um degrau unitário aplicado ao primário, não é instantaneo, mas requer um determinado tempo, o qual pode ser tão longo quanto 200 [μs]. Deste modo, para a maioria dos casos práticos o comprimento da frente de tensão transferida eletromagnéticamente é consideravelmente mais alongada que a onda aplicada (por exemplo, igual a 1,5 [μs]). Portanto geralmente é suficiente assumir que o impulso de tensão aplicado apresenta uma frente infinitamente íngreme e uma cauda com a forma exponencial de duração τ_t; conforme representado na .*Figura I.2.2.2*.

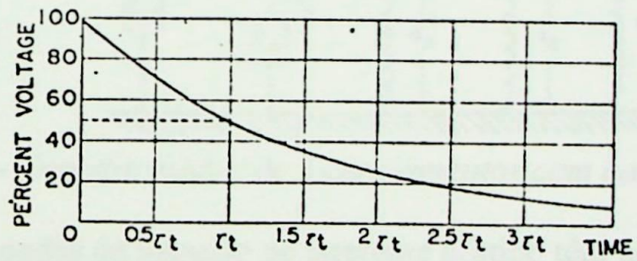


Figura I.2.2.2 - Onda de tensão aplicada com cauda exponencial de duração τ_t [12]

Portanto a expressão da onda aplicada é:

$$e_1(t) = \varepsilon^{-\alpha t} \qquad (1.2.2.2)$$

onde:

$$\alpha = \frac{0,692}{\tau_t} \qquad (1.2.2.3)$$

Neste ponto é conveniente ressaltar que a suposição de uma frente infinitamente íngreme também resulta em um cálculo ligeiramente conservativo da tensão transferida eletromagnéticamente.
Caso seja interessante introduzir o efeito da duração da frente da onda o impulso aplicado apresentará a seguinte forma:

$$e_1(t) = \varepsilon^{-\alpha t} - \varepsilon^{-\beta t} \qquad (1.2.2.4)$$

e, neste caso a solução para este impulso pode ser obtido por superposição uma vez que o impulso aplicado segundo *equação I.2.2.2* é conhecida.

Solução Rigorosa Para a Componente Transferida Eletromagneticamente:

Considerando os três laços do circuito mostrado na *Figura I.2.2.1* com $Z_2 = R_2$ e $Z_3 = R_3$. Seja M_{nn} a indutância própria do n^{ésimo} enrolamento e M_{nm} a indutância mútua entre os enrolamentos m^{ésimo} e o n^{ésimo}.

Caso um impulso unitário de tensão seja aplicado ao enrolamento primário, através da técnica das Transformadas de Laplace são obtidas as seguintes equações:

$$(pM_{11} + R_1)i_1(p) + pM_{12}i_2(p) + pM_{13}i_3(p) = \frac{1}{p} \qquad (1.2.2.5)$$

$$pM_{12}i_1(p) + (pM_{22} + R_2)i_2(p) + pM_{23}i_3(p) = 0 \qquad (1.2.2.6)$$

$$pM_{13}i_1(p) + pM_{23}i_2(p) + (pM_{33} + R_3)i_3(p) = 0 \qquad (1.2.2.7)$$

O sinal das indutâncias mútuas é determinado pela polaridade dos enrolamentos. Assumindo-se na *Figura I.2.2.1* que as três bobinas são enroladas na mesma direção e que portanto possuem uma polaridade subtrativa.

Dentro deste contexto a solução do sistema para a corrente no terciário é dada por:

$$i_3(t) = L^{-1}\left(\frac{c_1}{d_3} \frac{p + \left(\frac{c_o}{c_1}\right)}{p^3 + \left(\frac{d_2}{d_3}\right)p^2 + \left(\frac{d_1}{d_3}\right)p + \frac{d_o}{d_3}} \right) \qquad (1.2.2.8)$$

Onde:

$$c_o = R_2M_{13} \; ; \; c_1 = M_{12}M_{23} - M_{13}M_{22}$$

$$d_o = R_1R_2R_3 \; ; \; d_1 = R_1R_2M_{33} + R_1R_3M_{22} + R_2R_3M_{11} \qquad (1.2.2.9)$$

$$d_3 = M_{11}M_{22}M_{33} + 2M_{12}M_{13}M_{23} - M_{11}M_{23}^{\;2} - M_{22}M_{13}^{\;2} - M_{33}M_{12}^{\;2}$$

Caso a_1, a_2 e a_3 onde $a_1 \geq a_2 \geq a_3$ são as três raízes do polinômio de terceiro grau do denominador da *equação I.2.2.8*, ou seja:

$$p^3 + \left(\frac{d_2}{d_3}\right)p^2 + \left(\frac{d_1}{d_3}\right)p + \frac{d_o}{d_3}$$

a tensão no terminal terciário é dada por:

$$e_3(t) = R_3i_3(t) = R_3\frac{c_1}{d_3}\left(A_1\varepsilon^{-a_1t} + A_2\varepsilon^{-a_2t} + A_3\varepsilon^{-a_3t}\right) \qquad (1.2.2.10)$$

com:

$$A_1 = \frac{\left(\frac{c_o}{c_1}\right) - a_1}{(a_2 - a_1)(a_3 - a_1)}; A_2 = \frac{\left(\frac{c_o}{c_1}\right) - a_2}{(a_1 - a_2)(a_3 - a_2)}; A_3 = \frac{\left(\frac{c_o}{c_1}\right) - a_3}{(a_3 - a_1)(a_3 - a_2)} \qquad (1.2.2.11)$$

A solução para a tensão no secundário pode ser obtida trocando-se os *subscritos 2 e 3* em todas as resistências e indutâncias próprias e mútuas. Quando os valores reais das indutâncias mútuas e próprias do transformador são substituídas nestas equações, verifica-se que o expoente a_1 vem a ser pequeno quando comparado aos outros dois expoentes. Logo, para todos os propósitos práticos $\varepsilon^{-a_1 t}$ na *equação I.2.2.10* pode ser assumido como igual a unidade dentro dos limites de tempo de interesse (0 a 200 [μs])

Circuito Equivalente Para a Componente Eletromagnética:

Para um modelo simples de carga em todos os três terminais, isto é resistências, bem como, para um impulso unitário de tensão aplicado ao enrolamento primário, a solução das equações representativas do circuito de um transformador de três enrolamentos em termos de indutâncias próprias e mútuas como foi analisado anteriormente, resultam nas seguintes expressões para as tensões nos terminais secundário e terciário:

$$e(t) = A_1\varepsilon^{-a_1 t} + A_2\varepsilon^{-a_2 t} + A_3\varepsilon^{-a_3 t} \qquad (1.2.2.12)$$

Os coeficientes A_1 até A_3 e os expoentes a_1 até o a_3, os quais são as raízes da equação cúbica, dependem das indutâncias próprias e mútuas, bem como das resistências. A *equação I.2.2.12* não é prática, devido ao fato de que comumente, apenas as indutâncias de dispersão entre os enrolamentos estão disponíveis, quando dos ensaios comerciais.

Além disso, tal como préviamente discutido, ao se desprezar a corrente de magnetização serão eliminados os termos exponenciais na *equação I.2.2.12*, fato que a simplifica consideravelmente.

Solução Simplificada Para a Componente Eletromagnética:

Desprezando a corrente de magnetização do transformador, o valor da corrente do secundário em termos da corrente do primário e terciário pode ser substituído nas *equações:I.2.2.5, I.2.2.6 e I.2.2.7.* Consuderando-se agora que:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \qquad (1.2.2.13)$$

o que implica em:

$$i_2 = -(i_1 + i_3) \qquad (1.2.2.14)$$

Subtraindo agora a *equação I.2.2.6* das *equações I.2.2.5 e I.2.2.7* vem que:

$$[p(M_{11} + M_{22} - 2M_{12}) + R_1 + R_2]i_1(p) + [p(M_{22} - M_{12} + M_{13} - M_{23}) + R_2]i_3(p) = \frac{1}{p} \qquad (1.2.2.15)$$

$$[p(M_{22} - M_{12} + M_{13} - M_{23}) + R_2]i_1(p) + [p(M_{22} + M_{33} - 2M_{23}) + R_2 + R_3]i_3(p) = 0 \qquad (1.2.2.16)$$

Ambas as *equações I.2.2.15 e I.2.2.16*, em termos da forma: $(M_{mm} + M_{nn} - M_{mn})$ que representam as indutâncias séries L_{m-n} dos mésimos e nésimos enrolamentos, as quais são praticamente iguais as indutâncias de curto-circuito, também chamadas de indutância de dispersão.

Portanto adotando as seguintes definições:

$$L_{1-2} = M_{11} + M_{22} - 2M_{12};\ L_{1-3} = M_{11} + M_{33} - 2M_{13} \text{ e } L_{2-3} = M_{22} + M_{33} - 2M_{23} \qquad (1.2.2.17)$$

as *equações I.2.2.15 e I.2.2.16* podem ser reescritas como:

$$(pL_{1-2} + R_1 + R_2)i_1(p) + \left[\frac{p}{2}(L_{1-2} + L_{2-3} - L_{1-3}) + R_2\right]i_3(p) = \frac{1}{p} \qquad (I.2.2.18)$$

$$\left[\frac{p}{2}(L_{1-2} + L_{2-3} - L_{1-3}) + R_2\right]i_1(p) + p(L_{2-3} + R_2 + R_3)i_3(p) = 0 \qquad (I.2.2.19)$$

Caso as indutâncias de dispersão L_{s1} , L_{s2} , L_{s3} , sejam substituídas nas equações conforme definidas a seguir:

$$L_{s1} = \frac{1}{2}(L_{1-2} + L_{1-3} - L_{2-3}) \qquad (1.2.2.20)$$

$$L_{s2} = \frac{1}{2}(L_{1-2} - L_{1-3} + L_{2-3}) \qquad (1.2.2.21)$$

$$L_{s3} = \frac{1}{2}(-L_{1-2} + L_{1-3} + L_{2-3}) \qquad (1.2.2.22)$$

vem que:

$$\begin{aligned}&[p(L_{s1} + L_{s2}) + R_1 + R_2]i_1 - (pL_{s2} + R_2)i_3 \\ &= -\frac{1}{p} - (pL_{s2} + R_2)i_1 + [p(L_{s2} + L_{s3}) + R_2 + R_3]i_3 = 0\end{aligned} \qquad (1.2.2.23)$$

Assumindo por conveniência que a referência da direção da corrente i_3 é contrária, ao anteriormente discutido o conjunto de *equação I.2.2.23* representa o circuito da *Figura I.2.2.3*.

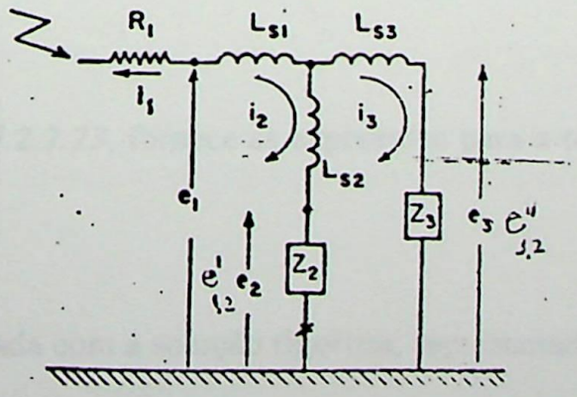


Figura I.2.2.3 - Circuito equivalente para a componente eletromagnética

Para um impulso de tensão aplicado ao primário a solução da *equação I.2.2.23* para a corrente no terciário é da forma:

$$i_3(t) = L^{-1}\left[\frac{L_{s2}}{g_2}\frac{p + f_{03}}{p\left[p^2 + \left(\frac{g_1}{g_2}\right)p + \left(\frac{g_o}{g_2}\right)\right]}\right] \qquad (1.2.2.24)$$

onde:

$$f_{03} = \frac{R_2}{L_{s2}}\ ,\ g_0 = R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3$$

$$g_1 = L_{s1}(R_2 + R_3) + L_{s2}(R_1 + R_3) + L_{s3}(R_1 + R_2)\ ,\ g_2 = L_{s1}L_{s2} + L_{s1}L_{s3} + L_{s2}L_{s3}$$

Caso b_1 e b_2 sejam as raízes da equação do segundo grau denominador da *equação I.2.2.24*, ou seja:

$$p^2 + \left(\frac{g_1}{g_2}\right)p + \left(\frac{g_o}{g_2}\right)$$

a tensão no terminal terciário para $(b_2 \geq b_1)$ é dada por:

$$e_3(t) = R_3 i_3(t) = K_3\left[B_1(1 - e^{-b_1 t}) + B_2(1 - e^{-b_2 t})\right] \qquad (1.2.2.25)$$

onde:

$$K_3 = -\frac{R_3 L_{s2}}{g_2}$$

$$B_1 = -\frac{f_{03} - b_1}{b_1(b_2 - b_1)}\ ;\ B_2 = -\frac{f_{03} - b_2}{b_2(b_2 - b_1)}$$

A tensão no secundário $e_2(t)$ tem a mesma expressão da tensão $e_3(t)$ (*equação I.2.2.25*), exceto para K_2 no lugar de K_3 e f_{02} no lugar de f_{03} , sendo que:

$$K_2 = -\frac{R_2 L_{s2}}{g_2}\ ;\ f_{02} = \frac{R_3}{L_{s3}} \qquad (1.2.2.26)$$

A solução da *equação I.2.2.23*, fornece as expressões para a tensão transferida na forma aproximada, ou seja:

$$e(t) = B_1\varepsilon^{-b_1 t} + B_2\varepsilon^{-b_2 t} + B_3 \qquad (1.2.2.27)$$

Comparando a solução aproximada com a solução rigorosa, representada abaixo, ou seja:

$$e(t) = A_1\varepsilon^{-a_1 t} + A_2\varepsilon^{-a_2 t} + A_3\varepsilon^{-a_3 t} \qquad (1.2.2.28)$$

para $t = \infty$ a tensão será igual a B_3 na expressão simplificada em vez de zero.

A diferença entre as duas soluções é evidente apenas para valores de tempo muito elevados, como por exemplo, 1000 [μs], após os quais o transitório para uma onda de impulso real com cauda de comprimento finito já está terminado.

A grande vantagem da *equação I.2.2.27* é que as expressões dos coeficientes B_1 ,B_2 e B_3 são mais simples que os coeficientes correspondentes da solução rigorosa, e que os expoentes b_1 e b_2 são obtidos de raízes de uma equação quadrática melhor que de uma equação cúbica.

Sempre que um dos terminais não solicitado é isolado, a tensão no terminal de carga dada pela *equação I.2.2.27* reduz-se a uma equação para os transformadores de dois enrolamentos.

Discussão das Tensões Transferidas Eletromagneticamente:

Assumindo a princípio que $Z_3 = \infty$ na *Figura I.2.2.1* .Do circuito equivalente da *Figura I.2.2.3* vem que:

$$i_2(t) = \frac{1}{R_1 + R_2}\left(1 - \varepsilon^{-\frac{R_1+R_2}{L_{1-2}}t}\right) \qquad (1.2.2.29)$$

$$e_2(t) = R_2 i_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}\left(1 - \varepsilon^{-\frac{R_1+R_2}{L_{1-2}}t}\right) \qquad (1.2.2.30)$$

Assim a tensão no terminal secundário aumenta gradualmente de zero em $t = 0$ até um valor máximo:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \qquad (1.2.2.31)$$

com uma constante de tempo que depende sobretudo da carga conectada ao secundário e pode variar na prática entre 1 ou 2 [μS] a mais que 200[μs].

A tensão no terminal terciário isolado é obtida diretamente do circuito equivalente da *Figura I.2.2.3*.

$$e_3(t) = R_2 i_2(t) + L_{s2}\frac{di_2(t)}{dt} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \left(\frac{L_{s2}}{L_{1-2}} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)\varepsilon^{-\frac{R_1+R_2}{L_{1-2}}t} \qquad (1.2.2.32)$$

A tensão no terminal terciário consiste de um termo constante e de um termo exponencial decrescente. Em $t = 0_+$, a tensão no terciário não é zero, porém é igual a:

$$e_3(t = 0_+) = \frac{L_{s2}}{L_{1-2}} = \frac{L_{s2}}{L_{s1} + L_{s2}} \qquad (1.2.2.33)$$

É conhecido que em um transformador de três enrolamentos um dos ramos de impedância L_s pode ser, e muitas vezes é, negativa, enquanto todas as impedâncias de curto-

circuito entre um enrolamento e outro, e entre um enrolamento e outros dois enrolamentos em paralelo são positivas.

Deste modo na discussão da *equação I.2.2.33*, quatro casos devem portanto ser verificados:

I - $L_{s2} < 0$ e $L_{s1} > |L_{s2}| > 0$

A tensão no terciário está inicialmente negativa, e pode ser em valor absoluto maior que 1 [p.u.]. Neste caso ela decresce gradualmente em valor absoluto, troca o sinal, e então aumenta para o seu valor final dado pela *equação I.2.2.31*, que é o mesmo em [p.u.] da tensão do secundário. A constante de tempo do terciário é a mesma do secundário.

II - $L_{s1} < 0$ e $L_{s2} > |L_{s1}| > 0$

A tensão no terciário está inicialmente positiva e menor que 1 [p.u.] e decresce gradualmente para o seu valor final, o mesmo do caso anterior.

III - $L_{s1} > 0$ e $L_{s2} > 0$

A tensão no terciário está inicialmente positiva e menor que 1 [p.u.], aumenta gradualmente para o seu valor final, o mesmo como dos casos anteriores.

IV - $\frac{L_{s2}}{L_{1-2}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

Neste caso a tensão no terciário está inicialmente igual ao seu valor final, e não se tem transitório.

Sempre que o terminal secundário está isolado ($Z_2 = \infty$) e o terminal terciário aterrado através de uma resistência, a solução é ainda dada pelas *equações: I.2.2.29, I.2.2.30 e I.2.2.32*, sendo o *subscrito 3* é substituído pelo *subscrito 2*; resultando nos quatro casos citados logo acima.

Quando ambos os enrolamentos secundário e terciário são ligados à resistências de carga, os fenômenos são semelhantes aos descritos anteriormente, se uma das resistências é maior que a outra. Em todos os casos as tensões no secundário e no terciário são ambas inicialmente zero e alcançam valores finais consistindo da soma algébrica de dois termos exponenciais com expoentes diferentes.

Tensões Eletromagnéticas Para Diversas Condições Terminais:

A transformada de Laplace das equações dos dois laços do circuito equivalente da *Figura I.2.2.3* é:

$$\begin{aligned} &[p(L_{s1} + L_{s2}) + R_1 + Z_2(p)]i_1(p) - [pL_{s2} + Z_2(p)]i_3(p) = e(p) \\ &-[pL_{s2} + Z_2(p)]i_1(p) + [p(L_{s2} + L_{s3}) + Z_2(p) + Z_3(p)]i_3(p) = 0 \end{aligned} \qquad (1.2.2.34)$$

onde a transformada da tensão aplicada para um degrau é

$$e(p) = \frac{1}{p}$$

e,

$$e(p) = \frac{1}{p+\alpha}$$

para uma tensão unitária com cauda exponencial.

Para as transformadas das impedâncias terminais $Z(p)$ são:

$Z(p) = R$, para um resistor R

$Z(p) = \frac{1}{C_p}$, para um capacitor C

$Z(p) = \frac{R}{(1+CRp)}$, para um resistor R em paralelo com com um capacitor

Considerando inicialmente um degrau aplicado ao primário, as transformadas das correntes no secundário e no terciário apresentam sempre a forma:

$$i(p) = K\frac{f_m}{g_n}\frac{p^m + \left(\frac{f_{m-1}}{f_m}\right)p^{m-1} + \ldots + \left(\frac{f_1}{f_m}\right)p + \left(\frac{f_0}{f_m}\right)}{p^n + \left(\frac{g_{n-1}}{g_n}\right)p^{n-1} + \ldots + \left(\frac{g_1}{g_n}\right)p + \left(\frac{g_0}{g_n}\right)}\frac{1}{p} \qquad (1.2.2.35)$$

Nesta equação o *grau n* da expressão entre parênteses no denominador do lado direito variará entre 1 (terminal isolado não solicitado e o outro aterrado através de um resistor) e quatro (ambos terminais não solicitados aterrados através de capacitores). É necessário em alguns casos encontrar as raízes reais e complexas b_1 a b_n das equações algébricas de terceiro e quarto graus,.o que pode ser feito por métodos numéricos que não serão discutidos aqui.

Expressando a *equação I.2.2.35* em frações parciais vem:

$$i(p) = K\left(\frac{B_1}{p+b_1} + \frac{B_2}{p+b_2} + \ldots + \frac{B_n}{p+b_n} + \frac{B_0}{p}\right) \qquad (1.2.2.36)$$

A transformada inversa da *equação I.2.2.36* fornece a expressão das correntes do secundário e do terciário:

$$i(t) = K(B_1\varepsilon^{-b_1 t} + B_2\varepsilon^{-b_2 t} + \ldots + B_n\varepsilon^{-b_n t} + B_0) \qquad (1.2.2.37)$$

Desde que a corrente em $t = 0$ deverá ser sempre igual a zero, vem que:

$$B_0 = -\sum_1^n B_k \qquad (1.2.2.38)$$

Assim a *equação I.2.2.37* pode ser reescrita como:

$$i(t) = -K\sum_{1}^{n} B_k\left(1-\varepsilon^{-b_k t}\right) \qquad (1.2.2.39)$$

Condição	Denominador			Numerador para a Tensão no Secundário $e_2(p)$			Numerador para a Tensão no Terciário $e_3(p)$		
	g_2	g_1	g_0	f_1	f_0	K	f_1	f_0	K
A	$L_{s1}L_{s2}+L_{s1}L_{s3}+L_{s2}L_{s3}$	$L_{s1}(R_2+R_3)+L_{s2}(R_1+R_3)+L_{s3}(R_1+R_2)$	$R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3$	L_{s2}	R_3	R_2	L_{s2}	R_2	R_3
B	-	$L_{s1}+L_{s3}$	R_1+R_3	L_{s3}	R_3	1	-	1	R_3
C	-	$L_{s1}+L_{s2}$	R_1+R_3	-	1	R_2	L_{s2}	R	1

Tabela II - Coeficientes da Equação I.2.2.35 para as condições de contorno da Tabela I

A *Tabela II* fornece para as condições de contorno descritas na *Tabela I* os valores dos coeficientes f_0 a f_m e g_0 a g_n na *equação I.2.2.35*. Desta maneira as tensões no secundário e no terciário podem ser calculadas para cada caso sem muito trabalho.

Considerando agora uma tensão aplicada no primário com uma cauda exponencial, as transformadas da tensão dos terminais não solicitados apresentam uma expressão idêntica a da *equação I.2.2.35* exceto que no denominador do lado direito o último valor p é substituído por $(p+\alpha)$. Portanto na *equação I.2.2.37* em vez do termo constante B_0 haverá outro termo decaindo, com o expoente α, e a expressão da tensão é:

$$e(t) = K(B'_1\varepsilon^{-b_1 t} + B'_2\varepsilon^{-b_2 t} + \ldots + B'_n\varepsilon^{-b_n t} + B'_0\varepsilon^{-\alpha t}) \qquad (1.2.2.40)$$

As constantes B'_0 a B'_n são obtidas diretamente das constantes B_0 a B_n , desde então:

$$B'_k = \frac{b_k}{b_k-\alpha}; B'_0 = \sum_{1}^{n} B'_k \qquad (1.2.2.41)$$

Para um impulso aplicado com uma cauda exponencial, dado pela *equação*:

$$e_1(t) = \varepsilon^{-\alpha t}$$

a tensão no terminal terciário caso $Z_2 = R_2$ e $Z_3 = R_3$ tem a seguinte forma:

$$e_3(t) = K_3(B'_1\varepsilon^{-b_1 t} + B'_2\varepsilon^{-b_2 t} + B'_0\varepsilon^{-\alpha t}) \qquad (1.2.2.42)$$

com:

$$B'_1 = \frac{(f_{03}-b_1)}{(b_1-b_2)(\alpha-b_1)}; B'_2 = \frac{(f_{03}-b_2)}{(b_1-b_2)(\alpha-b_2)}; B'_0 = -(B'_1+B'_2) \qquad (1.2.2.43)$$

A tensão no secundário $e_2(t)$ é novamente obtida das *equações I.2.2.42 e I.2.2.43* pela substituição de K_2 no lugar de K_3 e de f_{02} no lugar de f_{03}.

Caso $R_3 = \infty$, a tensão no secundário para um impulso aplicado de cauda exponencial é dada por:

$$e_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2 - \alpha L_{1-2}} \left(\varepsilon^{-\alpha t} - \varepsilon^{-\left(\frac{R_1+R_2}{L_{1-2}}\right)t} \right) \qquad (1.2.2.44)$$

Para a tensão no terciário vem:

$$e_3(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2 - \alpha L_{1-2}} \left((R_2 - \alpha L_{s2})\varepsilon^{-\alpha t} - \left(R_2 - \frac{L_{s2}(R_1 + R_2)}{L_{1-2}} \right) \varepsilon^{-\left(\frac{R_1+R_2}{L_{1-2}}\right)t} \right) \qquad (1.2.2.45)$$

Já o instante aonde ocorre a tensão máxima no secundário é dado por:

$$t_{2m} = \frac{1}{\frac{R_1 + R_2}{L_{1-2}} - \alpha} \ln\left(\frac{R_1 + R_2}{\alpha L_{1-2}} \right) \qquad (1.2.2.46)$$

O instante aonde ocorre a tensão máxima no terciário é dado por:

$$t_{3m} = \frac{1}{\frac{R_1 + R_2}{L_{1-2}} - \alpha} \ln\left(\frac{(R_1 + R_2)R_2 L_{1-2} - L_{s2}(R_1 + R_2)}{{L_{1-2}}^2 \alpha (R_3 - \alpha L_{s2})} \right) \qquad (1.2.2.47)$$

Caso $R_2 = \infty$, as *equações I.2.2.44* através da *equação I.2.2.47* podem ser usadas para a determinação da tensão no terciário trocando-se os *subscritos 2 e 3*.
Em $t = 0_+$ a tensão no terminal isolado é diferente de zero e é dada pela expressão:

$$e_3(0) = L_{s2} \frac{\left(\frac{R_1 + R_2}{L_{1-2}} - \alpha \right)}{R_1 + R_2 + \alpha L_{1-2}} = \frac{L_{s2}}{L_{1-2}} = \frac{L_{s2}}{L_{s1} + L_{s2}} \qquad (1.2.2.48)$$

tal como quando um impulso de tensão é aplicado no primário.

Autotransformadores com Enrolamento Terciário:

A componente eletromagnética para um autotransformador com enrolamento terciário é mostrada esquematicamente na *Figura I.2.2.4*. Ambos os neutros são aterrados, Z_1 é a carga ligada no terminal de A.T., Z_2 é a carga ligada ao terminal M, e Z_3 é a carga do terminal terciário.

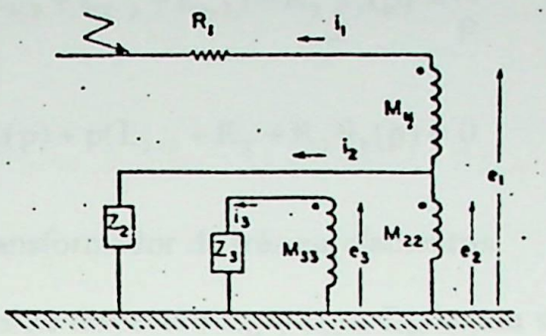


Figura I.2.2.4 - Autotransformador com enrolamento terciário com cargas terminais

A transformada de Laplace das equações dos três laços do circuito da *Figura I.2.2.4*, com as resistências de carga R_1 , R_2 , e R_3 são dadas por:

$$[p(M_{11}+2M_{12}+M_{22})+R_1]i_1(p)+p(M_{12}+M_{22})i_2(p)+p(M_{13}+M_{23})i_3(p)=\frac{1}{p} \qquad (1.2.2.49)$$

$$p(M_{12}+M_{22})i_1(p)+(pM_{22}+R_2)i_2(p)+pM_{23}i_3(p)=0 \qquad (1.2.2.50)$$

$$p(M_{13}+M_{23})i_1(p)+pM_{23}i_2(p)+(pM_{33}+R_3)i_3(p)=0 \qquad (1.2.2.51)$$

Assumindo como anteriormente que a corrente de magnetização é zero, vem que:

$$i_1+i_2+i_3=0 \qquad (1.2.2.52)$$

o que permite obter:

$$i_2=-(i_1+i_3) \qquad (I.2.2.53)$$

bem como,

$$M'_{13}=M_{13}+M_{23};\ M'_{11}=M_{11}+2M_{12}+M_{22};\ M'_{12}=M_{12}+M_{22} \qquad (1.2.2.54)$$

vem que:

$$[p(M'_{11}+M_{22}-2M'_{12})+R_1+R_2]i_1(p)+[p(M_{22}-M'_{12}+M'_{13}-M_{23})+R_2]i_3(p)=\frac{1}{p} \qquad (1.2.2.55)$$

$$[p(M_{22}-M'_{12}+M'_{13}-M_{23})+R_2]i_1(p)+[p(M_{22}+M_{33}-2M_{23})+R_2+R_3]i_3(p)=0 \qquad (1.2.2.56)$$

Aqui novamente as indutâncias L_{m-n} , medidas entre os vários pares de terminais, que são praticamente iguais as indutâncias de curto-circuito, podem ser substituída, fato que permite obter:

$$M'_{11}+M_{22}-2M'_{12}=L'_{1-2} \qquad (1.2.2.57)$$

$$M'_{11}+M_{33}-2M'_{13}=L'_{1-3} \qquad (1.2.2.58)$$

$$M_{22}+M_{33}-2M_{23}=L_{2-3} \qquad (1.2.2.59)$$

Assim as *equações I.2.2.55 e I.2.2.56* tornam-se idênticas às *equações*:

$$(pL_{1-2} + R_1 + R_2)i_1(p) + \left[\frac{p}{2}(L_{1-2} + L_{2-3} - L_{1-3}) + R_2\right] i_3(p) = \frac{1}{p}$$

$$\left[\frac{p}{2}(L_{1-2} + L_{2-3} - L_{1-3}) + R_2\right] i_1(p) + p(L_{2-3} + R_2 + R_3)i_3(p) = 0$$

que são as equações para o transformador de três enrolamentos.

Caso os ramos das indutâncias de dispersão L_{s1} , L_{s2} , L_{s3} sejam substituídos pelas indutâncias de curto-circuito L_{1-2}' , L_{1-3}' , L_{2-3}', então o circuito equivalente da *Figura I.2.2.3* pode ser usado igualmente para transformadores e autotransformadores com enrolamentos terciário.

1.2.2.2 - Equacionamento via Componentes Simétricas:

É possível através do Método das Componentes Simétricas, obter os resultados das tensões transferidas eletromagneticamente nos transformadores trifásicos e autotransformadores com uma, duas ou três fases solicitadas simultaneamente. No presente caso as fases sãs do enrolamento solicitado são consideradas aterradas. Esta condição é razoavelmente real pois a impedância de surto da linha ou do cabo, ligado ao enrolamento solicitado, expressa em por unidade, é usualmente desprezável quando comparada com a impedância de carga ligada aos enrolamentos não solicitados.

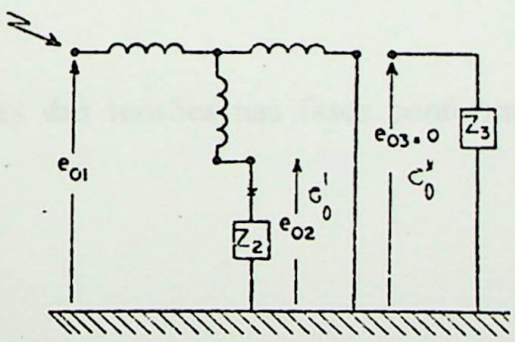


Figura 1.2.2.5 - Diagrama de Sequência Zero de um Transformador de Três Enrolamentos Ligado em Estrela-Aterrado, Estrela- Aterrado, Delta

O método consiste em três passos:

1 - Determinar o impulso de tensão aplicada nas sequências positiva, negativa e zero das componentes simétricas;

2 - Calcular separadamente as tensões eletromagneticamente transferidas para cada sequência do circuito de sequência equivalente;

3 - Calcular as tensões transferidas em cada fase adicionando-se a sequência de tensão transferida de maneira apropriada.

Para ilustração do método, considere inicialmente um transformador de três enrolamentos onde, o primário é ligado em Estrela - Aterrado, o secundário é ligado em Estrela - Aterrado e o terciário ligado em Delta.

Sejam os circuitos equivalentes de sequência para um Transformador Estrela - Aterrado, Estrela - Aterrado, Delta, conforme mostrado na *Figura 1.2.2.5*:

Estando somente a fase a, solicitada por um impulso de tensão é possível escrever que:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.60)$$

Onde:

U = Tensão de surto aplicada.

Através da Equação de Análise mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes Simétricas associadas com as tensões que solicitam o transformador, ou seja, na forma de Componentes de Fase:

$$[U_{0,+,-}] = \frac{1}{3}[A]^{-1}[U_{a,b,c}] \qquad (1.2.2.61)$$

onde:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

Substituindo os valores das tensões nas fases conforme *equação 1.2.2.60* na *equação 1.2.2.61*, vem:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_+ \\ U_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.62)$$

Portanto as componentes de sequência associadas ao degrau de tensão aplicada a fase a do transformador são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_+ \\ U_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U \qquad (1.2.2.63)$$

Com o auxílio da Equação de Síntese mostrada a seguir obtêm-se as Componentes de Fase a partir das Componentes Simétricas:

$$[U_{a,b,c}] = [A][U_{0,+,-}] \qquad (1.2.2.64)$$

Deste modo, supondo $U^s_{+/-}$ e $U^t_{+/-}$ as tensões de sequência positiva e negativa, transferidas para o secundário e terciário respectivamente, e U^s_0 e U^t_0 as correspondentes tensões de sequência zero, bem como, considerando que: $U^s_+ = U^s_-$ e substituindo as tensões transferidas para o enrolamento secundário; vem que as tensões resultantes nas fases deste são iguais a:

$$\begin{bmatrix} U^s_a \\ U^s_b \\ U^s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^s_0 \\ U^s_+ \\ U^s_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.65)$$

Considerando um degrau unitário de tensão aplicado à fase a, e os circuitos em por unidade conforme mostrado na *Figura 1.2.2.5 - (a - b)* para as sequências positiva e negativa e sequência zero respectivamente, é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o secundário do transformador são dadas por:

$$\begin{aligned} U^s_a &= 2U^s_+ + U^s_0 \\ U^s_b &= -U^s_+ + U^s_0 \\ U^s_c &= -U^s_+ + U^s_0 \end{aligned} \qquad (1.2.2.66)$$

Onde: agora, $U^s_+ = U^s_-$ e U^s_0, são calculados considerando um impulso unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Para calcular as tensões no terciário, é necessário computar o efeito das conexões Estrela e Delta entre os enrolamentos. Deste modo vem:

$+\frac{\pi}{6}$ radianos $= e^{j30}$ para a sequência positiva

e: (1.2.2.67)

$-\frac{\pi}{6}$ radianos $= e^{-j30}$ para a sequência negativa

Logo a Equação de Síntese em termos das tensões transferidas para o terciário é dada por:

$$\begin{bmatrix} U^t_a \\ U^t_b \\ U^t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^t_0 \\ e^{j30}U^t_+ \\ e^{-j30}U^t_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.68)$$

Novamente, considerando um degrau unitário de tensão, bem como, os circuitos em por unidade, conforme mostrado na *Figura 1.2.2.1 - (a - b)* para as sequências positiva e negativa e sequência zero respectivamente, é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o terciário do transformador, considerando que: $U^t_+ = U^t_-$ e $U^t_0 = 0$, são dadas por:

$$\begin{aligned} U^t_a &= \sqrt{3}U^t_+ \\ U^t_b &= 0 \\ U^t_c &= -\sqrt{3}U^t_+ \end{aligned} \qquad (1.2.2.69)$$

Onde: novamente $U^t_+ = U^t_-$, são calculados considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Transformador Estrela Aterrado - Estrela Aterrado - Estrela Aterrado:

Estando somente a fase a, solicitada por um degrau, as tensões aplicadas nas fases são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.70)$$

Onde:

U = Tensão de surto aplicada.

Utilizando a Equação de Análise mostrada, obtêm-se as Componentes Simétricas associadas com as tensões que solicitam o transformador na forma de Componentes de Fase, ou seja:

$$[U_{0,+,-}] = \frac{1}{3}[A]^{-1}[U_{a,b,c}] \qquad (1.2.2.71)$$

Substituindo os valores das tensões nas fases conforme *equação 1.2.2.70* na *equação 1.2.2.71*, vem:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_+ \\ U_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.72)$$

Portanto as componentes de sequência associadas ao degrau de tensão aplicado a fase a do transformador são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_+ \\ U_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U \qquad (1.2.2.73)$$

Novamente, com o auxílio da Equação de Síntese obtêm-se as Componentes de Fase a partir das Componentes Simétricas, deste modo, supondo $U^s_{+/-}$ e $U^t_{+/-}$ as tensões de sequência positiva e negativa transferidas para o secundário e terciário respectivamente, U^s_0 e U^t_0 as correspondentes tensões de sequência zero, bem como, considerando que: $U^s_+ = U^s_- = U^s_0$ e substituindo as tensões transferidas para o enrolamento secundário; vem que as tensões resultantes nas fases deste são iguais a:

$$[U_{a,b,c}] = [A][U_{0,+,-}] \qquad (1.2.2.74)$$

$$\begin{bmatrix} U^s_a \\ U^s_b \\ U^s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^s_0 \\ U^s_+ \\ U^s_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.75)$$

Considerando um degrau unitário de tensão aplicado a fase a e os circuitos em por unidade, é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o secundário do transformador são dadas por:

$$U^s_a = U^s_+$$

$$U^s_b = 0 \qquad (1.2.2.76)$$

$$U^s_c = 0$$

Onde: U^s_+, é calculado considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Utilizando a Equação de Síntese e considerando que: $U^t_+ = U^t_- = U^t_0$, vem que as tensões nas fases do terciário são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U^t_a \\ U^t_b \\ U^t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^t_0 \\ U^t_+ \\ U^t_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.77)$$

ou seja:

Considerando um degrau unitário de tensão aplicado a fase a e os circuitos de sequência, em por unidade é possível escrever que:

$$U^t_a = U^t_+$$

$$U^t_b = 0 \qquad (1.2.2.78)$$

$$U^t_c = 0$$

Onde: U^t_+, é calculado considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Transformador Estrela Aterrado - Estrela Isolado - Estrela Isolado:

Estando somente a fase a, solicitada por um degrau, as tensões aplicadas nas fases são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.79)$$

Onde:

U = Tensão de surto aplicada.

Através da Equação de Análise mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes Simétricas associadas com as tensões que solicitam o transformador, ou seja na forma de Componentes de Fase:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_+ \\ U_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U \qquad (1.2.2.80)$$

Utilizando a Equação de Síntese obtêm-se as Componentes de Fase a partir das Componentes Simétricas, deste modo, supondo $U^s_{+/-}$ e $U^t_{+/-}$ as tensões de sequência positiva e negativa transferidas para o secundário e terciário respectivamente, U^s_0 e U^t_0 as correspondentes tensões de sequência zero, bem como, considerando que: $U^s_+ = U^s_-$, $U^s_0 = 0$ e substituindo as tensões transferidas para o enrolamento secundário; vem que as tensões resultantes nas fases deste são iguais a:

$$\begin{bmatrix} U^s_a \\ U^s_b \\ U^s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ U^s_+ \\ U^s_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.81)$$

Considerando um degrau unitário de tensão aplicado a fase a, e os circuitos em por unidade, é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o secundário do transformador são dadas por:

$$\begin{aligned} U^s_a &= 2U^s_+ \\ U^s_b &= -U^s_+ \\ U^s_c &= -U^s_+ \end{aligned} \qquad (1.2.2.82)$$

Onde: $U^s_+ = U^s_-$, é calculado considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Através da Equação de Síntese e considerando que: $U^t_+ = U^t_-$ e $U^t_0 = 0$, vem que as tensões nas fases do terciário são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U^t_a \\ U^t_b \\ U^t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^t_0 \\ U^t_+ \\ U^t_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.83)$$

Considerando um degrau unitário de tensão aplicado a fase a, e os circuitos em por unidade, é possível escrever que:

$$\begin{aligned} U^t_a &= 2U^t_+ \\ U^t_b &= -U^t_+ \end{aligned} \qquad (1.2.2.84)$$

$U^t_c = -U^t_+$

Onde: $U^t_+ = U^t_-$, são calculados considerando um degrau unitário aplicado a fase a e os circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Transformador Estrela Aterrado - Delta - Delta:

Estando somente a fase a, solicitada por um degrau, as tensões aplicadas nas fases são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.85)$$

Onde:

U = Tensão de surto aplicada.

Através da Equação de Análise mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes Simétricas associadas com as tensões que solicitam o transformador, ou seja na forma de Componentes de Fase:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_+ \\ U_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U \qquad (1.2.2.86)$$

Com o auxílio da Equação de Síntese mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes de Fase a partir das Componentes Simétricas:

$$\left[U_{a,b,c}\right] = \left[A\right]\left[U_{0,+,-}\right] \qquad (1.2.2.87)$$

Para calcular as tensões no secundário, é necessário computar o efeito das conexões Estrela e Delta entre os enrolamentos. Deste modo vem:

$+\frac{\pi}{6}$ radianos $= e^{j30}$ para a sequência positiva

e: (1.2.2.88)

$-\frac{\pi}{6}$ radianos $= e^{-j30}$ para a sequência negativa

Deste modo, supondo $U^s_{+/-}$ e $U^t_{+/-}$ as tensões de sequência positiva e negativa transferidas para o secundário e terciário respectivamente, U^s_0 e U^t_0 as correspondentes tensões de sequência zero, bem como, considerando que: $U^s_+ = U^s_-$ e $U^s_0 = 0$ e substituindo as tensões transferidas para o enrolamento secundário; vem que as tensões resultantes nas fases deste são iguais a:

$$\begin{bmatrix} U^s_a \\ U^s_b \\ U^s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^s_0 \\ e^{j30} U^s_+ \\ e^{-j30} U^s_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.89)$$

Novamente, considerando um degrau unitário de tensão, bem como os circuitos em por unidade, para as sequências positiva e negativa e sequência zero respectivamente, é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o secundário do transformador, considerando que: $U^s_+ = U^s_-$ e $U^s_0 = 0$, são dadas por:

$$U^s_a = \sqrt{3} U^s_+$$

$$U^s_b = 0 \qquad (1.2.2.90)$$

$$U^s_c = -\sqrt{3} U^s_+$$

Onde: $U^s_+ = U^s_-$, são calculados considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Para calcular as tensões no terciário, é necessário computar o efeito das conexões Estrela e Delta entre os enrolamentos. Deste modo vem:

$+\frac{\pi}{6}$ radianos $= e^{j30}$ para a sequência positiva

e: (1.2.2.91)

$-\frac{\pi}{6}$ radianos $= e^{-j30}$ para a sequência negativa

Logo a Equação de Síntese em termos das tensões transferidas para o terciário é dada por:

$$\begin{bmatrix} U^t_a \\ U^t_b \\ U^t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^t_0 \\ e^{j30} U^t_+ \\ e^{-j30} U^t_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.92)$$

Novamente, considerando um degrau unitário de tensão, bem como os circuitos em por unidade, para as sequências positiva, negativa e zero respectivamente é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o terciário do transformador, considerando que: $U^t_+ = U^t_-$ e $U^t_0 = 0$, são dadas por:

$$U^t_a = \sqrt{3} U^t_+$$

$$U^t_b = 0 \qquad (1.2.2.93)$$

$$U^t_c = -\sqrt{3} U^t_+$$

Onde: $U^t_+ = U^t_-$, são calculados considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Transformador Estrela Aterrado - Estrela Isolado - Delta:

Estando somente a fase a, solicitada por um degrau, as tensões aplicadas nas fases são dadas

por:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.94)$$

Onde:

U = Tensão de surto aplicada.

Através da Equação de Análise mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes Simétricas associadas com as tensões que solicitam o transformador, ou seja na forma de Componentes de Fase:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_+ \\ U_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U \qquad (1.2.2.95)$$

Com o auxílio da Equação de Síntese mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes de Fase a partir das Componentes Simétricas, ou seja:

$$[U_{0,+,-}] = \frac{1}{3}[A]^{-1}[U_{a,b,c}] \qquad (1.2.2.96)$$

Deste modo, supondo $U^s_{+/-}$ e $U^t_{+/-}$ as tensões de sequência positiva e negativa transferidas para o secundário e terciário respectivamente, U^s_0 e U^t_0 as correspondentes tensões de sequência zero, bem como, considerando que: $U^s_+ = U^s_-$, $U^s_0 = 0$ e substituindo as tensões transferidas para o enrolamento secundário; vem que as tensões resultantes nas fases deste são iguais a:

$$\begin{bmatrix} U^s_a \\ U^s_b \\ U^s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ U^s_+ \\ U^s_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.97)$$

Considerando um degrau unitário de tensão aplicado a fase a, e os circuitos em por unidade, é possível escrever que:

$$U^s_a = 2U^s_+$$

$$U^s_b = -U^s_+ \qquad (1.2.2.98)$$

$$U^s_c = -U^s_+$$

Onde: $U^s_+ = U^s_-$, são calculados considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Para calcular as tensões no terciário, é necessário computar o efeito das conexões Estrela e Delta entre os enrolamentos. Deste modo vem:

$+\frac{\pi}{6}$ radianos = e^{j30} para a sequência positiva

e: (1.2.2.99)

$-\frac{\pi}{6}$ radianos = e^{-j30} para a sequência negativa

Logo a Equação de Síntese em termos das tensões transferidas para o terciário é dada por:

$$\begin{bmatrix} U^t_a \\ U^t_b \\ U^t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^t_0 \\ e^{j30}U^t_+ \\ e^{-j30}U^t_- \end{bmatrix} \quad (1.2.2.100)$$

Considerando um degrau unitário de tensão, bem como os circuitos em por unidade, para as sequências positiva, negativa e zero respectivamente é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o terciário do transformador, considerando que: $U^t_+ = U^t_-$ e $U^t_0 = 0$, são dadas por:

$$U^t_a = \sqrt{3}U^t_+$$

$$U^t_b = 0 \quad (1.2.2.101)$$

$$U^t_c = -\sqrt{3}U^t_+$$

Onde: $U^t_+ = U^t_-$, são calculados considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Transformador Delta - Delta - Delta:

Estando somente a fase a, solicitada por um degrau, as tensões aplicadas nas fases são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.2.2.102)$$

Onde:

U = Tensão de surto aplicada.

Através da Equação de Análise mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes Simétricas associadas com as tensões que solicitam o transformador, ou seja na forma de Componentes de Fase:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_+ \\ U_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U \qquad (1.2.2.103)$$

Com o auxílio da Equação de Síntese mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes de Fase a partir das Componentes Simétricas, ou seja:

$$\left[U_{0,+,-}\right] = \frac{1}{3}[A]^{-1}\left[U_{a,b,c}\right] \qquad (1.2.2.104)$$

Deste modo, supondo $U^s_{+/-}$ e $U^t_{+/-}$ as tensões de sequência positiva e negativa transferidas para o secundário e terciário respectivamente, U^s_0 e U^t_0 as correspondentes tensões de sequência zero, bem como, considerando que: $U^s_+ = U^s_-$, $U^s_0 = 0$ e substituindo as tensões transferidas para o enrolamento secundário; vem que as tensões resultantes nas fases deste são iguais a:

$$\begin{bmatrix} U^s_a \\ U^s_b \\ U^s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ U^s_+ \\ U^s_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.105)$$

Considerando um degrau unitário de tensão aplicado a fase a, e os circuitos em por unidade, é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o secundário do transformador são dadas por:

$$\begin{aligned} U^s_a &= 2U^s_+ \\ U^s_b &= -U^s_+ \\ U^s_c &= -U^s_+ \end{aligned} \qquad (1.2.2.106)$$

Onde: $U^s_+ = U^s_-$, são calculados considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Através da Equação de Síntese e, considerando que: $U^t_+ = U^t_-$, $U^t_0 = 0$, vem que as tensões nas fases do terciário são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U^t_a \\ U^t_b \\ U^t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ U^t_+ \\ U^t_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.107)$$

Considerando um impulso unitário de tensão aplicado a fase a, e os circuitos em por unidade, é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o terciário do transformador são dadas por:

$$U^t_a = 2U^t_+$$

$$U^t_b = -U^t_+ \qquad (1.2.2.108)$$

$$U^t_c = -U^t_+$$

Onde: $U^t_+ = U^t_-$, são calculados considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Transformador Delta - Estrela Isolado - Delta:

Estando somente a fase a, solicitada por um degrau, as tensões aplicadas nas fases são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.109)$$

Onde:

U = Tensão de surto aplicada.

Através da Equação de Análise mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes Simétricas associadas com as tensões que solicitam o transformador, ou seja na forma de Componentes de Fase:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_+ \\ U_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U \qquad (1.2.2.110)$$

Com o auxílio da Equação de Síntese mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes de Fase a partir das Componentes Simétricas:

$$[U_{a,b,c}] = [A][U_{0,+,-}] \qquad (1.2.2.111)$$

Para calcular as tensões no secundário, é necessário computar o efeito das conexões Estrela e Delta entre os enrolamentos. Deste modo vem:

$+\frac{\pi}{6}$ radianos = e^{j30} para a sequência positiva

e: (1.2.2.112)

$-\frac{\pi}{6}$ radianos = e^{-j30} para a sequência negativa

Deste modo, supondo $U^s_{+/-}$ e $U^t_{+/-}$ as tensões de sequência positiva e negativa transferidas para o secundário e terciário respectivamente, U^s_0 e U^t_0 as correspondentes tensões de sequência zero, bem como, considerando que: $U^s_+ = U^s_-$ e $U^s_0 = 0$ e substituindo as tensões transferidas para o enrolamento secundário; vem que as tensões resultantes nas fases deste são iguais a:

$$\begin{bmatrix} U^s_a \\ U^s_b \\ U^s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^s_0 \\ e^{j30} U^s_+ \\ e^{-j30} U^s_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.113)$$

Considerando um degrau unitário de tensão, bem como os circuitos em por unidade, para as sequências positiva e negativa e sequência zero respectivamente, é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o secundário do transformador, são dadas por:

$$U^s_a = \sqrt{3} U^s_+$$

$$U^s_b = -\sqrt{3} U^s_+ \qquad (1.2.2.114)$$

$$U^s_c = 0$$

Onde: $U^s_+ = U^s_-$, são calculados considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Através da Equação de Síntese e, considerando que: $U^t_+ = U^t_-$, $U^t_0 = 0$, vem que as tensões nas fases do terciário são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U^t_a \\ U^t_b \\ U^t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ U^t_+ \\ U^t_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.115)$$

Considerando um degrau unitário de tensão aplicado a fase a, e os circuitos em por unidade, é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o terciário do transformador são dadas por:

$$U^t_a = 2 U^t_+$$

$$U^t_b = -U^t_+ \qquad (1.2.2.116)$$

$$U^t_c = -U^t_+$$

Onde: $U^t_+ = U^t_-$, são calculados considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Transformador Delta - Estrela Isolado - Estrela Isolado:

Estando somente a fase a, solicitada por um degrau, as tensões aplicadas nas fases são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.117)$$

Onde:

U = Tensão de surto aplicada.

Através da Equação de Análise mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes Simétricas associadas com as tensões que solicitam o transformador, ou seja na forma de Componentes de Fase:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_+ \\ U_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U \qquad (1.2.2.118)$$

Com o auxílio da Equação de Síntese mostrada a seguir, obtêm-se as Componentes de Fase a partir das Componentes Simétricas:

$$[U_{a,b,c}] = [A][U_{0,+,-}] \qquad (1.2.2.119)$$

Para calcular as tensões no secundário, é necessário computar o efeito das conexões Estrela e Delta entre os enrolamentos. Deste modo vem:

$+\frac{\pi}{6}$ radianos = e^{j30} para a sequência positiva

e: (1.2.2.120)

$-\frac{\pi}{6}$ radianos = e^{-j30} para a sequência negativa

Deste modo, supondo $U^s_{+/-}$ e $U^t_{+/-}$ as tensões de sequência positiva e negativa transferidas para o secundário e terciário respectivamente, U^s_0 e U^t_0 as correspondentes tensões de sequência zero, bem como, considerando que: $U^s_+ = U^s_-$ e $U^s_0 = 0$ e substituindo as tensões transferidas para o enrolamento secundário; vem que as tensões resultantes nas fases deste são iguais a:

$$\begin{bmatrix} U^s_a \\ U^s_b \\ U^s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^s_0 \\ e^{j30} U^s_+ \\ e^{-j30} U^s_- \end{bmatrix} \qquad (1.2.2.121)$$

Considerando um impulso unitário de tensão, bem como os circuitos em por unidade, para as sequências positiva e negativa e sequência zero respectivamente, é possível escrever que as Componentes de Fase transferidas para o secundário do transformador, são dadas por:

$$U^s_a = \sqrt{3} U^s_+$$

$$U^s_b = -\sqrt{3} U^s_+ \qquad (1.2.2.122)$$

$$U^s_c = 0$$

Onde: $U^s_+ = U^s_-$, são calculados considerando um degrau unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Para calcular as tensões no terciário é necessário computar os efeitos das conexões Estrela e Delta entre os enrolamentos. Sendo assim vem:

$+\frac{\pi}{6}$ radianos = e^{j30} para a sequência positiva

e: (1.2.2.123)

$-\frac{\pi}{6}$ radianos = e^{-j30} para a sequência negativa

Através da Equação de Síntese e, considerando que: $U^t_+ = U^t_-$, $U^t_0 = 0$, vem que as tensões nas fases do terciário são dadas por:

$$\begin{bmatrix} U^t_a \\ U^t_b \\ U^t_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^t_0 \\ e^{j30}U^t_+ \\ e^{-j30}U^t_- \end{bmatrix} \quad (1.2.2.124)$$

Considerando um impulso unitário de tensão, bem como os circuitos em por unidade, para as sequências positiva e negativa e sequência zero respectivamente, é possível escrever que:

$$U^t_a = \sqrt{3}U^t_+$$

$$U^t_b = -\sqrt{3}U^t_+ \quad (1.2.2.125)$$

$$U^t_c = 0$$

Onde: $U^t_+ = U^t_-$, são calculados considerando um impulso unitário aplicado aos circuitos de sequência, em por unidade, representativos do transformador e sua conexão.

Quando somente o lado Primário do Transformador é solicitado na fase a, as tensões máximas transferidas eletromagnéticamente são usualmente menores (57 a 67%) que em um Transformador Monofásico correspondente.

Na rara ocorrência em que todos os três enrolamentos são ligados em Y-aterrado, as três fases são independentes uma da outra, e as tensões são idênticas para a a tensão do Transformador Monofásico. Havendo duas ligações Y-aterrado, em um banco, a tensão máxima pode ser igual ou mesmo até maior que a do Transformador Monofásico, devido ao efeito da rede de sequência zero. Quando as três fases são solicitadas simultâneamente, é suficiente considerar somente a rede de sequência zero e as tensões transferidas eletromagnéticamente aparecerão somente se o Primário e o enrolamento não solicitado estiverem ligados em Y-aterrado.

Um Autotransformador com neutro aterrado e terciário ligado em Delta, é tratado da mesma maneira como um Transformador de três enrolamentos ligado em Estrela-Aterrado - Estrela-Aterrado - Delta.[12].

I.3 - Modelos de Transformadores para Estudo de Surtos Transferidos

I.3.1 - Modelos Completo e Simplificado:

A modelagem exata de um transformador é muito complexa. Portanto um cuidado particular tem que ser tomado para que seja ajustado um modelo tão bom quanto possível aos requisitos de um caso específico a ser estudado. Por esta razão os modelos para um transformador são divididos em modelos nos quais o surto transferido de um enrolamento para

outro, não é interessante, por exemplo, transformador operando em vazio , e modelos nos quais onde o surto transferido para outros enrolamentos necessitam ser levado em conta. Para um transformador de dois enrolamentos monofásico a *Tabela I* mostra uma visão geral dos métodos de representação bem como a influência dos parâmetros relevantes.

Os transformadores são modelados nos Analisadores Analógicos e nos programas em computadores digitais por uma rede de resistores, indutâncias, transformadores ideais, indutores saturáveis e capacitâncias. Na modelagem dos fenômenos de saturação Grupos I e II os elementos saturáveis tem que ser inseridos tão perto quanto possível dos enrolamentos próximos ao núcleo magnético geralmente o enrolamento de B.T. Também para as frequências elevadas as capacitâncias vêm a ser importantes Grupos II e IV. Entretanto se o surto transferido não apresenta interesse, bem como, caso a impedância versus a frequência f, $Z = Z(f)$ for medida nos terminais de um transformador real, para os transitórios do Grupo III este poderá ser modelado por uma combinação de vários circuitos ressonantes amortecidos ligados em paralelo com indutância principal e capacitância de surto tal como representado na Tabela I . Este circuito equivalente representa a impedância nos terminais do transformador. Neste caso não será dada uma informação direta da distribuição de tensão dentro do transformador mas sim uma indicação da magnitude relativa de possíveis ressonâncias internas. Para o Grupo IV a capacitância de surto C^*_S é de interesse fundamental. À capacitância poderá ser adicionada em paralelo com uma resistência Z_S igual a impedância de surto dos enrolamentos. A adição de Z_S, é justificada no caso particular em que a relação de espiras do transformador está entre 0,5 e 1,0 fato comum em transformadores utilizados em subestações de H.V.D.C.

Uma representação mais precisa de um transformador monofásico ou mesmo com três enrolamentos é relativamente simples.

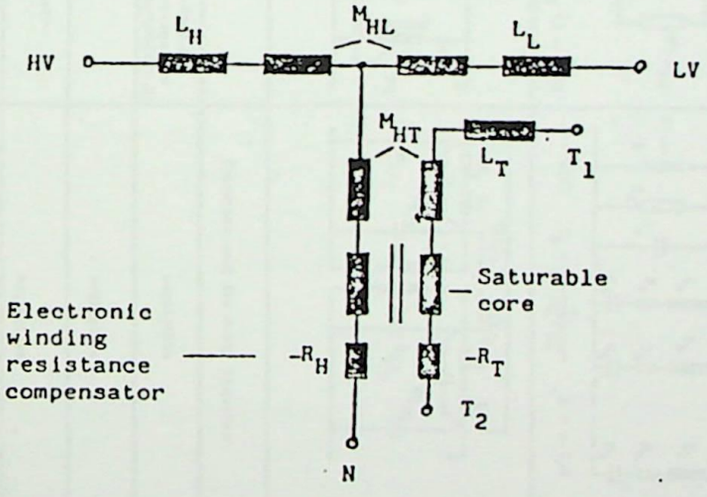


Figura 1.3.1.1 - Representação no Analisador Analógico de um transformador de três enrolamentos [15]

Na *Figura I.3.1.1.*é mostrado um exemplo de modelo de um Analisador Analógico. As resistências negativas $(-R_H, -R_T)$ obtidas através de um circuito eletrônico, são utilizadas quando necessário, para compensar a resistência dos enrolamentos do modelo.

Para os transformadores trifásicos, contudo, a representação é mais complicada. Dentro deste contexto, uma primeira aproximação a ser utilizada nos Analisadores Analógicos, quando da modelagem do acoplamento entre as pernas do transformador trifásico é a adição de enrolamentos extras ligados em delta.

Transformers	Group I 0.1 Hz ÷ 3 kHz	Group II 50/60 Hz ÷ 20 kHz	Group III 10 kHz ÷ 3 MHz	Group IV 100 kHz ÷ 50 MHz
Without surge transfer 1)				
With surge transfer 1)				
Short circuit impedance	very important	very important	very important for surge transfer	negligible
Saturation	very important	important	negligible	negligible
Frequency dependent series losses	very important	important	negligible	negligible
Hysteresis and iron losses	important only for resonance phenomena	important only for transformer energizing	negligible	negligible
Capacitive coupling	negligible	important only for surge transfer	very important for surge transfer	very important for surge transfer

1) Examples for single-phase, two-winding transformers (index 1: outer winding, index 2: inner winding, turn ratio $\ddot{u} = w_1/w_2$)

L = inductance
R = ohmic resistance
C = capacitance
f = frequency
L_h = magnetizing inductance
Φ = flux
R_{Fe} = replication of hysteresis and iron losses
Z_{Fe} = impedance measured at terminals
C_s = surge capacitance
Z_s = surge impedance of winding

Values indicated by * are lower than the corresponding values without *

Tabela III - Representação de Transformadores (sem as capacitâncias parasitas) enrolamentos [15]

Para a simulação digital podem ser usadas matrizes de resistências e indutâncias as quais representam estes acoplamentos, e cujos elementos podem ser calculados a partir de dados de testes de curto-circuito de sequência positiva e sequência zero.

Caso seja conhecido o projeto interno de um transformador, particularmente para as frequências contempladas pelos modelos dos Grupos I e II, modelos mais detalhados podem ser encontrados na aplicação da analogia entre as redes elétricas e magnéticas levando-se também em conta o arranjo dos enrolamentos.

Este princípio pode ser explicado a partir do exemplo de um transformador monofásico de três enrolamentos com um enrolamento de A.T. e com dois enrolamentos de B.T., B.T.1 e B.T.2, como é mostrado na *Figura I.3.1.2* a seguir:

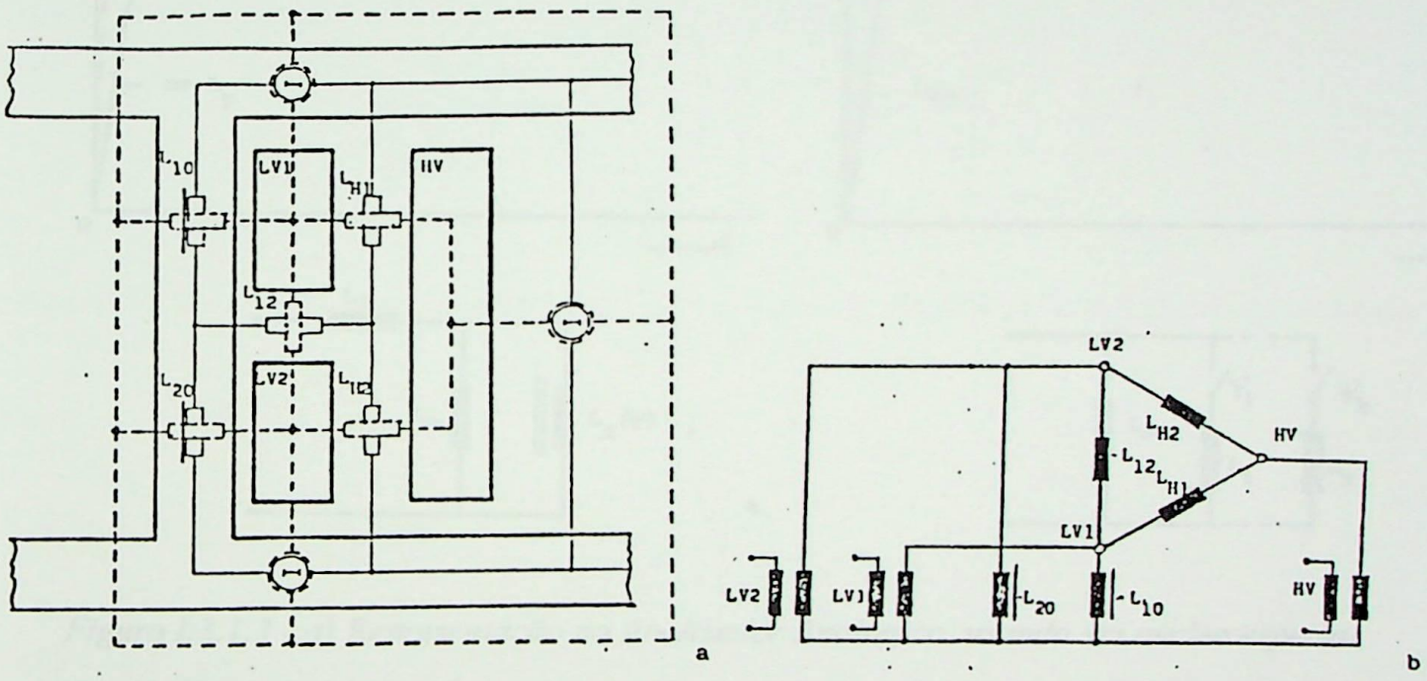


Figura I.3.1.2 - a) Derivação de um circuito elétrico equivalente

b) Circuito elétrico equivalente de um transformador de três enrolamentos [15]

O circuito magnético equivalente contém a permeância do percurso magnético principal e o percurso de dispersão, linha cheia na *Figura I.3.1.2-a* Para cada enrolamento existe associada uma fonte I. O circuito elétrico equivalente linhas tracejadas na *Figura I.3.1.2-a* é uma dualidade do circuito magnético. Deste modo, é possível obter o circuito elétrico resultante mostrado na *Figura I.3.1.2-b*.

Neste exemplo a arranjo de dois enrolamentos B.T.1. e B.T.2 são assumidos simétricos para o enrolamento de A.T. Portanto a reatância principal do transformador é dividida em duas partes iguais. No entanto este circuito muda completamente caso, os três enrolamentos sejam arranjados de um outro modo, como por exemplo, no caso onde o enrolamento B.T.1 é mais próximo ao núcleo e o enrolamento B.T.2 se situa entre o enrolamento de A.T. e o enrolamento B.T.1 (arranjo B.T.1 - B.T.2 - A.T.).

A representação da saturação do transformador é necessária para níveis de frequência dos Grupos I e II - *Tabela III*.

Em programas digitais, o elemento saturável é usualmente modelado com a representação de componentes lineares os quais podem ser implementados como ramos de indutância L_{mo} igual a indutância de magnetização na região de não saturação, colocados em paralelo com um ou mais ramos com indutâncias chaveadas conforme mostrado na *Figura I.3.1.3-b* a seguir:

A equação para a indutância chaveada L_j é dada pela *equação 1.3.1.1*:

$$\Psi = \Psi_j + L_j i_j \qquad (1.3.1.1)$$

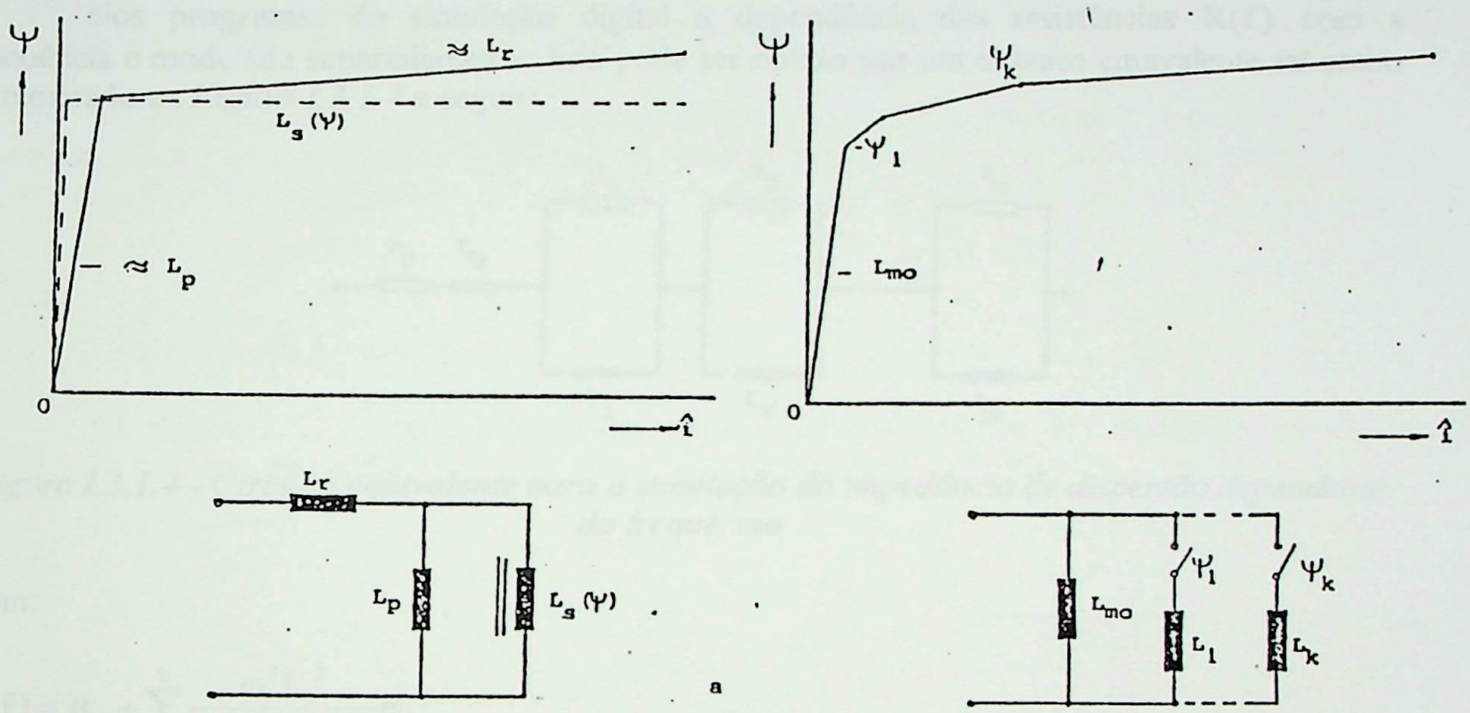


Figura I.3.1.3 - a) Representação no Analisador Analógico usando um núcleo especial

b) Representação no computador

O tamanho do passo Δt deve ser suficientemente pequeno fato que atua no sentido de evitar grandes mudanças ao longo da característica $\Psi/\hat{i}$.

Para a simulação dos efeitos de histerese e correntes parasitas, uma resistência linear ou não linear R_{FE} poderá ser colocada em paralelo com uma indutância linear, como é mostrado na *Tabela III*. Em alguns programas também estão desenvolvidos modelos com indutâncias não-lineares com os efeitos de histerese.

Para a superação de possíveis problemas tais como instabilidades numéricas para o aumento da precisão de tais cálculos, também tem sido proposto o uso de uma função analítica completa para a representação dos elementos saturáveis ao invés de uma função de componentes lineares.

Nas representações nos Analisadores Analógicos os efeitos de histerese e de correntes parasitas são inerentemente incluídos. No caso de um estudo específico de energização de transformadores será também necessário levar em conta os efeitos remanescentes. No Analisador Analógico o fluxo residual deve ser controlado para que sejam assegurados resultados confiáveis. Para simulações digitais, é relativamente fácil começar de um fluxo residual conhecido. Contudo

calcular o fluxo residual em uma simulação é um problema não resolvido satisfatóriamente até hoje.

Tal como mostrado na *Tabela III* as perdas dependentes da frequência podem apresentar uma grande influência particularmente nas oscilações do Grupo I e também parcialmente nos transitórios do Grupo II. Para as simulações no Analisador Analógico é necessário projetar os componentes relevantes de modo a limitar as perdas especialmente em frequências muito baixas ou elevadas.

Nos programas de simulação digital a dependência das resistências R(f) com a frequência e modelada separadamente. Isto pode ser obtido por um circuito equivalente tal como o mostrado na *Figura I.3.1.4* a seguir:

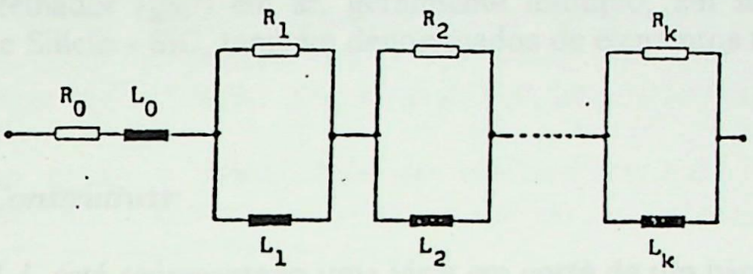


Figura I.3.1.4 - Circuito equivalente para a simulação da impedância de dispersão dependente da frequência

Com:

$$R(f) = R_0 + \sum_{i=1}^{k} \frac{\omega^2 L_i^2}{R_i^2 + (\omega L_i^2)} R_i$$

e: (1.3.1.2)

$$L(f) = L_0 + \sum_{i=1}^{k} \frac{R_i^2}{R_i^2 + (\omega L_i^2)} L_i$$

Onde:

$\omega = 2\pi f$

Os circuitos equivalentes com o aumento da frequência sugerem uma redução da indutância de dispersão L do transformador com o aumento da frequência, porém tais reduções tem sido amplamente verificadas experimentalmente em transformadores reais bem como, explicadas teoricamente.[15]

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS PÁRA-RAIOS

2.1 - Pára-raios Convencionais a Carboneto de Silício:

Os pára-raios convencionais também denominados como pára-raios tipo válvula, são compostos por um centelhador (gap) em ar, geralmente múltiplo, em série com um ou mais resistores a Carboneto de Silício - SiC, também denominados de elementos tipo válvula.

2.1.1 - Características Construtivas:

Na *Figura 2.1.1.1*, está representado uma vista em corte de um pára-raios a carboneto de silício para sistemas de distribuição, bem como, as suas partes constituintes.

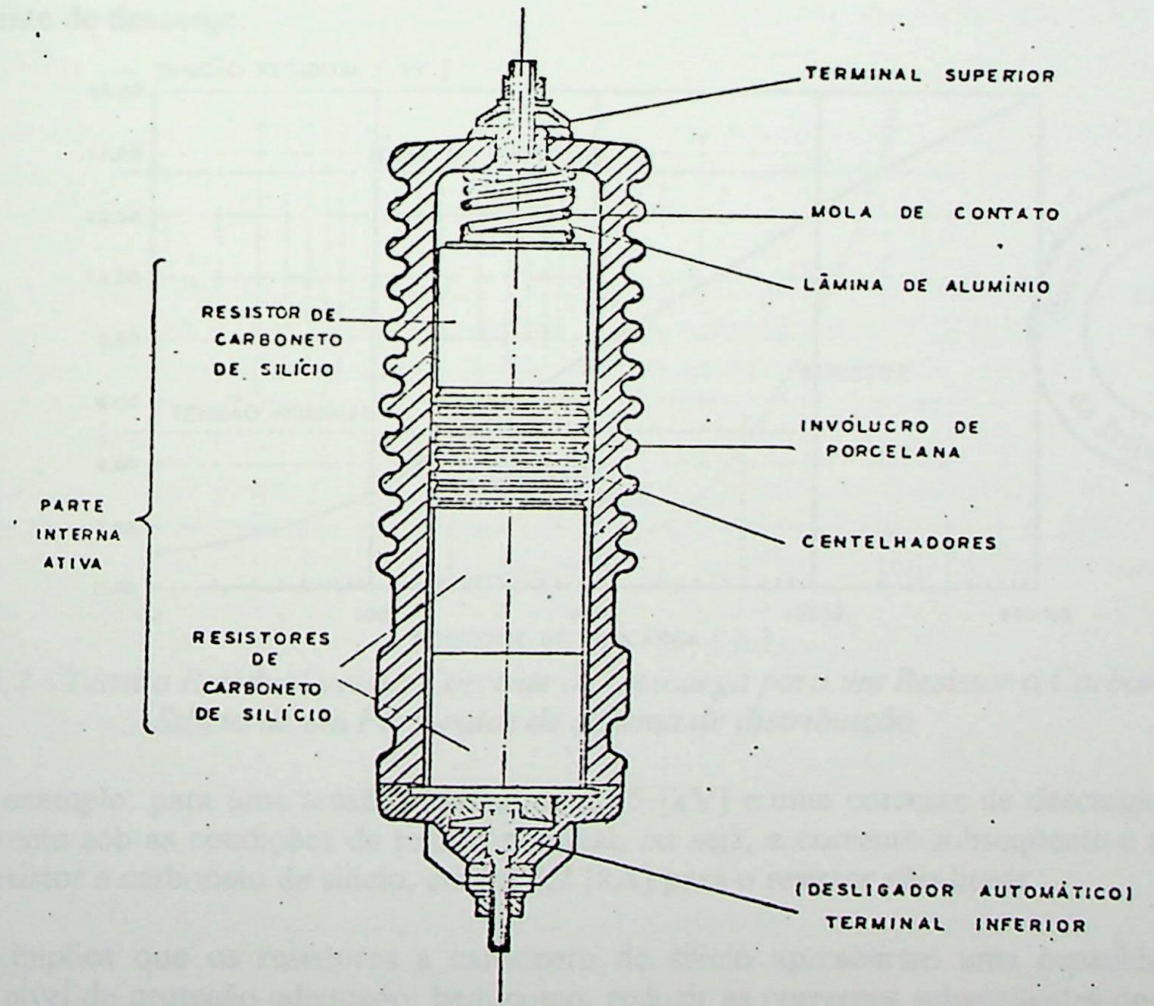


Figura 2.1.1.1 - Pára-raios para Sistemas de Distribuição - vista em corte

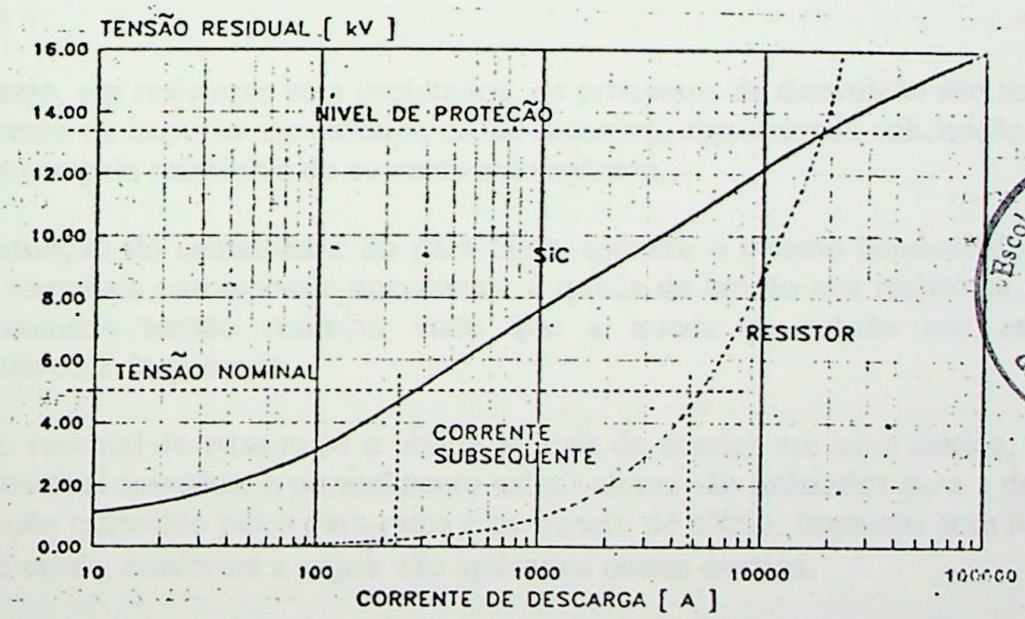
Em um pára-raios convencional, a característica tensão disruptiva versus tempo de centelhador, simples ou múltiplo, determina o valor de tensão a partir do qual a atuação do mesmo passa a ser efetiva.

Sendo assim, o pára-raios apresenta, antes do instante de atuação de seu centelhador, em relação ao sistema onde se encontra ligado, um comportamento passivo. Decorrido este período, o mesmo apresenta um comportamento ativo, sendo a queda de tensão nos centelhadores muito reduzida, em certos casos, como em pára-raios para sistemas de distribuição, construídos com centelhadores passivos, inferior a 1 [V/kV] de tensão nominal do pára-raios. Consequentemente, toda a tensão imposta pelo pára-raios aos equipamentos protegidos é resultante da queda de tensão nos resistores a carboneto de silício, denominada tensão residual do pára-raios.

O carboneto de silício apresenta um coeficiente de variação da temperatura, negativo, sendo que a resistência decresce com o crescimento da temperatura. Sendo que assim, os resistores a carboneto de silício, apresentam uma característica não-linear, implica-se em que a resistência efetiva é reduzida em função dos aumentos da corrente de descarga.

Embora de certo modo, a tensão residual seja elevada, para correntes elevadas, a diferença proporcional entre as tensões residuais para as correntes de alta e de baixa intensidade é muito menor que a existente nos resistores lineares.

A *Figura 2.1.1.2* mostra a característica tensão corrente obtida para dois resistores, dotados de dimensões definidas de modo a fornecerem o mesmo nível de proteção sob uma mesma corrente de descarga.



Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

Figura 2.1.1.2 - Tensão Residual versus Corrente de Descarga para um Resistor a Carboneto de Silício de um Pára-raios de sistema de distribuição

Por exemplo: para uma tensão residual de 13,5 [kV] e uma corrente de descarga de 20 [kA], a corrente sob as condições de tensão nominal, ou seja, a corrente subseqüente é de 280 [A] para o resistor a carboneto de silício, contra 5,2 [kA] para o resistor não-linear.

Isto implica que os resistores a carboneto de silício apresentam uma capacidade de fornecer um nível de proteção adequado, bem como, reduzir as correntes subseqüentes dos pára-raios a níveis capazes de ser interrompidas pelos centelhadores, de modo natural, ou seja quando da passagem da corrente pelo zero.

Ao serem solicitados por correntes não padronizadas, destacando-se as correntes oriundas de impulsos atmosféricos de longa duração e, as correntes de impulso de manobra de alta amplitude, os resistores a carboneto de silício podem estar sujeitos a falhas.

As descargas de correntes de longa duração podem implicar em aquecimento do material que compõe os resistores a carboneto de silício, fato que resulta na redução da resistência oferecida pelos mesmos, e permite assim descargas de correntes subsequentes com amplitudes mais elevadas.

Devido às imperfeições na estrutura cristalina, pode ocorrer uma elevada concentração de corrente em um canal condutor, implicando em aquecimento localizado resultando na queda da resistência oferecida pelo canal condutor à passagem de corrente, fato que por sua vez implica em uma concentração de corrente. A temperatura no ponto de concentração de corrente pode atingir valores superiores a 1500 [°C], implicando na fusão, praticamente instantânea, do material do canal condutor, fenômeno este conhecido como *"Tunneling"*, e com isto, inutilização do resistor.

Deste modo, devido a aumentos anormais de temperatura, ocorrem decréscimos na resistência dos resistores a Carboneto de Silício e, caso este decréscimo seja muito elevado, os centelhadores poderão não interromper a corrente subseqüente, implicando que o pára-raios entra no modo de falha.

Do exposto acima, é possível concluir que os resistores a carboneto de silício possuem uma margem de sobrecarga muito pequena, podendo facilmente ser destruídos caso sejam solicitados por descargas que resultem em um volume total de energia absorvida maior que o limite de projeto.

Geralmente, em resistores bem projetados, os processos de destruição são resultantes da descarga de corrente de impulso atmosférico ou de manobra, denominada solicitação principal, e a solicitação imposta pela existência de corrente subseqüente.

Com a atuação do centelhador do pára-raios, estando o mesmo conduzindo corrente, a tensão nos seus terminais corresponde unicamente à queda de tensão nos resistores a carboneto de silício, denominada tensão residual, visto que a queda de tensão nos centelhadores normalmente passivos é desprezada.

A tensão residual do pára-raios é obtida através de ensaios em laboratórios, no qual são aplicados impulsos padronizados, e normalmente estes valores são utilizados para a determinação do nível de proteção oferecido pelos pára-raios a carboneto de silício. Impulsos com forma 8 x 20 [μs], e valores de crista, conforme a seguir são aplicados nestes ensaios.

ABNT , IEC - 2,5 [kA], 5,0 [kA] e 10,0 [kA]
ANSI , CSA - 1,5 [kA], 3,0 [kA], 5,0 [kA], 10,0 [kA] e 20,0 [kA]

Utilizando-se papel mono-log com estes valores obtém-se a curva mostrada na *Figura 2.1.1.2* que define a característica da Tensão Residual versus Corrente de Descarga.

Na *Figura 2.1.1.3* a seguir são mostrados resultados de tensão residual para correntes não padronizadas, ou seja, com tempos até a crista diferente de 8 [μs], para os quais existe uma explicação física, pois, tendo em vista que a resistência de carboneto de silício está diretamente ligada com a temperatura, as correntes rápidas devem implicar em um menor aquecimento.

Uma explicação plausível sugere que este fenômeno consiste em um erro de medição, devido a indução no laço, acoplamento mútuo, formado pelo resistor sob o ensaio e o divisor de tensão. Isto implica que, para uma amplitude de corrente, a tensão residual nos resistores a carboneto de silício seja, virtualmente, constante para as formas de ondas passíveis de ocorrer no campo.

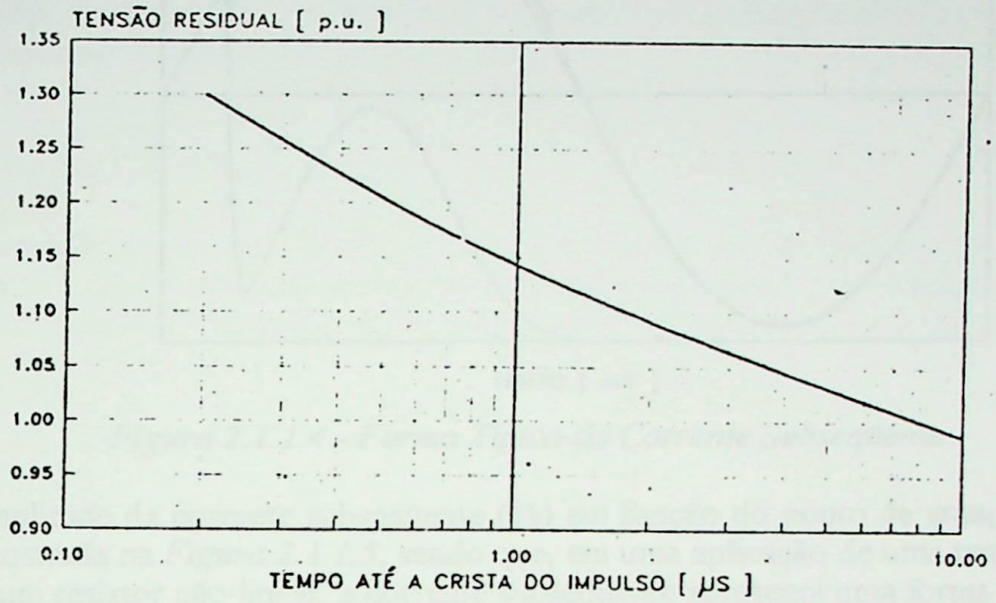


Figura 2.1.1.3 - Fator de Correção para a Tensão Residual

Convém ressaltar que não é levado em consideração na maioria dos estudos de Coordenação de Isolamento, o acoplamento mútuo existente entre o pára-raios e o equipamento protegido.

Em sistemas de A.T. é comum adotar os dados corrigidos. Nestes casos é usual utilizar uma corrente incidente que resulte em, por exemplo, uma onda viajante de tensão com uma taxa de crescimento da ordem de 2000 [kV/μs] e determinar a forma do impulso que atinge o pára-raios da subestação e, finalmente, fazer a correção da tensão residual dos pára-raios para o tempo de crista observado. Embora os processos acima não sejam corretos, os resultados de campo, estatísticamente comprovam sua eficácia.

A operação de um pára-raios convencional implica que o mesmo conduza corrente até que o arco, formado nos centelhadores, seja extinto quando do próximo zero de tensão em frequência industrial. Portanto em termos práticos, a corrente através do pára-raios pode ser dividida em duas:

- Uma corrente relativa ao impulso, de origem atmosférica ou de manobra, denominada corrente de descarga; e

- Outra corrente entre o tempo de extinção do impulso e o de extinção de arco nos centelhadores, denominada corrente subseqüente.

A corrente subseqüente decresce rapidamente após atingir o seu valor de crista aproximando-se de zero com uma inclinação bem suave, conforme mostra de maneira ilustrativa a *Figura 2.1.1.4*. Sendo que ainda, a corrente subseqüente apresenta uma característica praticamente resistiva, implicando que a extinção do arco nos centelhadores do pára-raios não apresenta sobretensão ou outros tipos de transitórios.

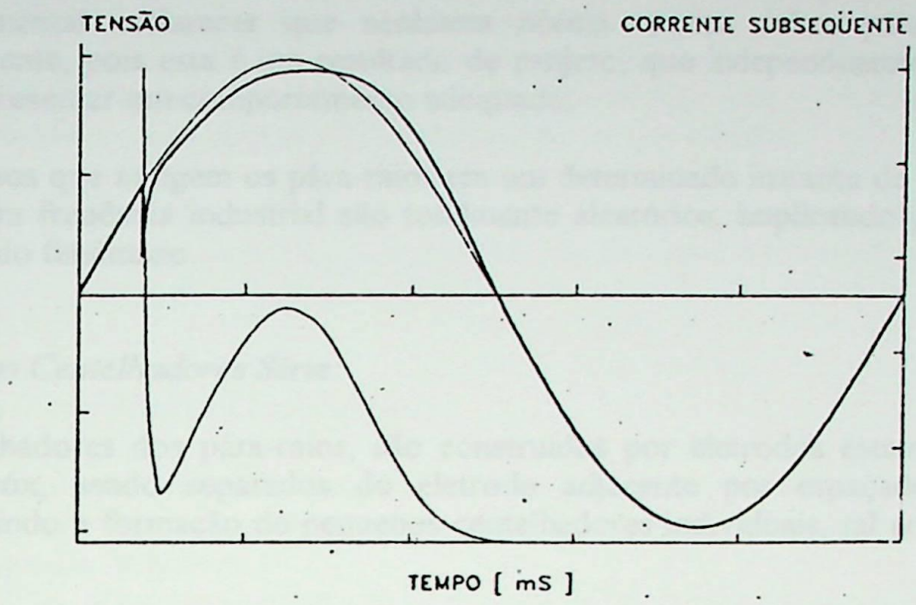


Figura 2.1.1.4 - Forma Típica da Corrente Subseqüente

A amplitude da corrente subseqüente (%) em função do ponto de atuação do pára-raios em graus é mostrada na *Figura 2.1.1.5*, sendo que, em uma aplicação de uma tensão praticamente senoidal, em um resistor não-linear, a corrente subseqüente apresenta uma forma não senoidal.

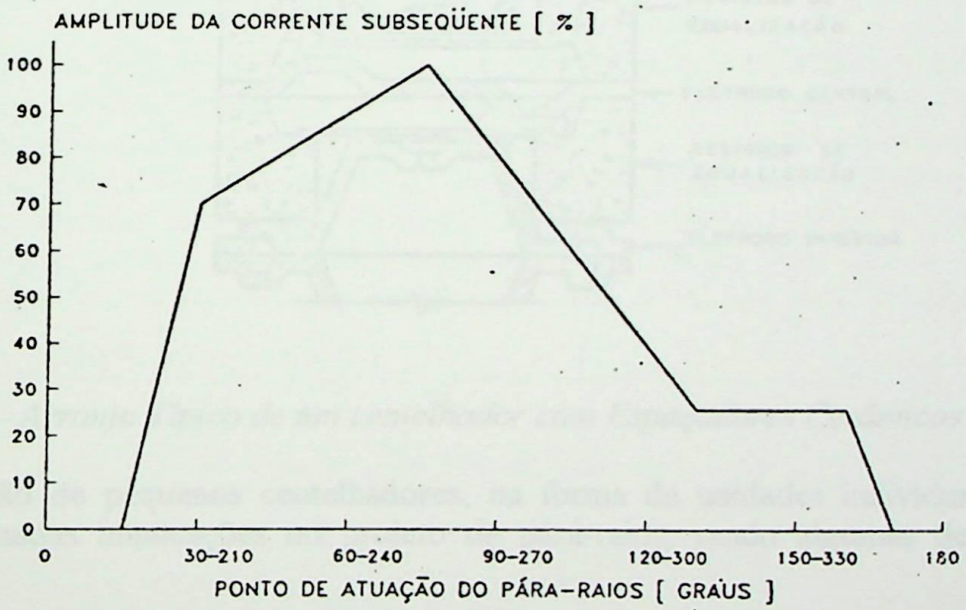


Figura 2.1.1.5 - Variação da Corrente Subseqüente em função do Ponto de Atuação do Pára-raios

No caso, dos pára-raios estarem ligados por exemplo a uma indutância, a aproximação final do zero de corrente, poderá ocorrer em um instante um pouco inferior ao zero de tensão tal como em um disjuntor, aparecendo através do centelhador, uma tensão de restabelecimento transitória de pequena amplitude.

De acordo com a *Figura 2.1.1.5*, a amplitude e a duração, ou seja a solicitação em termos de energia relativa à corrente subseqüente, é função do ponto (em graus), entrando o pára-raios em condução na frequência industrial, através da disrupção de seu centelhador, conforme mostrado na *Figura 2.1.1.4.*

É fundamental esclarecer que nenhuma norma técnica sobre pára-raios, define a amplitude da corrente, pois esta é um resultado de projeto, que independentemente do valor da mesma, deverá apresentar um comportamento adequado.

Os impulsos que atingem os pára-raios em um determinado instante de tempo, relativo a onda de tensão em freqência industrial são totalmente aleatórios, implicando portanto em uma análise estatística do fenômeno.

Características dos Centelhadores Série:

Os centelhadores dos pára-raios, são construídos por eletrodos estampados em latão, cobre ou aço inóx, sendo separados do eletrodo adjacente por espaçadores, geralmente cerâmicos, permitindo a formação de pequenos centelhadores individuais, tal como mostrado na *Figura 2.1.1.6*.

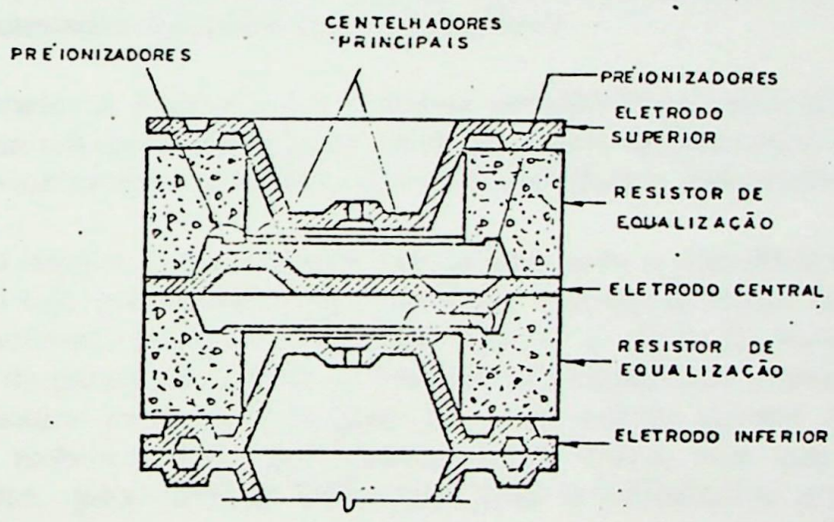


Figura 2.1.1.6 - Arranjo Típico de um centelhador com Espaçadores Cerâmicos Resistivos

A utilização de pequenos centelhadores, na forma de unidades individuais, em série, apresenta determinadas implicações no projeto de pára-raios, sendo algumas delas citadas a seguir:

- De acordo com a tensão nominal, os pára-raios podem ser montados com o auxílio de pequenos centelhadores individuais;

- Utilizando-se pequenos centelhadores em série, diminui-se o atraso do tempo para uma completa disrupção do centelhador, permitindo-se atenuar determinados problemas em centelhadores com grande espaçamento, quando os mesmos são solicitados por impulsos íngrimes;

- Com a técnica de equalização de potencial a resposta do centelhador sendo solicitado por formas distintas de impulsos, seria controlada através da tensão imposta a cada pequeno centelhador individualmente;
- Com os eletrodos intermediários, permite-se aumentar a queda de tensão do arco e, assim, atuar na capacidade de interrupção das correntes subseqüentes do centelhador;

- A capacidade de interrupção da corrente subseqüente, sofre um incremento adicional, sendo que o espaçamento em ar, em cada conjunto formado por dois pequenos centelhadores, permite, através da interrupção do arco, um intercalamento de uma grande massa de metal frio, eletrodos intermediários, facilitando assim uma rápida desionização do centelhador.

Com a interrupção da corrente, a somatória das quedas catódicas de um grande número de eletrodos, facilita a recuperação dielétrica do meio, impedindo assim o reacendimento do arco nos centelhadores.

Características dos Centelhadores Individuais:

Em meios gasosos, os mecanismos de descarga são dependentes das densidades das moléculas dos gases existentes no espaço entre os eletrodos, sendo que os invólucros dos pára-raios são herméticamente fechados.

Além disso, os pára-raios são preenchidos com ar seco ou nitrogênio, aos quais devido suas características disruptivas praticamente idênticas, não implica em diferenças substanciais no comportamento da característica disruptiva dos centelhadores.

Tal como mostrado na *Figura 2.1.1.6*, ambos centelhadores, pré-ionizador e principal, podem ser confinados em um único eletrodo, no entanto, mesmo apresentando diferenças fisicas, os diversos tipos de pré-ionizadores, trabalham de forma semelhante, independente do projeto do pára-raios.

A pré-ionização implica na construção em paralelo com o centelhador principal de um pequeno centelhador, ou seja, pré-ionizador para minimizar o atraso de tempo estatístico, ou seja, intervalo entre o aparecimento primeiro do elétron livre e o início da avalanche disruptiva, conectando, ao circuito do pára-raios através de uma elevada impedância, capacitiva ou resistiva. O centelhador pré-ionizador entra em disrupção sob uma tensão inferior à do centelhador principal, e visto que, ambos dividem um mesmo espaço fisico, vem que a disrupção do centelhador pré-ionizador, gera elétrons livres para que o centelhador principal entre em disrupção.

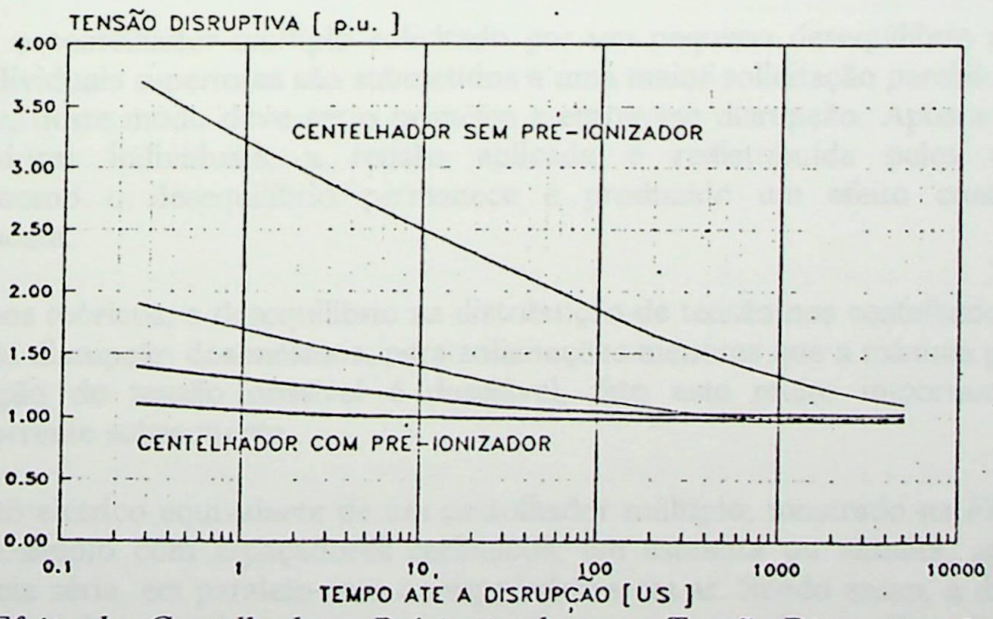


Figura 2.1.1.7 - Efeito dos Centelhadores Pré-ionizadores na Tensão Disruptiva, Inclusive Para Impulsos Íngremes

Devido à elevada impedância série os centelhadores pré-ionizadores não conduzem corrente elevada, e deste modo, o desempenho do pára-raios não sofre efeito apreciável. Após a disrupção dos centelhadores principais, que, por sua vez os curto circuitam conforme é mostrado na *Figura 2.1.1.6*.

A função principal dos centelhadores pré-ionizadores está na redução da variação da tensão disruptiva e do *"upturn"* observados por impulsos íngrimes conforme está mostrado a seguir na *Figura 2.1.1.7*.

Características dos Centelhadores Múltiplos:

Devido a vedação e dispositivos pré-ionizadores as características disruptivas dos centelhadores individuais são asseguradas e, deste modo, a característica disruptiva dos centelhadores múltiplos, definida pela distribuição de tensão ao longo dos mesmos, ou seja, pela tensão imposta aos seus centelhadores individuais.

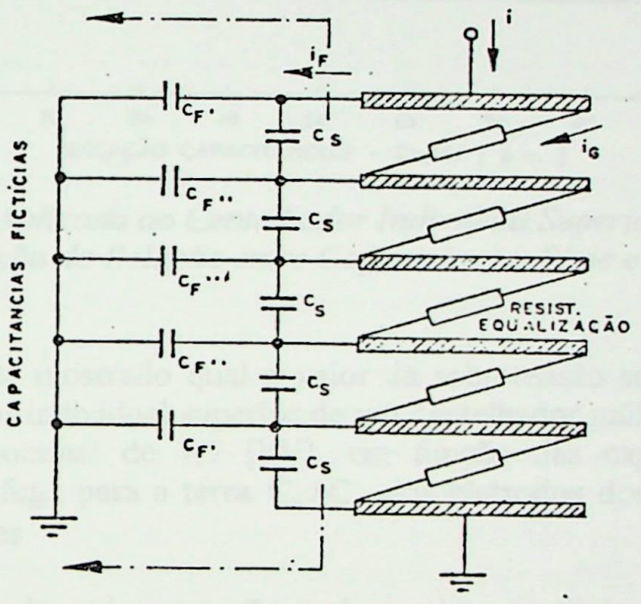


Figura 2.1.1.8 - Circuito Elétrico Equivalente de um Centelhador Múltiplo

Estando o centelhador múltiplo solicitado por um pequeno desequilíbrio de tensão, os centelhadores individuais superiores são submetidos a uma maior solicitação parcial em termos de tensão aplicada e, deste modo deve ser o primeiro a entrar em disrupção. Após a disrupção de alguns centelhadores individuais, a tensão aplicada é redistribuída pelos centelhadores remanescentes, como o desequilíbrio permanece é produzido um efeito conhecido como disrupção em cascata.

Em termos teóricos, o desequilíbrio na distribuição de tensão nos centelhadores múltiplos é responsável pela disrupção dos mesmos, para solicitações menores que a máxima prevista. Uma melhor distribuição de tensão possível é desejável, fato este muito importante durante a interrupção da corrente subseqüente.

O circuito elétrico equivalente de um centelhador múltiplo, mostrado na *Figura 2.1.1.8*, construído por exemplo com espaçadores cerâmicos, em esteatita ou alumita, apresenta uma elevada impedância série, em paralelo com os espaçadores em ar. Sendo assim, a distribuição de tensão em projetos de centelhadores, para trabalharem sem qualquer dispositivo extra de compensação, apresentando uma relação C_s / C_f reduzida, entre 1 e 10. Logo a distribuição de tensão ao longo dos centelhadores não é uniforme, visto que, a maior parcela da tensão total, é aplicada ao centelhador individual bem próximo do terminal de linha do pára-raios e subseqüentes, o que resulta em uma disrupção total do centelhador, para níveis de tensões menores ao nível projetado.

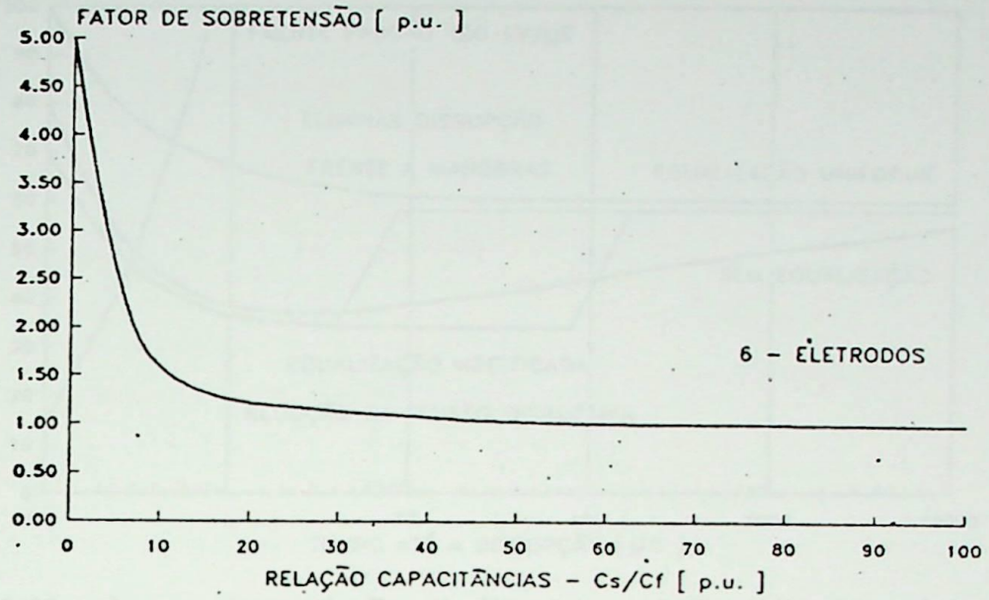


Figura 2.1.1.9 - Sobretensão Aplicada ao Centelhador Individual Superior de um Centelhador Múltiplo em Função da Relação entre Capacitâncias Série e de Fuga

Na *Figura 2.1.1.9* está mostrado qual o valor da sobretensão será aplicado ao par de eletrodos, ou seja, o centelhador individual superior de um centelhador múltiplo, sendo que este é projetado para uma tensão nominal de 7,5 [kV], em função das capacitâncias séries dos centelhadores individuais e de fuga para a terra C_s / C_f dos eletrodos dos mesmos em primeira aproximação supostas constantes.

Praticamente todos os pára-raios, estação e classes intermediária, e a maioria dos pára-raios de distribuição, construídos para tensões mais elevadas, são formados por elementos com a característica de prover uma forma de equalização ao longo dos centelhadores múltiplos.

De acordo com a norma ANSI - CSA, a equalização de potencial resistiva, utiliza componentes com características não-linear, conectados em paralelo com cada centelhador individual, porém podendo serem constituídos por elementos discretos, ou por elementos pré-formados, geralmente a carboneto de silício.

Apresentando os resistores de equalização de potencial características não lineares, sob a tensão nominal a energia dissipada pelos mesmos, não é muito elevada, embora, nos centelhadores individuais o controle da tensão aplicada seja bastante efetivo, inclusive, para tensões próximas à tensão disruptiva.

A eficiência da equalização de potencial aferida através das características disruptivas dos centelhadores múltiplos, para $U_N = 12$ [kV], com ou sem equalização de potencial, uniforme e modificada, é mostrado na *Figura 2.1.1.10*.

Propositalmente é possível desenvolver, uma distribuição de tensão, não uniforme, através de um adequado complemento, entre as equalizações resistiva, normalmente utilizada, e a capacitiva, para impulsos íngrimes, obtendo-se assim, pára-raios com características protetivas especiais.

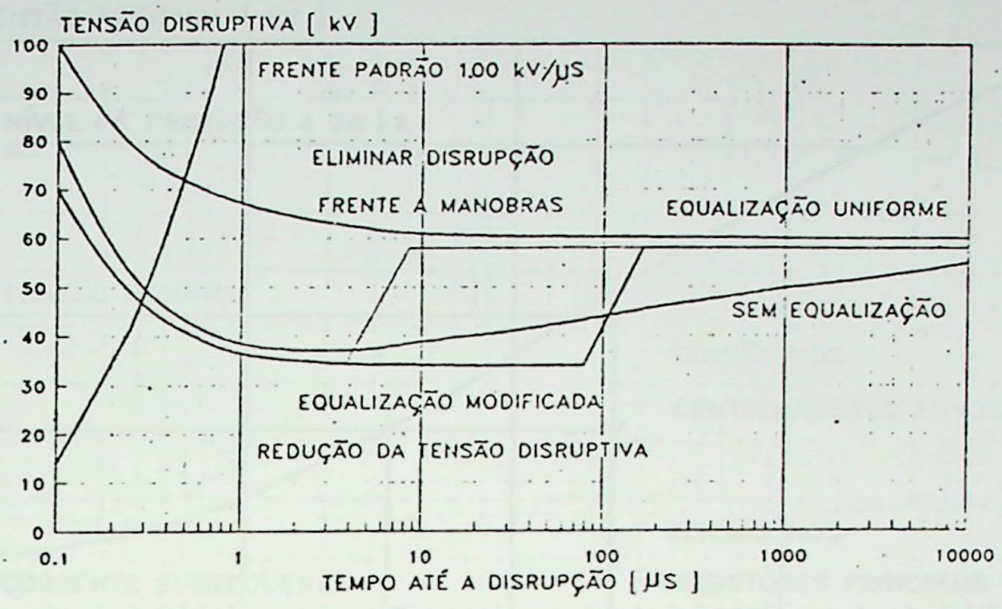


Figura 2.1.1.10 - Característica da Tensão Disruptiva de Centelhadores Com Vários Dispositivos de Equalização de Potencial

Na *Figura 2.1.1.10* está representado um dos arranjos conhecido como: "centelhador para pára-raios de máquinas rotativas", onde são utilizados capacitores especiais para a equalização de potencial em paralelo com o centelhador individual par. Estando este centelhador solicitado por um impulso íngrime, 50 [%] dos centelhadores individuais são virtualmente curto circuitados pelos capacitores, fato que diminui a tensão disruptiva do conjunto. Assim sendo, este tipo de arranjo se opõe ao atraso de tempo estatístico e de formação, ligados ao aumento da tensão disruptiva para impulsos íngremes. Estes centelhadores são aplicados à proteção de máquinas rotativas ou transformadores a seco, apresentando suportabilidade frente a impulsos planos ou decrescentes.

Centelhadores Ativos:

De acordo com as normas ANSI - CSA, os centelhadores ativos são aplicáveis à pára-raios, classes estação, intermediária e distribuição, como também em pára-raios para a proteção de conexões entre cabos e linhas aéreas.

Na *Figura 2.1.1.2*, mostrada anteriormente, observa-se que, qualquer redução nos níveis de proteção, implica em um aumento da corrente subseqüente à ser interrompida pelos centelhadores.

Existem determinados limites impostos pelos centelhadores nas reduções sistemáticas nos níveis de proteção, através de reduções sucessivas na tensão residual, associados com o desempenho dos mesmos, durante a extinção das correntes subseqüentes.

Utilizando-se nos projetos de pára-raios, centelhadores projetados com base no princípio do sopro magnético, ou ainda, magnetos permanentes, facilita-se assim um movimento constante do arco e melhora-se a capacidade dos centelhadores na interrupção da corrente subseqüente.

A diferença entre os centelhadores ativos e os passivos está no fato de que, nos primeiros, devido ao alongamento e resfriamento do arco, realizado dentro de câmaras de arco, horizontais, construídas com material refratário, apresentarem uma queda de tensão relativamente elevada conforme está mostrado na *Figura 2.1.1.11*, permitindo assim uma redução da tensão aplicada aos resistores a carboneto de silício, bem como, o deslocamento de seu ponto de operação frente a tensões em frequência industrial.

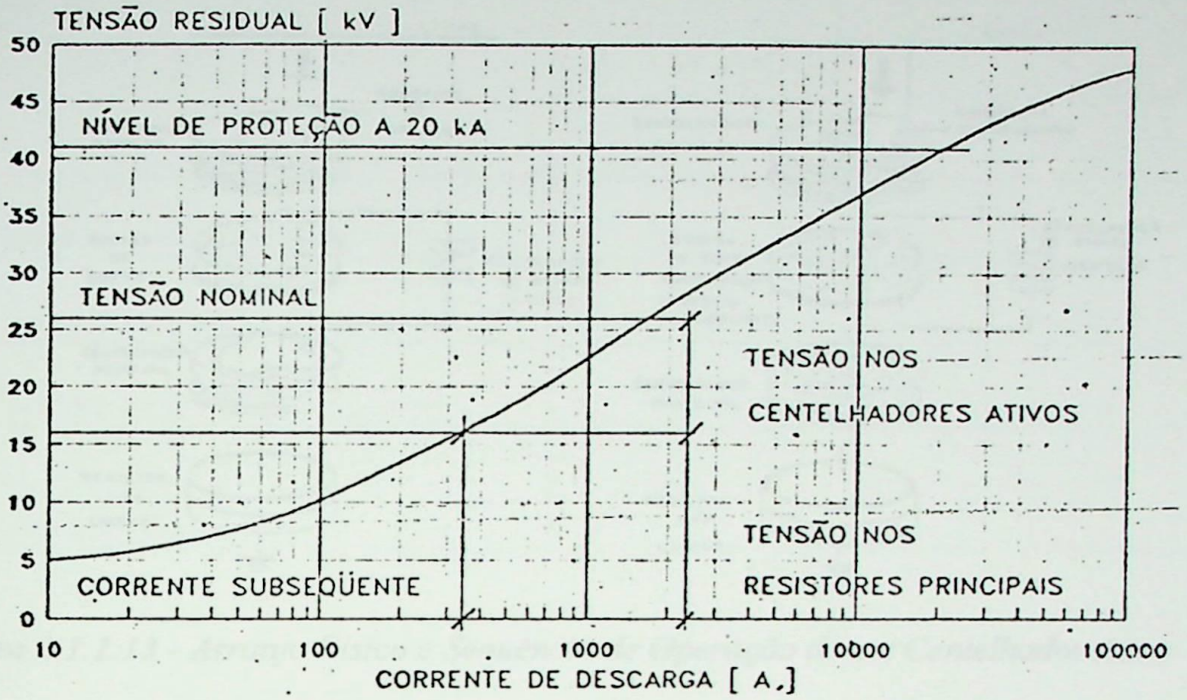


Figura 2.1.1.11 - Característica de Operação de um Pára-raios com Centelhadores Ativos

Nos centelhadores ativos, a corrente subseqüente é forçada para zero, possibilitanto a interrupção da mesma antes do zero natural de tensão.

Na *Figura 2.1.1.12*, está mostrado como se comporta o arco em um centelhador ativo. Durante a disrupção do centelhador o arco possui como comprimento o pequeno espaço, ou seja, a distância entre os eletrodos. Após a descarga do impulso o arco é alongado até uma posição final nas paredes da câmara de arco sob a presença de um campo magnético adequado, interior da mesma.

O campo magnético que possui a função de alongar o arco, é obtido pelas bobinas de sopro, que são bobinas ligadas em série com os centelhadores individuais.

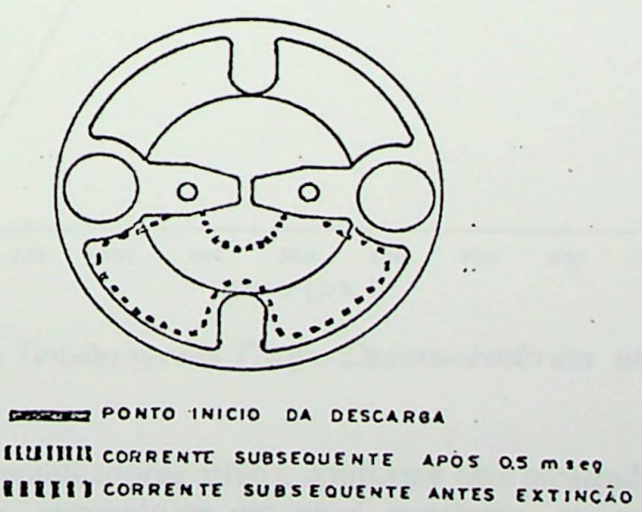


Figura 2.1.1.12 - Deslocamento do Arco no Interior de um Centelhador

As bobinas de sopro possuem um elemento *"bypass"*, constituído por um pequeno resistor a carboneto de silício, ou por um centelhador auxiliar, cuja função é de evitar sobretensões causadas por impulsos íngremes, que serão desviados das bobinas em questão.

Na *Figura 2.1.1.13* está mostrado a estrutura e a sequência de operação de um centelhador ativo.

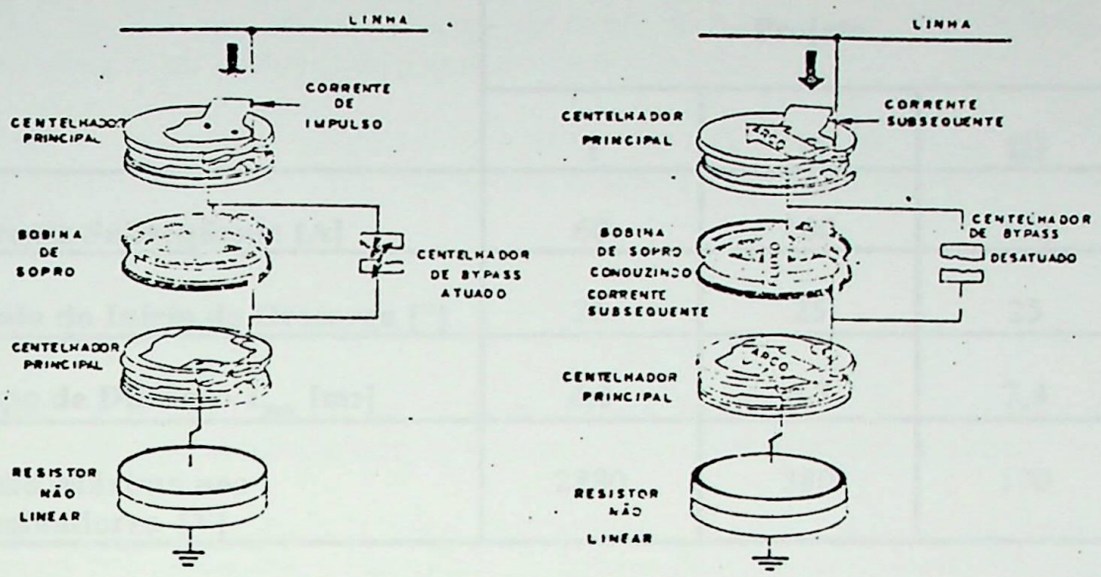


Figura 2.1.1.13 - Arranjo Físico e Sequência de Operação de um Centelhador Ativo

Contudo a impedância oferecida pelas bobinas de sopro sob a frequência industrial, na região da corrente subseqüente não é significativa, deste modo, ocorre uma transferência de corrente do elemento *"bypass"* para as bobinas de sopro e, deste modo o campo magnético gerado por esta corrente, força um deslocamento do arco dentro das câmaras de arco do centelhador, no entanto, estes processos graduais.

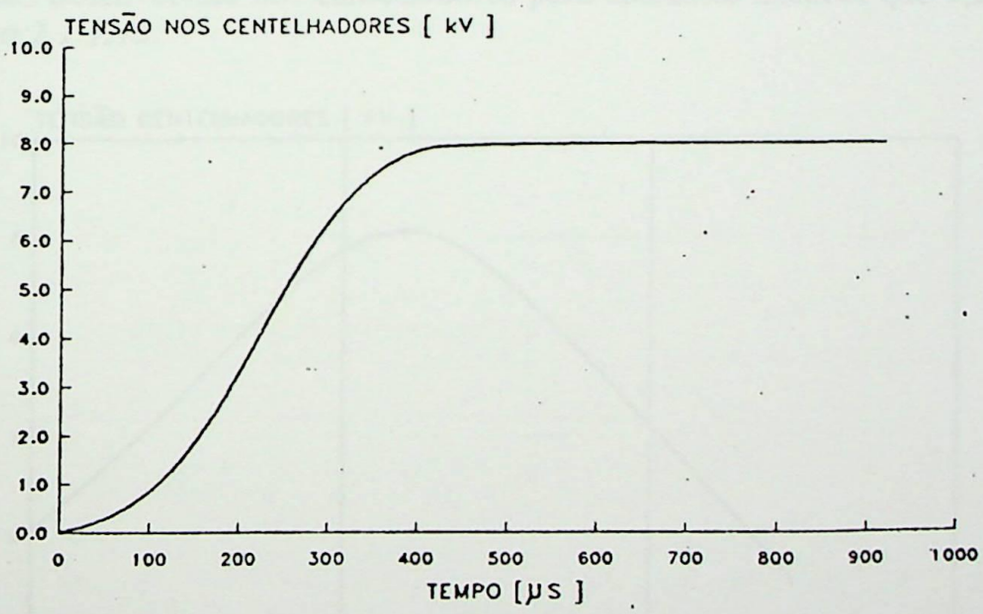


Figura 2.1.1.14 - Característica Tensão versus Tempo Desenvolvido em um Centelhador Ativo

A queda de tensão nos centelhadores ativos, conforme está mostrado na *Figura 2.1.1.14*, apresenta um crescimento lento, seguindo-se um nível constante, na qual permanece, até a interrupção da corrente subseqüente.

O tempo de duração da corrente subseqüente define a eficiência de um centelhador ativo, em função do valor da tensão do arco desenvolvido nos mesmos, conforme está mostrado na *Tabela I.*

	Projeto		
	I	**II**	**III**
Corrente Subseqüente [A]	60	100	172
Ângulo do Início da Descarga [°]	25	25	25
Tempo de Duração I_{Sub} [ms]	4,2	6,7	7,4
Tensão Máxima nos Centelhadores [V]	2880	380	170

Tabela I - Eficiência dos Centelhadores Ativos

Para evitar que a característica de proteção dos pára-raios, que é resultado da somatória das quedas de tensão nos resistores a carboneto de silício e nos centelhadores ativos, seja maior que o nível de projeto, inclusive, quando da interrupção da corrente subseqüente a tensão desenvolvida nos centelhadores ativos em função da corrente não deve apresentar uma característica plana. Isto implica que as câmaras de arco devem ser construídas com sub-câmaras. A redução da tensão desenvolvida nos centelhadores para correntes maiores que 0,20 [kA] está mostrado na *Figura 2.1.1.15*.

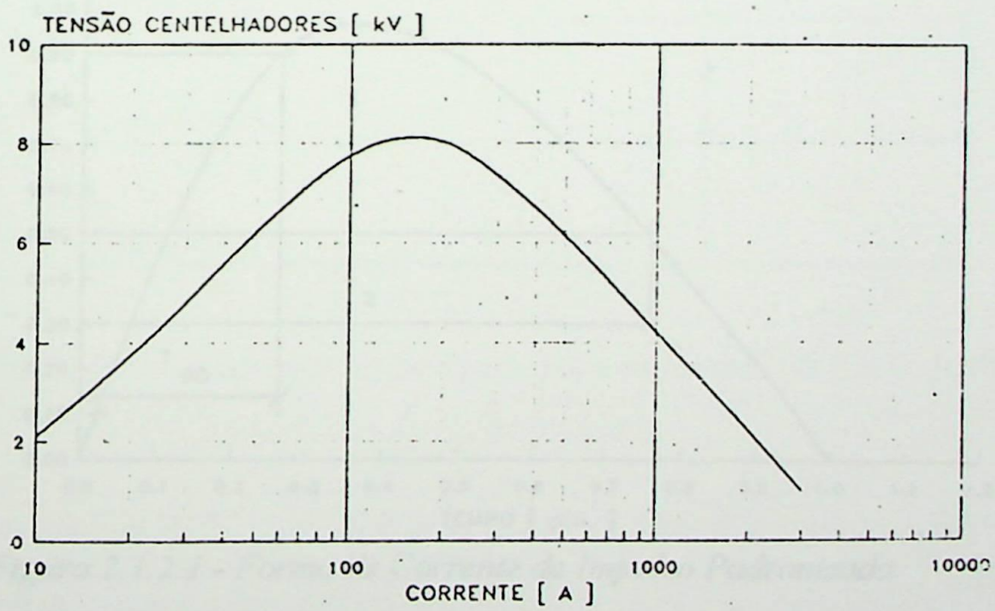


Figura 2.1.1.15 - Característica Tensão versus Corrente de um Centelhador Ativo com Tensão Nominal de 6 [kV]

Um dos pontos negativos dos centelhadores ativos está relacionado à sua concepção de projeto, restrita à condições de contorno e sistemas muito específicos.

Estando os centelhadores auxiliares, bobinas, assim como os demais componentes, tais como os capacitores e resistores de equalização de potencial, solicitados por uma forma inesperada de impulso, estes poderão ser facilmente destruídos, acarretando um mal funcionamento dos centelhadores. Nestes casos se o arco não se deslocar de sua posição inicial, o

que ocorre quando de descargas de correntes de manobra com o valor de crista superior ao previsto no projeto, ou seja, quando da descarga de linhas de transmissão com impedância de surto bastante diferentes, o pára-raios pode entrar em modo de falha.

Deste modo, como áreas problemáticas estão aquelas em que envolvem elevadas correntes de baixa frequência, devido, por exemplo, a manobra de grandes capacitores, linhas de transmissão ou cabos isolados de potência.

2.1.2 - Desempenho Frente a Surtos Atmosféricos:

Os pára-raios têm como função em sistemas de distribuição e sub-transmissão controlar as solicitações de tensão nos equipamentos, tipicamente em transformadores e linhas, causados por descargas atmosféricas.

Os valores de correntes padronizados por normas, os quais, definem os valores dos resistores não-lineares dos pára-raios, assim como, os valores de corrente os quais, determinam a suportabilidade frente as solicitações severas e sua capacidade, durante a interrupção das correntes subseqüentes.

Os pára-raios são construídos de forma modular, sendo que, para a execução dos ensaios são utilizadas seções proporcionais representativas do pára-raios completo, para a verificação do seu comportamento.

Sob correntes de descarga com forma 4x10 [μs] e 8x20 [μs], os resistores não-lineares a carboneto de silício são solicitados uniformemente, sendo que, devido a ambas as formas, a duração não é elevada fato que impede o fenômeno de *"Tunneling"*, ou seja concentração de corrente em canais condutores, que implica na inutilização dos resistores.

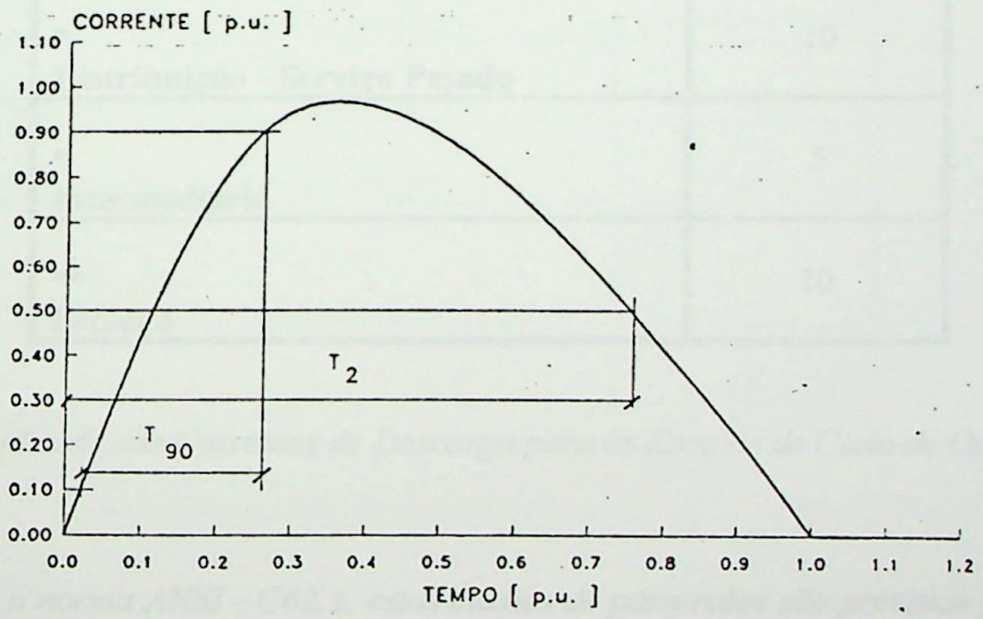


Figura 2.1.2.1 - Forma de Corrente de Impulso Padronizada

Nestes ensaios são utilizados as formas de correntes padronizadas, mostradas na *Figura 2.1.2.1*, sendo esta definida pela sua amplitude, tempo de crescimento T_1 , conhecido como tempo de frente e pelo tempo de meia amplitude T_2 dado por:

$$T_1 = 1,25T_{90} \qquad (2.1.1.1)$$

Onde:

T_1 - Tempo de frente da corrente de impulso (μs)

T_2 - Tempo até a metade da amplitude na cauda do impulso (μs)
T_{90} - Intervalo de tempo entre os valores 10 [%] e 90 [%] da anplitude na frente do impulso

Os ensaios que determinam as solicitações em termos de descargas atmosféricas segundo a Norma ANSI - C62.1; são:

- Ensaio de Ciclo de Operação

- Ensaio de Suportabilidade Frente a Correntes com Amplitudes Elevadas

- Ensaio de Suportabilidade Frente a Correntes de Longa Duração

Ensaio de Ciclo de Operação:

O objetivo deste ensaio é determinar e em alguns casos verificar, a operação sob frequência industrial, de um projeto de pára-raios, quando os mesmos são solicitados por uma sequência de impulsos, de acordo com a Tabela II.

Classe do Pára-raios	**Corrente [kA]**
Distribuição - Serviço Normal	5
* **Distribuição - Serviço Pesado**	10
* **Intermediário**	5
** **Estação**	10

Tabela II - Amplitude das Correntes de Descarga para os Ensaios de Ciclo de Operação

Onde:

** - De acordo com a norma ANSI - C62.1, estas classes de pára-raios são previstas para cobrir as solicitações consideradas específicas, no caso:*
- Sistemas de Distribuição com alto nível ceráunico; e
- Bay's de linha de subestações em A.T., até 145 [kV], pára-raios de linha.

*** - A Norma ANSI - C62.1, não padroniza correntes de descarga nominais de 15 [kA] e 20 [kA], compatíveis a pára-raios para E.A.T., ou seja acima de 242 [kV].*

Ensaio de Alta Corrente de Curta Duração:

O objetivo deste ensaio é determinar, e em alguns casos verificar, a suportabilidade de um projeto de pára-raios, frente a uma descarga atmosférica direta, dotada de uma magnitude

normalmente elevada, representada por uma determinada corrente com forma e amplitude de acordo com a *Tabela I* e com a *Tabela III*.

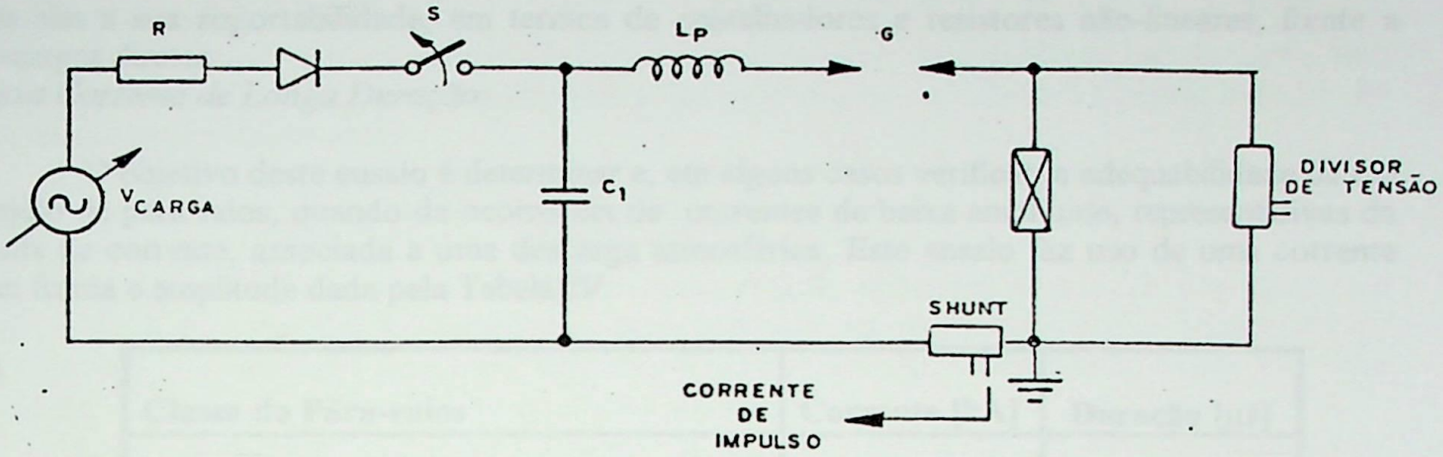


Figura 2.1.2.2 - Circuito Típico para o Ensaio de Alta Corrente de Curta Duração

O circuito sintético, mostrado na *Figura 2.1.1.2*, deve possuir uma baixa impedância, sendo desnecessário, a representação do sistema onde o pára-raios está ligado por seu equivalente Thévènin, devido a solicitação por uma corrente de descarga com a amplitude de acordo com a Tabela III, normalmente, resulta em uma tensão disruptiva ao longo do isolamento de algum ponto do sistema, implicando, via de regra, em um nível desprezável de tensão em frequência industrial, imposta aos pára-raios.

Classe do Pára-raios	Corrente [kA]
Distribuição - Serviço Normal	65
Distribuição - Serviço Pesado	100
* **Intermediário**	65
* **Estação**	65

Tabela III - Amplitude das Correntes de Descarga para os Ensaios de Alta Corrente de Curta Duração

Onde:

** - Os sistemas de A.T. e de E.A.T., são normalmente, efetivamente blindados, com o auxílio de cabos de guarda. Sendo assim, as descargas diretas nos condutores de fase nestes sistemas, devem apresentar amplitudes menores, que a verificada em sistemas de distribuição normalmente expostos.*

Existem argumentos sobre a ineficácia deste ensaio, devido ao fato de que na realidade, a tensão residual desenvolvida pelo pára-raios, durante uma descarga de corrente com amplitude conforme a Tabela III, é maior que o *"Nível Básico de Isolamento - NBI"* dos equipamentos

ligados ao sistema. Porém o contra-argumento quanto a eficiência deste ensaio estabelece que não é objetivo do mesmo a verificação da *"Coordenação de Isolamento"* pára-raios versus sistema mas sim a sua suportabilidade, em termos de centelhadores e resistores não-lineares, frente a descargas diretas.

Baixa Corrente de Longa Duração:

O objetivo deste ensaio é determinar e, em alguns casos verificar, a adequabilidade de um projeto de pára-raios, quando da ocorrência de correntes de baixa amplitude, representativas da cauda da corrente, associada a uma descarga atmosférica. Este ensaio faz uso de uma corrente com forma e amplitude dada pela Tabela IV.

Classe do Pára-raios	**Corrente [kA]**	**Duração [μs]**
Distribuição - Serviço Normal	75	* 2000
Distribuição - Serviço Pesado	250	2000

Tabela IV - Amplitude e Forma das Correntes de Descarga para os Ensaios de Baixa Corrente de Longa Duração

Onde:

**Segundo IEC 99.1 - 1000 [μs].*

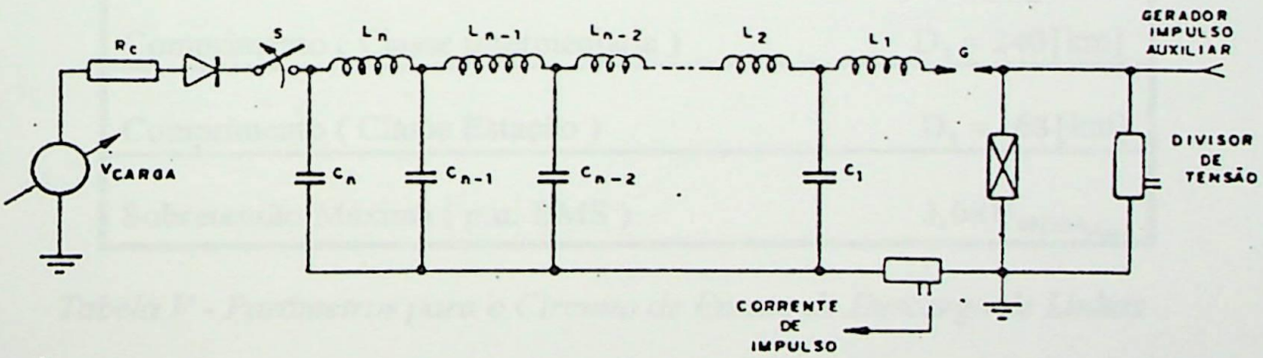


Figura 2.1.2.3 - Circuito Típico para oEnsaio de Baixa Corrente de Longa Duração

Os resistores não-lineares a carboneto de silício são enormemente solicitados pelas correntes de curta duração, pois estas apresentam um tempo suficientemente longo, da ordem de vinte vezes, ao tempo de duração de uma descarga de curta duração, fato que implica em um aquecimento localizado de regiões dos resistores (*"Tunneling"*), podendo resultar em uma elevação da temperatura local, superior a 1500 [°C], danificando assim o material cerâmico do canal condutor.

O circuito mostrado na *Figura 2.1.1.3*, reproduz uma corrente com uma forma praticamente retangular. Este circuito também é utilizado no ensaio de descarga de linha de transmissão.

2.1.3 - Desempenho Frente a Surtos de Manobra:

As descargas de manobra apresentam correntes de longa duração, onde além de permitir o fenômeno de *"Tunneling"*, podem conter energia em excesso quando comparadas com as descargas atmosféricas.

Sendo assim, a nível microscópico, a homogeneidade dos resistores não lineares, bem como o mecanismo de troca de calor entre os grãos de carboneto de silício e a matriz isolante são fundamentalmente importantes.

A matriz isolante deve apresentar elevada capacidade térmica, quando se necessita de elevada resistência frente às solicitações impostas pelas descargas de longa duração, típicas de manobra.

Os pára-raios, classe intermediária e classe estação utilizados na maioria dos casos, em sistemas de A.T. e de E.A.T., apresentam uma reduzida suportabilidade frente a impulsos de manobra em por unidade [p.u.] da sua Tensão Nominal -U_N, resultando assim em uma probabilidade reduzida de atuação frente a estas solicitações.

Para o ensaio para descargas de manobras padronizadas utiliza-se o circuito mostrado na *Figura 2.1.2.3*.

Parâmetros para o Circuito de Ensaio de Descarga de Linhas para Pára-raios com Tensão Nominal de até 145 [kV] *	
Impedância de Surto $Z_1 = 450\,[\Omega]$	
Capacitância $C_1 = 0,0075\,[\mu F / km]$	
Comprimento (Classe Intermediária)	$D_1 = 240\,[km]$
Comprimento (Classe Estação)	$D_1 = 168\,[km]$
Sobretensão Máxima (p.u. RMS)	$3,68 U_{60\,[Hz]Máx.}$

Tabela V - Parâmetros para o Circuito de Ensaio de Descarga de Linhas

Na Tabela V, segundo com as normas ANSI-CSA, são mostrados os parâmetros de linha, utilizados nos ensaios de descarga de linhas em pára-raios de classe intermediária e estação, apresentando-se tensões nominais equivalentes ao sistema de média tensão.

Onde:

* *Segundo ANSI-C62.1*

O circuito mostrado na *Figura 2.1.2.2*, nada mais é que um modelo reduzido de uma linha de transmissão, produz um impulso de corrente com amplitude dada por:

$$I_D = \frac{U_C - U_{PR}}{Z_1} \qquad (2.1.1.2)$$

Logo:

$$I_D = \frac{3,62 U_{máx\,60[Hz]} - U_{PR}}{Z_1}$$

e:

$$U_{máx\,60[Hz]} = K_T U_{FT} \qquad (2.1.1.3)$$

Onde:

I_D = Corrente de Descarga pelo pára-raios [kA]
U_C = Tensão de Carga da linha [kV]
U_{FT} = Tensão Fase-Terra [kV]
K_T = Fator de Sobretensão máxima [p.u.], em sistemas padrão K_T = 1,06 [p.u.]

A duração da corrente de descarga é obtida com o auxílio da expressão:

$$T_D = 2 Z_1 C_1 D_1 \qquad (2.1.1.4)$$

Onde:

T_D = Duração da Corrente de Descarga

Substituindo os valores apresentados na Tabela V, vem que:

T_D = 1620 [μs] - (Pára-raios classe Estação)
T_D = 1080 [μs] - (Pára-raios classe Intermediária)

A energia absorvida pelo pára-raios, no caso, construído com centelhadores múltiplos, é determinada pelo produto da tensão residual do pára-raios, da corrente de descarga e do tempo de duração da mesma, conforme a seguir:

$$E_{PR} = U_{PR} I_D T_D \qquad (2.1.1.5)$$

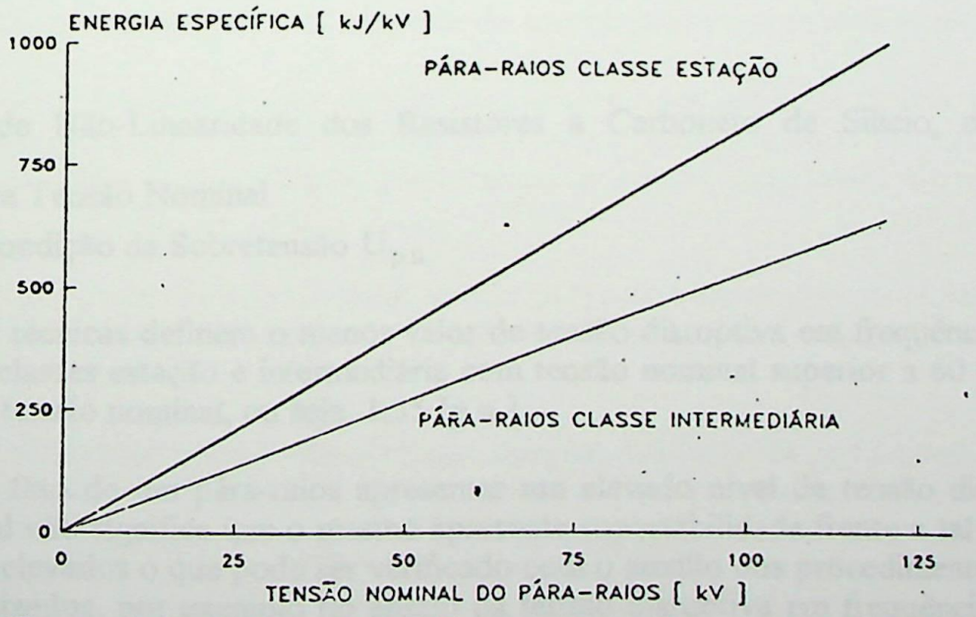


Figura 2.1.3.1 - Capacidade de Absorção de Energia de um Pára-raios Função da Tensão Nominal para Linhas com Parâmetros conforme Tabela V

Logo:

$E_{PR} = 2U_{PR}I_D Z_1 D_1 C_1$

Conforme mostra a *Figura 2.1.3.1*, a capacidade de absorção de energia dos pára-raios cresce com a tensão nominal.

Devido aos pára-raios serem construídos de forma modular, o que proporciona uma intercambialidade de componentes entre diferentes grupos de pára-raios, os fabricantes, ensaiam os componentes frente às solicitações impostas pela classe de pára-raios mais solicitada, na qual eles devem ser utilizados, resultando assim em uma margem conservativa de projeto.

2.1.4 - Desempenho Frente a Sobretensões Sustentadas:

As sobretensões sustentadas na frequência fundamental do sistema (60 [Hz]), ocorrem devido faltas, rejeições de cargas ou energização de linhas.

A capacidade de um pára-raios operar na presença de tensão, em frequência industrial, superiores a sua tensão nominal, ou seja, sobretensões, depende de sua suportabilidade frente a dois estados operativos possíveis:

- Estado Condutor ,e
- Estado Não Condutor.

Estado Condutor - Suportabilidade dos resistores não lineares principais frente à esforços térmicos extras, tais como, a suportabilidade térmica e capacidade de extinção dos centelhadores frente a altas correntes subseqüentes.

A amplitude que as correntes subseqüentes podem atingir que implica em um esforço térmico no qual o pára-raios será submetido por ocasião da atuação sobre uma sobretensão em frequência industrial pode ser obtida por:

$$I_{sub} = I_{sub_0} U^{\alpha}{}_{p.u.} \qquad (2.1.1.6)$$

Onde:

α = Coeficiente de Não-Linearidade dos Resistores a Carboneto de Silício, normalmente $2 < \alpha < 4$

$I_{sub_0} = I_{subseq}$, para Tensão Nominal

$I_{sub} = I_{subseq}$, na condição de Sobretensão $U_{p.u.}$

As normas técnicas definem o menor valor de tensão disruptiva em frequência industrial para os pára-raios classes estação e intermediária com tensão nominal superior a 60 [kV], como sendo 1,35 vezes a tensão nominal, ou seja, 1,35 [p.u.].

Devido ao fato de um pára-raios apresentar um elevado nível de tensão disruptiva em frequência industrial não significa que o mesmo apresente suportabilidade frente a tal tensão, por períodos de tempo elevados o que pode ser verificado com o auxílio dos procedimentos adotados nos ensaios normalizados, por exemplo no ensaio da tensão disruptiva em frequência industrial, que evitam ao máximo, expor o pára-raios a tensões superiores à sua tensão nominal.

Em se referindo aos ensaios o fator limitante quando os mesmos são realizados com equipamento dotado de baixa potência de curto-circuito, ou seja, elevada impedância interna, é

sem dúvida, uma possível falha de origem térmica, dos resistores de equalização de potencial, não-lineares, utilizados em praticamente todos os pára-raios classe estação e intermediária, e na maioria dos pára-raios de distribuição para tensões mais elevadas.

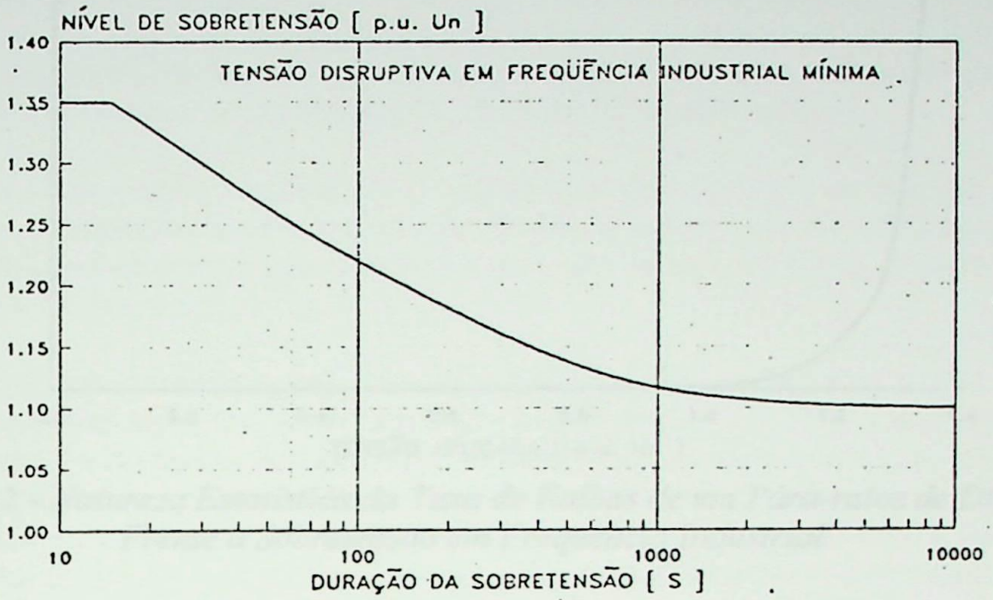


Figura 2.1.4.1 - Suportabilidade de um Pára-raios Estação Frente a Sobretensão em Frequência Industrial

Na *Figura 2.1.4.1* está mostrado o aspecto da suportabilidade dos pára-raios frente a sobretensões em frequência industrial, sendo que o aumentos de tensão aplicada aos resistores de equalização de potencial não lineares, são inferiores aos aumentos do consumo de energia.

Caso o pára-raios entre em condução, quando solicitado a uma sobretensão em frequência industrial, a sua probabilidade de falha cresce substancialmente, pois, os centelhadores precisam interrromper correntes subseqüentes elevadas, o que implica em esforço térmico superior ao previsto no projeto. Estas ocorrências, se encontram relacionadas com transitórios de origem atmosférica ou de manobra, capazes de provocar a descarga dos pára-raios, bem como, criar uma contigência que resulte em uma condição de sobretensão em frequência industrial.

Normalmente, o pára-raios para distribuição, não apresentam capacidades de operação sob condições de sobretensão em frequência industrial. Assim sendo, quando submetidos a estas condições, sua taxa de falha é determinada pelas características de suportabilidade estatística de seus componentes.

A definição da probabilidade de falha de um pára-raios apresenta um elevado grau de dificuldade, envolvendo fatores aleatórios que influem muito sobre o desempenho real dos mesmos, conforme a seguir:

- As tolerâncias de fabricação exigem que a tensão nominal dos projetos dos centelhadores, seja definida, conservativamente, de maneira que a maioria dos pára-raios em serviço, sejam submetidos a aproximadamente 60 [%] a 70 [%] da sua capacidade máxima de interrupção da corrente subseqüente; e:

- A disrupção dos centelhadores ocorre, de modo aleatório em qualquer ponto da onda de tensão em frequência fundamental, implicando que o pára-raios raramente interrompa sua máxima corrente subseqüente.

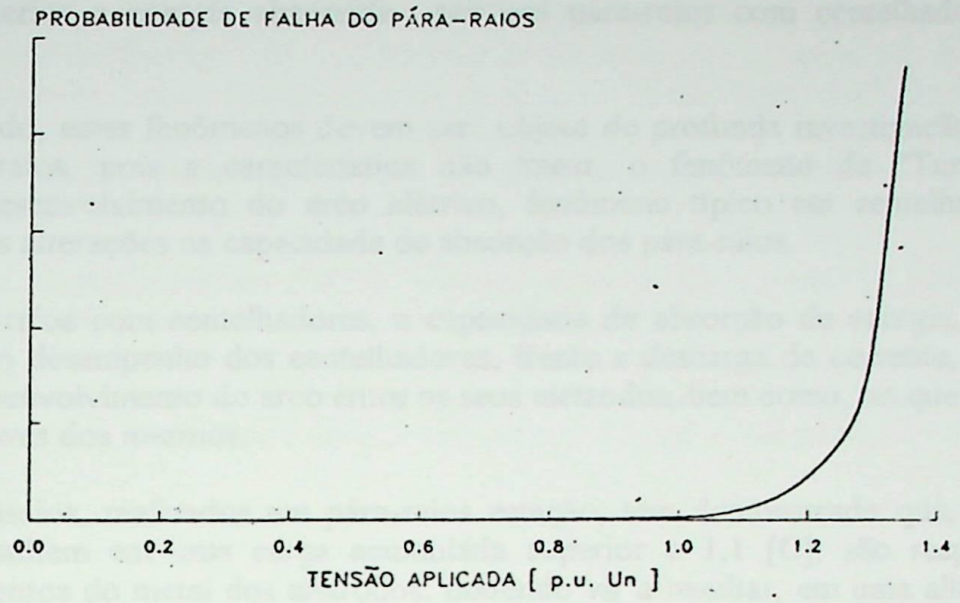


Figura 2.1.4.2 - Natureza Estatística da Taxa de Falhas de um Pára-raios de Distribuição Frente a Sobretensão em Frequência Industrial.

De acordo com a *Figura 2.1.4.2*, tem-se que, o desempenho dos pára-raios de distribuição é expresso em termos de um crescimento da probabilidade de falha versus sobretensão aplicada.

Os pára-raios classe estação e intermediária, apresentam um melhor desempenho frente a operação sob sobretensões em frequência industrial devido ao projeto de seus centelhadores, normalmente ativos.

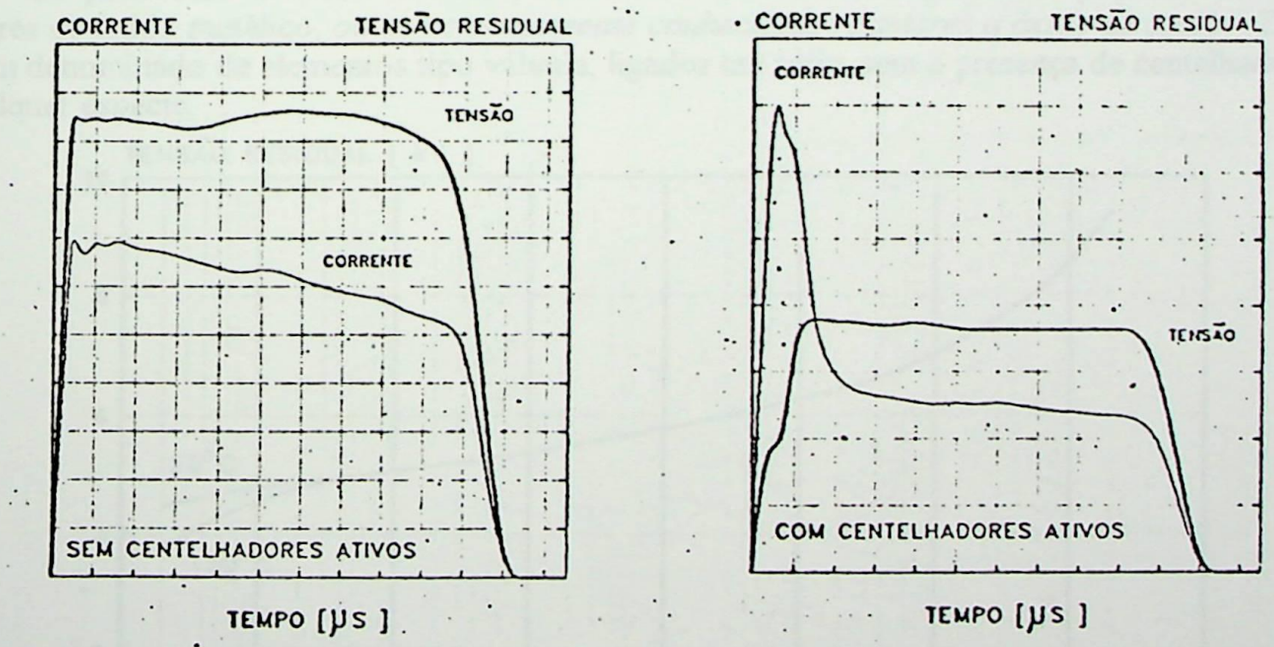


Figura 2.1.4.3 - Oscilogramas de Ensaios de Descarga de Linhas em Pára-raios Com e Sem Centelhadores

A habilidade de um pára-raios em absorver energia, depende da forma do surto de manobra, principalmente quando dos pára-raios construídos com centelhadores ativos, nos quais, o desenvolvimento da parte da queda de tensão relativa aos centelhadores, demanda um intervalo de tempo, da ordem de 400 [μs]. Conforme é mostrado na *Figura 2.1.4.3*, para uma mesma corrente de descarga, a energia desenvolvida por um pára-raios com centelhadores ativos, é

normalmente, superior a energia absorvida por um pára-raios com centelhadores múltiplos comuns.

Deste modo, estes fenômenos devem ser objeto de profunda investigação nas fases de projeto do pára-raios, pois a característica não linear, o fenômeno de "Tunneling" e os mecanismos de desenvolvimento do arco elétrico, fenômeno típico em centelhadores ativos, implica em grandes alterações na capacidade de absorção dos pára-raios.

Nos pára-raios com centelhadores, a capacidade de absorção de energia, está também relacionada, com o desempenho dos centelhadores, frente a descarga de corrente, tanto no que diz respeito ao desenvolvimento do arco entre os seus eletrodos, bem como, no que diz respeito a carga escoada através dos mesmos.

Alguns ensaios, realizados em pára-raios estação, tem demonstrado que, descargas de correntes, que resultem em uma carga acumulada superior a 1,1 [C], são responsáveis por grandes deslocamentos do metal dos eletrodos, podendo vir a resultar, em uma alteração na sua característica protetiva, que depende do projeto do centelhador do pára-raios. Este, é um dos fatores que dificultam em muito, a utilização de pára-raios com centelhadores na proteção de bancos de capacitores, sendo que, para estes casos, são construídos pára-raios especiais.

2.2 - Pára-raios a Óxido Metálico - ZnO

2.2.1 - Características Construtivas:

Os pára-raios a óxido metálico, são tradicionalmente, constituídos por um ou mais resistores de óxido metálico, *ou como comumente conhecidos, resistores a óxido de zinco - ZnO*, também denominado de elementos tipo válvula, ligados em série, sem a presença de centelhadores de qualquer espécie.

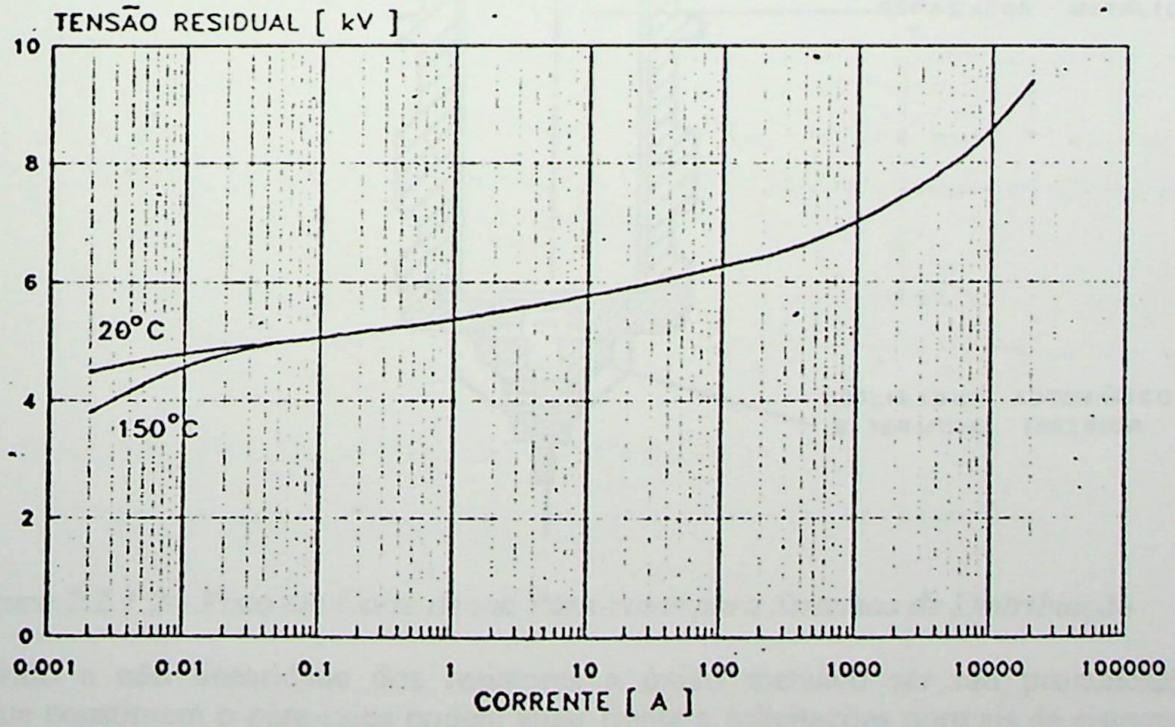


Figura 2.2.1.1 - Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga de um Resistor a Óxido Metálico para Pára-raios de Distribuição

Os resistores a óxido metálico apresentam uma variação da resistência com a tensão muito maior, quando comparada com a oferecida pelos resistores a carboneto de silício. Deste modo, respeitando-se os limites da definição de coeficiente de não linearidade determinados pelas correntes, os resistores a óxido metálico apresentam um coeficiente de não linearidade muito superior, em torno de *50*, quando comparada ao coeficiente de não linearidade dos resistores a carboneto de silício em torno de *4*.

Conforme mostra a *Figura 2.2.1.1*, sob um ponto de vista geral, os pára-raios a óxido metálico, são projetados de modo a conduzirem correntes de baixa amplitude, virtualmente, correntes de fuga, quando submetidos às condições normais do sistema, tensões fase-terra ou sobretensões em frequência industrial de pequena amplitude, sem contudo perderem a característica de escoarem correntes de alta amplitude, devido a sobretensões de manobra ou atmosférica.

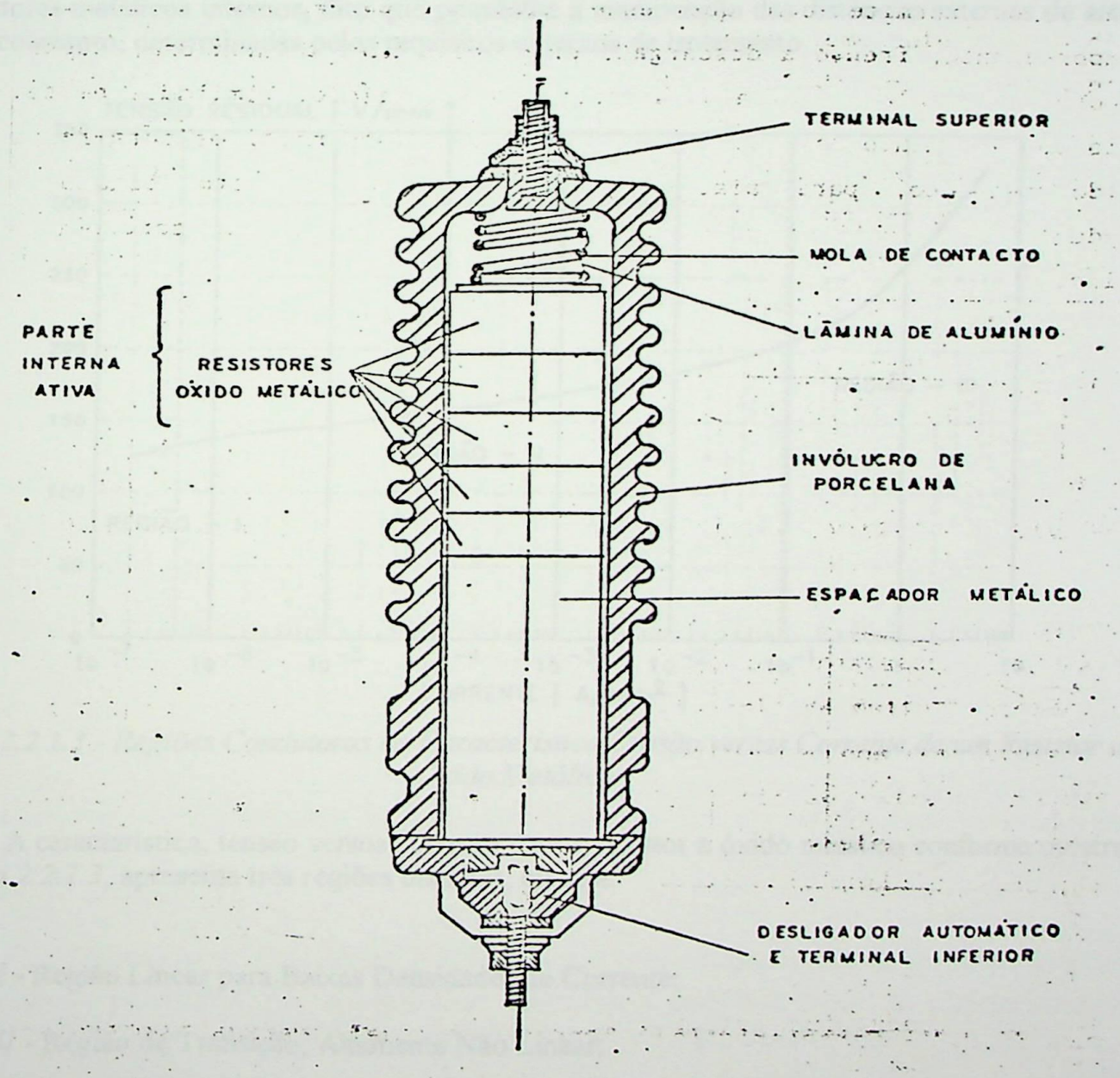


Figura 2.2.1.2 - Vista em Corte de um Pára-raios para Sistemas de Distribuição

Devido a não linearidade dos resistores a óxido metálico ser tão pronunciada os resistores que constituem o pára-raios podem atuar frente a solicitações normais de sistema e de sobretensões atmosféricas ou não, como se fossem dotados internamente de um centelhador ou

de um mecanismo interno de disparo. Deste modo os pára-raios a óxido metálico podem, e geralmente o são isentos de centelhadores de qualquer espécie.

Como o pára-raios a óxido metálico apresenta um comportamento ativo em relação ao sistema ao qual se encontra ligado, isto também, permite com que este tipo de pára-raios apresente um comportamento frente a descargas principalmente, de manobra superior ao oferecido pelos pára-raios a carboneto de silício que são limitados pelo comportamento de seus centelhadores.

O pára-raios a óxido metálico, em termos construtivos, conforme mostra a *Figura 2.2.1.2*, é extremamente similar a um pára-raios a carboneto de silício, exceto pela não existência de centelhadores. Como os resistores a óxido metálico possuem dimensões inferiores as apresentadas pelos correspondentes resistores a carboneto de silício, usualmente são utilizados espaçadores metálicos internos, fato que possibilita a manutenção das distâncias externas de arco e de escoamento, determinadas pelos requisitos externos de isolamento.

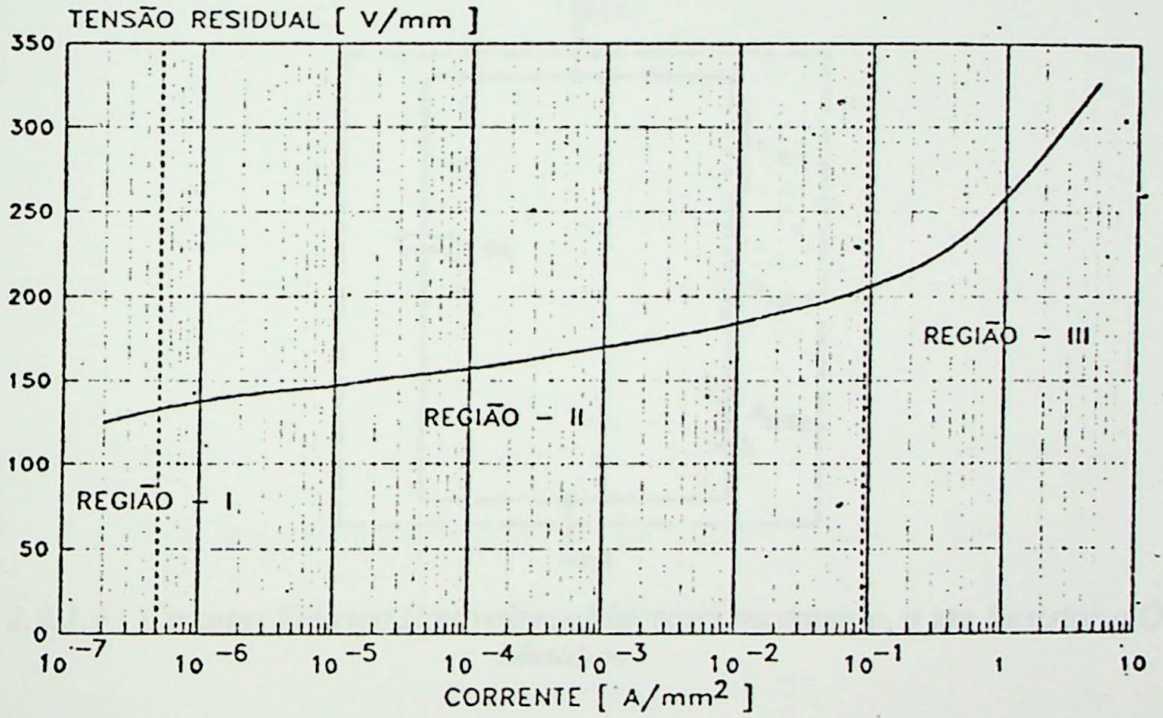


Figura 2.2.1.3 - Regiões Condutoras da Característica Tensão versus Corrente de um Resistor a Óxido Metálico

A característica, tensão versus corrente de um resistor a óxido metálico conforme mostra a *Figura 2.2.1.3*, apresenta três regiões distintas, ou seja:

Região I - Região Linear para Baixas Densidades de Corrente;

Região II - Região de Transição, Altamente Não Linear;

Região III - Região Linear para Altas Densidades de Corrente.

Na região de baixa densidade de corrente - *Região I*, a tensão aplicada resulta em um campo elétrico de baixa densidade incapaz de impor uma redução significativa na altura das barreiras de potencial, sendo que o resistor a óxido metálico apresenta o desempenho típico de um resistor linear de alto valor.

Na região de média densidade - *Região II*, o aumento da tensão aplicada e, por conseguinte, do campo elétrico impõe uma redução da altura das barreiras de potencial e assim sendo, o resistor a óxido metálico apresenta um desempenho altamente não linear.

Contudo, existe um limite para a redução da altura das barreiras de potencial, sendo que a partir deste limite, o resistor a óxido metálico, apresenta o desempenho de um resistor linear, de baixo valor, controlado pelo comportamento linear dos cristais de óxido de zinco - ZnO. Neste caso, o resistor passa a trabalhar na região de alta densidade de corrente, ou seja - *Região III*.

Corrente de Fuga e Perda de Potência:

A *Figura 2.2.1.4*, mostra o circuito elétrico equivalente ao comportamento macroscópico de um resistor a óxido metálico.

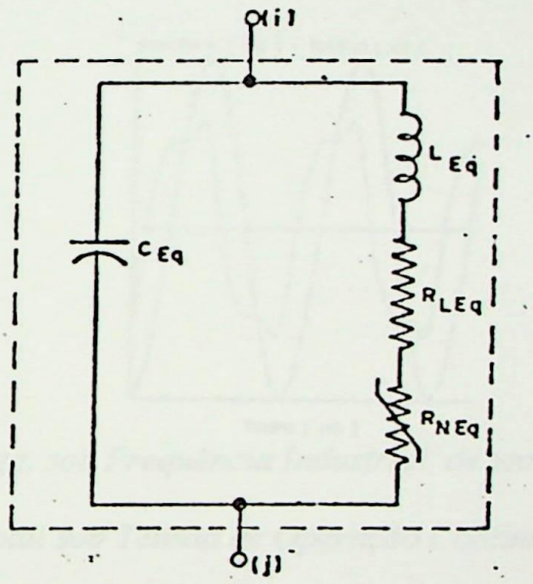


Figura 2.2.1.4 - Circuito Elétrico Equivalente Macroscopicamente, a um Resistor a Óxido Metálico

Onde:

C_{EQ} = Capacitância Equivalente - Representa o resultado da combinação série - paralelo das capacitâncias das junções, sendo que estas relacionadas, diretamente com as *"Regiões de Deplexão"* (μ capacitores).

R_{LEQ} = Resistência Linear Equivalente - Representa o comportamento linear apresentado pelos grãos de óxido de zinco é, em última análise, responsável pelo *"Up Turn"* da característica de tensão versus corrente, para altas densidades de corrente, ou seja, *Região III*.

$R_{NEQ}R_{NEQ}$ = Resistência Não Linear Equivalente - Representa o comportamento não linear oferecido pelas barreiras de potencial devido ao *"Efeito Schottky"*.

L_{EQ} = Indutância Parasita - Normalmente em torno de 10 a 20 [nH] portanto desprezável frente a solicitações em frequência industrial.

De acordo com a *Figura 2.2.1.5*, devido ao alto valor de resistência oferecido pelas barreiras de potencial, para baixos valores de tensão aplicada, R_{NEQ} , circula por um resistor a óxido metálico operando na *Região I*, uma corrente de fuga, predominantemente capacitiva, ou seja adiantada da tensão.

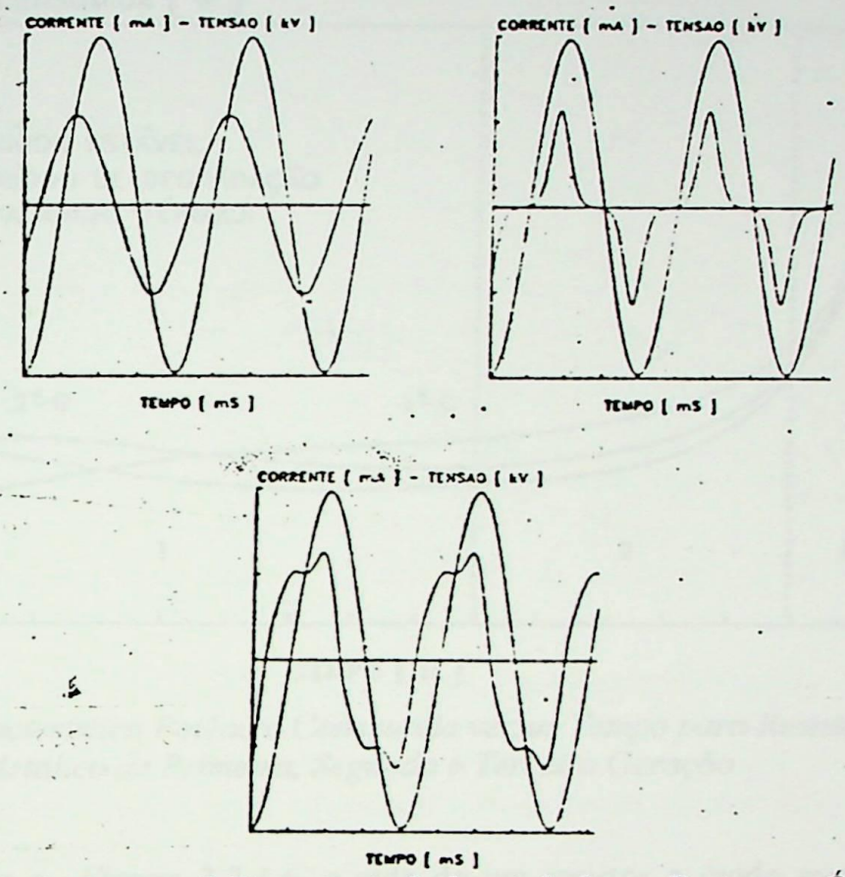


Figura 2.2.1.5 - Corrente de Fuga, sob Frequência Industrial, de um Resistor a Óxido Metálico

a - Corrente Total sob Tensão de Operação Contínua - COV

b - Componente Resistiva de (a)

c - Corrente Total sob 1,50 x COV

A *Figura 2.2.1.5*, mostra que o comportamento resistivo da corrente não é senoidal, devido a característica não linear destes resistores e que para níveis de tensões mais elevadas, a não linearidade se torna a exemplo da *Figura 2.2.1.3*, dentro de determinados limites mais acentuada.

Estes fatos implicam, que a componente resistiva da corrente de fuga, em termos de valor de pico, pode ser medida através de oscilogramas de tensão aplicada e corrente de fuga, bastando obter o valor da corrente para o instante de tempo onde o tensão é zero.

Envelhecimento e Degradação:

A exemplo de qualquer dielétrico, os resistores a óxido metálico, quando submetidos a sua tensão nominal de operação em frequência industrial, apresentam consumo de potência, vinculado com a componente resistiva da corrente de fuga, crescente, ao longo do tempo, fato que caracteriza um processo de envelhecimento.

Até o presente momento existe, a rigor, três gerações de resistores a óxido metálico sendo que, o comportamento frente a uma determinada tensão em frequência industrial, conforme

mostra a *Figura 2.2.1.6*, indica que os resistores mais modernos apresentam uma característica intrínseca a se auto estabilizarem, fato que deve ser verificado, durante a aquisição de novos tipos de pára-raios que operam sem centelhadores série.

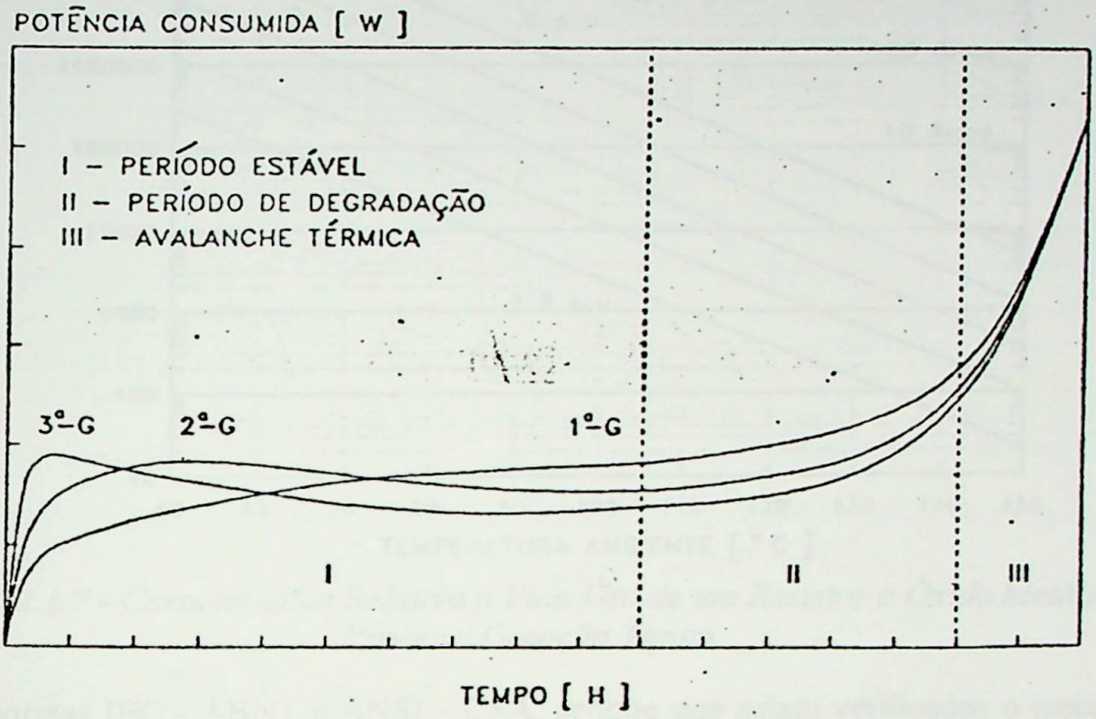


Figura 2.2.1.6 - Característica Potência Consumida versus Tempo para Resistores a Óxido Metálico de Primeira, Segunda e Terceira Geração

Ainda, conforme a *Figura 2.2.1.6*, a vida de um resistor a óxido metálico pode ser dividida em três regiões, ou seja:

Região I - Região estável, na qual se processa o envelhecimento do resistor;

Região II - Região na qual denota-se os primeiros traços de instabilidade, marcada por um ligeiro incremento, na taxa de crescimento da corrente de fuga com manutenção precária do equilíbrio térmico;

Região III - Região instável, marcada com um alto incremento da taxa de crescimento da corrente de fuga e perda do equilíbrio térmico, onde se verifica a ocorrência do fenômeno *"Thermal Runaway"*.

A teoria de envelhecimento dos resistores a óxido metálico, definida sobre os resistores de primeira geração, a exemplo da de dielétricos, é baseada no *"Método Arrhenius - Dakin"*, ou seja, na idéia de vida útil.

Sendo assim, idealmente a *Figura 2.2.1.7* mostra que, deve ser levantada para várias tensões aplicadas, o tempo necessário para que por exemplo, o consumo de potência seja duas vezes superior ao inicial. Conforme é possível notar, este conceito é deveras orientativo, uma vez que, o parâmetro determinante do fim de vida útil dos resistores é um parâmetro intrínseco ao seu processo de manufatura e ao método de construção do pára-raios e, por conseguinte, em específico, aos fabricantes.

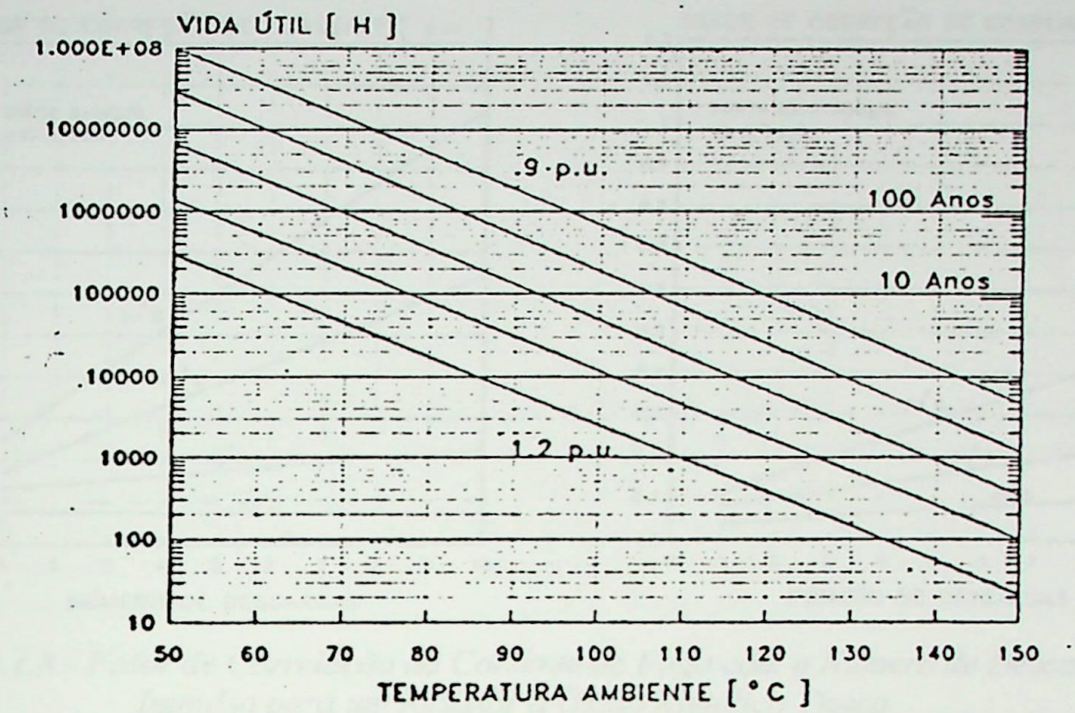


Figura 2.2.1.7 - Característica Relativa a Vida Útil de um Resistor a Óxido Metálico de Primeira Geração Típico

As normas IEC - ABNT e ANSI - CSA, propõe que sejam verificados o mecanismo de envelhecimento dos resistores o óxido metálico através de um *"Envelhecimento Artificial"*, fazendo, com que os mesmos sejam submetidos a uma tensão de operação por 1000 [hs] sob uma temperatura de 115 [°C], fato que procura reproduzir a hipótese de funcionamento contínuo por 40 anos, a uma temperatura de 40 [°C].

Sendo assim, nos casos onde a potência consumida aumenta com o decorrer do tempo, a relação entre a potência consumida no instante final e inicial define o fator de correção, para as tensões em frequência industrial, aplicadas aos resistores novos. Nos casos em que a potência consumida diminui com o decorrer do tempo, o fator de correção não é utilizado para as tensões em frequência industrial.

Além das solicitações em frequência industrial, os resistores a óxido metálico utilizados em pára-raios sem centelhadores série, se encontram submetidos a esforços, e por conseguinte, envelhecimento provenientes de descargas aleatórias de surtos de corrente de origem atmosférica e de manobra.

A *Figura 2.2.1.8* mostra que o envelhecimento dos resistores a óxido metálico, frente a descargas de surtos de corrente dependem basicamente dos seguintes fatores:

- Forma do Impulso;
- Densidade de Corrente Através do Resistor;
- Temperatura do Resistor;
- Polaridade dos Surtos; e
- Número de Descargas.

Conforme mostra a *Figura 2.2.1.8*, quanto maior for a densidade de corrente imposta aos resistores a óxido metálico, fato compatível com impulsos de origem atmosférica, maiores serão os incrementos na corrente de fuga.

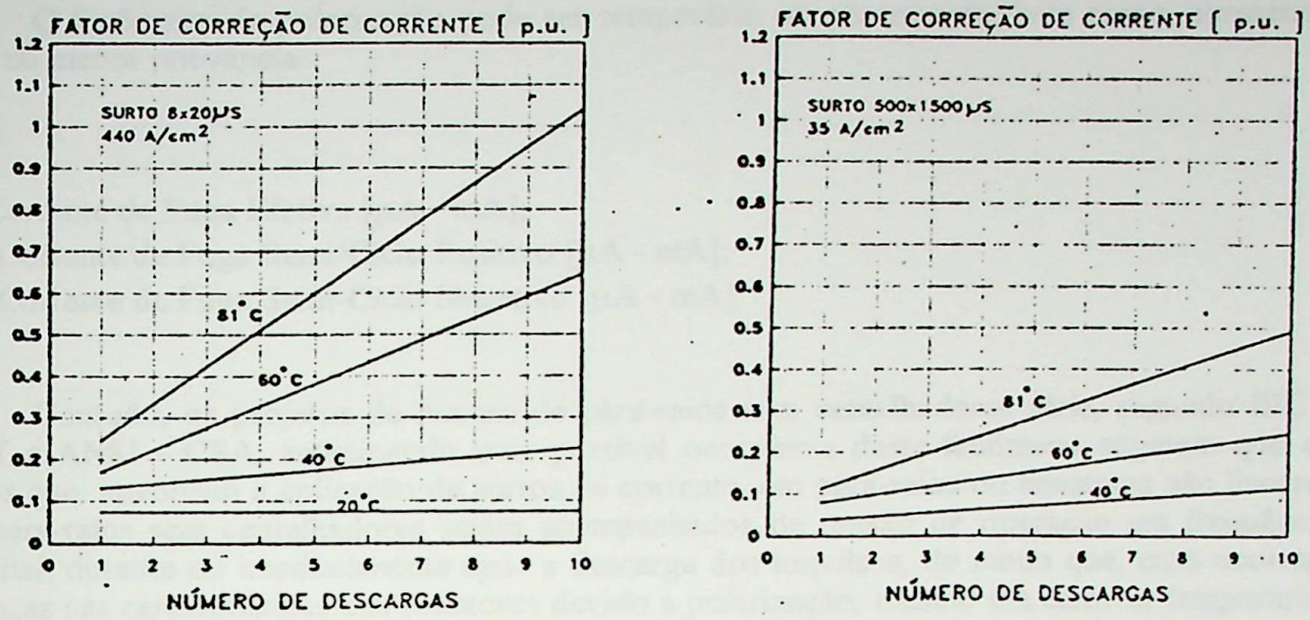


Figura 2.2.1.8 - Fator de Correlação da Corrente de Fuga com o Número de Descargas de Impulso para um Resistor a Óxido Metálico Típico.
a - Impulso Atmosférico;
b - Impulso de Manobra.

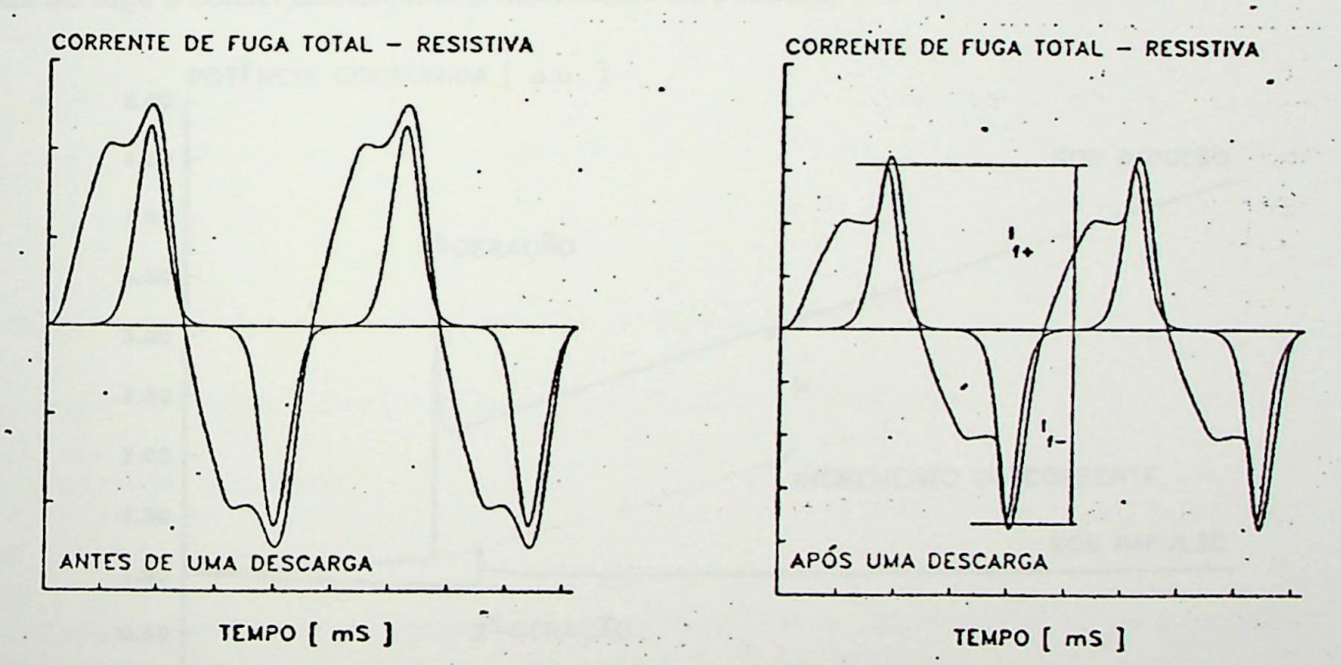


Figura 2.2.1.9 - Efeito da Polarização da Corrente de Fuga em um Resistor a Óxido Metálico Típico.

Os impulsos atmosféricos de elevada amplitude, podem resultar em alterações nas barreiras de potencial de magnitude tal que os resistores passam a apresentar uma direção preferencial de condução, ou seja, *"polarização"*, conforme mostra a *Figura 2.2.1.9*.

No caso de polarização, é usual, calcular a corrente de fuga através dos resistores a óxido metálico, conforme a seguir:

$$I_F = \frac{I_{F+} + I_{F-}}{2} \qquad (2.2.1.1)$$

O fenômeno de polarização pode ser temporário ou permanente, bem como, apresentar maior ou menor relevância.

Onde:

I_F = Corrente de Fuga Efetiva [μA - mA];
I_{F+} = Corrente de Fuga Semi-Ciclo Positivo [μA - mA];
I_{F-} = Corrente de Fuga Semi-Ciclo Negativo [μA - mA].

Contudo, os projetos de Norma de pára-raios sem centelhadores série, segundo IEC - ABNT e ANSI - CSA, antecipando uma possível ocorrência deste fenômeno sugerem que os ensaios que envolvam a aplicação de surtos de corrente, em pára-raios ou resistores não lineares para pára-raios sem centelhadores sejam acompanhados de tensão de operação em frequência industrial, durante ou imediatamente após a descarga dos impulsos, de modo que, caso ocorram mudanças nas características dos resistores devido a polarização, mesmo em carácter temporário, as mesmas sejam verificadas.

Caso as características dos resistores a óxido metálico, sejam alteradas, devido ao envelhecimento ou a degradação, pelas descargas de impulso o resultado final é o incremento da corrente de fuga e consequentemente o incremento da potência.

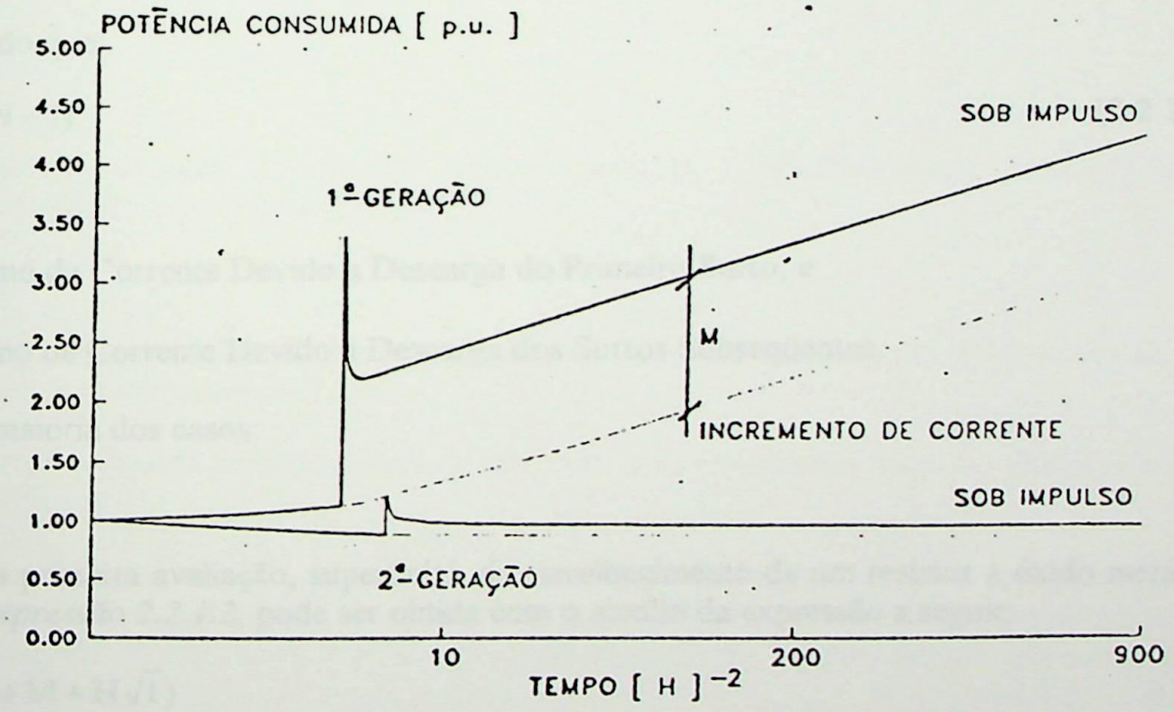


Figura 2.2.1.10 - Efeito da Descarga de um Impulso de Corrente na Corrente de Fuga de Resistores a Óxido Metálico de Primeira e de Segunda Geração

A *Figura 2.2.1.10*, o efeito da descarga de um impulso de corrente em resistores de primeira e segunda geração, bem como, a melhoria no desempenho obtido com o auxílio de novas técnicas de manufatura. Neste caso é possível observar que o incremento de corrente, frente as mesmas solicitações, é substancialmente inferior nos resistores a óxido metálico de projeto mais recente.

De um modo geral, o envelhecimento de um resistor a óxido metálico, pode ser dividido na evolução da corrente de fuga devido a aplicação contínua de tensão em frequência industrial e

na evolução de corrente de fuga devido a descargas de surtos, quer de manobra, quer atmosféricos.

A evolução da corrente de fuga de um resistor a óxido metálico em termos matemáticos é fornecida pela seguinte expressão:

$$I_F(t) = I_{F0}(1 + H\sqrt{t}) + I_a(t) + MI_{F0} \qquad (2.2.1.2)$$

Onde:

$I_F(t)$ = Corrente de Fuga para um instante de tempo (t) [mA - μA];

I_{F0} = Corrente de Fuga Inicial [mA - μA];

H = Constante de Proporcionalidade;

$I_a(t)$ = Expressão que Descreve o Decréscimo de Corrente Existente nos Resistores mais Modernos
[mA - μA]; e

M = Acréscimo de Corrente Devido ao Envelhecimento ou Degradação Frente a Descarga de Surtos.

Sendo que:

$$M = \alpha + \beta(N - 1) \qquad (2.2.1.3)$$

Onde:

α = Acréscimo de Corrente Devido a Descarga do Primeiro Surto; e

β = Acréscimo de Corrente Devido a Descarga dos Surtos Subseqüentes.

Na maioria dos casos:

$\alpha > \beta$

Uma primeira avaliação, superficial, do envelhecimento de um resistor a óxido metálico, retirada da *expressão 2.2.1.2*, pode ser obtida com o auxílio da expressão a seguir:

$$I_F(t) = I_{F0}(1 + M + H\sqrt{t}) \qquad (2.2.1.4)$$

Onde:

$$M = \alpha_{(maior_{surto})} + \sum_{i=1}^{k} \beta_{(demais_{surtos})}$$

A *Tabela VI* mostra o aumento esperado da corrente de fuga para os resistores a óxido metálico de primeira e segunda geração, sendo os mesmos submetidos a um conjunto de surtos padrão por um período de 20 anos.

Tipo de Resistor		1ª Geração	2ª Geração
$H\sqrt{t}$	t=20 anos	2,55	* $\cong 0$
M	65 [kA] 4 x 10 [μs] 2 Descargas	0,41	0,25
	10 [kA] 8 x 20 [μs] 100 Descargas	0,26	0,08
	1 [kA] 500 x 1500 [μs] 100 Descargas	0,10	0,04
Fator de Correção $1+M+H\sqrt{t}$		4,32	1,37

Tabela VI - Aumento da Corrente de Fuga em Resistores a Óxido Metálico de Primeira e SegundaGeração

Onde:

**Para um resistor a óxido metálico de segunda geração, o envelhecimento é muito pequeno para ser determinado experimentalmente.*

Comparando -se o envelhecimento total, previsto para ambas as gerações de resistores a óxido metálico, é possível concluir que:

- Os resistores de segunda geração e subsequentes são mais estáveis em todos os níveis, que os de primeira geração; e

- Enquanto a vida útil de um resistor de primeira geração é praticamente determinada pelo envelhecimento frente a solicitação em frequência industrial, nos resistores de segunda geração e subsequentes a ela é determinada pelo envelhecimento frente a solicitações provenientes de descargas de surtos.

Características Térmicas e a Estabilidade Térmica dos Pára-raios a Óxido Metálico:

Ao contrário dos pára-raios com centelhadores série, os resistores a óxido metálico utilizados em pára-raios sem centelhadores ou com centelhadores paralelo *"gap's shunt"*, são os elementos responsáveis pelo controle da corrente de fuga através do pára-raios e, sendo assim, devido a natureza semi-condutora dos mesmos, é necessário que exista um equilíbrio entre a potência consumida e a potência dissipada. Este fato, implica na necessidade de se conhecer e determinar as características térmicas do sistema formado pelos resistores, invólucro e meio

ambiente, os quais são fatores responsáveis pelo comportamento térmico dos pára-raios assim construídos.

Estabilidade Térmica:

Nos sistema elétrico em operação normal os pára-raios a óxido metálico sofrem um processo de aquecimento devido a potência consumida sob frequência industrial, bem como, devido a radiação solar.

Apresentando os resistores a óxido metálico características semi-condutoras, qualquer incremento na temperatura de operação dos pára-raios, resulta em uma elevação da corrente de fuga e, consequentemente, na potência consumida, o que implica em um fenômeno cíclico, com tendência à instabilidade.

Uma das mais importantes características relativas no projeto de um pára-raios sem centelhadores ou com centelhadores paralelo, conforme mostra a *Figura 2.2.1.11*, é a característica "Potência versus Temperatura". Esta característica define as regiões operativas, o consumo, bem como, a dissipação de potência, para uma tensão aplicada fixa, aumenta com a temperatura.

Na *Figura 2.2.1.11*, existe três regiões de operação distintas, delimitadas pelas duas interseções entre a característica de potência consumida pelos resistores a óxido metálico, que define a capacidade de geração de calor do pára-raios, e a característica de potência dissipada pelo invólucro, que, por sua vez define a capacidade de dissipação de calor do pára-raios.

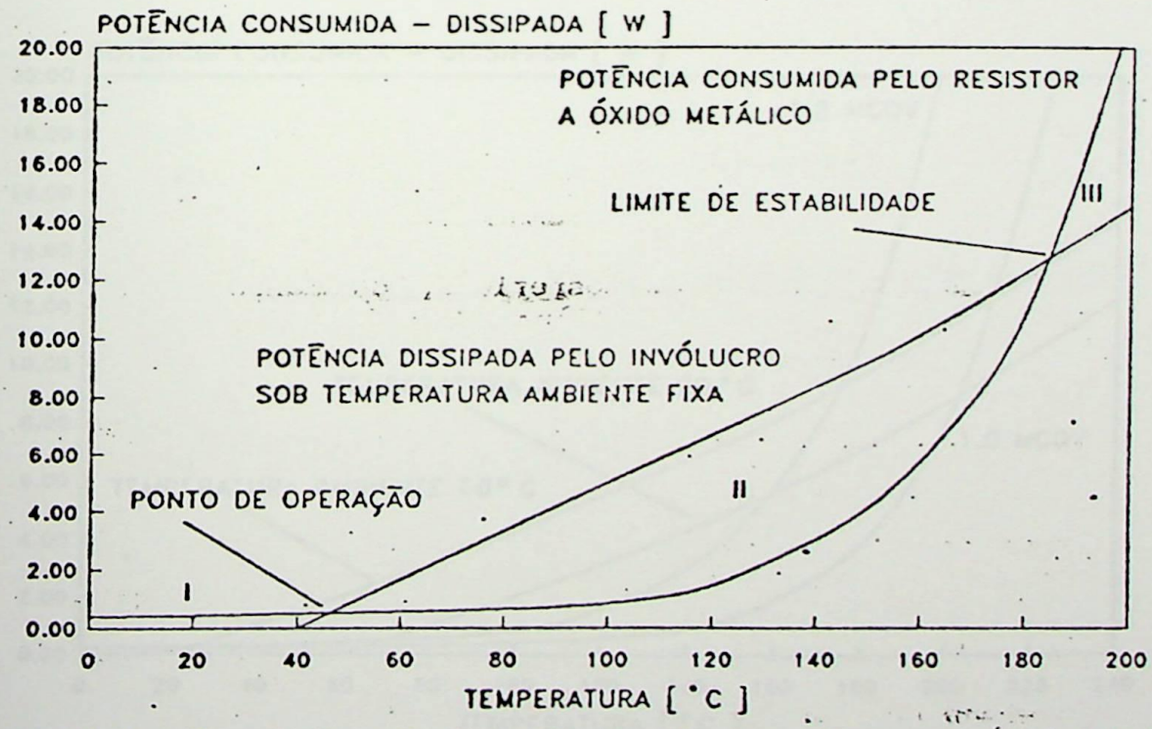


Figura 2.2.1.11 - Característica Potência Consumida por um Resistor a Óxido Metálico, Potência Dissipada por um Invólucro, Típicos, versus Temperatura

Na *Região I*, a capacidade de geração de calor é superior a capacidade de dissipação de calor do pára-raios e, deste modo, a temperatura do mesmo cresce, até atingir o ponto de operação.

Na *Região II*, a capacidade de dissipação de calor é superior a capacidade de geração de calor do pára-raios e, deste modo, o mesmo apresenta uma tendência intrínseca a diminuir a sua temperatura de operação, e consequentemente, retornar a um ponto de equilíbrio estável.

Na *Região III*, a capacidade de dissipação de calor é inferior a capacidade de geração de calor do pára-raios, sendo assim, o mesmo, devido a natureza semi-condutora dos resistores a óxido metálico, apresenta uma tendência intrínseca a um rápido aumento de sua temperatura, fato que caracteriza o fenômeno denominado *"Thermal Runaway"*.

Logo, a interseção entre a *Região I* e a *Região II*, define um ponto denominado *"Ponto de Operação"*, e a interseção entre a *Região II* e a *Região III*, define um ponto denominado *"Ponto Limite de Estabilidade Térmica"* e, a partir deste ponto o pára-raios entra em regime de *"Thermal Runaway"*.

Teoricamente os pára-raios, suportam variações de temperatura até o seu limite de estabilidade térmica, provenientes de descarga de surtos atmosféricos, de manobra ou mesmo de sobretensões em frequência industrial pois, caso o ponto de estabilidade térmica não seja ultrapassado, a temperatura sempre retorna para o valor de operação estável.

Sendo assim, teoricamente, a diferença, ou seja, a margem de temperatura entre o*"Ponto de Operação"*e o *"Ponto Limite de Estabilidade Térmica"* define a *"Máxima Capacidade Teórica de Absorção de Energia"* de um pára-raios a óxido metálico sem centelhador ou com centelhadores paralelo.

A *Figura 2.2.1.12* mostra como o *"Ponto de Operação"* e o *"Ponto Limite de Estabilidade Térmica"* são afetados pelas variações de tensão aplicada aos pára-raios e a temperatura.

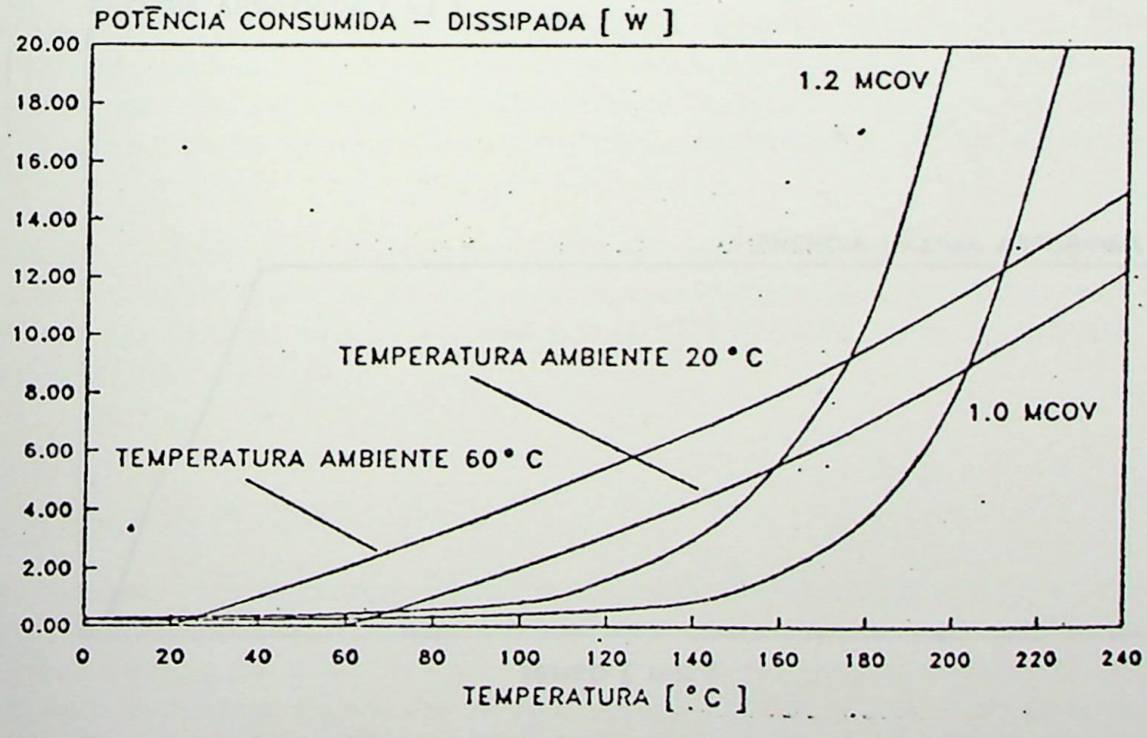


Figura 2.2.1.12 - Efeito das Variações de Tensão e Temperatura na Característica Potência versus Temperatura de um Pára-raios a Óxido Metálico

O incremento da temperatura ambiente ou da tensão aplicada, reduz a margem de elevação de temperatura e, sendo assim, a capacidade de absorção de energia dos pára-raios.

No caso extremo, mais usual, caso a tensão seja elevada o suficiente, as características de dissipação e geração de calor do pára-raios, se tornam assintóticas, ou seja, as duas características passam a apresentar um único ponto de interseção. Devido a inexistência de um ponto de equilíbrio térmico, a partir deste nível de tensão, o pára-raios apresenta um comportamento inerentemente instável. Isto implica na necessidade de se impor um limite de tempo de exposição dos mesmos frente a estas condições.

Na prática, isto resulta na definição de uma característica que relaciona a suportabilidade frente a sobretensões em frequência industrial de um pára-raios em função do tempo.

Capacidade de Absorção de Energia de um Pára-raios a Óxido Metálico:

Em estudos sobre o problema de absorção de energia por um pára-raios a óxido metálico, feitos principalmente nos últimos anos em "TNA" e "EMTP", normalmente, para sistema de Alta e Extra Alta Tensão, foi observada a existência de vários modos distintos de absorção de energia, que alguns destes não apresentam, pelo menos a primeira vista, nenhuma semelhança com os resultados tradicionalmente obtidos quando da utilização dos pára-raios a carboneto de silício.

Isto se deve obviamente, a ausência, de centelhadores nestes pára-raios, fato que permite com que os mesmos façam parte ativa do processo de limitação das sobretensões.

Dentro deste contexto, a análise dos oscilogramas, energia absorvida por um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores podem ser agrupados em três grandes classes ou modos:

1 - Modo de Absorção de Energia Tipo-I:

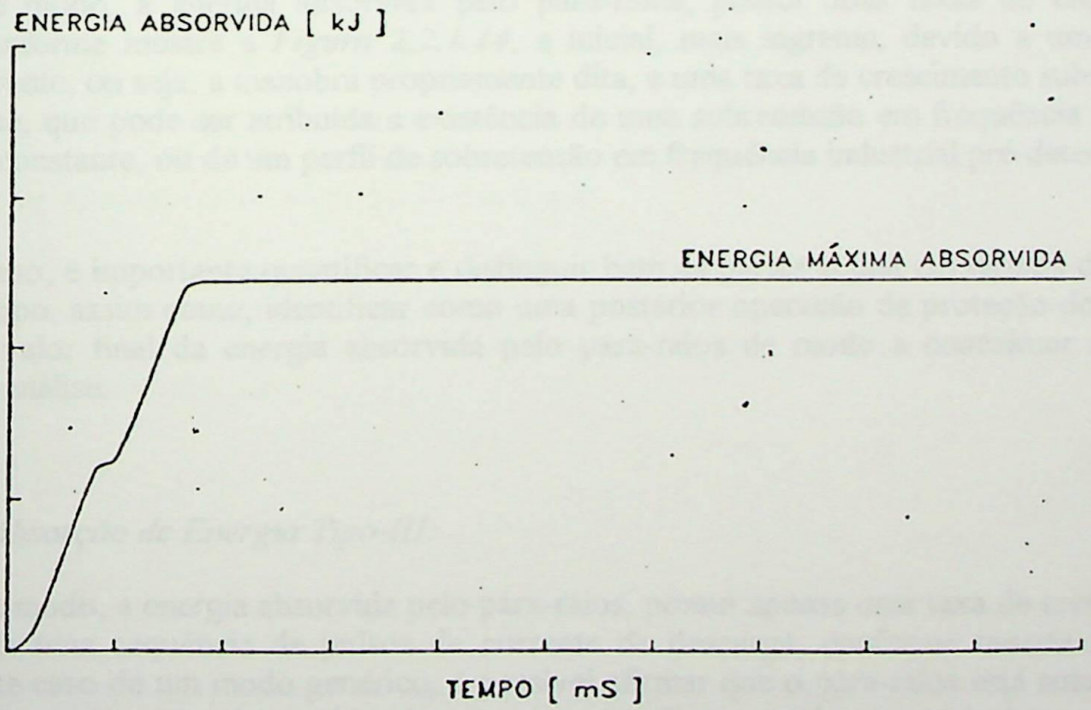


Figura 2.2.1.13 - Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo - I

Neste modo, a energia absorvida pelo pára-raios, possui uma única taxa de crescimento e apresenta um valor bem definido pois, conforme mostra a *Figura 2.2.1.13*, apenas alguns pulsos de corrente de descarga circulam pelo pára-raios. O caso em questão, pode ser atribuído a um

surto de manobra, não apresentando, a princípio problema de grandes proporções, visto que, em última análise, não existe uma depedência entre o valor da energia absorvida pelo pára-raios e uma posterior operação da proteção do sistema.

2 - Modo de Absorção de Energia Tipo-II:

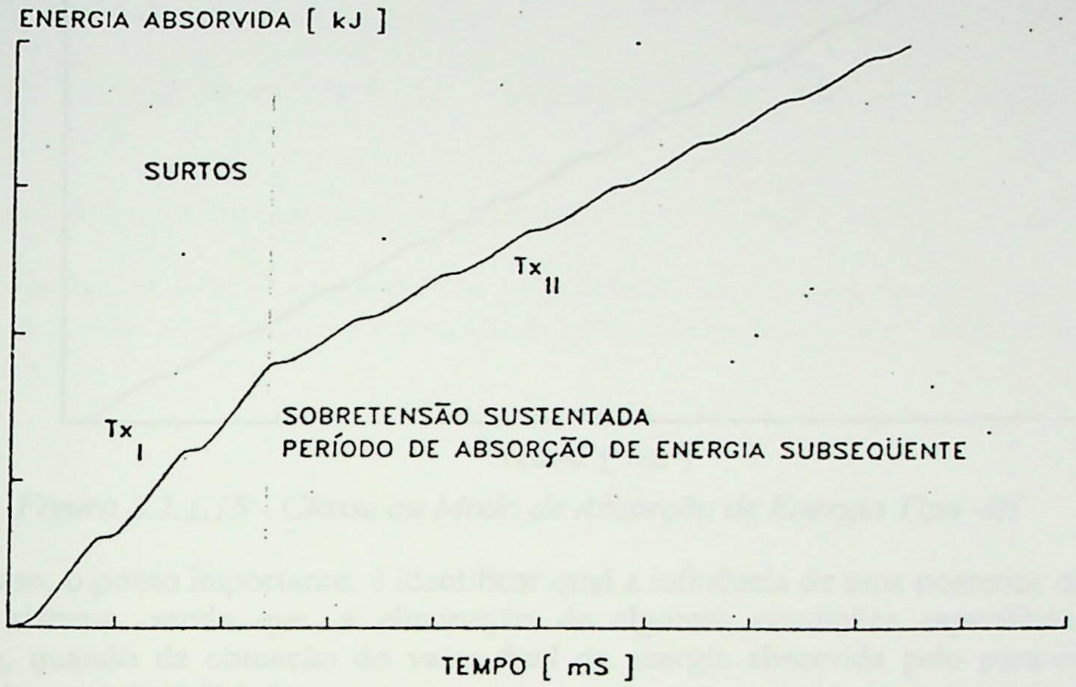


Figura 2.2.1.14 - Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo - II

Neste modo, a energia absorvida pelo pára-raios, possui duas taxas de crescimento diferentes, conforme mostra a *Figura 2.2.1.14*, a inicial, mais íngreme, devido a um ou mais pulsos de corrente, ou seja, a manobra propriamente dita, e uma taxa de crescimento subsequente, menos íngreme, que pode ser atribuída a existência de uma sobretensão em frequência industrial de amplitude constante, ou de um perfil de sobretensão em frequência industrial pré-determinado.

No caso, é importante quantificar e distinguir bem as partes acima em termos de tensão, corrente e tempo, assim como, identificar como uma posterior operação da proteção do sistema, influenciar o valor final da energia absorvida pelo pára-raios de modo a conceituar melhor o problema sob análise.

3 - Modo de Absorção de Energia Tipo-III:

Neste modo, a energia absorvida pelo pára-raios, possui apenas uma taxa de crescimento, proveniente de uma sequência de pulsos de corrente de descarga, conforme mostra a *Figura 2.2.1.15*. Neste caso de um modo genérico, é possível afirmar que o pára-raios está submetido, a cada semi-ciclo, à descarga de um impulso de corrente. Deste modo, é possível, considerar o fenômeno como proveniente de uma sobretensão em frequência industrial de amplitude constante ou de um perfil de sobretensão em frequência industrial pré-determinado. Neste caso, uma boa indicação da severidade da solicitação imposta ao pára-raios, pode ser obtida com o auxílio da taxa de crescimento da energia absorvida pelo mesmo.

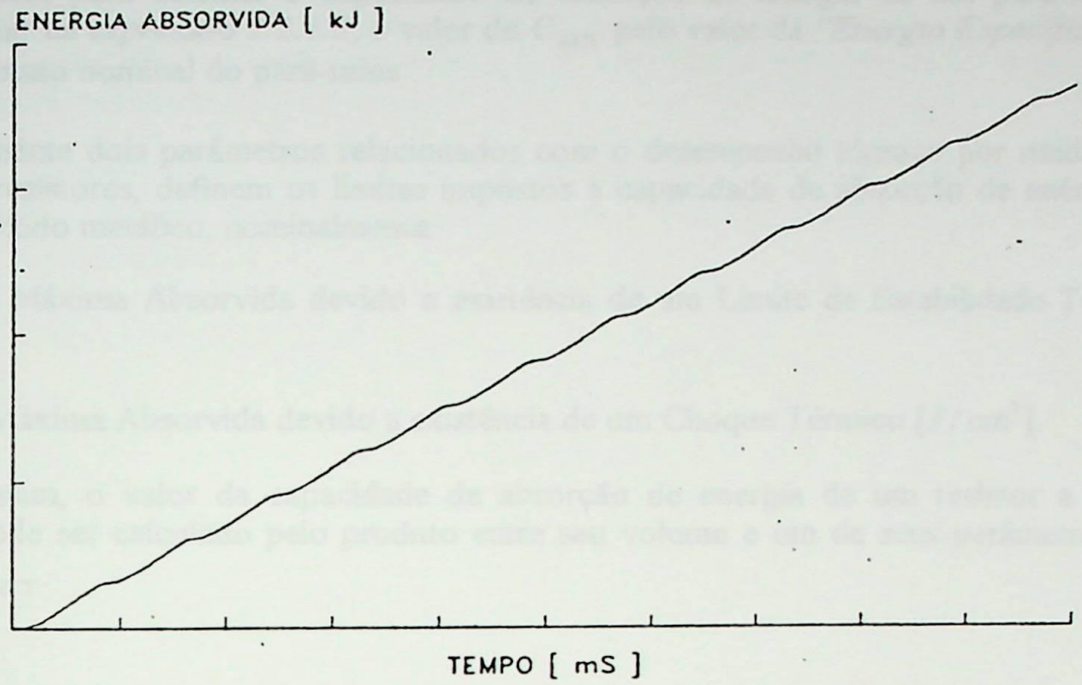


Figura 2.2.1.15 - Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo -III

No caso, o ponto importante, é identificar qual a influência de uma posterior operação da proteção do sistema, sendo que, a eliminação de algumas condições específicas pode ser determinística, quando da obtenção do valor final da energia absorvida pelo pára-raios e, por conseguinte, de sua aplicabilidade.

Capacidade de Absorção de Energia de um Pára-raios a Óxido Metálico:

Os pára-raios a óxido metálico possuem uma capacidade de absorção de energia superior a de um pára-raios a carboneto de silício, devido, a ausência de centelhadores, que impõem severas limitações nos valores de corrente de descarga.

Nos projetos de pára-raios a óxido metálico, os resistores são ligados em série, formando colunas, ou em casos muito especiais quando é necessário uma elevada capacidade de absorção de energia em paralelo. A capacidade de absorção de energia de um pára raios pode ser determinada através da expressão:

$$C_{AE} = C_{AER} N_{RS} N_{CP} F_{RC} \qquad (2.2.1.5)$$

Onde:

C_{AE} = Capacidade de absorção de energia de um pára-raios [J];
C_{AER} = Capacidade de absorção de energia de um resistor [J];
N_{RS} = Número de resistores em série, formando uma coluna de resistores;
N_{CP} = Número de colunas de resistores em paralelo formando o pára-raios completo; e
F_{RC} = Fator de redução da capacidade de absorção de energia devido a conexão de N_{CP} colunas em paralelo ($0,80 < F_{RC} < 0,90$).

Os fabricantes indicam a capacidade de absorção de energia de um pára-raios a óxido metálico, através de um parâmetro denominado *"Energia Específica"*, que relaciona a capacidade de absorção de energia de projeto com sua tensão nominal [kJ/kV].

Neste caso, para calcular a capacidade de absorção de energia de um pára-raios, é suficiente substituir na *expressão 2.2.1.5*, o valor de C_{AER} pelo valor da *"Energia Específica"* e o valor N_{RS} pela tensão nominal do pára-raios.

Teóricamente dois parâmetros relacionados com o desempenho térmico por unidade de volume de seus resistores, definem os limites impostos à capacidade de absorção de energia de um pára-raios a óxido metálico, nominalmente:

E_{MLET} = Energia Máxima Absorvida devido a existência de um Limite de Estabilidade Térmica [J / cm^3]

E_{MCT} = Energia Máxima Absorvida devido a existência de um Choque Térmico [J / cm^3].

Sendo assim, o valor da capacidade de absorção de energia de um resistor a óxido metálico C_{AER} pode ser calculado pelo produto entre seu volume e um de seus parâmetros, ou seja, E_{MLET} ou E_{MCT}.

Capacidade de Absorção de Energia Devido ao Limite de Estabilidade Térmica:

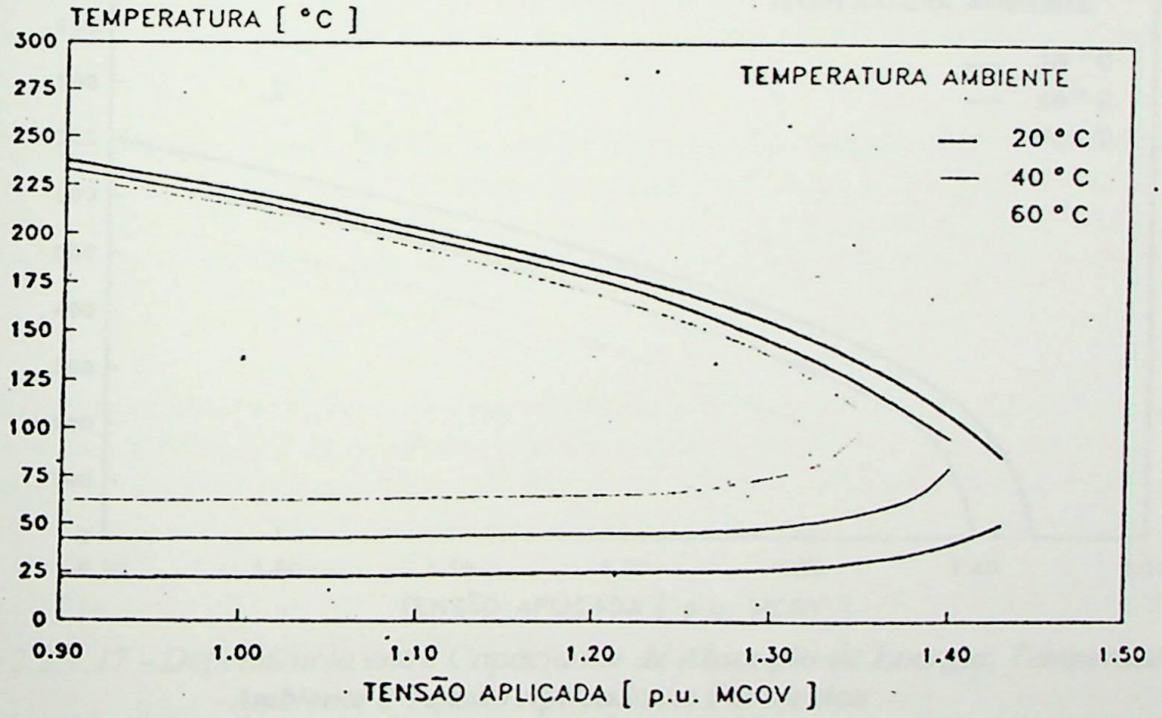


Figura 2.2.1.16 - Dependência da Temperatura de Operação e Limite de Estabilidade com Tensão Aplicada e a Temperatura Ambiente

A Capacidade de Absorção de Energia de um resistor não linear à Óxido metálico com base na existência de um Limite de Estabilidade Térmica; é definida como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de seu ponto de operação estável para seu ponto limite de operação. Este conceito deve ser aplicado principalmente, quando a taxa de crescimento da energia absorvida pelo pára-raios é suficientemente baixa de modo a permitir a elevação uniforme de temperatura dos resistores, evitando a formação de gradientes térmicos no interior dos mesmos.

A *Figura 2.2.1.16* mostra a variação das temperaturas definidas pelo *"Ponto de Operação"* e pelo *"Ponto Limite de Estabilidade Térmica"* respectivamente, *"Temperatura de*

Operação" e *"Temperatura Limite de Estabilidade"* em função da temperatura ambiente e da tensão aplicada, onde pode-se observar que, enquanto a *"Temperatura Limite de Estabilidade"* virtualmente independe da temperatura ambiente, a *"Temperatura de Operação"* mantém uma determinada proporcionalidade com a mesma.

Ainda conforme *Figura 2.2.1.16*, é possível calcular a energia absorvida devido a existência de uma temperatura limite de estabilidade para a operação estável E_{MLET} em $[J/cm^3]$, conforme mostra a expressão a seguir:

$$E_{MLET} = 2,59(\theta_{LMT} - \theta_{OP}) + 0,0022(\theta_{LMT}^{\ 2} - \theta_{OP}^{\ 2}) \qquad (2.2.1.6)$$

Onde:

θ_{OP} = Temperatura de operação [°C];

θ_{LMT} = Temperatura Limite de Operação [°C].

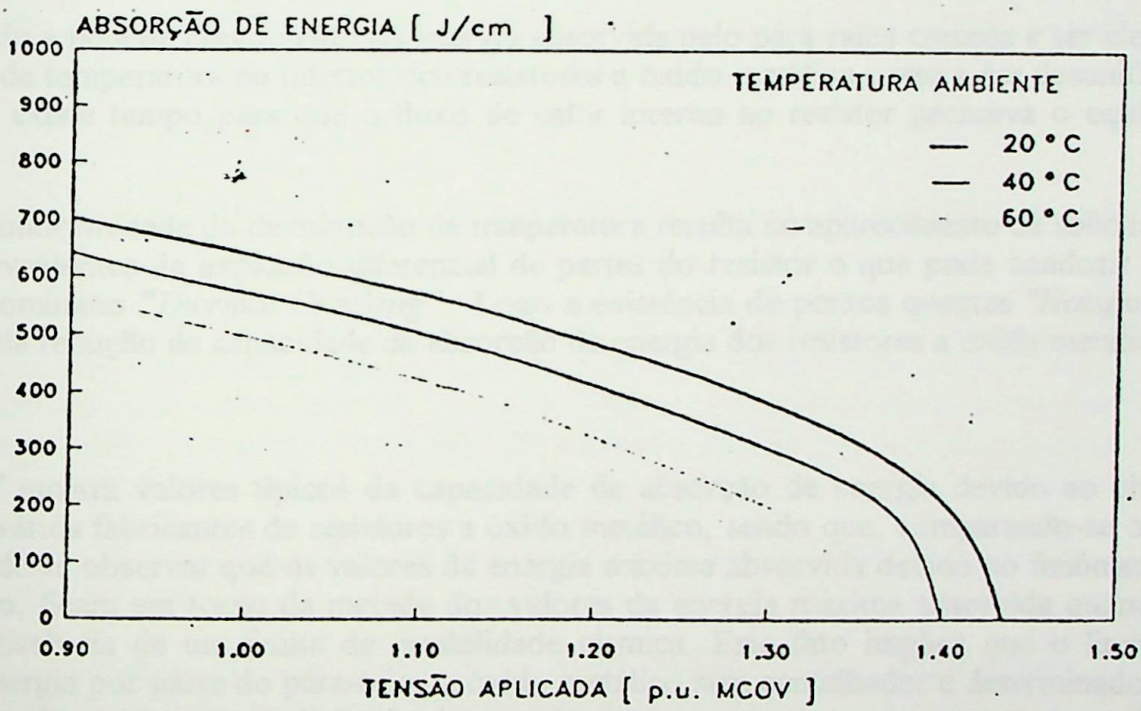


Figura 2.2.1.17 - Dependência entre Capacidade de Absorção de Energia, Temperatura Ambiente e Tensão Aplicada ao Pára-raios

Convém ressaltar que a *equação 2.2.1.6* é válida somente para um determinado projeto de resistor a óxido metálico. Contudo, através da mesma é obtida a característica mostrada na *Figura 2.2.1.17*, onde pode-se observar a dependência entre a capacidade de absorção de energia em função da temperatura ambiente e da tensão aplicada ao pára-raios.

A *Tabela VII* mostra valores típicos de capacidade de absorção de energia devido ao limite térmico, sob tensão de operação contínua, para outros tipos de projetos de pára-raios.

Classe do Pára-raios	E_{MLET} [J / cm^3]
Distribuição	600 - 700
Intermediária	500 - 600
Estação	400 - 500

Tabela VII - Energia Máxima Absorvida Devido Limite de Estabilidade Térmica para Diversas Classes de Pára-raios

Capacidade de Absorção Devido ao Choque Térmico:

Quando a taxa de crescimento de energia absorvida pelo pára-raios começa a ser elevada, a distribuição de temperatura no interior dos resistores a óxido metálico passa a ser desuniforme, visto que não existe tempo para que o fluxo de calor interno ao resistor promova o equilíbrio térmico.

A desuniformidade da distribuição de temperatura resulta no aparecimento de solicitações mecânicas provenientes da expansão diferencial de partes do resistor o que pode conduzir a um fenômeno denominado *"Thermal Cracking"*. Logo a existência de pontos quentes *"Hotspots"*, é responsável pela redução da capacidade de absorção de energia dos resistores a óxido metálico.

A *Tabela VIII* mostra valores típicos da capacidade de absorção de energia devido ao choque térmico, para vários fabricantes de resistores a óxido metálico, sendo que, comparando-se com a *TabelaVII*, pode-se observar que os valores da energia máxima absorvida devido ao fenômeno de choque térmico, ficam em torno da metade dos valores da energia máxima absorvida quando se considera a existência de um limite de estabilidade térmica. Este fato implica que o limite de absorção de energia por parte do pára-raios a óxido metálico sem centelhador é determinado pela energia máxima absorvida sob condição de choque térmico.

As solicitações impostas aos resistores a óxido metálico devido ao fenômeno de choque térmico e a formação de *"Hotspots"*, que resulta no fenômeno *"Thermal Cracking"*, são reduzidas quando o intervalo entre as descargas de corrente é elevado, pois isto permite a equalização de temperatura no interior dos resistores.

Estudos recentes, tem mostrado que o limite de absorção de energia devido ao fenômeno de choque térmico, depende da forma e da amplitude da corrente de descarga, fato plenamente aceitável, visto o processo físico que resulta na formação dos *"Hotspots"*. Deste modo, os valores típicos da *Tabela VIII* devem ser encarados como reservas, principalmente quando a forma da corrente de descarga difere das formas padronizadas, como por exemplo quando da descarga de bancos de capacitores.

Classe do Pára-raios	E_{MLET} [J / cm^3]
Hitachi	300
Westinghouse	225
McGraw-Edson	205
Meidensha	203
General Eletric	136

Tabela VIII - Energia Máxima Absorvida Devido ao Choque Térmico para Diversos Resistores a Óxido Metálico

Correlação Entre os Modos e os Limites de Absorção de Energia de um Pára-raios a Óxido Metálico:

A capacidade de absorção de energia de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores ou com centelhadores paralelos se encontra relacionada com a taxa de crescimento da energia absorvida pelos seus resistores. Com isto, é possível e muitas vezes, extremamente útil, traçar um paralelo entre os modos e os limites de absorção de energia, bem como quais são os ensaios aplicáveis para cada caso.

1 - Modo de Absorção de Energia Tipo - I e sua Correlação com a Capacidade de Descarga de Energia de um Pára-raios:

O comportamento de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores ou com centelhadores paralelo, quando de correntes de descarga inferiores a 1,5 - 2,0 [kA] frente ao modo de absorção de energia Tipo-I, tendo em vista, principalmente, o objetivo, bem como, também os resultados do ensaio, como originalmente previsto, pode muito bem ser determinado pelos *"Ensaios de Descarga de Linhas de Transmissão"*.

Valores de corrente de descarga superiores ao apresentado acima, usualmente exigem a realização de um *"Ensaio Complementar"*, normalmente não normalizado, através de um circuito de ensaio, a parâmetros concentrados denominado *"Circuito Complementar"*.

As normas ANSI-CSA e IEC-ABNT em relação ao ensaio de descarga de linhas de transmissão, pouco diferem entre si em termos de modelo reduzido da linha de transmissão, às vezes, denominado, gerador de corrente de longa duração, ou seja em última análise, tipo de solicitação, para o qual o pára-raios é projetado.

No caso das normas ANSI-CSA, a escolha dos parâmetros do gerador de corrente de longa duração, implica na utilização de parâmetros de linhas, físicos, ou seja, dimensionais, e elétricos, sendo que os últimos normalmente de sequência positiva.

No caso das normas IEC-ABNT, esta escolha implica na determinação de uma *"Classe de Descarga de Linhas"*, obtida com base nas características típicas dos geradores e dos pára-raios.

Contudo, para os dois casos, a solicitação imposta ao modelo proporcional do pára-raios, deve ser sempre superior a suposta real, ou seja:

- Pulso de corrente, constante e com amplitude igual ou superior a corrente considerada real, determinada por estudo; e

- Energia superior a descarregada pelo pára-raios, considerada real, determinada por estudo.

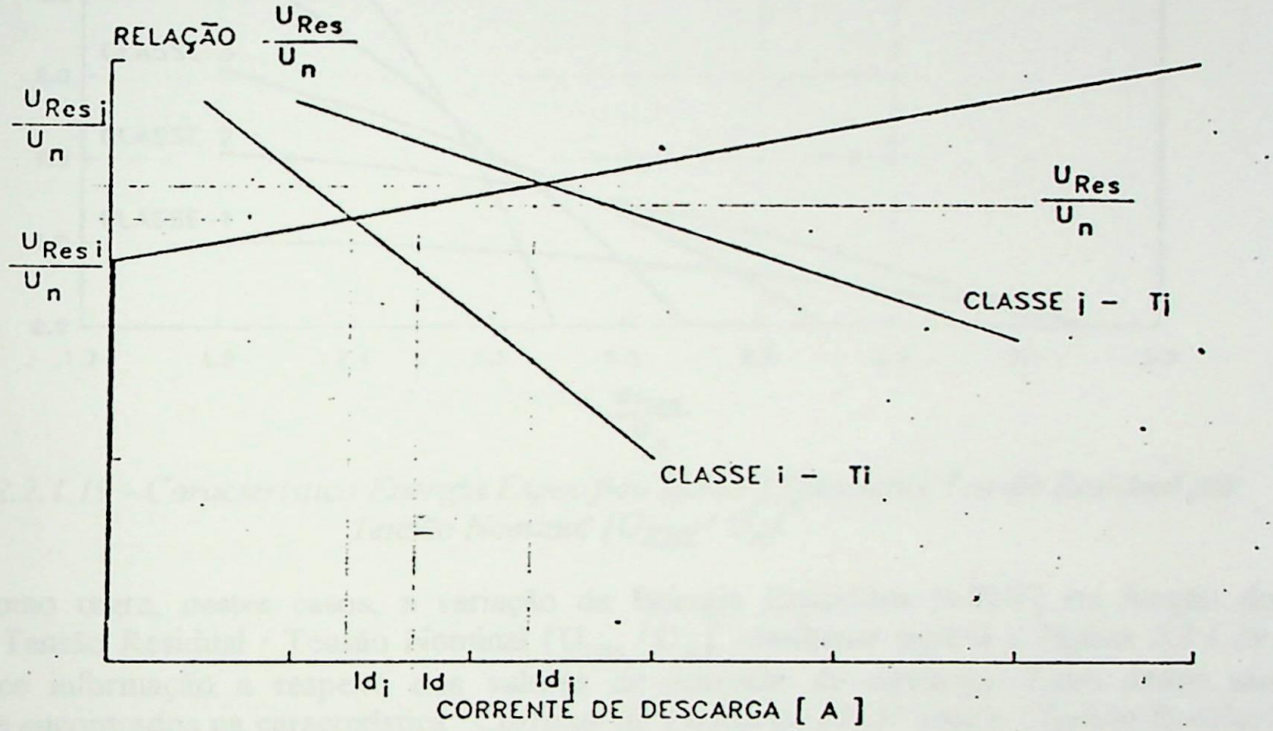


Figura 2.2.1.18 - Característica Tensão Residual [U_{Res}] versus Corrente de Descarga [I_D] de Linhas de Transmissão

Segundo proposta IEC-ABNT, as características que devem ser utilizadas na escolha da "Classe de Descarga de Linhas", são as seguintes:

Características do Gerador

- Tensão Residual / Tensão Nominal - Corrente de Descarga [I_D]

Características do Pára-raios

- Energia específica [kJ/kV] - Tensão Residual / Tensão Nominal; e

- Corrente de Descarga [I_D] - Energia específica [kJ/kV]

Um estudo de sobretensões geralmente fornece os seguintes parâmetros básicos:

- Energia específica [kJ/kV];

- Corrente de Descarga [I_D]; e:

- Quociente Tensão Residual / Tensão Nominal [U_{RES} / U_N]

Baseado nestes resultados, [I_D] e [U_{Res} / U_n], bem como, nos critérios para a escolha da *"Classe de Descarga de Linhas"*, o pára-raios do exemplo mostrado na *Figura 2.2.1.18*, deve ser submetido às solicitações relativas à *"Classe de Descarga de Linhas* - LT_j*"*.

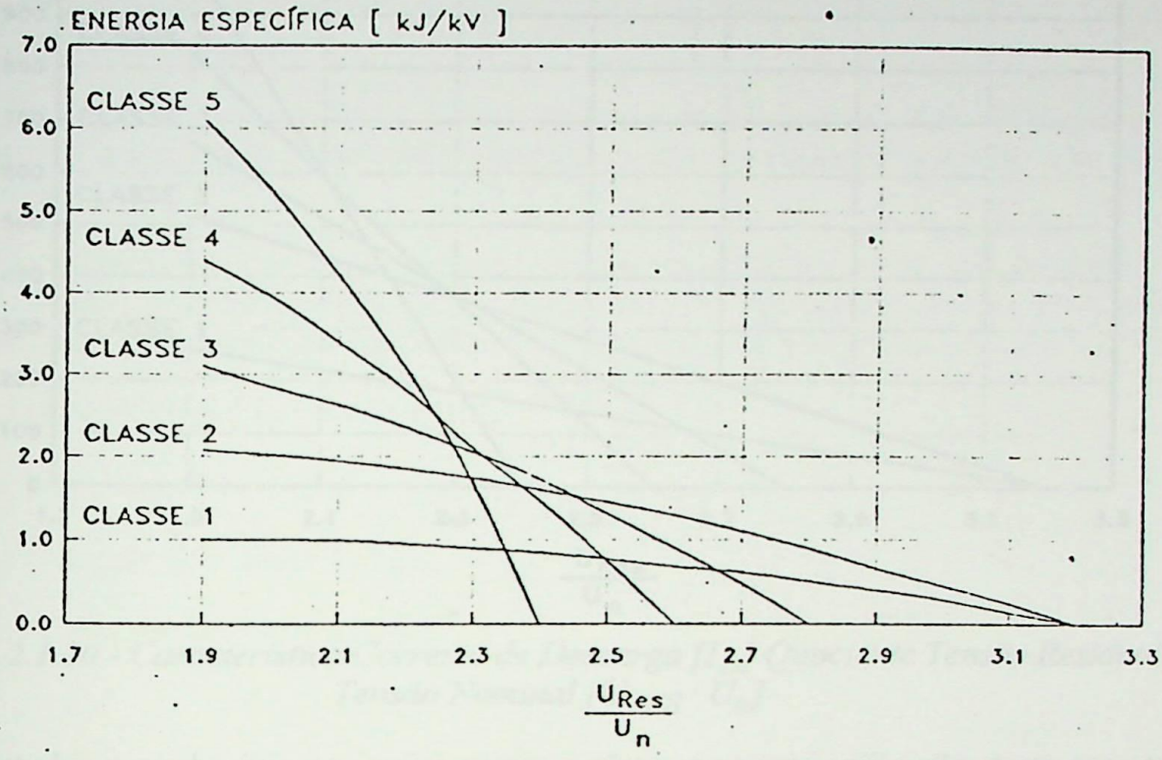


Figura 2.2.1.19 - Característica Energia Específica [kJ/kV] Quociente Tensão Residual por Tensão Nominal [U_{RES} / U_n]

Como regra, nestes casos, a variação da Energia Específica [kJ/kV] em função do quociente Tensão Residual / Tensão Nominal [U_{RES} / U_N], conforme mostra a *Figura 2.2.1.19*, não fornece informação a respeito dos valores de corrente de descarga. Estes dados são usualmente encontrados na característica *"Corrente de Descarga [I_D]"* versus *"Tensão Residual / Tensão Nominal [U_{RES} / U_N]"*, conforme mostra a *Figura 2.2.1.20*, que não é normalizada.

A utilização das características mostradas na *Figura 2.2.1.19* e na *Figura 2.2.1.20*, admite para qualquer corrente de descarga, uma relação [U_{Res} / U_n] constante. A *Figura 2.2.1.18* mostra que isto não é verdadeiro, contudo, devido ao elevado grau de não linearidade dos resistores a óxido metálico, na região de corrente de descarga de manobra, a relação em questão pode ser sem muito erro, assumida como constante.

Uma nova formulação, mais correta e realista, do critério para a escolha da *"Classe de Descarga de Linhas"* dos pára-raios a óxido metálico, aplicável ainda, a situações onde a corrente de descarga é superior ao seu valor limite, normalmente entre 1,5 - 2,0 [kA], pode ser obtida a partir da *Figura 2.2.1.26* representativa do *"Método do Fator de Utilização"*.

A *Figura 2.2.1.26* retrata macroscopicamente, o fenômeno proveniente da concentração de corrente em canais condutores distribuídos ao longo dos resistores, devido aos mesmos não serem estruturas perfeitamente uniformes. A concentração de corrente nestes canais pode conduzir a falhas por perfuração (*"Puncturing"*), devido a existência de defeitos estruturais de grande porte, ou a existência de defeitos estruturais de pequeno porte por fragmentação (*"Thermal Cracking"*). Sendo assim, o fenômeno de concentração de corrente em canais condutores implica em uma redução da capacidade de absorção de energia dos resistores a óxido metálico, quando de aumentos da corrente de descarga.

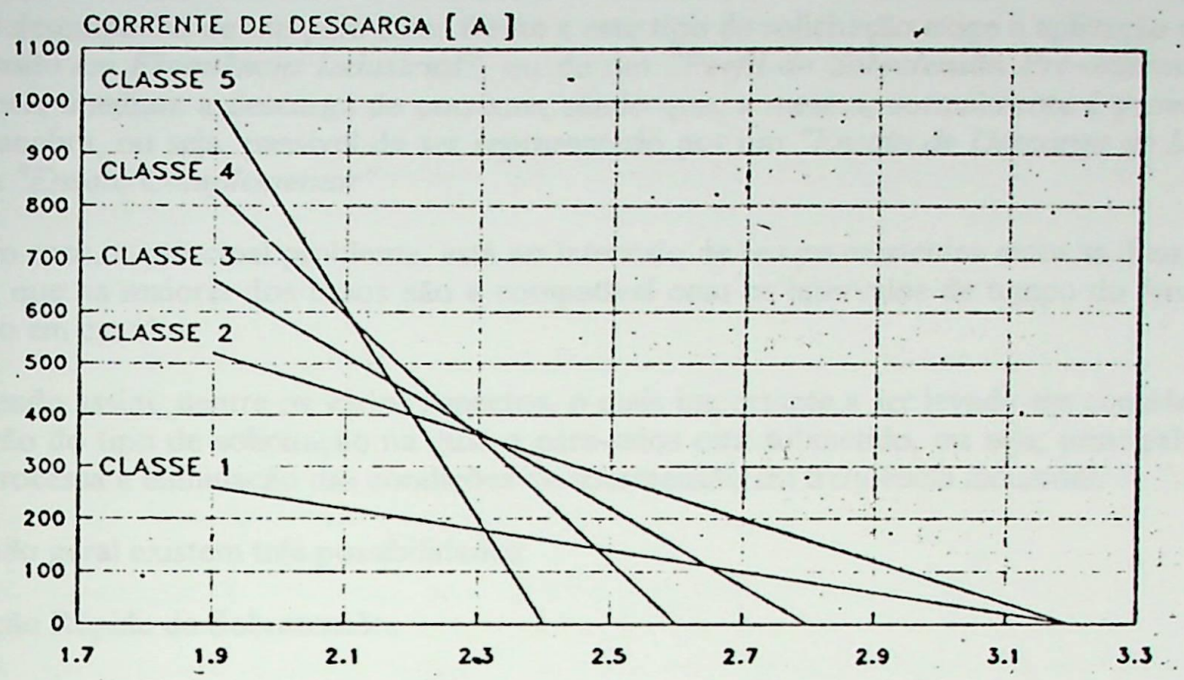


Figura 2.2.1.20 - Característica Corrente de Descarga [I_D] Quociente Tensão Residual por Tensão Nominal [U_{RES} / U_n]

Contudo, o conhecimento, assim como, a plena e correta utilização desta característica pode conduzir a escolha de um pára-raios mais adequado a uma determinada condição ou ainda, estender a faixa de aplicação de um pára-raios já instalado.

Segundo estudos recentes, a utilização conjunta, dos resultados do *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, conforme normalizado e da característica *"Corrente de Descarga"* versus *"Energia Específica"*, permite extrapolar o desempenho dos resistores de modo a verificar as condições de suportabilidade dos mesmos frente a solicitações obtidas em estudos de sobretensões.

Sendo assim, é possível escolher um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores em termos de absorção de energia que atenda uma determinada *"Classe de Descarga de Linhas"*que imponha, um conjunto de solicitações inferior aos obtidos de estudos, embora que sob o aspecto da característica *"Corrente de Descarga"* versus *"Energia Específica"*, atenda as solicitações impostas pelo sistema.

Consequentemente, isto atua no sentido de evitar um sobredimensionamento desnecessário do pára-raios o que, normalmente acontece quando se trabalha com os critérios tradicionais, onde é usual a opção de um pára-raios que atenda a uma *"Classe de Descarga de Linhas"* superior a mínima necessária.

2 - Modo de Absorção de Energia Tipo - II e sua Correlação com a Capacidade de Descarga de Energia de um Pára-raios:

A determinação do comportamento de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores ou com centelhadores paralelo, frente ao "*Modo de Absorção de Energia Tipo - II*", se constitue em problema, visto que, não existe a primeira vista uma correlação direta entre o mesmo e os métodos de ensaios contidos nas normas.

O desempenho de um pára-raios frente a este tipo de solicitação exige a aplicação de uma *" Sobretensão em Frequência Industrial"*, ou de um *"Perfil de Sobretensão Pré-determinado"* em sequência imediata a descarga de corrente, sendo que, a mesma, normalmente é proveniente de uma manobra, ou seja, passível de ser representado por um *"Ensaio de Descarga de Linhas"* ou por um *"Ensaio Complementar"*.

No caso, o principal problema, está no intervalo de tempo existentes entre as duas partes do ensaio, que na maioria dos casos não é compatível com os intervalos de tempo do fenômeno real, obtido em estudos.

Sendo assim, dentre os vários aspectos, o mais importante a ser levado em consideração, é a definição do tipo de solicitação na qual o pára-raios está submetido, ou seja, principalmente, como se processa a eliminação das condições de sobretensão em frequência industrial.

De um modo geral existem três possibilidades:

- Eliminação Rápida da Sobretensão;

- Eliminação Lenta da Sobretensão; e:

- Eliminação Muito lenta da Sobretensão.

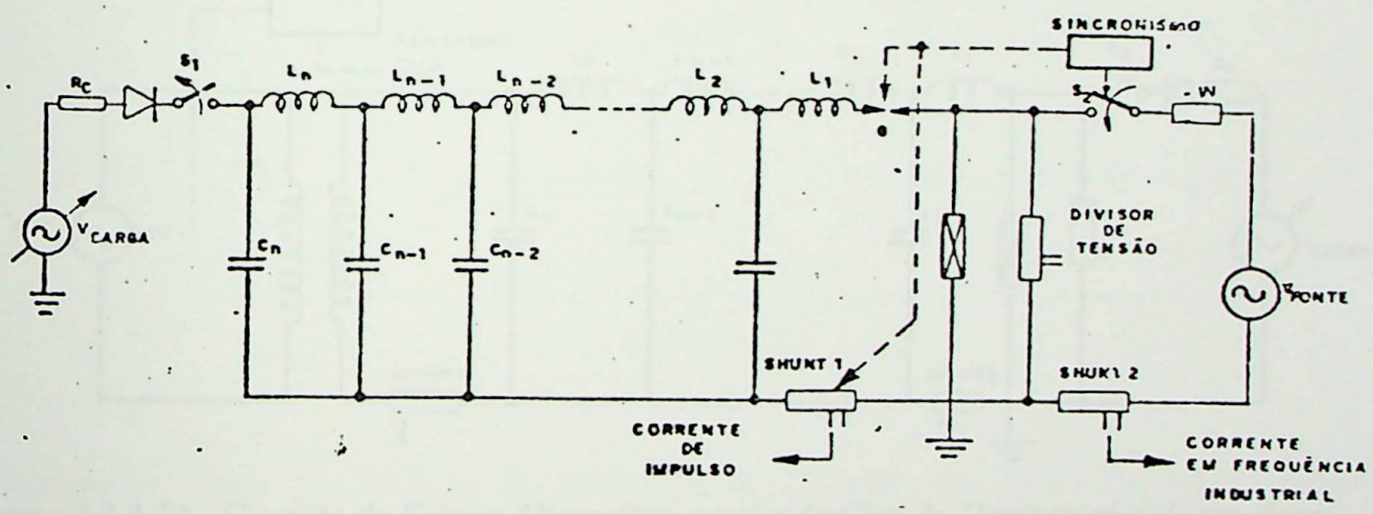


Figura 2.2.1.21 - Circuito de Ensaio para a Análise do Desempenho de um Pára-raios a Óxido Metálico Frente ao Modo de Absorção de Energia Tipo - II

Conforme mostra a *Figura 2.2.1.14*, as três condições apresentadas acima são muito distintas, com respeito ao valor da energia absorvida pelo pára-raios, durante o período de *"Absorção de Energia Subseqüente"*, e assim no valor da *"Energia Total Absorvida"*. Sendo assim, o quociente entre o valor da *"Energia Subseqüente"* e a *"Energia Total Absorvida"*, conduz a variações substanciais nos métodos que pretendem representar, com um bom grau de similaridade, o fenômeno real, conforme a seguir.

a - Eliminação Rápida da Sobretensão:

Considerando que a sobretensão em frequência industrial é eliminada em poucos ciclos, ou seja, em algumas dezenas de milisegundos, é impossível utilizar uma *"Fonte Auxiliar de Tensão em Frequência Industrial"*, em paralelo com o pára-raios, conforme mostra a *Figura 2.2.1.21*, para tentar comprovar o seu desempenho frente a esta solicitação.

Sendo assim o fenômeno de absorção de energia do pára-raios, normalmente, acaba por ser considerado similar ao *"Modo de Absorção de Energia Tipo-I"*, o que o torna passível, em função do valor da corrente de descarga, ser representado pelo *"Ensaio de Descarga de Linhas"*.

Esta solução tem como base que o *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, como tradicionalmente concebido, representa uma solução mais rigorosa que a real, pois um único impulso de corrente fornece toda a energia absorvida pelo pára-raios fato que, dificulta uma homogeinização da temperatura interna dos resistores que compõem o pára-raios.

Devido ao fato de o modelo de linha, ou seja, o gerador de corrente de longa duração ser uniformemente carregado, o *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, impõe uma solicitação em torno de 0,20 [p.u.] ao modelo de pára-raios, superior a imposta pelo fenômeno real. Logo, sem muito erro, pode-se considerar este valor adequado para o quociente entre os valores de *"Energia Subsequente"* e de *"Energia Total Absorvida"*.

Na grande maioria dos casos, as condições acima são suficientes, para cobrir os possíveis problemas quando da verificação do desempenho de um pára-raios a óxido metálico, frente ao *"Modo de Absorção de Energia Tipo-II"*, quando da eliminação rápida da sobretensão em frequência industrial.

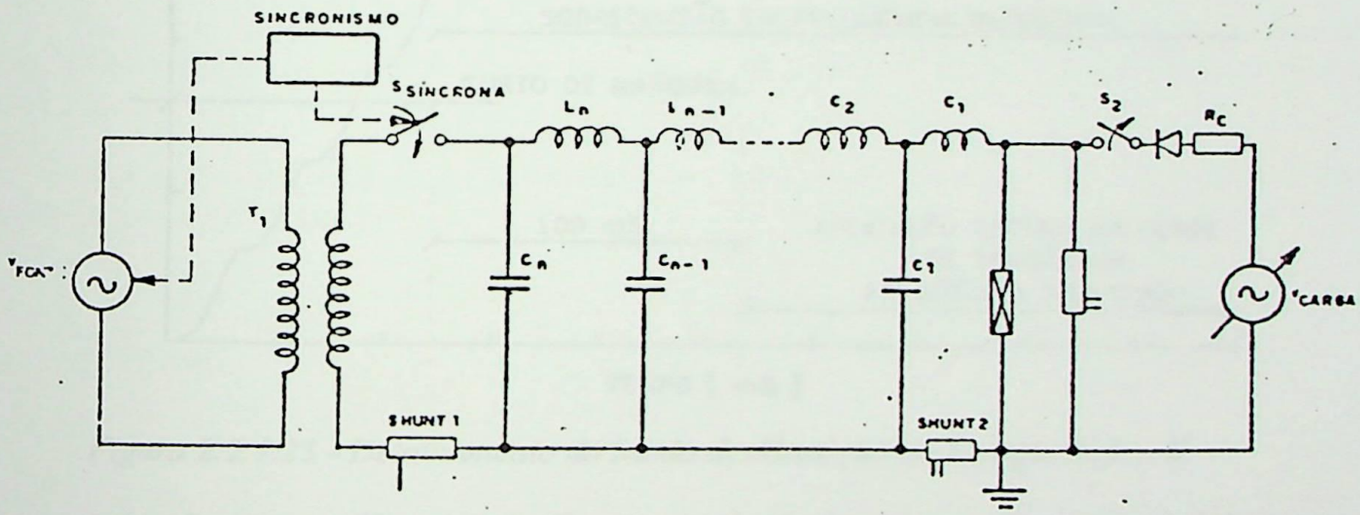


Figura 2.2.1.22 - Circuito de Ensaio Alternativo para a Análise do Desempenho de um Pára-raios a Óxido Metálico Frente ao Modo de Absorção de Energia Tipo - II

Alternativamente, pode ser utilizado o circuito representado na *Figura 2.2.1.22*, que possibilita o ajuste do instante de fechamento da chave síncrona, do valor da tensão de carga em corrente contínua da linha, de sua impedância de surto e seu comprimento, bem como, da impedância entre a fonte em frequência industrial e linha, fato que torna possível reproduzir, qualquer forma de tensão provenientes de estudos de transitórios, principalmente em *"TNA"*, ou de medições de campo, com razoável grau de precisão.

b - Eliminação Lenta da Sobretensão:

Caso a sobretensão em frequência industrial seja eliminada em algumas dezenas de ciclos, ou seja, em algumas centenas de milisegundos, é possível utilizar uma *"Fonte Auxiliar de Tensão em Frequência Industrial"*, conectado em paralelo com o pára-raios conforme mostra a *Figura 2.2.1.21*, de modo a comprovar o desempenho de um pára-raios frente a esta solicitação.

A conexão de uma *"Fonte Auxiliar de Tensão em Frequência Industrial"*, em paralelo com o pára-raios, está relacionada com os tempos envolvidos no fenômeno e com a *"Energia Subsequente"* absorvida pelo pára-raios. Assumindo um intervalo de tempo da ordem de 100 [ms] para a conexão da fonte de tensão em frequência industrial, dependendo do *"Tempo Total de Observação do Fenômeno"*, bem como, do valor da *"Energia Subsequente"* que está relacionada com a corrente descarregada pelo pára-raios, durante o período de *"Absorção de Energia Subsequente"*, conforme mostra a *Figura 2.2.1.14*, pode ainda ser conveniente considerar o fenômeno como semelhante ao *"Modo de Absorção de Energia Tipo-I"*.

O desempenho de um pára-raios, frente ao *"Modo de Absorção de Energia Tipo-II"*, conforme mostra a *Figura 2.2.1.23*, pode ser dividido em duas etapas:

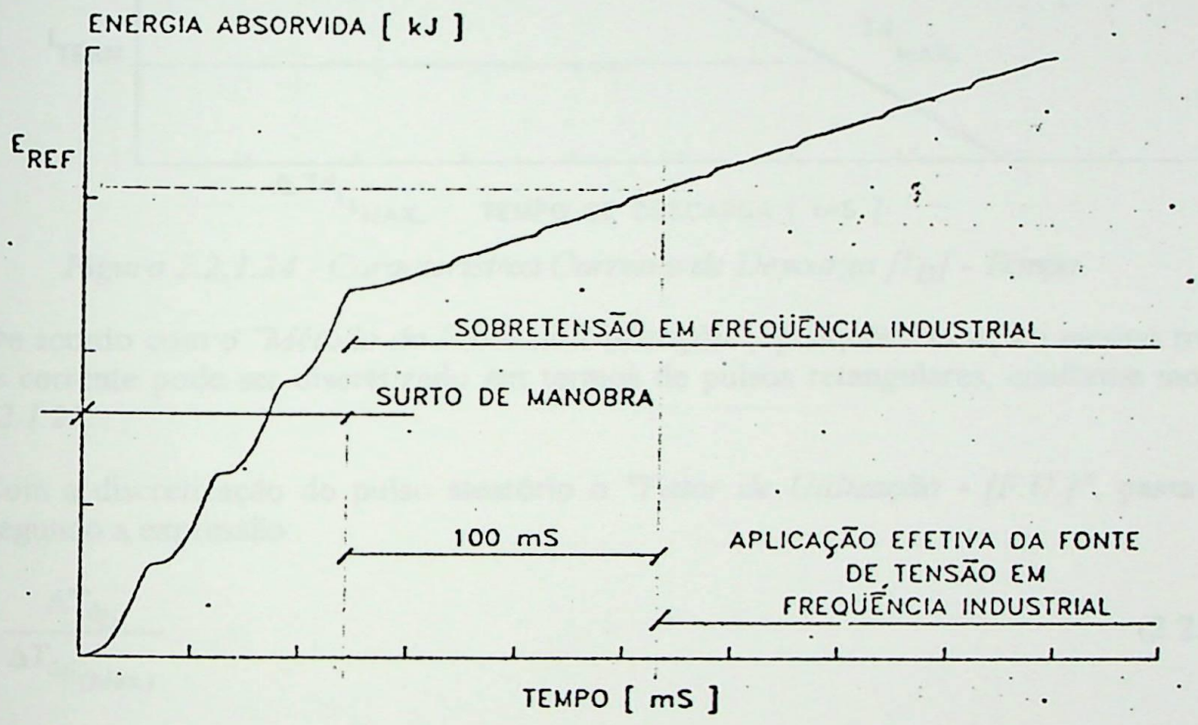


Figura 2.2.1.23 - Detalhamento do Modo de Absorção de Energia Tipo - II

- Desempenho frente ao *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, ou *"Complementar"*, como tradicionalmente concebidos; e:
- Aplicação de tensão em frequência industrial.

Conforme mostra a *Figura 2.2.1.23*, o valor da energia a ser utilizada como referência na execução do *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, ou *"Complementar"*, - E_{Ref} -, que deve ser igual a soma da energia absorvida durante a descarga do surto de manobra e a energia a ser absorvida no período de 100 [ms], ou seja, até a efetiva conexão da fonte de tensão em frequência industrial.

Neste procedimento, um dos problemas é o relacionado com a compatibilidade entre os valores de energia e de corrente de descarga, que pode ser obtida através do *"Método do Fator de Utilização"*, conforme mostra a *Figura 2.2.1.24*, baseado na característica *"Corrente de Descarga [I_D]" - "Tempo"*, obtida através de ensaios destrutivos e utilizada como base para o desenvolvimento da característica *"Corrente de Descarga [I_D]" - "Energia Específica [kJ/kV]"*, onde o valor de corrente limite, está ligado ao comportamento térmico do pára-raios.

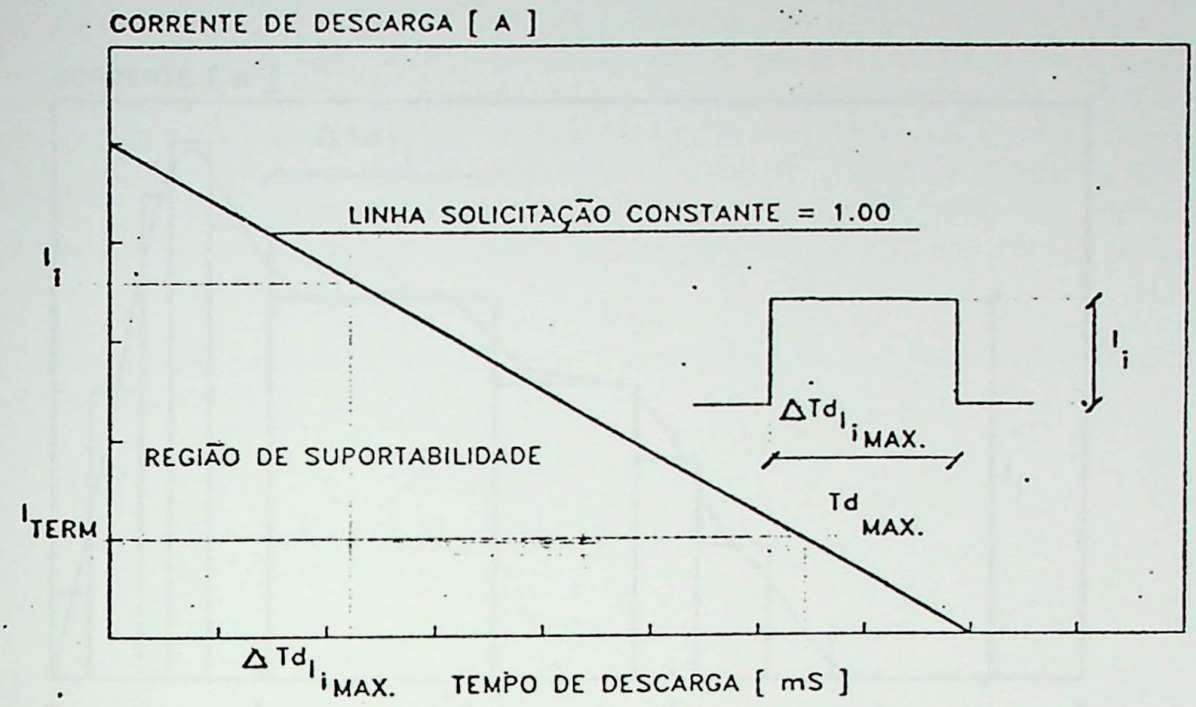


Figura 2.2.1.24 - Característica Corrente de Descarga [I_D] - Tempo

De acordo com o *"Método do Fator de Utilização"*, qualquer forma, ou mesmo trem de pulsos, de corrente pode ser discretizado em termos de pulsos retangulares, conforme mostra a *Figura 2.2.1.25*.

Com a discretização do pulso aleatório o *"Fator de Utilização - [F.U.]"*, passa a ser definido segundo a expressão:

$$F.U. = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta T_{dIi}}{\Delta T_{dIi(Max.)}} \qquad (2.2.1.7)$$

Onde:

n = Número de Pulsos Utilizados para Discretizar o Impulso;

ΔT_{dIi} = Tempo de Descarga da Corrente I_i ; e:

$\Delta T_{dIi(Max.)}$ = Tempo de Descarga Máximo da Corrente I_i.

Em relação a um pulso ou a um trem de pulsos semi-senoidais, conforme mostra a *Figura 2.2.1.23* é usual, transformá-lo em um pulso ou trem de pulsos retangulares e a seguir aplicar a definição do *"Fator de Utilização - [F.U.]"*. Nestes casos, o pulso retangular equivalente a um pulso semi-senoidal deve possuir a mesma amplitude do pulso semi-senoidal, bem como, apresentar um tempo de descarga segundo a expressão:

$$T_{DR} = \frac{2}{\pi} T_{DS} \qquad (2.2.1.8)$$

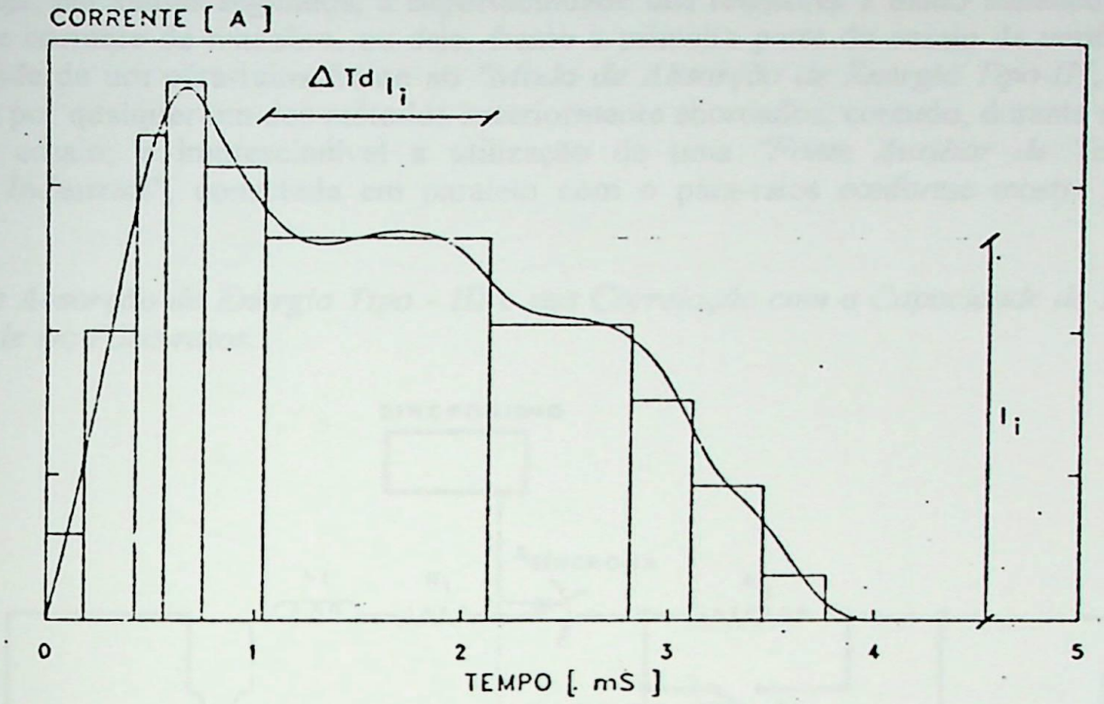


Figura 2.2.1.25 - Discretização de uma Forma Aleatória

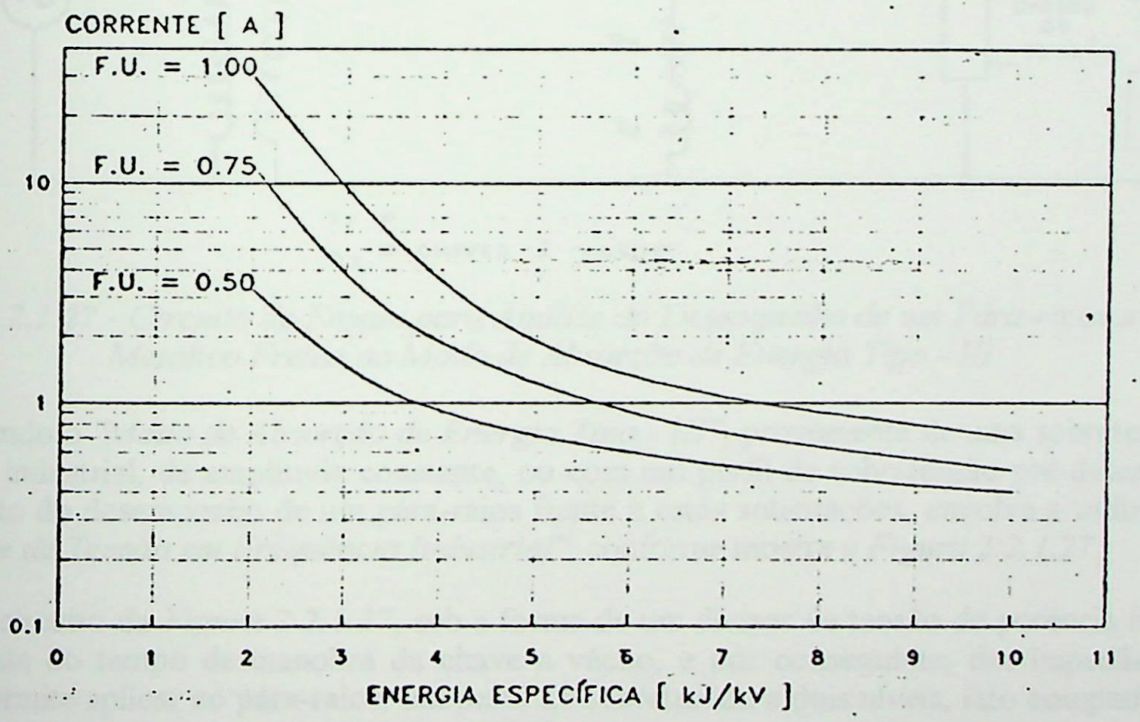


Figura 2.2.1.26 - Característica Corrente de Descarga [I_D] - Energia Específica [kJ/kV] Completa

Onde:

T_{DS} = Tempo de Descarga do Pulso Semi-senoidal [ms - μs]; e:

T_{DR} = Tempo de Descarga do Pulso Retangular Equivalente [ms - μs].

c - Eliminação Muito Lenta da Sobretensão em Frequência Industrial:

Caso a sobretensão em frequência industrial seja eliminada em algumas centenas de ciclos, ou seja, em alguns segundos, a suportabilidade dos resistores a óxido metálico frente as descargas de corrente de manobra, ou seja, frente a primeira parte do ensaio de verificação de suportabilidade de um pára-raios frente ao *"Modo de Absorção de Energia Tipo-II"*, pode ser determinada por qualquer um dos métodos anteriormente abordados, contudo, durante a segunda parte deste ensaio, é imprescindível a utilização de uma *"Fonte Auxiliar de Tensão em Frequência Industrial"*, conectada em paralelo com o pára-raios conforme mostra a *Figura 2.2.1.21.*

3 - Modo de Absorção de Energia Tipo - III e sua Correlação com a Capacidade de Descarga de Energia de um Pára-raios:

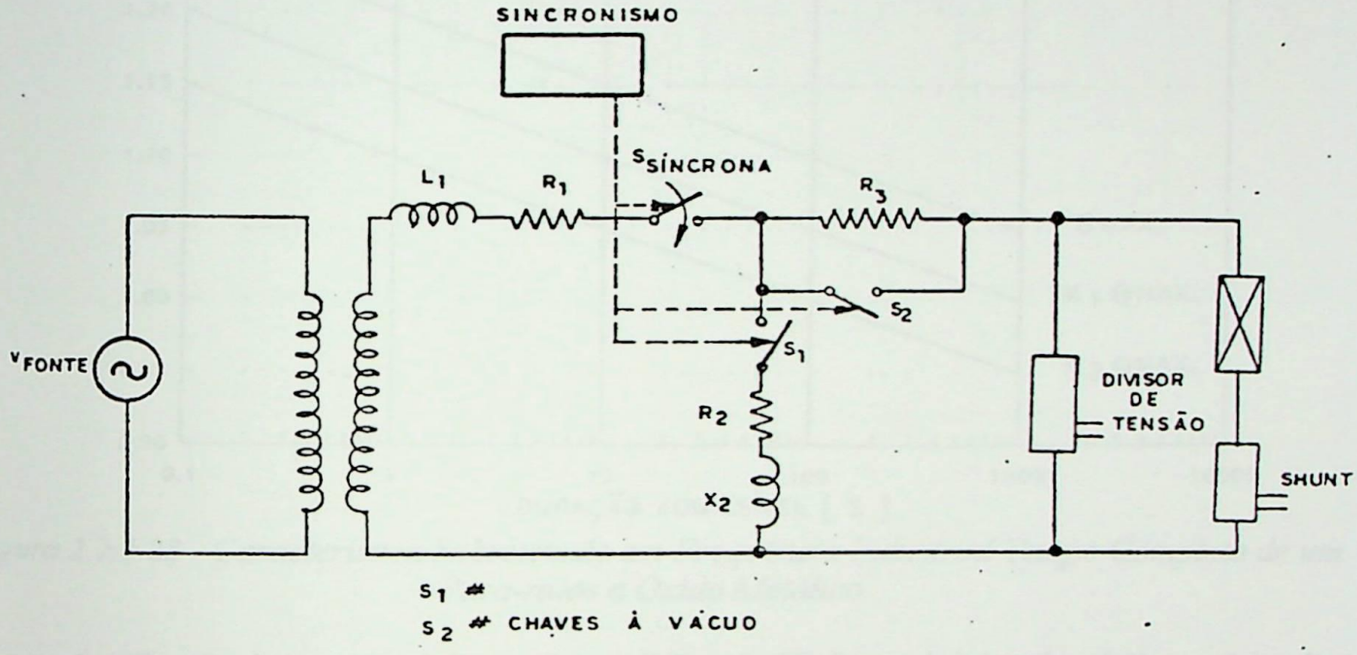


Figura 2.2.1.27 - Circuito de Ensaio para Análise do Desempenho de um Pára-raios a Óxido Metálico Frente ao Modo de Absorção de Energia Tipo - III

Sendo o *"Modo de Absorção de Energia Tipo - III"*, proveniente de uma sobretensão em frequência industrial, de amplitude constante, ou com um perfil de sobretensão pré-determinado, a verificação do desempenho de um pára-raios frente a estas solicitações, envolve a utilização de uma *"Fonte de Tensão em Frequência Industrial"*, conforme mostra a *Figura 2.2.1.27.*

O circuito da *Figura 2.2.1.27*, sob a forma de um divisor de tensão de potência indutivo, com o ajuste do tempo de manobra da chave a vácuo, e por conseguinte, das impedâncias do circuito, permite aplicar ao pára-raios, um perfil de sobretensão a dois níveis, fato compatível com alguns resultados de estudos em "TNA" ou "EMTP".

Duas situações diferentes devem ser analisadas, com relação a amplitude da sobretensão e, por conseguinte, a amplitude da corrente de descarga pelo pára-raios.

i - Sobretensões de Baixa Amplitude

Sobretensões de Baixa Amplitude são as que apresentam valores prospectivos, próximos da tensão nominal do pára-raios, ou seja, inferiores a 1,2 [p.u.].

A menos de ensaios específicos, normalmente não é usual dispor de informações detalhadas, a respeito da característica tensão versus corrente nesta região, o que torna impossível

a realização de estudos precisos do fenômeno como um todo, principalmente no que se refere ao aspecto *"Energia Absorvida"* versus *"Corrente de Descarga"* pelo pára-raios.

Nestes casos, é usual a verificação do desempenho do pára-raios, com o auxílio da característica *"Sobretensão Aplicada - Tempo Completo"*, conforme mostra a *Figura 2.2.1.28*, obtida pelos fabricantes através da modelagem e simulação digital do comportamento do pára-raios para esta região de corrente.

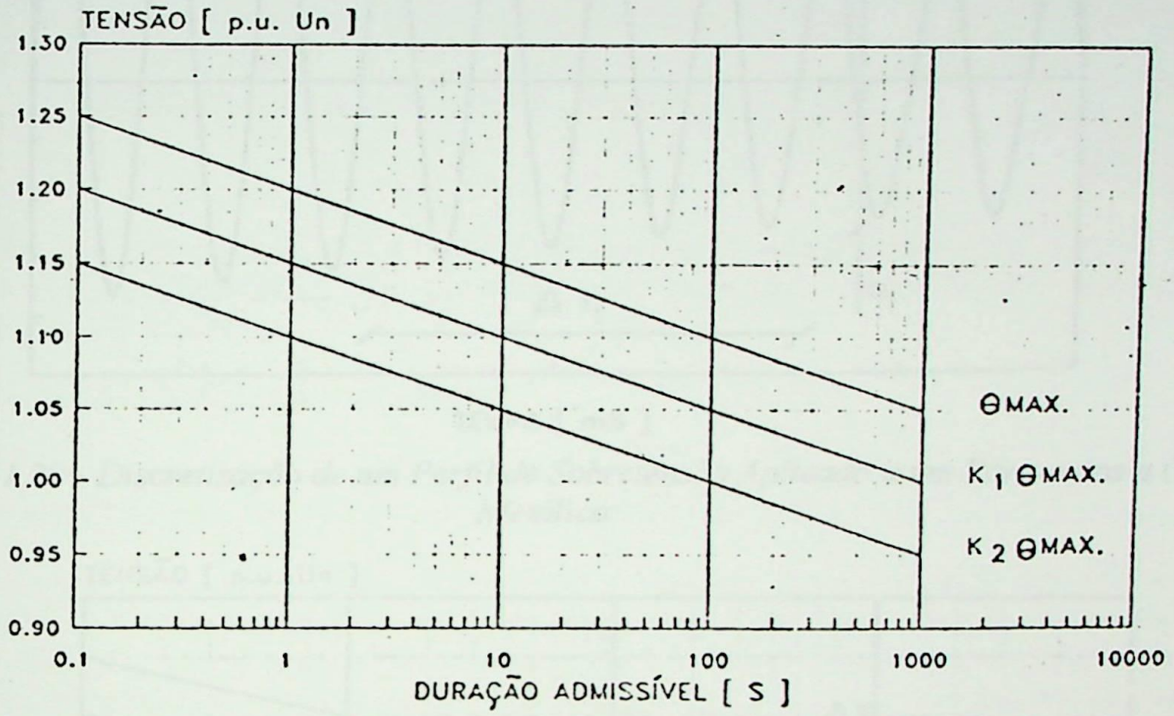


Figura 2.2.1.28 - Característica Sobretensão em Frequência Industrial Tempo Completa de um Pára-raios a Óxido Metálico

A utilização das características sob condições de *"Esforço de Manobra Máximo"*, implica na existência de descargas de manobra anteriores a aplicação da sobretensão em frequência industrial.

Quando um perfil de sobretensão pré-determinado for aplicado ao pára-raios, para verificar seu desempenho, é possível trabalhar com o conceito de *"Fator de Utilização em Frequência Industrial [$F.U._{FI}$]"* definido de acordo com a *Figura 2.2.1.28* e *Figura 2.2.1.29*, através da seguinte expressão:

$$F.U._{FI} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta\theta_{U_i} \rightarrow \Delta T_i}{\theta_{Max.}} \qquad (2.2.1.9)$$

Onde:

n = Número de Trechos para Digitalizar o Perfil de Sobretensão;
$\Delta\theta_{U_i} \rightarrow \Delta T_i$ = Variação da Temperatura sob Condição: $U_i \rightarrow \Delta T_i$ [°C];

U_i = Tensão Aplicada [kV - p.u.];

ΔT_i = Intervalo de tempo de aplicação da U_i [s]; e

θ_{Max} = Temperatura Limite de Estabilidade [°C].

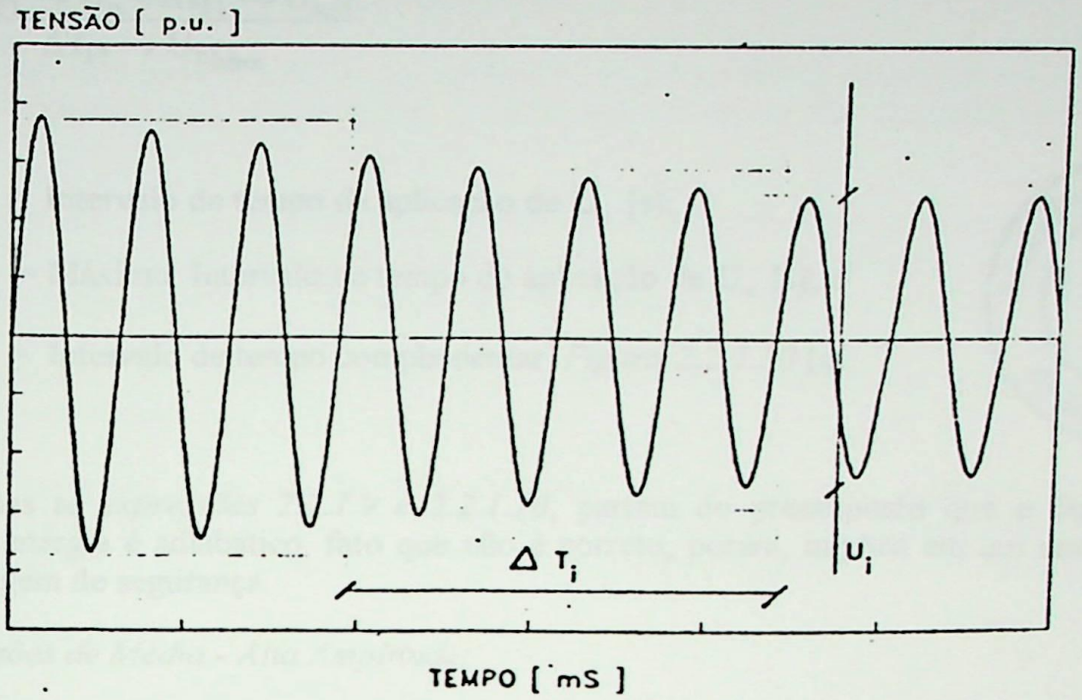


Figura 2.2.1.29 - Discretização de um Perfil de Sobretensão Aplicado a um Pára-raios a Óxido Metálico

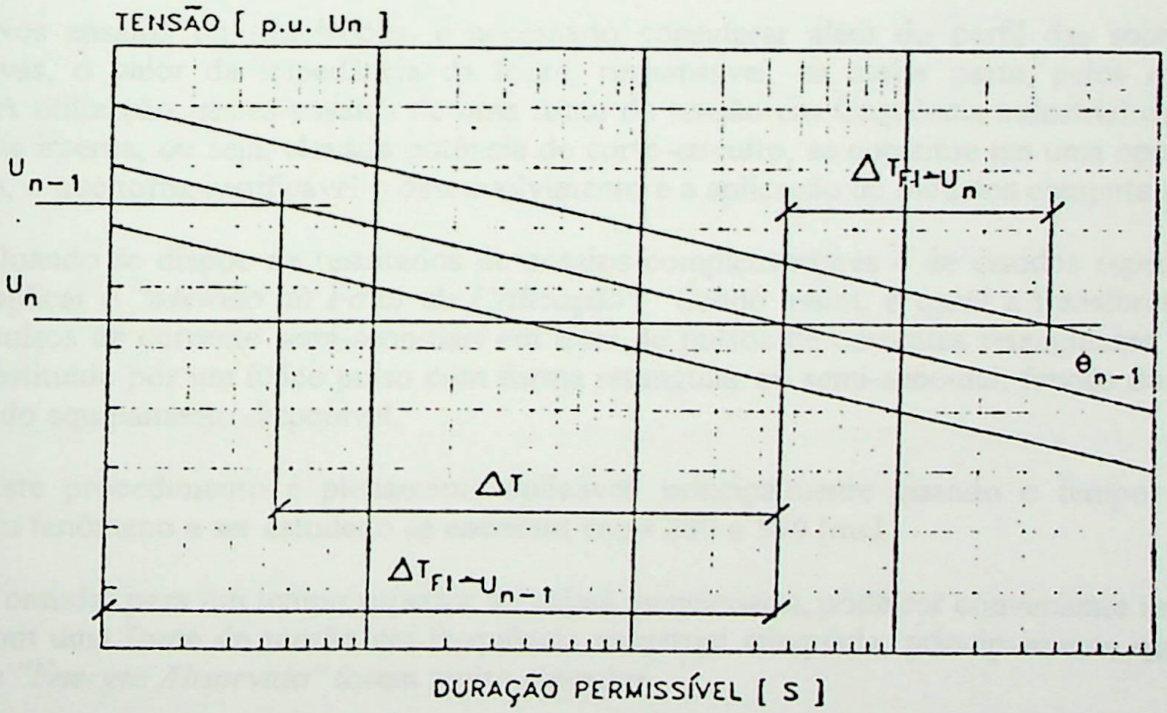


Figura 2.2.1.30 - Definição do Intervalo de Tempo Complementar

Considera-se conveniente ressaltar que, de um modo geral, a discretização de um perfil de sobretensão em frequência industrial, aplicado a um pára-raios, tem como principal objetivo, proporcionar, através de uma perfeita compreensão do fenômeno na sua totalidade, o melhor aproveitamento da capacidade apresentada pelos pára-raios em operar frente a estas condições de sobretensão.

É possível, caso seja necessário, adotar como definição para o *"Fator de Utilização em Frequência Industrial [*$F.U._{FI}$*]"* , a seguinte expressão:

$$F.U._{FI} = \frac{\Delta T_{FI} \rightarrow U_n + \Delta T_{FI} \rightarrow U_{n-1}}{\Delta T_{FI} \rightarrow U_{n_{Max}}} \qquad (2.2.1.10)$$

Onde:

$\Delta T_{FI} \rightarrow U_n$ = Intervalo de tempo de aplicação de U_n [s];

$\Delta T_{FI} \rightarrow U_{n_{Max}}$ = Máximo Intervalo de tempo de aplicação de U_n [s]; e

$\Delta T_{FI} \rightarrow U_{n-1}$ = Intervalo de tempo complementar *Figura 2.2.1.30* [s].

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

Ambas as *expressões 2.2.1.9 e 2.2.1.10*, partem do pressuposto que o fenômeno de absorção de energia é adiabático, fato que não é correto, porém, implica em um resultado com razoável margem de segurança.

ii - Sobretensões de Média - Alta Amplitude:

Sobretensões de Média - Alta Amplitude são as que apresentam valores prospectivos, medianamente superiores a tensão nominal do pára-raios, algo em torno de 1,2 a 1,5 [p.u.].

Nos ensaios ou simulações, é necessário considerar além do perfil das sobretensões prospectivas, o valor da impedância da fonte, responsável, na maior parte, pelos resultados obtidos. A utilização nestes ensaios de uma fonte de tensão em frequência industrial com baixa impedância interna, ou seja, elevada potência de curto-circuito, se constitue em uma operação de alto custo, o que torna justificável o desenvolvimento e a aplicação de modelos computacionais.

Quando se dispõe de resultados de ensaios complementares e de estudos específicos, é possível aplicar o *"Método do Fator de Utilização"*. Sendo assim, é usual a transformação do trem de pulsos de corrente semi-senoidais em trem de pulsos de correntes retangulares, passível de ser substituído por um único pulso com forma retangular ou semi-senoidal, função do nível de energia e do equipamento disponível.

Este procedimento é plenamente aplicável, principalmente quando o tempo total de duração do fenômeno a ser estudado se encontra entre 200 a 500 [ms].

Contudo, para um tempo superior ao acima mencionado, pode ser conveniente realizar os ensaios com uma fonte de tensão em frequência industrial adequada, principalmente quando os valores de *"Energia Absorvida"* forem muito elevados.

Nota:

- Em termos de sobretensão em frequência industrial, os valores suportáveis por um pára-raios a óxido metálico, pode ser ainda apresentados em [p.u.] da máxima tensão de operação contínua, sendo que, nestes casos, os limites definidos para sobretensões de baixa, média e alta amplitude, são normalmente superiores ao acima discutido.

- Em termos de sobretensão em frequência industrial, os limites de suportabilidade de um pára-raios a óxido metálico, são diretamente relacionados com a classe, a qual o mesmo pertence, dentro desta classe, com o seu projeto térmico, bem como, o projeto de seus resistores.

2.2.2 - Desempenho Frente a Surtos Atmosféricos:

Um dos objetivos principais da instalação de pára-raios é controlar as solicitações de tensão, nos equipamentos, tipicamente, transformadores e linhas; causadas pelas descargas atmosféricas.

A forte interação com as impedâncias dos sistemas, implica em que a amplitude e a forma da corrente de descarga que atinge o pára-raios apresente grande variação, quando comparada com o ponto onde ocorreu a descarga. Sendo assim, o grau de dispersão estatística das solicitações impostas aos pára-raios, implica que projetá-los, de forma que os mesmos sejam capazes de suportar todo o espectro possível para as correntes de descarga, venha a se constitur em prática antieconômica.

Para assegurar uma taxa de falha aceitável, as normas, que regem a verificação do desempenho dos pára-raios têm sido desenvolvidas com o auxílio de práticas de campo, ensaios, verificações periódicas em pára-raios retirados de operação, sob condições normais e de falha.

Correntes de Impulso Padronizadas:

Devido ao fato, dos pára-raios serem construídos em módulos, bem como, a elevada exigência em termos de energia imposta aos equipamentos necessários para a execução dos ensaios, para a verificação de sua suportabilidade frente as solicitações provenientes de descargas de correntes, os mesmos são realizados em seções proporcionais, representativas do pára-raios completo, sendo que, dependendo do ensaio, devem ainda representar o comportamento de sua pior seção, e desta forma, apresentam suas extremidades isoladas termicamente, forçando que o fluxo de calor seja radial.

As correntes representativas dos impulsos atmosféricos em amplitude e forma, solicitam os resistores não lineares a óxido metálico de modo, praticamente uniforme, sendo a duração da corrente não muito elevada, isto impede sua concentração em canais condutores, ou seja, a formação do fenômeno conhecido como *"Tunneling"*, que, dependendo do caso, pode resultar no fenômeno de *"Thermal Cracking"*.

Segundo as Normas IEC - ABNT, as solicitações em termos de descargas atmosféricas, impostas aos pára-raios a óxido metálico, são determinados pelo *Ensaio do Ciclo de Operação Combinado*.

Neste ensaio, as várias solicitações são impostas aos pára-raios, ao longo de sua vida útil, são aplicadas em curto espaço de tempo e sendo assim, a série preliminar de impulsos, dividida em grupos de descargas, possui neste ensaio, um carácter pré-condicionante e este fato permite dispensar a aplicação de tensão em frequência industrial entre os grupos de descargas.

As Normas ANSI - CSA, devido a similaridade, que mantém com as normas relativa aos pára-raios a carboneto de silício, verificam as solicitações impostas aos pára-raios a óxido de metálico através dos seguintes ensaios, que comparados com os originalmente, desenvolvidos para pára-raios a carboneto de silício, apresentam ligeiras variações.

- Ensaio de Ciclo de Operação;

- Ensaio de Suportabilidade Frente a Correntes de Amplitude Elevada; e

- Ensaio de Suportabilidade Frente a Correntes de Longa Duração.

No Brasil os pára-raios a óxido metálico, tem sido ensaiados sob as Normas IEC - ABNT, porém de modo informativo a Norma ANSI - C62.11, também é citada no texto a seguir.

Ciclo de Operação:

O objetivo do ensaio do ciclo de operação, é determinar, e em alguns casos verificar a tensão nominal, em frequência industrial, de um projeto de pára-raios, através da demostração de sua capacidade em suportar uma série de impulsos com forma e amplitude constante de acordo com a *Tabela IX*.

Classe do Pára-raios	Corrente [kA]
Distribuição - Serviço Normal	5
* **Distribuição - Serviço Pesado**	10
* **Intermediário**	5
** **Estação**	10

Tabela IX - Amplitude das Correntes de Descarga para os Ensaios de Ciclo de Operação

Notas:

** - Classe de pára-raios previstas na Norma ANSI - C62.11, para cobrir solicitações consideradas específicas, no caso:*

- Sistemas de Distribuição com elevado nível ceráunico;

- Bay's de Linha de Subestações em Alta Tensão, até 145 [kV], pára-raios de linha.

*** - A Norma ANSI - C62.11 não padroniza correntes de descargas nominais de 15 [kA] e 20 [kA], compatíveis a pára raios para extra alta tensão, ou seja, 242 [kV] e acima.*

Para este ensaio, o circuito sintético, devido a ausência da corrente subseqüente, fato que não ocorre no cado dos pára-raios a carboneto de silício, não necessita reproduzir, fielmente o sistema, ao qual o pára-raios deve ser conectado por seu equivalente de Thèvénin e, segundo as Normas ANSI - CSA, a seção proporcional representativa ou o pára-raios completo, deve ser continuamente energizado, sob sua *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_N"* durante o período de aplicação dos impulsos de corrente programados para ocorrer a 60° do zero de tensão em frequência industrial.

O intervalo de tempo entre o zero de tensão em frequência industrial e o ponto de disparo do gerador, responsável pela aplicação do impulso de corrente, ou seja, 60° elétricos, foi

escolhido de modo a manter o arco interno ao pára-raios no caso de falha de alguns dos resistores a óxido metálico que constituem a seção representativa ou o pára-raios completo.

De maneira a demonstrar a existência de estabilidade térmica, após a série de impulsos preliminares sob frequência industrial, a seção representativa ou o pára-raios completo é aquecido até a temperatura de 60 [°C], submetido a impulsos de corrente complementares, com a mesma amplitude anterior, exceto quando no caso de pára-raios classe distribuição serviço pesado, aos quais devem ser aplicados impulsos de corrente com amplitude de 40 [kA], ao invés de 10 [kA] e, em sequência, energizado sob sua *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*.

Sendo assim, as Normas ANSI - CSA consideram que os pára-raios a óxido metálico devem ser capazes de operar, sequencialmente, sob corrente nominal e condições extremamente severas de sobretensão em frequência industrial, logo, o ensaio em questão se constitue no ensaio crucial, na determinação das dimensões dos resistores a óxido metálico e no projeto térmico dos pára-raios.

Alta Corrente de Curta Duração:

O objetivo do ensaio de alta corrente de curta duração é determinar e, em alguns casos, verificar, a suportabilidade de um projeto de pára-raios frente a uma descarga atmosférica direta, de magnitude normalmente elevada.

Classe do Pára-raios	Corrente [kA]
Distribuição - Serviço Normal	65
Distribuição - Serviço Pesado	100
* **Intermediário**	65
* **Estação**	65

Tabela X- Amplitude das Correntes de Descarga para os Ensaios de Alta Corrente de Curta Duração

Nota:

** - Os sistemas de Alta e Extra Alta Tensão são, normalmente Efetivamente Blindados, com o auxílio dos cabos de guarda. Deste modo, as descargas diretas aos condutores de fase destes sistemas, devem apresentar amplitude inferior, à verificada, em sistemas de distribuição, normalmente, expostos.*

Segundo as Normas ANSI - CSA, um primeiro impulso de corrente com amplitude conforme a *Tabela X*, deve ser aplicada na seção proporcional representativa, ou ao pára-raios completo que deve retornar a temperatura ambiente.

Logo após, um segundo impulso é então aplicado e, em sequência a seção proporcional representativa, ou o pára-raios completo é energizado sob a sua *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, de modo a demonstrar a estabilidade térmica.

É conveniente ressaltar que os sistemas de Alta Tensão e de Extra Alta Tensão são, normalmente, efetivamente blindados, com o auxílio de cabos guardas. Sendo assim, as descargas diretas aos condutores de fase destes sistemas, devem apresentar amplitude inferior, à verificada em sistemas de distribuição, normalmente expostos.

O circuito utilizado neste ensaio, que deve possuir uma baixa indutância, não necessita reproduzir o sistema, ao qual o pára-raios deve ser conectado, por seu equivalente de Thèvenin, pois a ocorrência de uma descarga de corrente conforme a *Tabela V*, normalmente, resulta em uma descarga disruptiva ao longo de algum ponto do isolamento do sistema, o que implica, na pior das hipóteses, na redução, da tensão em frequência industrial, imposta ao pára-raios.

Segundo as Normas IEC - ABNT, este ensaio é parte integrante do *"Ensaio de Ciclo de Operação Combinado"*.

No Brasil um ponto, a seu modo, relevante, em termos de normalização sobre os pára-raios de sistemas de potência adotado, versa sobre a real necessidade, e mesmo, eficácia, do ensaio de alta corrente de curta duração.

Os defensores da ineficácia deste ensaio apresentam o argumento, que se baseia no fato real, de ser, a tensão residual , desenvolvida pelo pára-raios durante uma descarga de corrente de amplitude elevada, que apesar de inferior aos níveis alcançados nos pára-raios a carboneto de silício, ainda superior ao *"Nível Básico de Isolamento - NBI"* dos equipamentos comumente conectados aos sistemas. O contra-argumento, estabelece que, o objetivo do ensaio não é a verificação da *"Coordenação de Isolamento"*, *Pára-raios versus Sistema*, mas apenas, verificar sua suportabilidade frente a descargas diretas, o que é razoável, visto as reduzidas dimensões, principalmente em termos de altura de isolamento oferecidas pelos resistores a óxido metálico.

Baixa Corrente de Longa Duração:

O objetivo do ensaio de baixa corrente de longa duração é determinar, e em alguns casos, verificar a adequabilidade de um projeto de pára-raios frente a descarga de corrente de baixa amplitude, relacionada com a cauda da corrente associada a descarga atmosférica, e representada por uma corrente com forma e amplitude, conforme a *Tabela XI*.

Os resistores a óxido metálico são extremamente solicitados pelas correntes de longa duração, pois o tempo de duração da mesma, é da ordem de 20 vezes, ao de uma descarga de curta duração, fato que permite o aquecimento localizado de regiões dos resistores, mecanismo conhecido como *"Tunneling"*, que pode resultar em uma elevação local de temperatura, superior a 1500 [°C], responsável pela vaporização, virtualmente instantânea do materia cerâmico do canal condutor.

* *Segundo a Norma IEC 37 - WG 4, 1000 [μS].*

Classe do Pára-raios	Corrente [kA]	Duração [μs]
Distribuição - Serviço Normal	75	* 2000
Distribuição - Serviço Pesado	250	2000

Tabela XI - Amplitude e Forma das Correntes de Descarga para os Ensaios de Baixa Corrente de Longa Duração

2.2.3 - Desempenho Frente a Surtos de Manobra:

As correntes relacionadas com as descargas de manobra são as correntes de longa duração e, portanto, além de permitirem a ocorrência dos fenômenos de *"Tunneling"* e *"Thermal Cracking"*, podem conter energia em excesso, quando comparadas com as correntes relativas a descargas atmosféricas.

Os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores para sistemas de média tensão - geralmente classe distribuição, raramente são submetidos a correntes de descarga de manobra, pois apresentam um nível de proteção frente a impulsos de manobra, em [p.u.] da sua tensão nominal, muito elevado.

Os pára-raios, classe intermediária e classe estação, adequados na maioria dos casos a sistemas de Alta Tensão e Extra Alta Tensão, apresentam úm nível de proteção frente a impulsos de manobra, em [p.u.] da sua tensão nominal, razoavelmente reduzido, o que implica em serem projetados para atuar frente a estas solicitações.

Classe de Descarga de Linhas Segundo IEC			
Classe	Impedância de Surto Z_0 [Ω]	Duração Virtual da Crista [μs]	Tensão de Carga U_C [$kV_{c.c.}$]
1	* $3,3U_N$ - ** $4,9U_N$	2000	* $3,0U_N$ - ** $3,2U_N$
2	* $1,8U_N$ - ** $2,4U_N$	2000	* $2,6U_N$ - ** $3,2U_N$
3	* $1,2U_N$ - ** $1,3U_N$	2400	* $2,6U_N$ - ** $2,8U_N$
4	* $0,8U_N$ - ** $0,8U_N$	2800	* $2,4U_N$ - ** $2,8U_N$
5	* $0,5U_N$ - ** $0,5U_N$	3200	* $2,2U_N$ - ** $2,4U_N$

Tabela XII - Classses de Descarga de Linhas Segundo as Normas IEC

A solicitação imposta ao pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, se encontra relacionado com o binômio *"Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, *"Suportabilidade Frente a Sobretensões em Frequência Industrial"*, e, por conseguinte, ao *"Nível Básico de Isolamento - NBI"* dos equipamentos do sistema.

Logo, o projeto deste tipo de pára-raios, está relacionado com as solicitações impostas ao mesmo, na forma de descargas de manobra e atmosféricas, na forma de tensão contínua em frequência industrial.

As Normas IEC - ABNT, padronizam *Classes de Descarga de Linha*, em *número de 5*, em termos da impedância de surto, tempo de descarga e máxima sobretensão de manobra, conforme a *Tabela XII*.

Entre as Normas ANSI - CSA e IEC - ABNT, não existe menhuma equivalência, pelo menos aparente, entre as classes de descarga de linhas. Sendo que, as Normas IEC - ABNT, admitem tempos de descarga, relacionados com a capacitância ou com o comprimento da linha, ou ambos, superiores aos admitidos pela Norma ANSI - CSA, o que implica na possibilidade de as primeiras, levarem em conta os efeitos das capacitâncias de sequência zero do sistema.

Parâmetros para o Circuito de Ensaio de Descarga de Linhas para Pára-raios com Tensão Nominal de até 145 [kV] *	
Impedância de Surto $Z_1 = 450\,[\Omega]$	
Capacitância $C_1 = 0,0075\,[\mu F / km]$	
Comprimento (Classe Intermediária)	$D_1 = 160\,[km]$
Comprimento (Classe Estação)	$D_1 = 240\,[km]$
Sobretensão Máxima (p.u. RMS)	$3,68 U_{60[Hz]Máx.}$

Tabela XIII - Parâmetros para o Circuito de Ensaio de Descarga de Linhas

De acordo com as Normas ANSI - CSA, os parâmetros utilizados nos ensaios de descarga de linhas em pára-raios de classe intermediária e classe estação em função das tensões nominais adequados aos sistemas de alta - média tensão são mostrados na *Tabela XIII*.

Para o *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, o circuito utilizado, é um modelo reduzido de uma linha de transmissão, submetida a um religamento, via de regra sob falta. Neste caso é produzido um impulso de corrente com amplitude igual a:

$$I_D = \frac{U_C - U_{RES}}{Z_1} \qquad (2.2.3.1)$$

Logo:

$$I_D = \frac{3,68U_{60[Hz]Máx} - U_{RES}}{Z_1}$$

e:

$$U_{Max\,60[Hz]Máx.} = K_T U_{\phi T} \qquad (2.2.3.2)$$

Onde:

I_D = Corrente de Descarga pelo Pára-raios [kA];

U_C = Tensão de Carga da Linha [kV];

U_{RES} = Tensão Residual do Pára-raios [kV];

$U_{\phi T}$ = Tensão Fase - Terra [kV];

K_T = Fator de Sobretensão Máxima [p.u.], em Sistemas Padrão K_T = 1,06.

Para a utilização das *expressões 2.2.3.1 e 2.2.3.2*, é usual linearizar a *"Característica Tensão Residual [U_{RES}] Corrente de Descarga [I_D]"*, e:

$$U_{RES} = \sqrt{2}U_N + K_\alpha I_D \qquad (2.2.3.3)$$

Com:

$$K_\alpha = \frac{U_{R500-1000} - \sqrt{2}U_N}{I_{D500-1000}} \qquad (2.2.3.4)$$

Onde:

$U_{R_{500-1000}}$ = Tensão Residual para Corrente de Descarga 500 - 1000 [A];

$I_{D500-1000}$ = Corrente de Descarga para $U_{R_{500-1000}}$.

A duração da corrente de descarga é obtida com auxílio da expressão:

$$T_D = 2Z_1C_1D_1 \qquad (2.2.3.5)$$

Onde:

T_D = Duração da Corrente de Descarga

Substituindo os parâmetros da *Tabela VIII* , vem que:

T_D = 1620 [μs] - (Pára-raios Classe Estação)

T_D = 1080 [μs] - (Pára-raios Classe Intermediária)

A energia absorvida pelo pára-raios é o resultado do produto da tensão residual do pára-raios, da corrente de descarga e do tempo de duração da mesma, conforme a expressão a seguir:

$$E_{PR} = U_{RES} I_D T_D = 2U_{RES} I_D Z_1 D_1 C_1 \qquad (2.2.3.6)$$

Ou seja, a capacidade de absorção de energia dos pára-raios, aumenta com a sua tensão nominal.

Sendo os pára-raios construídos de modo, modular, o que propicia uma intercambialidade de componentes entre diferentes grupos de pára-raios, os fabricantes usualmente ensaiam os componentes frente as solicitações impostas pela classe do pára-raios mais solicitada, na qual, eles devem ser utilizados, o qual resulta, em margens conservadoras de projeto.

Deste modo, de acordo com as Normas ANSI - CSA, os pára-raios utilizados em sistemas de distribuição ou subtransmissão em média tensão são projetados levando-se em conta os requisitos de descargas em linhas de transmissão de pára-raios com com tensão nominal de 108 [kV] a 144 [kV]. Considerando que as características do sistema são fixas, o pára-raios mais solicitado, é o pára-raios de 108 [kV] e, nestes casos é possível escrever a seguinte expressão:

$$E_{PR} = \frac{2Z_1 C_1 D_1}{(Z_1 + K_\alpha)^2} \left\{ K_\alpha K_\phi^{\,2} K_T^{\,2} U_{\phi T}^{\,2} + \sqrt{2} U_N K_\phi K_T U_{\phi T} (Z_1 - K_\alpha) - 2U_N^{\,2} Z_1 \right\} \qquad (2.2.3.7)$$

Onde:

K_ϕ= Fator de Sobretensão [p.u.]

Assumindo que K_ϕ é igual a zero, o que corresponde a um pára-raios ideal, vem que:

$$\frac{E_{PR}}{U_N} = 2C_1 D_1 \left\{ \sqrt{2} K_\phi K_T U_{\phi T} - 2U_N \right\} \qquad (2.2.3.8)$$

Para as Normas IEC - ABNT, as *"Classes de Descarga de Linhas"*, podem ser determinadas com o auxílio da expressão seguinte, para a *"Energia Específica [kJ/kV]"*.

$$\frac{E_{PR}}{U_N} = \frac{T_D}{Z_1} \left[\frac{U_C U_{RES}}{U_N} - \frac{U_{RES}^{\,2}}{U_N} \right] \qquad (2.2.3.9)$$

Deste modo, o valor da *"Energia Específica [kJ/kV]"* e do quociente *"Tensão Residual/Tensão Nominal - $[U_{RES} / U_N]$"* determinado nos estudos de transitórios é levado na característica, conforme mostra a *Figura 2.2.3.1*, onde, é escolhido um pára-raios com capacidade de atender a *"Classe de Descarga de Linhas"*, imediatamente superior a intersecção entre estes valores.

Estudos recentes, mostram que a habilidade de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores em absorver energia, ou seja, suportar descargas de manobra, depende da forma e duração do impulso.

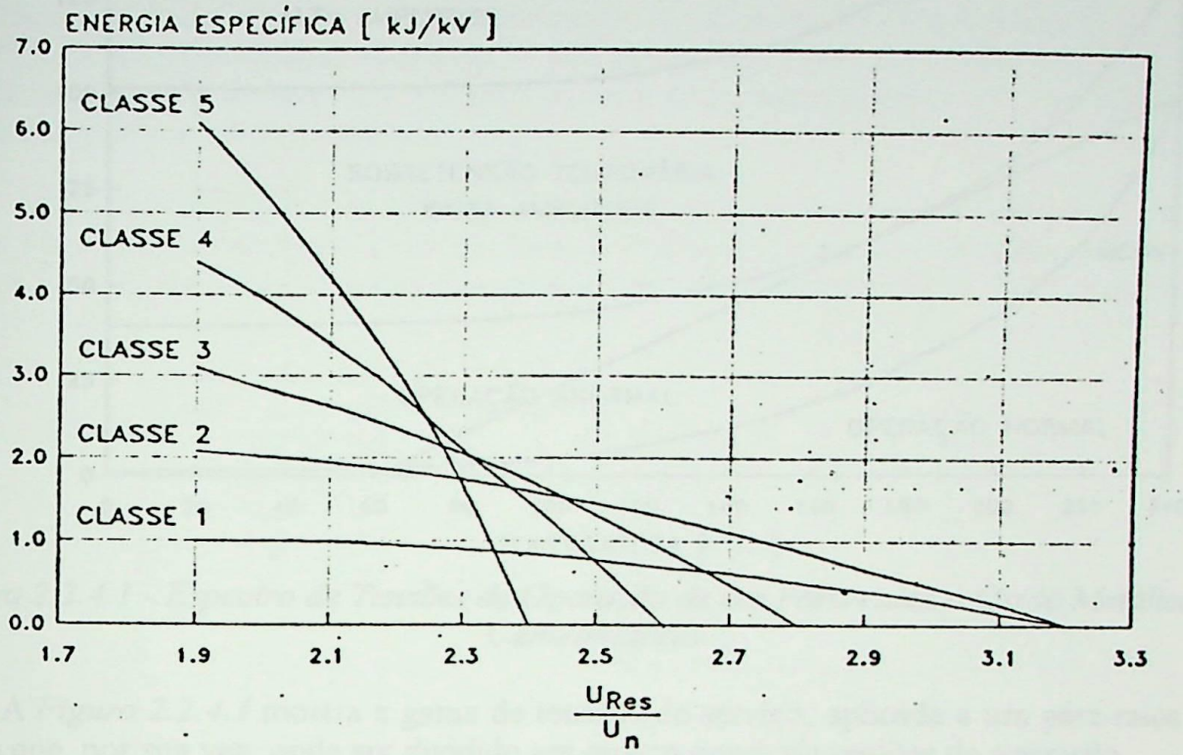


Figura 2.2.3.1 - Característica Energia Específica [kJ/kV] versus Quociente Tensão Residual - Tensão Nominal [U_{RES} / U_N] Segundo IEC 37 - WG 4

A ausência de centelhadores torna os pára-raios a óxido metálico bem mais insensíveis às variações na forma e duração dos impulsos quando comparados com os pára-raios a carboneto de silício. No entanto, pequenas falhas na microestrutura dos resistores, bem como, o mecanismo de condução de corrente permitem, uma concentração de corrente em uma infinidade de canais condutores, o que pode dependendo da amplitude, forma e duração do impulso, implicar em aquecimento diferencial e, sendo assim, na dilatação, por aquecimento, do núcleo de alguns canais condutores, que ao se expandirem, comprimem, de maneira rápida e violenta, o anel cerâmico, pouco aquecido, que os envolvem, implicando no aparecimento de microfissuras o que resulta no fenômeno *"Thermal Cracking"*, e implica na redução da capacidade de absorção de energia, ou seja, na suportabilidade frente a surtos de manobra.

2.2.4 - Desempenho Frente a Sobretensões Sustentadas:

Os resistores a óxido metálico utilizados na construção dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, se encontram permanentemente energizados sob a tensão fase-terra do sistema. Logo, é necessário que os resistores óxido metálico, sejam projetados, tendo em vista, toda a gama de tensões de serviço que possa vir a ocorrer nos sistemas aos quais os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores são destinados.

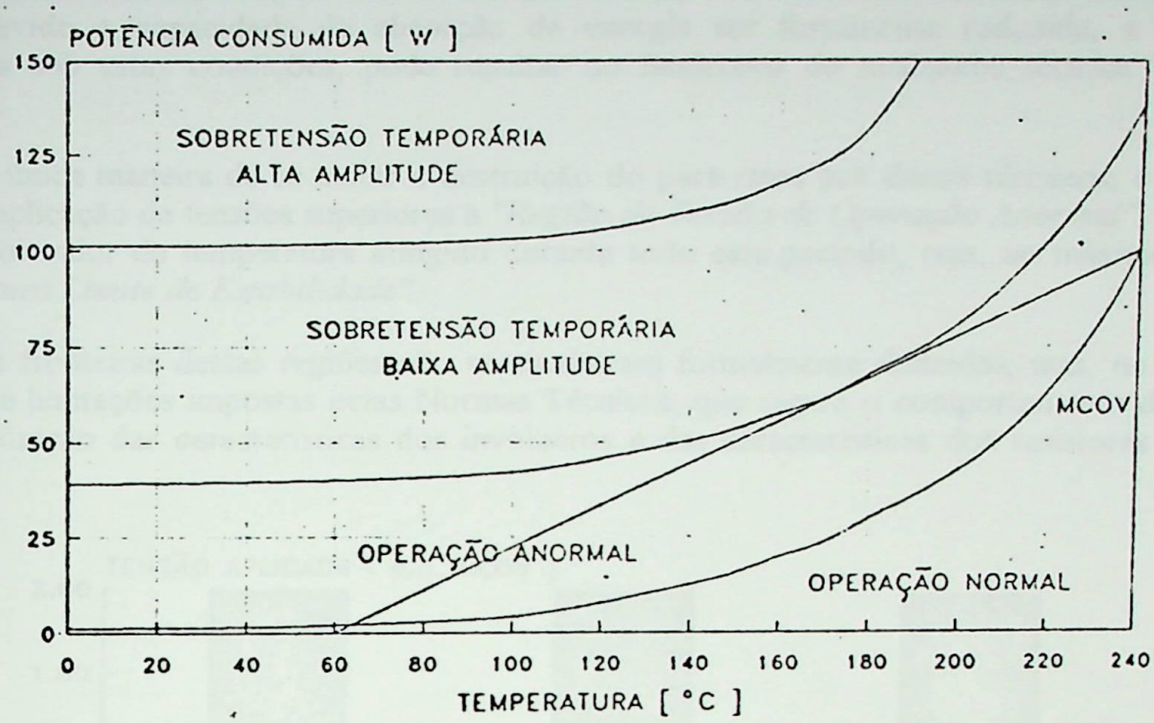


Figura 2.2.4.1 - Espectro de Tensões de Operação de um Pára-raios a Oxido Metálico sem Centelhadores

A *Figura 2.2.4.1* mostra a gama de tensões de serviço, aplicada a um pára-raios a óxido metálico que, por sua vez, pode ser dividido em quatro possíveis regiões de operação.

A primeira área, inclui todas as tensões de operação normais, sendo limitadas pela *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* do pára-raios. Neste caso, para uma operação correta do pára-raios, a *"Máxima Tensão de Operação Contínua do Sistema"*, normalmente definida, como a tensão de operação mais uma margem para contemplar o efeito da regulação de tensão, se encontra obrigatoriamente dentro desta região.

Nos sistemas fracamente aterrados ou isolados, devido ao alto valor das sobretensões em frequência industrial, provenientes de faltas, em termos transitórios e de regime permanente, pode ser necessário adotar um pára-raios com *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, superior ao acima definido.

Na maioria das vezes, o pára-raios deve operar por mais de 99[%] de sua vida útil dentro desta região. Sendo que, devido a pequena corrente de fuga em frequência industrial, a potência consumida é virtualmente desprezável, o que implica em um aquecimento mínimo.

A temperatura dos resistores a óxido metálico deve sempre alcançar um ponto de operação estável, mesmo quando o pára-raios for submetido a esforços que resultam na máxima absorção de energia permitida.

A segunda região no espectro de tensões de operação, conforme mostra a *Figura 2.2.4.1*, inclui as tensões de operação anormais, pois são em tese, superiores a *"Máxima Tensão de Operação Contínua do Sistema"*, e se estende até o ponto onde, a curva de consumo de potência dos resistores a óxido metálico, passa a ser assintótica a curva de dissipação de potência do pára-raios. Esta é uma região térmicamente estável, porém, a capacidade de absorção de energia do pára-raios se encontra reduzida e de fato, na condição limite de estabilidade, denominada *"Tensão Limite de Estabilidade"*, é virtualmente nula.

Devido a capacidade de absorção de energia ser fortemente reduzida, a operação prolongada sob estas condições, pode resultar no fenômeno de avalanche térmica *"Thermal Runaway"*.

A única maneira de se evitar a destruição do pára-raios por danos térmicos, é limitar o tempo de aplicação de tensões superiores a *"Região de Tensão de Operação Anormal"*, de modo que o maior valor de temperatura atingido durante todo este período, seja, no máximo igual a *"Temperatura Limite de Estabilidade"*.

As fronteiras destas regiões não se encontram formalmente definidas, mas, no entanto, resultam de limitações impostas pelas Normas Técnicas, que regem o comportamento dos pára-raios, em função das características dos invólucros e das características dos resistores a óxido metálico.

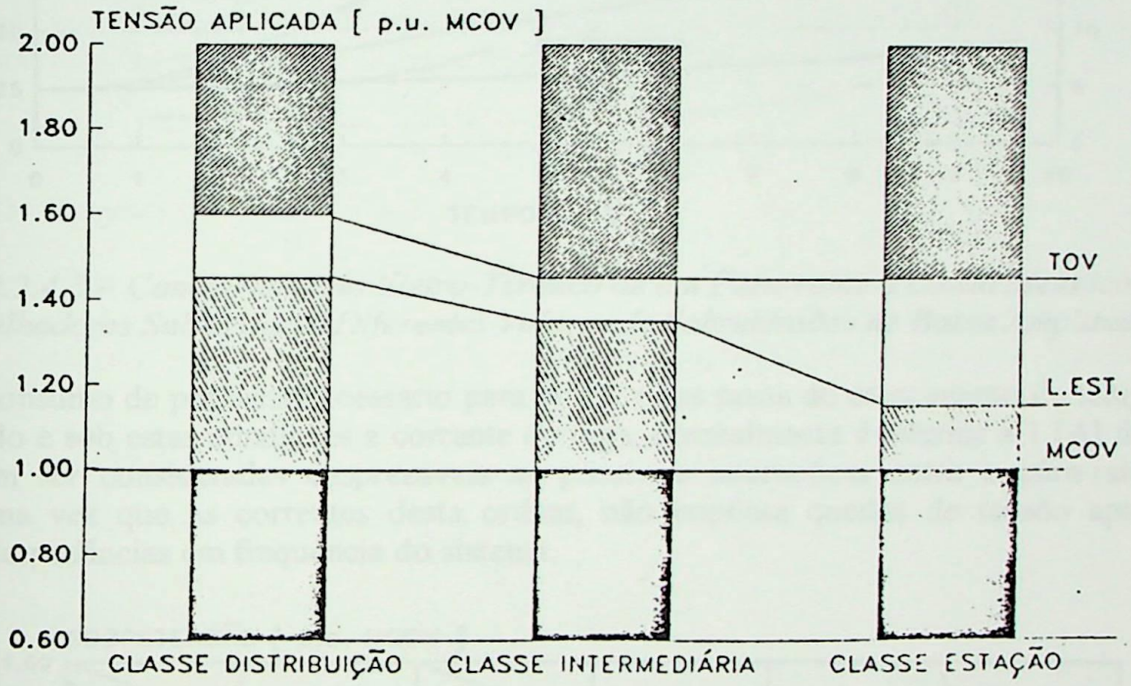


Figura 2.2.4.2 - Relações entre as Quatro Regiões de Tensão de Operação para Vários projetos de Pára-raios a Óxido de Zinco sem Centelhadores

A *Figura 2.2.4.2*, mostra de acordo com as Normas ANSI - CSA, os limites obtidos através de ensaios ou através de informações de fabricantes. Ainda de acordo com a *Figura 2.2.4.2*, os pára-raios para classe distribuição, apresentam uma suportabilidade a sobretensão em frequência industrial superior aos pára-raios equivalentes pertencentes as outras classes. Isto implica que, nos sistemas de distribuição em média tensão, a substituição de um pára-raios classe distribuição por um pára-raios classe estação, que por sua vez apresenta um desempenho global superior pode resultar em falha por especificação incorreta.

As sobretensões temporárias em frequência industrial podem ser divididas em baixa e alta amplitude.

Sobretensões Temporárias de Baixa Amplitude:

As maiores sobretensões temporárias a serem consideradas como de *"Baixa Amplitude"*, são aquelas que fazem com que os pára-raios atinjam a *"Temperatura Limite de Estabilidade"*, em torno de 200 [°C], em um intervalo de tempo de 1 [s] a 200 [s].

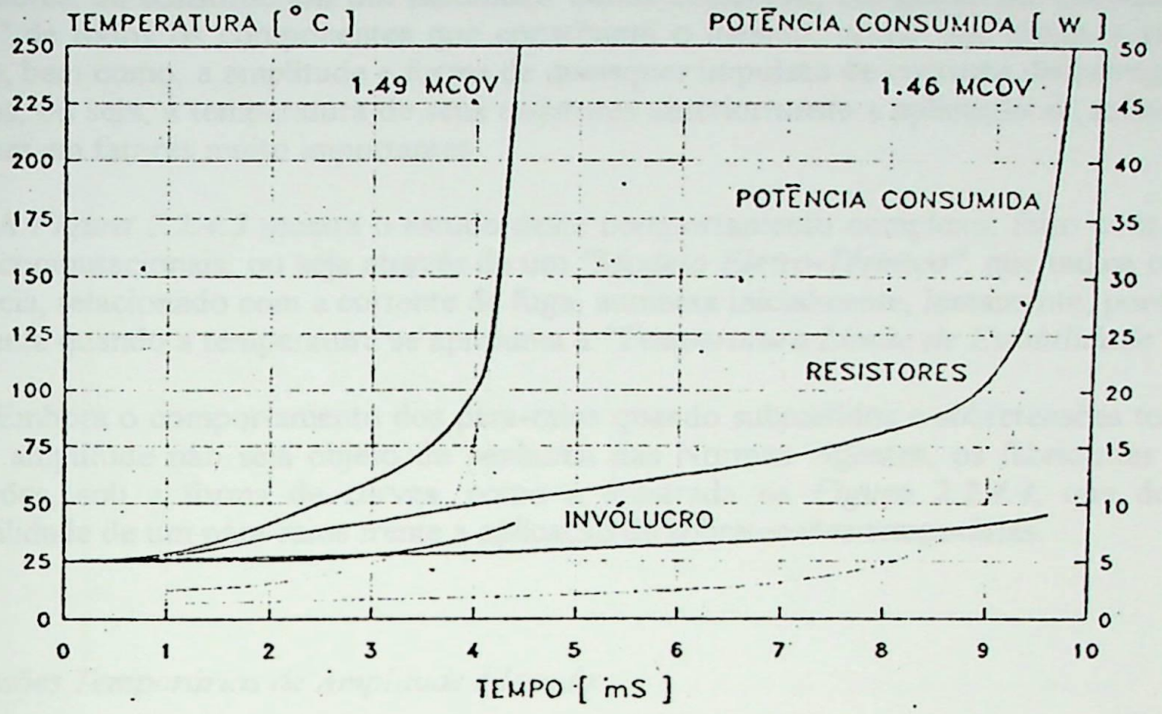


Figura 2.2.4.3 - Comportamento Eletro-Térmico de um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores Submetido a Diferentes Valores de Sobretensões de Baixa Amplitude

O consumo de potência necessário para impor estas taxas de crescimento de temperatura não é elevado e sob estas condições a corrente de fuga, normalmente é inferior a 1 [A] de crista. Logo podem ser consideradas desprezáveis as possíveis interaçõess entre o pára-raios e os sistemas, uma vez que as correntes desta ordem, não impõem quedas de tensão apreciáveis através das impedâncias em frequência do sistema.

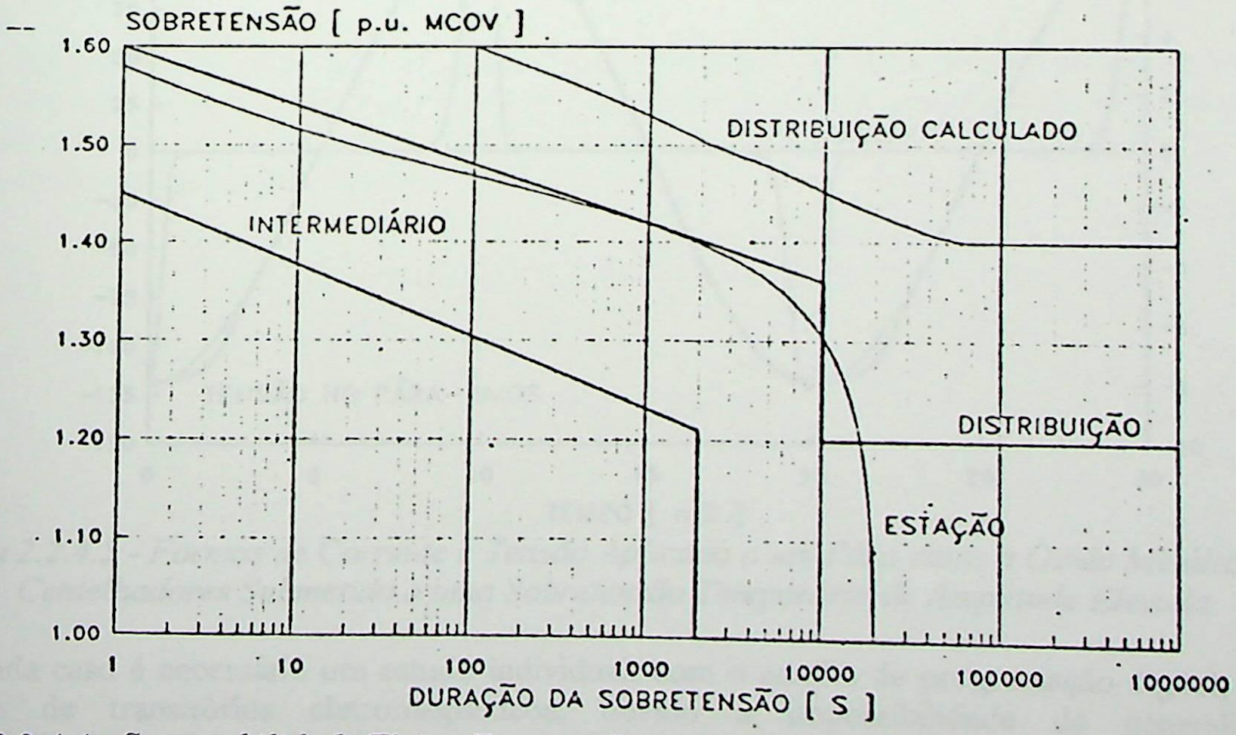


Figura 2.2.4.4 - Suportabilidade Típica Frente a Sobretensões Temporárias de Baixa Amplitude de um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores sob Temperatura Ambiente de 60 [°C]

Nestes casos, o comportamento detalhado do pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, se constitue em um fenômeno muito complexo, resultante da interação *"Eletro-Térmica"* de todos os componentes que constituem o mesmo, sendo que ainda, a temperatura ambiente, bem como, a amplitude e forma de quaisquer impulsos de corrente descarregados pelos pára-raios, ou seja, a temperatura de seus resistores anteriormente a aplicação da sobretensão, se constituem em fatores muito importantes.

A *Figura 2.2.4.3* mostra o estudo deste comportamento complexo, feito com auxílio de técnicas computacionais, ou seja através de um *"Modelo Eletro-Térmico"*, que indica o consumo de potência, relacionado com a corrente de fuga, aumenta inicialmente, lentamente, porém acelera rapidamente quando a temperatura se aproxima a *"Temperatura Limite de Estabilidade"*.

Embora o comportamento dos pára-raios quando submetidos a sobretensões temporárias de baixa amplitude não seja objeto de nenhuma das Normas vigentes, os fabricantes publicam informações, sob a forma de curvas, como a mostrada na *Figura 2.2.4.4*, que detalham a suportabilidade de um pára-raios frente a aplicação de sobretensões temporárias.

Sobretensões Temporárias de Amplitude Elevada:

Por convenção as sobretensões em frequência industrial resultam em uma corrente de fuga, superior a 1 [A] de crista, pois, normalmente a partir deste ponto a tensão aplicada aos pára-raios começa a sofrer distorção provenientes das quedas de tensão na impedâncias do sistema.

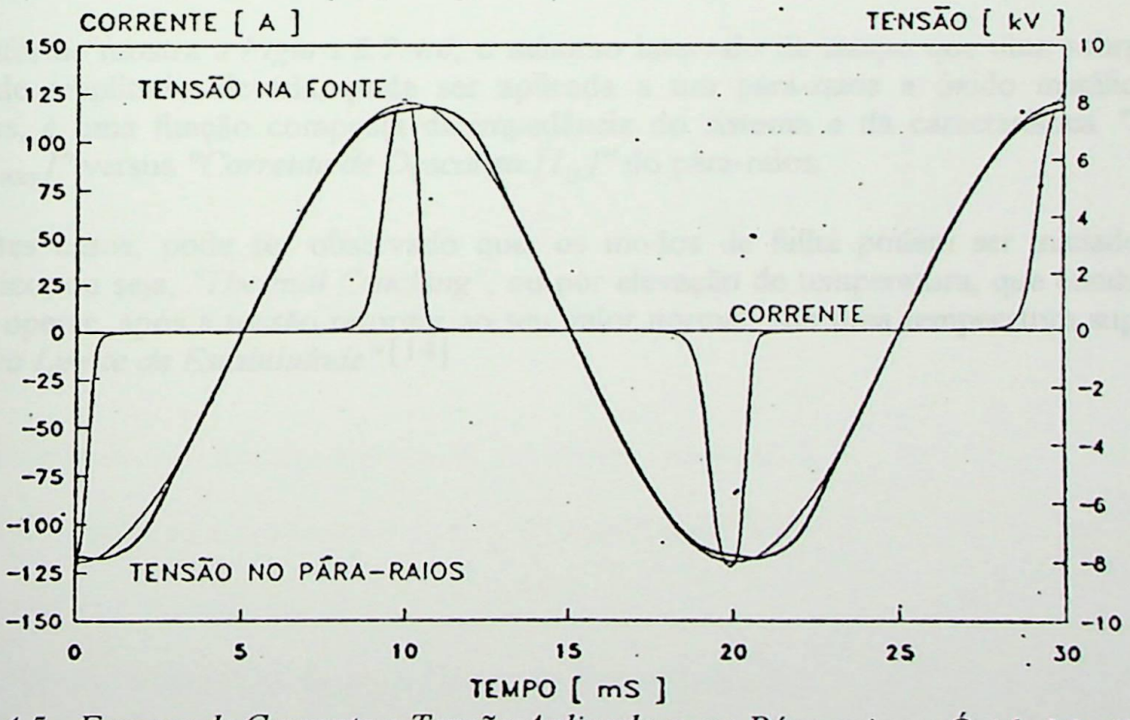


Figura 2.2.4.5 - Formas de Corrente e Tensão Aplicada a um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores Submetido a uma Sobretensão Temporária de Amplitude Elevada

Para cada caso é necessário um estudo individual, com o auxílio de programação digital, para a solução de transitórios eletromagnéticos, devido a impossibilidade de generalizar a suportabilidade dos pára-raios, frente a estas sobretensões.

A *Figura 2.2.4.5* mostra as formas típicas de corrente, e as correspondentes tensões da fonte, aplicadas ao pára-raios, normalmente obtidos em estudos de transitórios eletromagnéticos.

Nestes casos, a temperatura dos resistores a óxido metálico, cresce sob taxas muito elevadas, sendo que nestes casos a temperatura ambiente passa a influenciar muito pouco a suportabilidade do pára-raios.

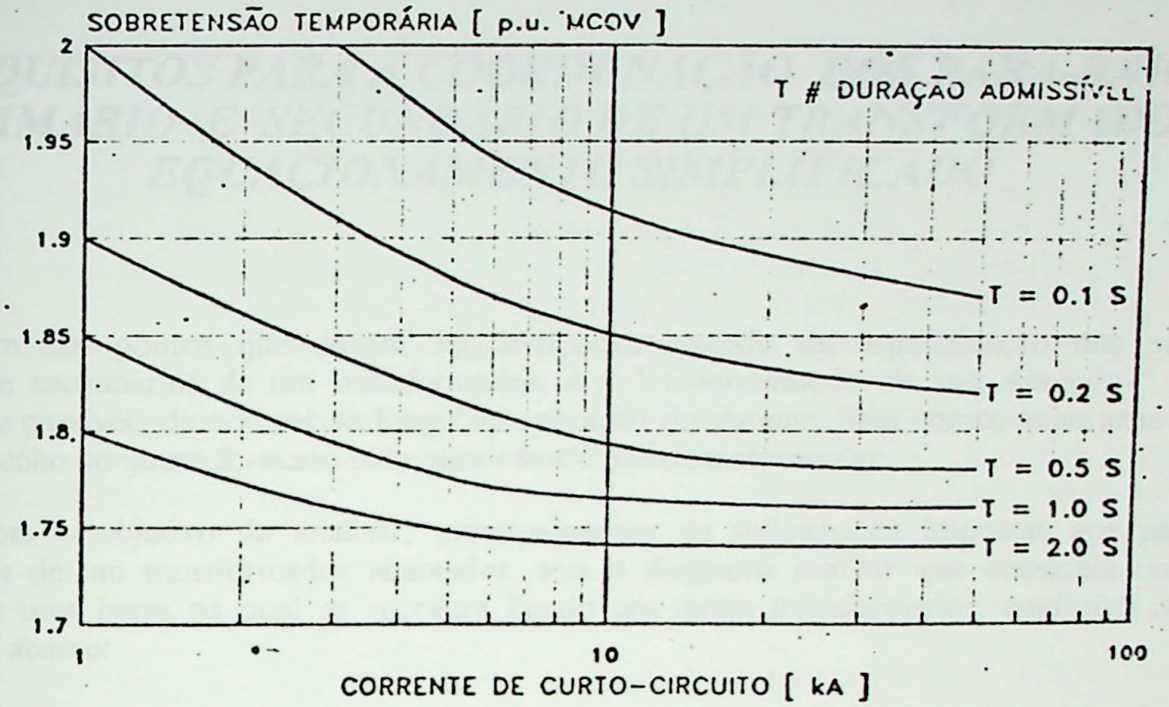


Figura 2.2.4.6 - Máximo Intervalo de Aplicação das Sobretensões Temporárias de Amplitude Elevada a um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores em Função da Tensão e da Impedância de Curto-Circuito do Sistema

Conforme mostra a *Figura 2.2.4.6*, o máximo intervalo de tempo que uma sobretensão temporária de amplitude elevada, pode ser aplicada a um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, é uma função composta da impedância do sistema e da característica *"Tensão Residual [U_{RES}]"* versus *"Corrente de Descarga [I_D]"* do pára-raios.

Nestes casos, pode ser observado que, os modos de falha podem ser iniciados, por choque térmico, ou seja, *"Thermal Cracking"*, ou por elevação de temperatura, que conduzem o pára-raios a operar, após a tensão retornar ao seu valor normal, sob uma temperatura superior a *"Temperatura Limite de Estabilidade"*.[14]

CAPÍTULO 3

REQUISITOS PARA A COORDENAÇÃO DOS PÁRA-RAIOS PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO DE UM TRANSFORMADOR EQUACIONAMENTO SIMPLIFICADO

Um dos pontos que devem ser analisados quando da especificação dos pára-raios primários e secundários de um transformador, é a " *Coordenação de sua Atuação* " frente a solicitações passíveis de ocorrer ao longo da operação do sistema, bem como, quais seus reflexos no desempenho conjunto formado pelo pára-raios e pelo transformador.

Com o objetivo de analisar, principalmente, as solicitações impostas aos pára-raios secundários de um transformador abaixador, seja o diagrama unifilar que considera uma linha incidente e uma barra na qual se encontra ligado um único transformador, conforme mostra a *Figura 3.1* abaixo:

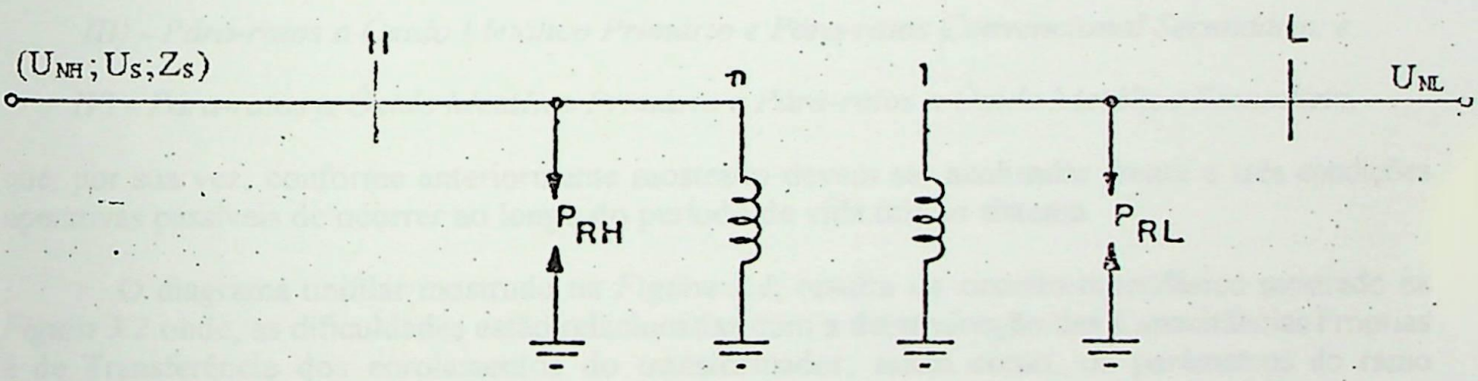


Figura 3.1 - Diagrama Unifilar do Sistema em Análise

Onde;

U_{NH} = Tensão Nominal do Enrolamento de A.T. - [Fase-Terra] [kV];

U_{NL} = Tensão Nominal do Enrolamento de B.T. - [Fase-Terra] [kV];

n : 1 = Relação de Transformação;

U_s = Surto de Tensão Imposto ao Sistema [Valor de Crista] [kV]; e

Z_s = Impedância de Surto do Sistema, dimensionalmente equivalente à uma resistência [Ω].

são as condições de contorno impostas pelo sistema.

São analisados o desempenho dos pára-raios primários e secundários, em três situações distintas:

I) - Desempenho Frente a Descargas Atmosféricas Transferidas;

II) - Desempenho Frente a Descargas de Manobra Transferidas; e

III) - Desempenho Frente a Sobretensões Sustentadas Transferidas.

De um modo geral, a análise da atuação de um pára-raios secundário frente a surtos injetados no primário do transformador se encontra relacionada com o comportamento e o desempenho dos pára-raios utilizados na proteção deste enrolamento que, dependendo do caso, podem ou não operar frente a solicitações a eles impostas. Consequentemente nestas condições, o tipo de pára-raios utilizado pode apresentar um importante papel no comportamento global do sistema, uma vez que quando o mesmo entra em condução, idealmente, a tensão nos seus terminais permanece constante, atuando no sentido de manter constante, a tensão nos outros enrolamentos.

Considerando-se a existência de duas tecnologias distintas de pára-raios, ou seja, convencionais com centelhadores e a óxido metálico, existem quatro situações tecnológicas possíveis para se prover a proteção contra surtos de um transformador de dois enrolamentos, ou seja:

I) - Pára-raios Convencional Primário e Pára-raios Convencional Secundário;

II) - Pára-raios Convencional Primário e Pára-raios a Óxido Metálico Secundário;

III) - Pára-raios a Óxido Metálico Primário e Pára-raios Convencional Secundário; e

IV) - Pára-raios a Óxido Metálico Primário e Pára-raios a Óxido Metálico Secundário.

que, por sua vez, conforme anteriormente mostrado devem ser analisadas frente a três condições operativas passíveis de ocorrer ao longo do período de vida útil do sistema.

O diagrama unifilar mostrado na *Figura 3.1*, resulta no circuito monofásico mostrado na *Figura 3.2* onde, as dificuldades estão relacionadas com a determinação das Capacitâncias Próprias e de Transferência dos enrolamentos do transformador, assim como, os parâmetros do ramo magnetizante.

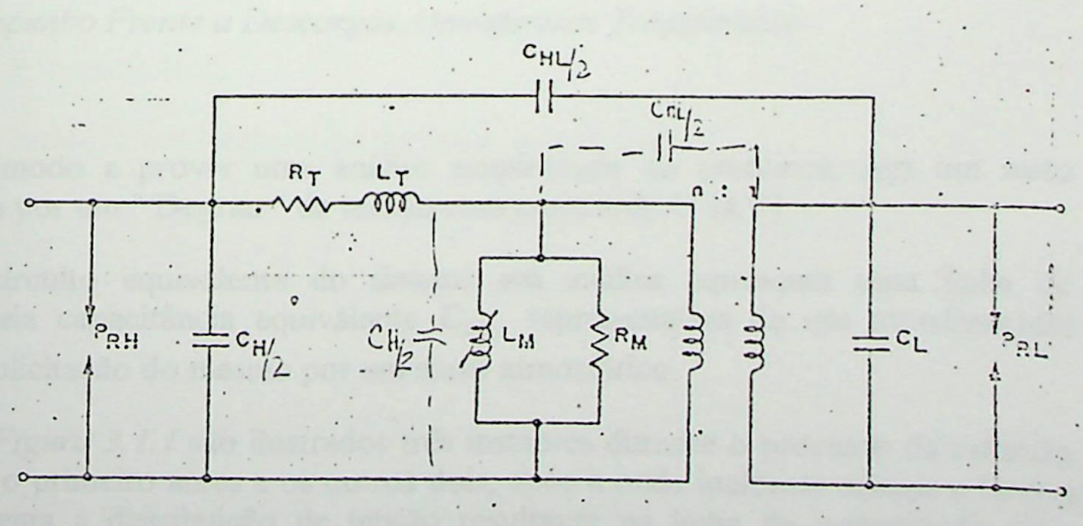


Figura 3.2 - Circuito Monofásico correspondente ao Diagrama Unifilar da Figura 3.1

As Capacitâncias Próprias C_H e C_L e de Transferência C_{HL} dos enrolamentos do transformador são obtidas com o auxílio de uma " *Ponte Doble* ", a Impedância de Dispersão referida, no caso da *Figura 3.2*, ao primário do transformador é retirada do " *Ensaio de Curto-*

Circuito "e a Resistência de Magnetização dos resultados do " *Ensaio a Vazio* ". Já a obtenção da Indutância de Magnetização, parâmetro relacionado com a " *Curva de Saturação* " do transformador, normalmente provém de ensaios específicos realizados pelo fabricante do equipamento.

Em se tratando de pré-dimensionamento e avaliação preliminar realizados com fórmulas simplificadas, o circuito mostrado na *Figura 3.2*, apresenta um elevado grau de complexidade, portanto, apresentando pouca utilidade prática.

Devido a este fato, impõe-se a necessidade de se realizar uma série de simplificações que terminam por resultar no circuito mostrado na *Figura* 3.3.

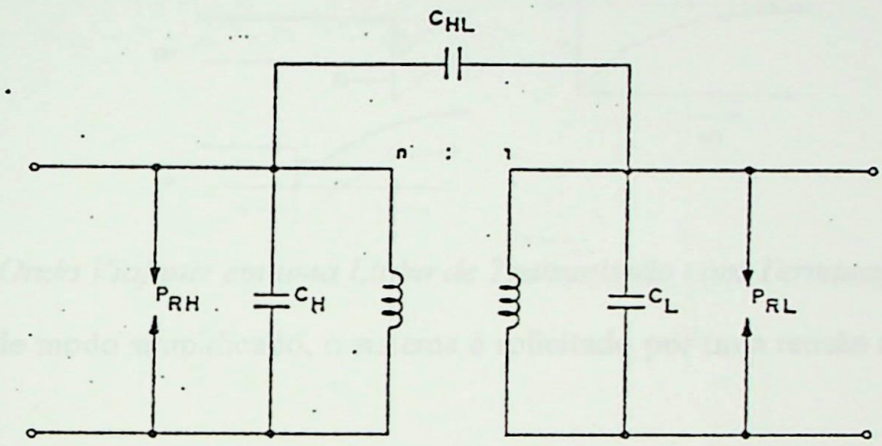


Figura 3.3 - Circuito Monofásico Simplificado correspondente à Figura 3.1

Mesmo dotado de carácter simplificado o circuito mostrado na *Figura 3.3*, confrontando com as condições de contorno relativas às solicitações impostas ao enrolamento primário, permite definir uma série de regras que devem ser respeitadas para que se tenha um " *Grau de Coordenação Adequado* " entre o pára-raios primários e secundários de um transformador.

3.1. - Desempenho Frente a Descargas Atmosféricas Transferidas:

De modo a prover uma análise simplificada do problema, seja um surto atmosférico representado por um " Degrau " de tensão com amplitude U [kV].

O circuito equivalente do sistema em análise, apresenta uma linha de transmissão terminada pela capacitância equivalente C_{eq}, representativa de um transformador monofásico quando da solicitação do mesmo por um surto atmosférico.

Na *Figura 3.1.1*.são ilustrados três instantes durante o processo de reflexão, para o caso em questão, o primeiro antes e os outros dois, após a onda incidente atingir a terminação. A linha cheia representa a distribuição de tensão resultante na linha de transmissão para os instantes mostrados. As linhas pontilhadas são as ondas individuais incidentes e refletidas. A *Figura 3.1.1 - d* mostra o perfil de tensão no capacitor C_{eq}, ou seja, $U_3(t)$, que possui uma forma exponencial começando em zero e se elevando em direção da assíntota 2U, com uma constante de tempo τ de

$Z_s C_{eq}$. Fato este, já era de se esperar, uma vez que quando a onda incidente atinge o capacitor, ela não pode alterar seu potencial instantaneamente.

Momentaneamente o capacitor se comporta como um curto-circuito, a frente de onda refletida cancela a onda incidente. Por fim o capacitor não apresenta caminho para a corrente contínua, uma vez que ele se comporta como um circuito aberto, do qual já se obteve resultados referentes a duplicação de tensão.

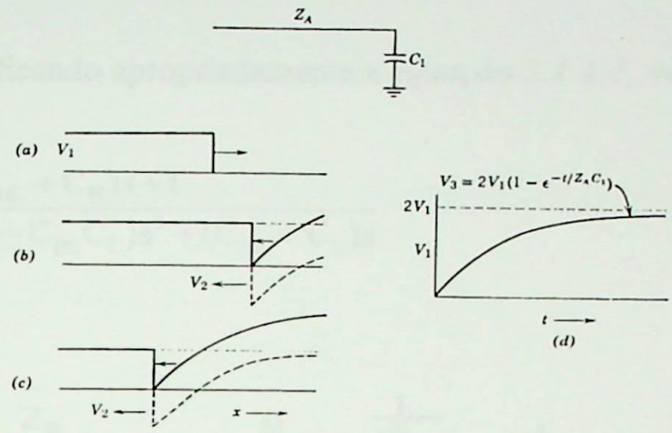


Figura 3.1.1 - Onda Viajante em uma Linha de Transmissão com Terminação Capacitiva

Com isto, de modo simplificado, o sistema é solicitado por uma tensão de surto dada por:

$$U_s = \frac{2U}{s}$$

O desenvolvimento a seguir trabalha com o equacionamento monofásico do transformador frente a surtos transferidos eletrostaticamente. Para os casos trifásicos as tensões transferidas, conforme mostra o *ítem 1.2.1.3* na *equação 1.2.1.51* para um transformador estrela aterrado - triângulo são reduzidas. No entanto, o circuito pode ser equivalentado a um circuito monofásico.

Condições a serem analisadas:

1 - Nenhum pára-raios atua;

2 - Sistema protegido pelo Pára-raios do Enrolamento de A.T.

3 - Sistema protegido pelo Pára-raios do Enrolamento de B.T.

4 - Sistema protegido por Pára-raios do Enrolamento de A.T. e do Enrolamento de B.T.

3.1.1 - Nenhum dos Pára-raios Ligado aos Terminais do Transformador Atua:

Para tanto seja o circuito mostrado na *Figura 3.1.1.1*, onde os valores dos componentes do sistema em análise, estão no Domínio de Laplace:

Através do Teorema de Thèvenin vem:

I - Cálculo da Impedância de Thèvénin:

$$Z_{TH}(s) = \frac{1}{\dfrac{1}{\dfrac{1}{\dfrac{1}{Z_p} + sC_H} + \dfrac{1}{sC_{HL}}} + sC_L} \qquad (3.1.1.1)$$

Resolvendo e simplificando apropriadamente a *equação 3.1.1.1*, vem:

$$Z_{TH}(s) = \frac{Z_p(C_{HL} + C_H)s + 1}{Z_p(C_{HL}C_L + C_HC_L + C_{HL}C_L)s^2 + (C_{HL} + C_L)s} \qquad (3.1.1.2)$$

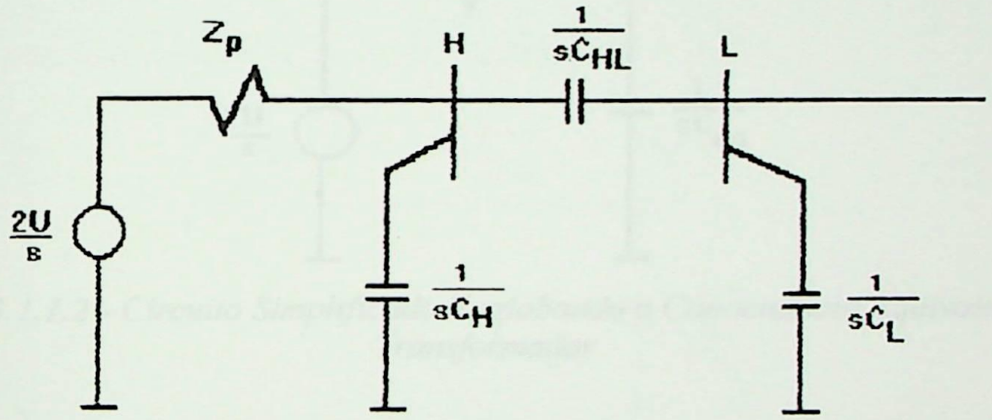


Figura 3.1.1.1- Circuito Equivalente de um Transformador quando os Pára-raios Não Atuam

II - Cálculo da Tensão de Thèvénin:

II.1 - Cálculo da Impedância Equivalente do Transformador:

$$Z_{eq}(s) = \frac{1}{\dfrac{1}{\dfrac{1}{sC_H}} + \dfrac{1}{\dfrac{1}{sC_{HL}} + \dfrac{1}{sC_L}}} \qquad (3.1.1.3)$$

Resolvendo as frações e rearranjando a equação vem:

$$Z_{eq}(s) = \frac{(C_L + C_{HL})}{(C_HC_L + C_HC_{HL} + C_{HL}C_L)s} \qquad (3.1.1.4)$$

Sendo:

$$Z_{eq}(s) = \frac{1}{sC_{eq}} \tag{3.1.1.5}$$

Portanto vem:

$$C_{eq} = \frac{(C_H C_L + C_H C_{HL} + C_{HL} C_L)}{(C_{HL} + C_L)} \tag{3.1.1.6}$$

Considerando o circuito equivalente conforme mostrado na *Figura 3.1.1.2*, vem:

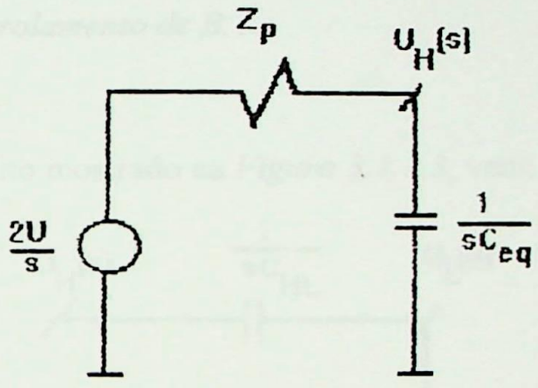


Figura 3.1.1.2 - Circuito Simplificado Englobando a Capacitância Equivalente do Transformador

$$\frac{2U}{s} = \left(Z_p + \frac{1}{sC_{eq}}\right) I(s) \tag{3.1.1.7}$$

$$U_H(s) = \frac{I(s)}{sC_{eq}} \tag{3.1.1.8}$$

Da *equação 3.1.1.7*, vem:

$$I(s) = \frac{\frac{2U}{s}}{\left(Z_p + \frac{1}{sC_{eq}}\right)} \tag{3.1.1.9}$$

Das *equações 3.1.1.8 e 3.1.1.9*, vem:

$$U_H(s) = \frac{\frac{2U}{s}\frac{1}{sC_{eq}}}{\left(Z_p + \frac{1}{sC_{eq}}\right)} \tag{3.1.1.10}$$

Resolvendo apropriadamente a equação acima vem:

$$U_H(s) = \frac{2U}{sZ_pC_{eq}\left(s + \frac{1}{Z_pC_{eq}}\right)} \qquad (3.1.1.11)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace vem:

$$U_H(t) = 2U\left[1 - \varepsilon^{\frac{-t}{Z_pC_{eq}}}\right] \qquad (3.1.1.12)$$

II.1 - Cálculo da tensão do enrolamento de B.T.:

Equacionando o circuito mostrado na *Figura 3.1.1.3*, vem:

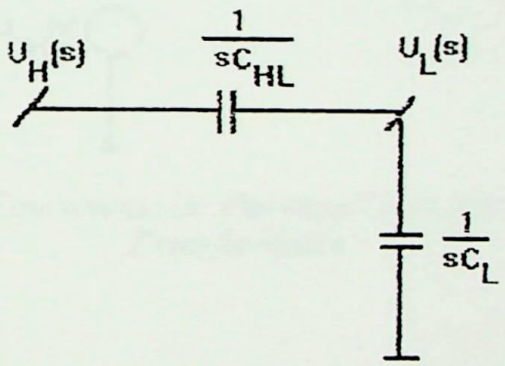


Figura 3.1.1.3 - Circuito Equivalente do Transformador para Cálculo da Tensão nos Terminais de B.T

$$U_L(s) = \frac{U_H(s)}{\frac{1}{sC_{HL}} + \frac{1}{sC_L}} \frac{1}{sC_L} \qquad (3.1.1.13)$$

Resolvendo e simplificando apropriadamente a equação acima. vem:

$$U_L(s) = U_H(s)\frac{C_{HL}}{C_{HL} + C_L} \qquad (3.1.1.14)$$

Fato que implica em:

$$U_L(t) = U_H(t)\frac{C_{HL}}{C_{HL} + C_L} \qquad (3.1.1.15)$$

ou seja:

$$U_L(t) = 2U\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right)\left[1-\varepsilon^{\frac{-t}{Z_p C_{eq}}}\right] \qquad (3.1.1.16)$$

III - O Equivalente Thèvénin de um Transformador:

A *Figura 3.1.1.4*, mostra o Circuito Equivalente de um Transformador para a condição de surtos transferidos eletrostaticamente, no domínio da frequência, visto de seu secundário, quando nenhum de seus pára-raios atua.

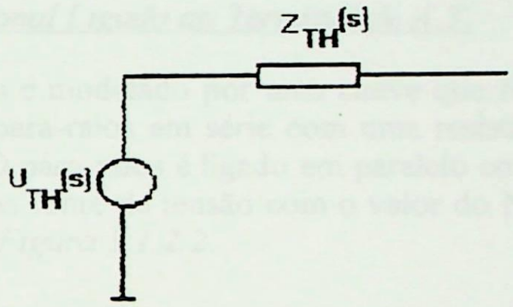


Figura 3.1.1.4 - Circuito Equivalente de Thèvénin Visto dos Terminais de B.T. de um Transformador

Onde:

$$Z_{TH}(s) = \frac{Z_p(C_{HL}+C_H)s+1}{Z_p(C_{HL}C_L+C_HC_L+C_{HL}C_L)s^2+(C_{HL}+C_L)s}$$

e:

$$U_{TH}(s) = U_L(s) = \left(\frac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right)\frac{2U}{sZ_pC_{eq}\left(s+\frac{1}{Z_pC_{eq}}\right)}$$

3.1.2 - Sistema Protegido por Pára-raios Ligado ao Terminal de A.T.

Deste modo, seja o sistema, conforme mostrado na *Figura 3.1.2.1*.

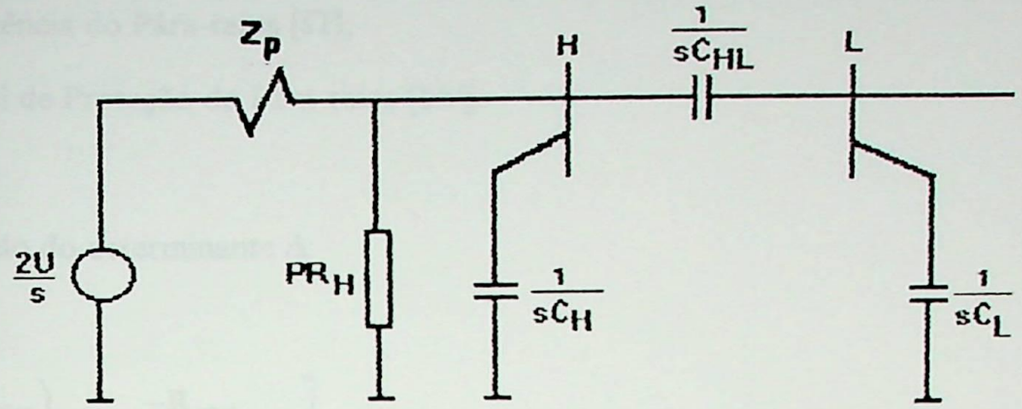


Figura 3.1.2.1 - Circuito Equivalente do Transformador Protegido por um Pára-raios Ligado ao Terminal de A.T.

I-Pára-raios do Tipo Convencional Ligado ao Terminal de A.T.

Neste caso o pára-raios é modelado por uma chave que fecha em $t > 0$, quando a tensão atinge o nível de proteção do pára-raios em série com uma resistência com valor dependente da corrente que flui pelo mesmo. O pára-raios é ligado em paralelo com a capacitância equivalente do transformador em série com uma fonte de tensão com o valor do Nível de Proteção do Pára-raios NP_{PRH} , conforme mostrado na *Figura 3.1.2.2*.

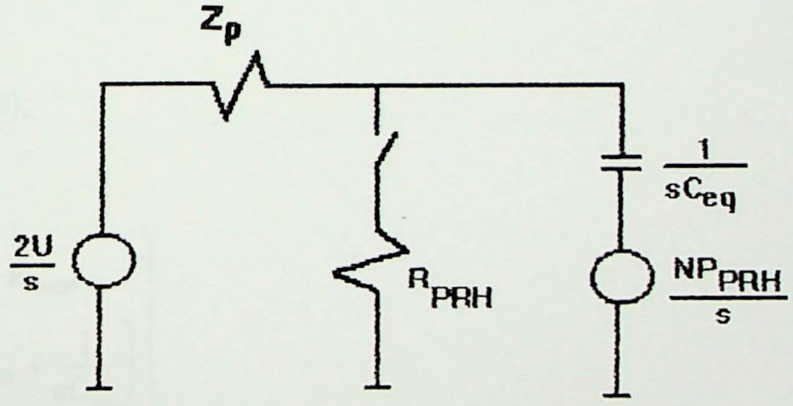


Figura 3.1.2.2 - Circuito Equivalente Simplificado do Transformador Protegido por um Pára-raios Ligado ao Terminal de A.T

Equacionando os dois laços do circuito equivalente da *Figura 3.1.2.2*, na forma matricial vem:

$$\begin{bmatrix} (Z_p + R_{PRH}) & -R_{PRH} \\ -R_{PRH} & \left(R_{PRH} + \frac{1}{sC_{eq}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2U}{s} \\ \frac{-NP_{PRH}}{s} \end{bmatrix} \qquad (3.1.2.1)$$

Onde:

$\frac{2U}{s}$ = Tensão de Surto Aplicada ao Sistema [kV];

Z_p = Impedância de Surto do Sistema [Ω];

R_{PRH} = Resistência do Pára-raios [Ω];

NP_{PRH} = Nível de Proteção do Pára-raios [kV].

Cálculo do determinante Δ:

$$\Delta = \begin{bmatrix} (Z_p + R_{PRH}) & -R_{PRH} \\ -R_{PRH} & \left(R_{PRH} + \frac{1}{sC_{eq}}\right) \end{bmatrix} \qquad (3.1.2.2)$$

Resolvendo apropriadamente o Determinante vem:

$$\Delta = \frac{Z_p R_{PRH} C_{eq} s + (Z_p + R_{PRH})}{C_{eq} s}$$

Cálculo da corrente $I_1(s)$:

$$I_1(s) = \frac{\begin{bmatrix} \frac{2U}{s} & -R_{PRH} \\ \frac{-NP_{PRH}}{s} & \left(R_{PRH} + \frac{1}{sC_{eq}}\right) \end{bmatrix}}{\Delta} \qquad (3.1.2.3)$$

ou seja:

$$I_1(s) = \frac{(2U - NP_{PRH}) R_{PRH} C_{eq} s + 2U}{Z_p R_{PRH} C_{eq} s^2 + (Z_p + R_{PRH}) s}$$

Colocando em evidência $(2U - NP_{PRH}) R_{PRH} C_{eq}$ no numerador e $Z_p R_{PRH} C_{eq}$ no denominador, vem:

$$I_1(s) = \frac{(2U - NP_{PRH})R_{PRH}C_{eq}}{Z_p R_{PRH} C_{eq} s} \frac{\left(s + \frac{2U}{(2U - NP_{PRH})R_{PRH}C_{eq}}\right)}{\left(s + \frac{Z_p + R_{PRH}}{Z_p R_{PRH} C_{eq}}\right)} \qquad (3.1.2.4)$$

como:

$a_1 = [(2U - NP_{PRH})R_{PRH}C_{eq}]]$

$a_0 = 2U$

$b_1 = Z_p + R_{PRH}$

$b_2 = Z_p R_{PRH} C_{eq}$

vem:

$$I_1(s) = \frac{a_1}{b_2} \frac{\left(s + \frac{a_0}{a_1}\right)}{s\left(s + \frac{b_1}{b_2}\right)} \qquad (3.1.2.5)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na *equação 3.1.2.1*, vem:

$$I_1(t) = \frac{a_1}{b_2}\left[\frac{-\left(\frac{a_0}{a_1}\right) + \left(\frac{a_0}{a_1} + \frac{b_1}{b_2}\right)\varepsilon^{-\frac{b_1}{b_2}t}}{\frac{b_1}{b_2}}\right]$$

Substituindo os valores das variáveis da equação e simplificando, vem:

$$I_1(t) = \frac{2U}{R_{PRH} + Z_p} + \frac{2UR_{PRH} - NP_{PRH}(R_{PRH} + R)}{Z_p(R_{PRH} + Z_p)} \varepsilon^{-\left[\frac{K+1}{Z_p C_{eq}}\right]t} \qquad (3.1.2.6)$$

Onde:

$$K = \frac{Z_p}{R_{PRH}}$$

Cálculo da corrente $I_2(s)$:

$$I_2(s) = \frac{\begin{bmatrix} (Z_p + R_{PRH}) & \frac{2U}{s} \\ -R_{PRH} & \frac{-NP_{PRH}}{s} \end{bmatrix}}{\Delta} \qquad (3.1.2.7)$$

ou seja:

$$I_2(s) = \frac{C_{eq}[-(Z_p + R_{PRH})NP_{PRH} + 2UR_{PRH}]}{Z_p R_{PRH} C_{eq} s + Z_P + R_{PRH}}$$

Colocando em evidência o coeficiente da maior potência de s, no denominador, vem:

$$I_2(s) = \frac{C_{eq}[-(Z_p + R_{PRH})NP_{PRH} + 2UR_{PRH}]}{Z_p R_{PRH} C_{eq}\left(s + \frac{(Z_p + R_{PRH})}{RR_{PRH}C_{eq}}\right)} \qquad (3.1.2.8)$$

como:

$$c_0 = C_{eq}[-(Z_p + R_{PRH})NP_{PRH} + 2UR_{PRH}]$$

$$d_1 = Z_p R_{PRH} C_{eq}$$

$$d_0 = Z_p + R_{PRH}$$

vem:

$$I_2(s) = \frac{c_0}{d_1\left(s + \frac{d_0}{d_1}\right)} \qquad (3.1.2.9)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na *equação 3.1.2.9*, vem:

$$I_2(t) = \frac{c_0}{d_1}\varepsilon^{-\frac{d_0}{d_1}t}$$

Substituindo os valores das variáveis da equação e simplificando, vem:

$$I_2(t) = \frac{[-(K+1)NP_{PRH} + 2U]}{Z_p}\varepsilon^{-\left[\frac{K+1}{Z_p C_{eq}}\right]t} \qquad (3.1.2.10)$$

Logo para a corrente no pára-raios, vem:

$$I_{PRH}(t) = I_1(t) - I_2(t)$$

$$I_{PRH}(t) = \left[\frac{NP_{PRH}}{R_{PRH}} - \frac{2U}{(Z_p + R_{PRH})}\right]\varepsilon^{-\left[\frac{K+1}{Z_p C_{eq}}\right]t} + \frac{2U}{(Z_p + R_{PRH})} \qquad (3.1.2.11)$$

Onde, novamente:

$$K = \frac{Z_p}{R_{PRH}}$$

De modo simplificado vem que o valor de pico da corrente do pára-raios do enrolamento de A.T. é dado por:

$$I_{PRH} = \frac{NP_{PRH}}{R_{PRH}} \qquad (3.1.2.12)$$

No caso dos Pára-raios Convencionais, tem-se:

$$NP_{PRH} = U_d \qquad (3.1.2.13)$$

Considerando $I_{PRH} < 5[kA]$, ou seja, $U_{RES_{5[kA]}} > U_d$, vem:

$$R_{PRH} = \frac{U_{RES_{5[kA]}}}{5} \qquad (3.1.2.14)$$

o que implica em:

$$I_{PRH} = \frac{5U_d}{U_{RES_{5[kA]}}} \quad [kA]$$

$$(I_{PRH} < 5[kA]) \qquad (3.1.2.15)$$

Considerando $5[kA] < I_{PRH} < 10[kA]$, ou seja, $U_{RES_{5[kA]}} < U_d < U_{RES_{10[kA]}}$, vem:

$$R_{PRH} = \frac{U_d\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}\right]}{5\left[U_d + U_{RES_{10[kA]}} - 2U_{RES_{5[kA]}}\right]} \qquad (3.1.2.16)$$

o que na *equação 3.1.2.12*, implica em:

$$I_{PRH} = 5 + \frac{5\left[U_d - U_{RES_{5[kA]}}\right]}{\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}\right]} \quad [kA]$$

$$(5[kA] < I_{PRH} < 10[kA]) \qquad (3.1.2.17)$$

Onde:

U_d = Tensão Disruptiva do pára-raios [kV]

$U_{RES_{5[kA]}}$ = Tensão Residual para 5[kA] [kV]

$U_{RES_{10[kA]}}$ = Tensão Residual para 10[kA] [kV]

Finalmente, ao se considerar $I = kU^{\alpha}$, a *equação 3.1.2.17*, pode ser transformada em:

$$I_{PRH} = 5 + \frac{5\left[U_d - U_{RES_{5[kA]}}\right]}{U_{RES_{5[kA]}}\left[2^{\alpha} - 1\right]} \qquad (3.1.2.18)$$

Onde:

α = Coeficiente de Não Linearidade $3 < \alpha < 4$

II- Pára-raios a Óxido de Zinco Ligado ao Terminal de A.T.

Neste caso o pára-raios é modelado por uma chave que fecha em $t > 0$, quando a tensão atinge o nível de proteção do pára-raios em série com uma resistência com valor dependente da corrente que flui pelo mesmo, conforme mostrado na *Figura 3.1.2.3*.

Equacionando os dois laços do circuito equivalente da *Figura 3.1.2.3*, na forma matricial vem:

$$\begin{bmatrix} \left(Z_p + R_{PRH}\right) & -R_{PRH} \\ -R_{PRH} & \left(R_{PRH} + \frac{1}{sC_{eq}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2U}{s} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (3.1.2.19)$$

Onde:

$\frac{2U}{s}$ = Tensão de Surto Aplicada ao Sistema [kV];

Z_p = Impedância de Surto do Sistema [Ω];

R_{PRH} = Resistência do Pára-raios [Ω];

NP_{PRH} = Nível de Proteção do Pára-raios [kV].

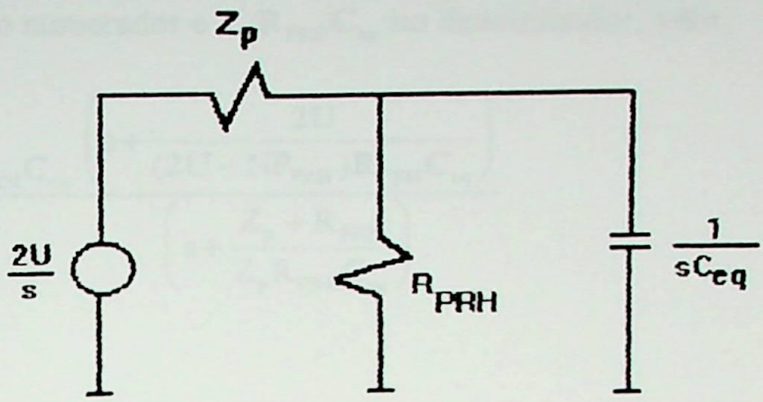


Figura 3.1.2.3 - Circuito Equivalente Simplificado do Transformador Protegido por Pára-raios a Óxido de Zinco Ligado ao Terminal de A.T

Cálculo do determinante Δ:

$$\Delta = \begin{bmatrix} (Z_p + R_{PRH}) & -R_{PRH} \\ -R_{PRH} & \left(R_{PRH} + \dfrac{1}{sC_{eq}}\right) \end{bmatrix} \qquad (3.1.2.20)$$

Resolvendo apropriadamente o Determinante vem:

$$\Delta = \frac{Z_p R_{PRH} C_{eq} s + (Z_p + R_{PRH})}{C_{eq} s}$$

Cálculo da corrente $I_1(s)$:

$$I_1(s) = \frac{\begin{bmatrix} \dfrac{2U}{s} & -R_{PRH} \\ 0 & \left(R_{PRH} + \dfrac{1}{sC_{eq}}\right) \end{bmatrix}}{\Delta} \qquad (3.1.2.21)$$

ou seja:

$$I_1(s) = \frac{2U(R_{PRH} C_{eq} s + 1)}{Z_p R_{PRH} C_{eq} s^2 + (Z_p + R_{PRH}) s}$$

Colocando em evidência:

$(2U - NP_{PRH})R_{PRH}C_{eq}$ no numerador e $Z_p R_{PRH} C_{eq}$ no denominador, vem:

$$I_1(s) = \frac{(2U - NP_{PRH})R_{PRH}C_{eq}}{Z_p R_{PRH} C_{eq} s} \frac{\left(s + \frac{2U}{(2U - NP_{PRH})R_{PRH}C_{eq}}\right)}{\left(s + \frac{Z_p + R_{PRH}}{Z_p R_{PRH} C_{eq}}\right)} \qquad (3.1.2.22)$$

como:

$a_1 = [(2U - NP_{PRH})R_{PRH}C_{eq}]]$

$a_0 = 2U$

$b_1 = Z_p + R_{PRH}$

$b_2 = Z_p R_{PRH} C_{eq}$

vem:

$$I_1(s) = \frac{a_1}{b_2} \frac{\left(s + \frac{a_0}{a_1}\right)}{s\left(s + \frac{b_1}{b_2}\right)} \qquad (3.1.2.23)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na *equação 3.1.2.23* vem:

$$I_1(t) = \frac{a_1}{b_2} \left[\frac{\left(\frac{a_0}{a_1}\right) - \left(\frac{a_0}{a_1} - \frac{b_1}{b_2}\right)\varepsilon^{-\frac{b_1}{b_2}t}}{\frac{b_1}{b_2}} \right]$$

Substituindo os valores das variáveis da equação e simplificando, vem:

$$I_1(t) = \frac{2U}{R_{PRH} + Z_p} + \frac{2UR_{PRH}}{Z_p(R_{PRH} + Z_p)} \varepsilon^{-\left[\frac{K+1}{Z_p C_{eq}}\right]t} \qquad (3.1.2.24)$$

Onde:

$$K = \frac{Z_p}{R_{PRH}}$$

Cálculo da corrente $I_2(s)$:

$$I_2(s) = \frac{\begin{bmatrix} (Z_p + R_{PRH}) & \frac{2U}{s} \\ -R_{PRH} & 0 \end{bmatrix}}{\Delta} \qquad (3.1.2.25)$$

ou seja:

$$I_2(s) = \frac{2UR_{PRH}C_{eq}}{Z_pR_{PRH}C_{eq}s + Z_p + R_{PRH}}$$

Colocando em evidência o coeficiente da maior potência de s, no denominador, vem:

$$I_2(s) = \frac{2UR_{PRH}C_{eq}}{Z_pR_{PRH}C_{eq}\left(s + \frac{(Z_p + R_{PRH})}{Z_pR_{PRH}C_{eq}}\right)} \qquad (3.1.2.26)$$

como:

$c_0 = 2UR_{PRH}C_{eq}$

$d_1 = Z_pR_{PRH}C_{eq}$

$d_0 = Z_p + R_{PRH}$

vem:

$$I_2(s) = \frac{c_0}{d_1\left(s + \frac{d_0}{d_1}\right)} \qquad (3.1.2.27)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na *equação 3.1.2.27;* vem:

$$I_2(t) = \frac{c_0}{d_1}\varepsilon^{-\frac{d_0}{d_1}t}$$

Substituindo os valores das variáveis da equação e simplificando, vem:

$$I_2(t) = \frac{2U}{Z_p}\varepsilon^{-\left[\frac{K+1}{Z_p C_{eq}}\right]t} \qquad (3.1.2.28)$$

Logo para a corrente no pára-raios, vem:

$$I_{PRH}(t) = I_1(t) - I_2(t)$$

$$I_{PRH}(t) = \frac{2U}{(Z_p + R_{PRH})}\left(1 - \varepsilon^{-\left[\frac{K+1}{Z_p C_{eq}}\right]t}\right) \qquad (3.1.2.29)$$

Onde, novamente:

$$K = \frac{Z_p}{R_{PRH}}$$

De modo simplificado vem que o valor de pico da corrente do pára-raios do Lado de A.T. é dado por:

$$I_{PRH} = \frac{2U}{Z_p + R_{PRH}} \qquad (3.1.2.30)$$

No caso dos Pára-raios a Óxido de Zinco, tem-se:

$$NP_{PRH} = \sqrt{2}U_N + \left(\frac{U_{RES_{5[kA]}} - \sqrt{2}U_N}{5}\right)I_d \qquad (3.1.2.31)$$

bem como:

$$2U = NP_{PRH} + Z_p I_d \qquad (3.1.2.32)$$

Considerando $I_{PRH} < 5[kA]$, vem:

$$R_{PRH} = \frac{\sqrt{2}U_N[5Z_p - 2U] + 2UU_{RES_{5[kA]}}}{5[2U - \sqrt{2}U_N]} \qquad (3.1.2.33)$$

ou seja, na *equação 3.1.2.30*:

$$I_{PRH} = \frac{5\left[2U - \sqrt{2}U_N\right]}{\left[U_{RES_{5[kA]}} - \sqrt{2}U_N + 5Z_p\right]} \quad [kA]$$

$(I_{PRH} < 5[kA])$ (3.1.2.34)

Alternativamente, considerando $5[kA] < I_{PRH} < 10[kA]$, vem:

$$R_{PRH} = \frac{2U[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}] + 5Z_p[2U_{RES_{5[kA]}} - U_{RES_{10[kA]}}]}{5[2U + U_{RES_{10[kA]}} - 2U_{RES_{5[kA]}}]} \quad (3.1.2.35)$$

vem que:

$$I_{PRH} = \frac{5[2U + U_{RES_{10[kA]}} - 2U_{RES_{5[kA]}}]}{[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}} + 5Z_p]} \quad [kA]$$

$(5[kA] < I_{PRH} < 10[kA])$ (3.1.2.36)

Finalmente a *equação 3.1.2.36*, pode ser transformada em:

$$I_{PRH} = \frac{5\left[2U + U_{RES_{10[kA]}}\left(2^{\alpha} - 2\right)\right]}{U_{RES_{5[kA]}}\left(2^{\alpha} - 1\right) + 5Z_p} \quad (3.1.2.37)$$

Onde:

α = Coeficiente de Não Linearidade $10 < \alpha < 15$

O equacionamento do circuito para um pára-raios a Óxido de Zinco conduz a uma resposta diferente da mostrada na *equação 3.1.2.11* (do pára-raios a Carboneto de Silício). No entanto conforme proposto, o levantamento da dependência existente entre o nível de proteção e a corrente de descarga de um pára-raios a Óxido de Zinco existente na *equação 3.1.2.19* implica na determinação do mesmo valor máximo de corrente de descarga.

3.1.3 - Sistema Protegido por Pára-raios Ligado ao Terminal de B.T.

Deste modo, seja o sistema, conforme mostrado na *Figura 3.1.3.1*:

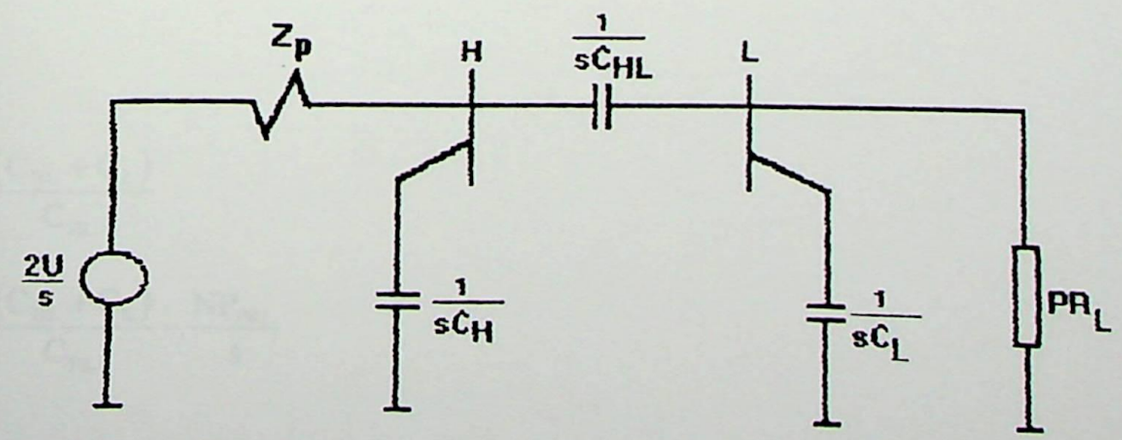


Figura 3.1.3.1 - Circuito Equivalente de um Transformador Protegido por um Pára-raios Ligado ao Terminal B.T.

I - Pára-raios do Tipo Convencional Ligado aos Terminais de B.T.

Neste caso o pára-raios é modelado por uma chave que fecha em $t > 0$, quando a tensão atinge o nível de proteção do pára-raios em série com uma resistência com valor dependente da corrente que flui pelo mesmo, conforme mostrado na *Figura 3.1.3.2*.

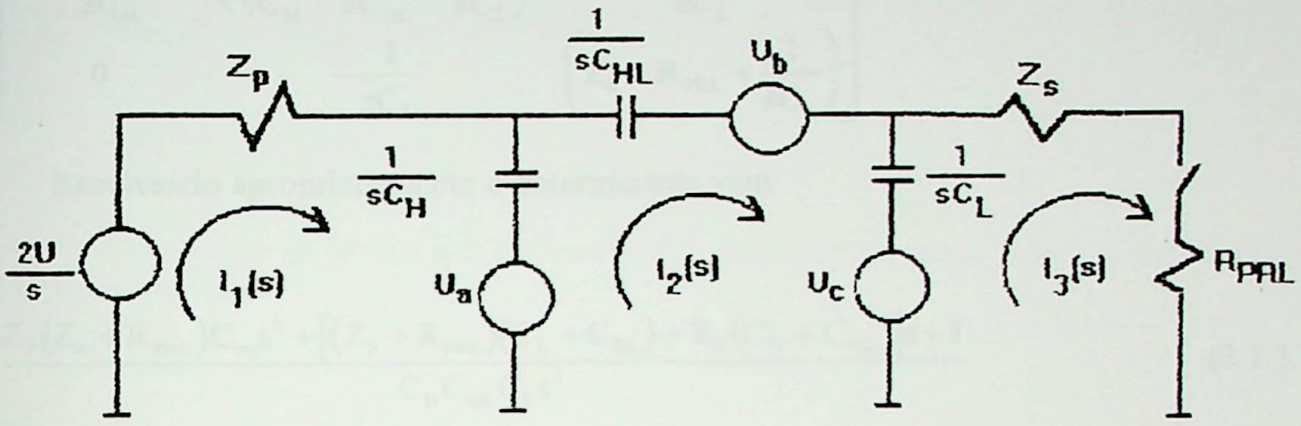


Figura 3.1.3.2 - Circuito Equivalente de um Transformador Protegido por um Pára-raios Ligado ao Terminal de B.T.

Equacionando os três laços do circuito equivalente da *Figura 3.1.3.2*, na forma matricial,vem:

$$\begin{bmatrix} \left(Z_p + \frac{1}{sC_H}\right) & -\frac{1}{sC_H} & 0 \\ -\frac{1}{sC_H} & \left(\frac{1}{sC_H} + \frac{1}{sC_{HL}} + \frac{1}{sC_L}\right) & \frac{1}{sC_L} \\ 0 & -\frac{1}{sC_L} & \left(Z_S + R_{PRL} + \frac{1}{sC_L}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \\ I_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s - U_a \\ 0 \\ U_c \end{bmatrix} \qquad (3.1.3.1)$$

Onde:

$$U_s = \frac{2U}{s}$$

$$U_a = \frac{NP_{PRL}}{s}\frac{(C_{HL} + C_L)}{C_{HL}}$$

$$U_b = \frac{NP_{PRL}}{s}\frac{(C_{HL} + C_L)}{C_{HL}} - \frac{NP_{PRL}}{s}$$

$$U_c = \frac{NP_{PRL}}{s}$$

Cálculo do determinante Δ:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \left(Z_P + \frac{1}{sC_H}\right) & -\frac{1}{sC_H} & 0 \\ -\frac{1}{sC_H} & \left(\frac{1}{sC_H} + \frac{1}{sC_{HL}} + \frac{1}{sC_L}\right) & \frac{1}{sC_L} \\ 0 & -\frac{1}{sC_L} & \left(Z_S + R_{PRL} + \frac{1}{sC_L}\right) \end{bmatrix} \qquad (3.1.3.2)$$

Resolvendo apropriadamente o determinante vem:

$$\Delta = \frac{Z_P(Z_S + R_{PRL})C_{eq}s^2 + \left[(Z_S + R_{PRL})(C_L + C_{HL}) + Z_P(C_H + C_{HL})\right]s + 1}{C_H C_{HL} C_L s^3} \qquad (3.1.3.3)$$

Cálculo da corrente $I_3(s) = I_{PRL}(s)$

$$I_{PRL}(s) = \frac{\begin{bmatrix} \left(Z_P + \frac{1}{sC_H}\right) & -\frac{1}{sC_H} & U \\ -\frac{1}{sC_H} & \left(\frac{1}{sC_H} + \frac{1}{sC_{HL}} + \frac{1}{sC_L}\right) & U_a \\ 0 & -\frac{1}{sC_L} & U_c \end{bmatrix}}{\Delta} \qquad (3.1.3.4)$$

Resolvendo a matriz do numerador, bem como substituindo a *equação 3.1.3.3* no denominador, vem:

$$I_{PRL}(s) = \frac{\frac{\left(Z_P NP_{PRL} C_{eq}\right)s + 2UC_{HL}}{C_H C_{HL} C_L s^3}}{\frac{R(Z_S + R_{PRL})C_{eq}s^2 + \left[(Z_S + R_{PRL})(C_L + C_{HL}) + Z_P(C_H + C_{HL})\right]s + 1}{C_H C_{HL} C_L s^3}} \qquad (3.1.3.5)$$

Simplificando adequadamente a *equação 3.1.3.5*, vem:

$$I_{PRL}(s) = \frac{\left(Z_P NP_{PRL} C_{eq}\right)s + 2UC_{HL}}{Z_P(Z_S + R_{PRL})C_{eq}s^2 + \left[(Z_S + R_{PRL})(C_L + C_{HL}) + Z_P(C_H + C_{HL})\right]s + 1} \qquad (3.1.3.6)$$

Considerando:

$$a_1 = Z_P NP_{PRL} C_{eq}$$

$$a_0 = 2UC_{HL}$$

$$b_2 = Z_P (Z_S + R_{PRL}) C_{eq}$$

$$b_1 = \left[(Z_S + R_{PRL})(C_L + C_{HL}) + Z_P (C_H + C_{HL}) \right]$$

$$b_0 = 1$$

Colocando em evidência o coeficiente de maior potência em s, tanto no numerador como no denominador, vem:

$$I_{PRL}(s) = \frac{a_1}{b_2} \left(\frac{s + \frac{a_0}{a_1}}{s^2 + \frac{b_1}{b_2} s + \frac{b_0}{b_2}} \right) \qquad (3.1.3.7)$$

Calculando as raízes da equação do segundo grau do denominador e trocando os seus respectivos sinais, vem:

$$r_1 = \left(\frac{-b_1 + \sqrt{b_1^{\,2} - 4b_0 b_2}}{2b_2} \right)$$

e:

$$r_2 = \left(\frac{-b_1 - \sqrt{b_1^{\,2} - 4b_0 b_2}}{2b_2} \right)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na *equação 3.1.3.7*, e simplificando adequadamente, vem:

$$I_{PRL}(t) = \frac{NP_{PRL}}{(Z_S + R_{PRL})} \left[\frac{\left(\frac{2UC_{HL}}{Z_P NP_{PRL} C_{eq}} + r_1 \right) \varepsilon^{r_1 t} - \left(\frac{2UC_{HL}}{Z_P NP_{PRL} C_{eq}} + r_2 \right) \varepsilon^{r_2 t}}{r_1 - r_2} \right] \qquad (3.1.3.8)$$

Deste modo:

$$I_{PRL}(t) = k_1\varepsilon^{k_2 t} + k_3\varepsilon^{k_4 t} \qquad (3.1.3.9)$$

Onde:

$$k_1 = \frac{4UC_{HL}(Z_S + R_{PRL}) - NP_{PRL}\left[R_{PRL}(C_L + C_{HL}) + Z_P(C_H + C_{HL})\right] + \sqrt{k}}{2(Z_S + R_{PRL})\sqrt{k}}$$

$$k_2 = \frac{(Z_S + R_{PRL})(C_L + C_{HL}) + Z_P(C_H + C_{HL}) - \sqrt{k}}{2(Z_S + R_{PRL})\left[C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\right]}$$

$$k_3 = \frac{-4UC_{HL}(Z_S + R_{PRL}) + NP_{PRL}\left[R_P(C_L + C_{HL}) + Z_P(C_H + C_{HL})\right] - \sqrt{k}}{2(Z_S + R_{PRL})\sqrt{k}}$$

$$k_4 = \frac{(Z_S + R_{PRL})(C_L + C_{HL}) + Z_P(C_H + C_{HL}) + \sqrt{k}}{2(Z_S + R_{PRL})\left[C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\right]}$$

$$k = Z_p{}^2(C_H + C_{HL})^2 + (Z_S + R_{PRL})^2(C_L + C_{HL})^2 - 2Z_P(Z_S + R_{PRL})\left[(C_H C_L) + C_{HL}(C_H + C_L) - C_{HL}{}^2\right]$$

O valor de pico da corrente no pára-raios do lado de B.T.

$$I_{PRL} = \frac{NP_{PRL}}{(Z_S + R_{PRL})} \qquad (3.1.3.10)$$

Condição de Atuação dos Pára-raios Convencionais Ligados aos Terminais de B.T.:

Reescrevendo a *equação 3.1.1.15*, mostrada anteriormente, vem:

$$U_L(t) = U_H(t)\frac{C_{HL}}{(C_{HL} + C_L)}$$

$$RTC = \frac{U_L(t)}{U_H(t)} = \frac{C_{HL}}{(C_{HL} + C_L)} \qquad (3.1.3.11)$$

e:

$$RNP_{PR} = \frac{NP_{PRL}}{NP_{PRH}} \qquad (3.1.3.12)$$

onde:

RTC = Relação de Transferência Capacitiva;

RNP_{PR} = Relação do Nível de Proteção do Pára-raios

Através das *equações 3.1.1.11 e 3.1.3.12*, é possível obter a *"Condição Mínima"* para que o pára-raios do lado de B.T. entre em condução, ou seja:

$$\frac{NP_{PRL}}{NP_{PRH}} < \frac{C_{HL}}{(C_{HL} + C_L)} \qquad (3.1.3.13)$$

ou:

$$\frac{U_{d\,PRL}}{U_{d\,PRH}} < \frac{C_{HL}}{(C_{HL} + C_L)} \qquad (3.1.3.14)$$

onde:

$U_{d\,PRL}$ = Tensão Disruptiva de Impulso do Pára-raios no lado de B.T.

Cálculo da Corrente no Pára-raios Secundário Sem a Presença de um Cabo Secundário $Z_S = 0$*:*

Como no caso de Pára-raios Convencionais:

$$NP_{PRL} = U_d \qquad (3.1.3.15)$$

Considerando $I_{PRL} < 5[kA]$, ou seja, $U_{RES_{5[kA]}} > U_d$, vem:

$$R_{PRL} = \frac{U_{RES_{5[kA]}}}{5[kA]} \qquad (3.1.3.16)$$

vem que:

$$I_{PRL} = \frac{5U_d}{U_{RES_{5[kA]}}}[kA] \qquad (I_{PRL} \leq 5[kA]) \qquad (3.1.3.17)$$

Onde:

U_d = Tensão Disruptiva do Pára-raios em [kV];

$U_{RES_{5[kA]}}$ = Tensão Residual do Pára-raios para a corrente de 5 [kA] em [kV]

Considerando $5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]$, ou seja, , vem:

$$R_{PRL} = \frac{U_d\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}\right]}{5\left[U_d + U_{RES_{10[kA]}} - 2U_{RES_{5[kA]}}\right]} \qquad (3.1.3.18)$$

Substituindo a *equação 3.1.3.18* na *equação 3.1.3.10*, bem como considerando $5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]$, ou seja $U_{RES_{5[kA]}} < U_d < U_{RES_{10[kA]}}$, vem:

$$I_{PRL} = 5 + \frac{5\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}\right]}{\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}\right]}[kA] \qquad (5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]) \qquad (3.1.3.19)$$

Onde:

$U_{RES_{10[kA]}}$ = Tensão Residual do Pára-raios para a corrente de 10 [kA] em [kV]

Finalmente a *equação 3.1.3.19*, pode ser transformada em:

$$I_{PRL} = 5 + \frac{5\left[U_d - U_{RES_{5[kA]}}\right]}{U_{RES_{5[kA]}}\left[2^{\alpha} - 1\right]}[kA] \qquad (3.1.3.20)$$

Onde:

α = Coeficiente de Não Linearidade ($3<\alpha<4$).

II - Pára-raios do Tipo a Óxido de Zinco Ligado aos Terminais de B.T.:

Neste caso o sistema que consta de um pára-raios ligado diretamente aos terminais secundário de um transformador, pode ser modelado pelo Equivalente de Thèvénin em série com uma resistência R_{PRL} dependente da corrente conforme é mostrado na *Figura 3.1.3.3*:

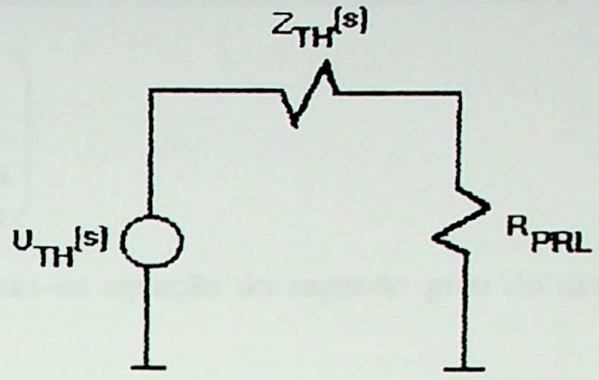


Figura 3.1.3.3 - Circuito Equivalente de Thèvénin do Circuito Mostrado na Figura 3.1.3.1

Onde:

$$U_{TH}(s) = \frac{2UC_{HL}}{s\left[Z_P C_{eq} s + (C_{HL} + C_L)\right]} \qquad (3.1.3.21)$$

$$Z_{TH}(s) = \frac{Z_P(C_{HL} + C_H)s + 1}{s\left[Z_P C_{eq} s + (C_{HL} + C_L)\right]} \qquad (3.1.3.22)$$

Onde:

$$C_{eq} = C_H C_L + C_H C_{HL} + C_L C_{HL}$$

Deste modo, equacionando o laço do circuito equivalente de Thèvénin, vem:

$$I_{PRL}(s) = \frac{U_{TH}(s)}{Z_{TH}(s) + R_{PRL}} \qquad (3.1.3.23)$$

Substituindo as *equações 3.1.3.21* e *3.1.3.22* na *equação 3.1.3.23*, e simplificando adequadamente, vem:

$$I_{PRL} = \frac{2UC_{HL}}{s\left(Z_p R_{PRL} C_{eq}\right) + s\left[Z_p(C_{HL} + C_H) + R_{PRL}(C_{HL} + C_L)\right] + 1} \qquad (3.1.3.24)$$

Considerando:

$$a_0 = 2UC_{HL}$$

$$b_2 = Z_P R_{PRL} C_{eq}$$

$$b_1 = \left[Z_P(C_{HL} + C_H) + R_{PRL}(C_{HL} + C_L)\right]$$

$$b_0 = 1$$

Colocando em evidência o coeficiente de maior potência de s, no denominador, vem:

$$I_{PRL}(s) = \frac{a_0}{b_2}\left(\frac{1}{s^2 + \frac{b_1}{b_2}s + \frac{b_0}{b_2}}\right) \qquad (3.1.3.25)$$

Calculando as raízes da equação do segundo grau do denominador e trocando os seus respectivos sinais, vem:

$$r_1 = \left(\frac{-b_1 + \sqrt{b_1^{\,2} - 4b_0b_2}}{2b_2}\right)$$

e:

$$r_2 = \left(\frac{-b_1 - \sqrt{b_1^{\,2} - 4b_0b_2}}{2b_2}\right)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na *equação 3.1.3.25*, e simplificando adequadamente, vem:

$$I_{PRL}(t) = \frac{2UC_{HL}}{Z_p R_{PRL} C_{eq}}\left[\frac{\varepsilon^{r_1 t} - \varepsilon^{r_2 t}}{r_1 - r_2}\right] \qquad (3.1.3.26)$$

Deste modo:

$$I_{PRL}(t) = k_1\left(\varepsilon^{k_2 t} - \varepsilon^{k_3 t}\right) \qquad (3.1.3.27)$$

Onde:

$$k_1 = \frac{2UC_{HL}}{Z_p R_{PRL}\left[C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\right]\sqrt{k}}$$

$$k_2 = \frac{R_{PRL}(C_L + C_{HL}) + Z_p(C_H + C_{HL}) - \sqrt{k}}{2R_{PRL}\left[C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\right]}$$

$$k_3 = \frac{R_{PRL}(C_L + C_{HL}) + Z_p(C_H + C_{HL}) + \sqrt{k}}{2R_{PRL}\left[C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\right]}$$

$$k = Z_p^{\,2}(C_H + C_{HL})^2 + R_{PRL}^{\,2}(C_L + C_{HL})^2 - 2Z_p R_{PRL}\left[(C_H C_L) + C_{HL}(C_H + C_L) - C_{HL}^{\,2}\right]$$

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

Deste modo, o valor de pico da corrente no pára-raios do lado de B.T. é dado por:

$$I_{PRL} = \frac{2UC_{HL}}{Z_P R_{PRL}\left[C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\right]\sqrt{k}}\left[\left(\frac{k_2}{k_3}\right)^{\frac{k_2}{k}} - \left(\frac{k_2}{k_3}\right)^{\frac{k_3}{k}}\right] \qquad (3.1.3.28)$$

Devido a ausência de um trecho de linha entre os bornes de B.T. do transformador e os pára-raios, que permite levantar a dependência entre o nível de proteção e a corrente de descarga, a solução da *equação 3.1.3.28* é iterativa, pois é necessário assumir um valor de R_{PRL} que resulta em uma corrente e por conseguinte, em uma tensão residual que redefine um novo valor para R_{PRL}.

3.1.4 - Sistema Protegido por Pára-raios Ligados aos Terminais de A.T. e de B.T.:

Deste modo seja o sistema, conforme mostrado na *Figura 3.1.4.1*:

Neste caso o Sistema apresenta pára-raios ligados aos terminais de A.T. e de B.T. do transformador.

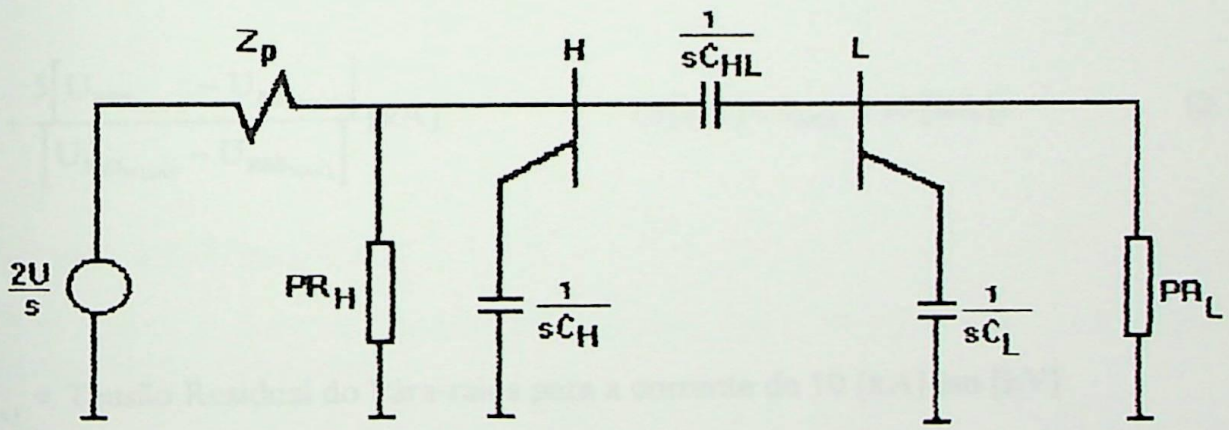


Figura 3.1.4.1 - Circuito Equivalente de um Transformador Protegido por Pára-raios Ligados aos seus Terminais de A.T. e de B.T.

Com respeito aos pára-raios ligados aos terminais de A.T., a situação é a mesma apresentada no *ítem 3.1.2*. Portanto, o seu equacionamento pode ser resumido da seguinte maneira:

1 - Pára-raios dos Terminais de A.T.:

1.1 - Utilização de Pára-raios do Tipo Convencional:

Conforme demonstrado, a corrente através dos pára-raios convencionais ligados aos terminais de A.T. de um transformador pode ser calculada segundo as seguintes equações:

$$I_{PRH} = \frac{NP_{PRH}}{R_{PRH}} \qquad (3.1.4.1)$$

Logo:

$$I_{PRH} = \frac{5U_d}{U_{RES_{5[kA]}}}[kA] \qquad (I_{PRH} \leq 5[kA]) \qquad (3.1.4.2)$$

Onde:

U_d = Tensão Disruptiva do Pára-raios em [kV];

$U_{RES_{5[kA]}}$ = Tensão Residual do Pára-raios para a corrente de 5 [kA] em [kV]

Considerando $5[kA] < I_{PRH} < 10[kA]$, ou seja $U_{RES_{5[kA]}} < U_d < U_{RES_{10[kA]}}$, vem:

$$I_{PRH} = 5 + \frac{5\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}\right]}{\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}\right]}[kA] \qquad (5[kA] < I_{PRH} < 10[kA]) \qquad (3.1.4.3)$$

Onde:

$U_{RES_{10[kA]}}$ = Tensão Residual do Pára-raios para a corrente de 10 [kA] em [kV]

Finalmente a *equação 3.1.4.3*, pode ser transformada em:

$$I_{PRH} = 5 + \frac{5\left[U_d - U_{RES_{5[kA]}}\right]}{U_{RES_{5[kA]}}\left[2^{\alpha} - 1\right]}[kA] \qquad (3.1.4.4)$$

Onde:

α = Coeficiente de Não Linearidade ($3<\alpha<4$).

1.2 - Utilização de Pára-raios a Óxido de Zinco:

Conforme demonstrado, a corrente através dos Pára-raios a óxido de zinco ligados aos terminais de A.T. de um transformador pode ser calculada segundo as seguintes equações:

$$I_{PRH} = \frac{2U}{(Z_P + R_{PRH})} \qquad (3.1.4.5)$$

$$I_{PRH} = \frac{5\left[2U - \sqrt{2}U_N\right]}{\left[U_{RES_{5[kA]}} - \sqrt{2}U_N + 5Z_P\right]}[kA] \qquad (I_{PRH} < 5[kA]) \qquad (3.1.4.6)$$

$$I_{PRH} = \frac{5\left[2U + U_{RES_{10[kA]}} - 2U_{RES_{5[kA]}}\right]}{\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}} + 5Z_P\right]}[kA] \qquad (5[kA] < I_{PRH} < 10[kA]) \qquad (3.1.4.7)$$

Finalmente a *equação 3.1.4.7*, pode ser transformada em:

$$I_{PRH} = \frac{5\left[2U + U_{RES_{10[kA]}}\left(2^{\alpha} - 2\right)\right]}{U_{RES_{5[kA]}}\left[2^{\alpha} - 1\right] + 5Z_P}[kA] \qquad (3.1.4.8)$$

Onde:

α = Coeficiente de Não Linearidade $10 < \alpha < 14$

11 - Pára-raios dos Terminais de B.T.:

Novamente é possível fazer o uso de dois tipos de pára-raios para a proteção do transformador. Deste modo, vem:

11.1 - Utilização do Pára-raios do Tipo Convencional:

Deste modo seja:

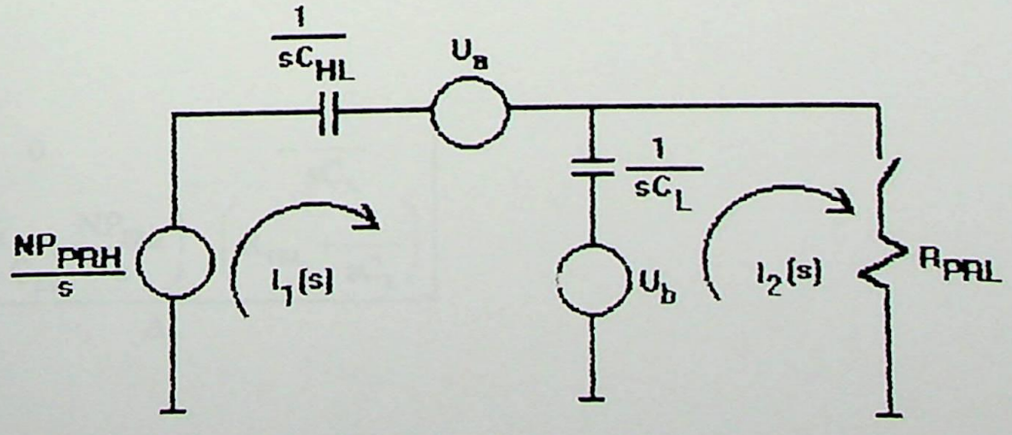


Figura 3.1.4.2 - Circuito Equivalente Simplificado de um Transformador Protegido por Pára-raios Convencionais Ligados aos seus Terminais de B.T.

Equacionando os dois laços do circuito equivalente mostrado na *Figura 3.1.4.2*, na forma matricial, vem:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{sC_{HL}}+\frac{1}{sC_L}\right) & -\frac{1}{sC_L} \\ -\frac{1}{sC_L} & \left(R_{PRL}+\frac{1}{sC_L}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \left(\frac{C_{HL}}{(C_{HL}+C_L)}\frac{NP_{PRH}}{s}\right) \end{bmatrix} \qquad (3.1.4.9)$$

Onde:

R_{PRL} = Resistência do Pára-raios [Ω];

NP_{PRH} = Nível de Proteção do Pára-raios [kV].

Cálculo do determinante:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{sC_{HL}}+\frac{1}{sC_L}\right) & -\frac{1}{sC_L} \\ -\frac{1}{sC_L} & \left(R_{PRL}+\frac{1}{sC_L}\right) \end{bmatrix}$$

Resolvendo apropriadamente o determinante, vem:

$$\Delta = \frac{sR_{PRL}(C_{HL}+C_L)+1}{s^2C_{HL}C_L} \qquad (3.1.4.10)$$

Cálculo da corrente $I_1(s)$*:*

$$I_1(s) = \frac{\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{sC_L} \\ \left(\frac{C_{HL}}{(C_{HL}+C_L)}\frac{NP_{PRH}}{s}\right) & \left(R_{PRL}+\frac{1}{sC_L}\right) \end{bmatrix}}{\Delta} \qquad (3.1.4.11)$$

ou seja, resolvendo apropriadamente a *equação 3.1.4.11*, vem:

$$I_1(s) = \frac{C_{HL}{}^2 NP_{PRL}}{\left[sR_{PRL}(C_L + C_{HL}) + 1\right](C_L + C_{HL})} \qquad (3.1.4.12)$$

Colocando em evidência: o termo do numerador e o termo que multiplica *s* no denominador da *equação 3.1.4.12*, vem:

$$I_1(s) = \frac{C_{HL}{}^2 NP_{PRL}}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})^2} \frac{1}{\left[s + \frac{1}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})}\right]}$$

Como:

$$a_0 = C_{HL}{}^2 NP_{PRL}$$

$$b_2 = R_{PRL}(C_L + C_{HL})$$

vem:

$$I_1(s) = \frac{a_0}{b_2(C_L + C_{HL})} \frac{1}{\left[s + \frac{1}{b_2}\right]} \qquad (3.1.4.13)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na *equação 3.4.1.13*, vem:

$$I_1(t) = \frac{a_0}{b_2(C_L + C_{HL})} \varepsilon^{-\frac{1}{b_2}t} \qquad (3.1.4.14)$$

Substituindo os valores das variáveis da *equação 3.1.4.14*, vem:

$$I_1(t) = \frac{C_{HL}{}^2 NP_{PRL}}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})^2} \varepsilon^{-\frac{1}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})}t} \qquad (3.1.4.15)$$

<u>*Cálculo da corrente*</u> $I_2(s) = I_{PRL}(s)$:

$$I_2(s) = \frac{\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{sC_{HL}} + \frac{1}{sC_L}\right) & 0 \\ -\frac{1}{sC_L} & \left(\frac{C_{HL}}{C_{HL} + C_L} \frac{NP_{PRH}}{s}\right) \end{bmatrix}}{\Delta} \qquad (3.1.4.16)$$

ou seja, resolvendo apropriadamente a *equação 3.1.4.16*, vem:

$$I_2(s) = \frac{C_{HL} NP_{PRH}}{\left[sR_{PRL}(C_L + C_{HL}) + 1\right]} \qquad (3.1.4.17)$$

Colocando em evidência: o termo do numerador e o termo que multiplica *s* no denominador da *equação 3.1.4.17*, vem:

$$I_2(s) = \frac{C_{HL} NP_{PRL}}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})} \frac{1}{\left[s + \frac{1}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})}\right]}$$

Como:

$c_0 = C_{HL} NP_{PRL}$

$d_1 = R_{PRL}(C_L + C_{HL})$

vem:

$$I_2(s) = \frac{c_0}{d_1} \frac{1}{\left[s + \frac{1}{d_1}\right]} \qquad (3.1.4.18)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na *equação 3.4.1.18*, vem:

$$I_2(t) = \frac{c_0}{d_1} \varepsilon^{-\frac{1}{d_1}t} \qquad (3.1.4.19)$$

Substituindo os valores das variáveis da *equação 3.1.4.19*, bem como considerando que $I_2(t) = I_{PRL}(t)$ vem:

$$I_{PRL}(t) = \frac{NP_{PRL}}{R_{PRL}} \frac{C_{HL}}{(C_L + C_{HL})} \varepsilon^{-\frac{1}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})}t} \qquad (3.1.4.20)$$

De modo simplificado, para o valor de pico da corrente no pára-raios, vem em t=0:

$$I_{PRL} = \frac{NP_{PRL}}{R_{PRL}} \frac{C_{HL}}{(C_L + C_{HL})} \qquad (3.1.4.21)$$

Considerando $I_{PRL} < 5[kA]$, ou seja, $U_{RES_{5[kA]_L}} > U_{dL}$, vem:

$$R_{PRL} = \frac{U_{RES_{5[kA]_L}}}{5} \qquad (3.1.4.22)$$

Substituindo na *equação 3.1.4.21*, vem:

$$I_{PRL} = \frac{5NP_{PRL}}{U_{RES_{5[kA]_L}}} \frac{C_{HL}}{(C_L + C_{HL})} [kA] \qquad (3.1.4.23)$$

Onde:

U_{dL} = Tensão Disruptiva do Pára-raios ligado ao enrolamento de B.T. do transformador, em [kV];

$U_{RES_{5[kA]_L}}$ = Tensão Residual do Pára-raios para a corrente de 5 [kA] em [kV]

Alternativamente, considerando $5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]$, ou seja

$U_{RES_{5[kA]_L}} < U_{dL} < U_{RES_{10[kA]_L}}$, vem:

$$R_{PRL} = \frac{U_{dL}\left(U_{RES_{10[kA]_L}} - U_{RES_{5[kA]_L}}\right)}{5\left(U_{dL} + U_{RES_{10[kA]_L}} - U_{RES_{5[kA]_L}}\right)} \qquad (3.1.4.24)$$

Substituindo na *equação 3.1.4.21*, para $5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]$, vem:

$$I_{PRL} = NP_{PRH} \frac{C_{HL}}{(C_L + C_{HL})} \left[5 + \frac{5\left(U_{dL} + U_{RES_{10[kA]_L}} - U_{RES_{5[kA]_L}}\right)}{U_{dL}\left(U_{RES_{10[kA]_L}} - U_{RES_{5[kA]_L}}\right)} \right] [kA] \qquad (3.1.4.25)$$

Onde:

U_{dL} = Tensão Disruptiva do Pára-raios ligado ao enrolamento de B.T. do transformador, em [kV];

$U_{RES_{10[kA]_L}}$ = Tensão Residual do Pára-raios para a corrente de 10 [kA] em [kV]

Finalmente a *equação 3.1.4.25*, pode ser transformada em:

$$I_{PRL} = NP_{PRH}\frac{C_{HL}}{(C_L + C_{HL})}\left[5 + \frac{5\left(U_{dL} - U_{RES_{5[kA]L}}\right)}{U_{RES_{5[kA]L}}\left(2^{\alpha} - 1\right)}\right][kA] \qquad (3.1.4.26)$$

Onde:

α = Coeficiente de Não Linearidade ($3 < \alpha < 4$).

11.2 - Utilização do Pára-raios do Tipo Óxido de Zinco:

A *Figura 3.1.4.3* mostra o circuito equivalente da situação em estudo. Neste caso o pára-raios do enrolamento de A.T. atua, condição normal, e transfere para o enrolamento secundário uma tensão que é aplicada ao seu respectivo pára-raios.

Deste modo seja:

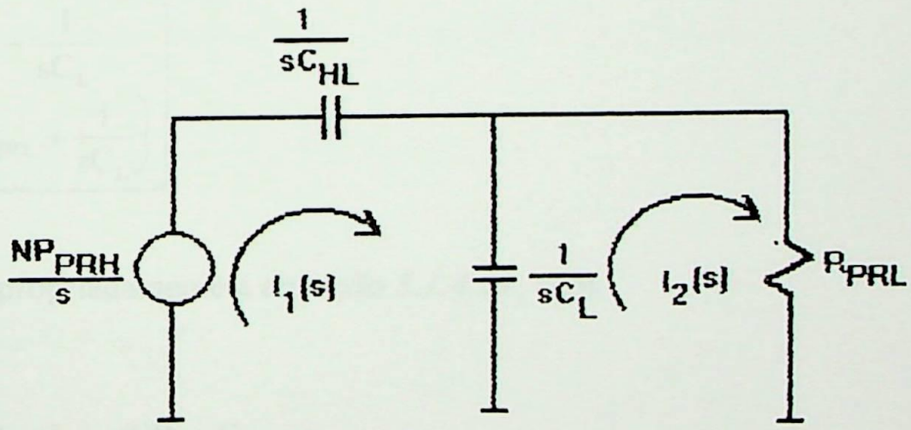


Figura 3.1.4.3 - Circuito Equivalente Simplificado de um Transformador Protegido por Pára-raios a Óxido de Zinco Ligado ao Terminal de B.T.

Equacionando os dois laços do circuito equivalente mostrado na *Figura 3.1.4.3*, na forma matricial, vem:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{sC_{HL}} + \frac{1}{sC_L}\right) & -\frac{1}{sC_L} \\ -\frac{1}{sC_L} & \left(R_{PRL} + \frac{1}{sC_L}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{NP_{PRH}}{s} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (3.1.4.27)$$

Onde:

R_{PRL} = Resistência do Pára-raios [Ω];

NP_{PRH} = Nível de Proteção do Pára-raios [kV].

Cálculo do determinante:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{sC_{HL}} + \frac{1}{sC_L}\right) & -\frac{1}{sC_L} \\ -\frac{1}{sC_L} & \left(R_{PRL} + \frac{1}{sC_L}\right) \end{bmatrix}$$

Resolvendo apropriadamente o determinante, vem:

$$\Delta = \frac{sR_{PRL}(C_{HL} + C_L) + 1}{s^2 C_{HL} C_L} \qquad (3.1.4.28)$$

Cálculo da corrente $I_1(s)$ *:*

$$I_1(s) = \frac{\begin{bmatrix} \frac{NP_{PRH}}{s} & -\frac{1}{sC_L} \\ 0 & \left(R_{PRL} + \frac{1}{sC_L}\right) \end{bmatrix}}{\Delta} \qquad (3.1.4.29)$$

ou seja, resolvendo apropriadamente a *equação 3.1.4.29*, vem:

$$I_1(s) = \frac{s(NP_{PRH} R_{PRL} C_{HL} C_L) + NP_{PRH} C_{HL}}{\left[sR_{PRL}(C_L + C_{HL}) + 1\right]} \qquad (3.1.4.30)$$

Colocando em evidência o termo do denominador que multiplica *s* na *equação 3.1.4.30*, vem:

$$I_1(s) = \frac{1}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})} \left[\frac{NP_{PRH} R_{PRH} C_L C_{HL} s}{\left[s + \frac{1}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})}\right]} + \frac{NP_{PRH} C_{HL}}{\left[s + \frac{1}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})}\right]} \right]$$

Como:

$$a_1 = NP_{PRH} R_{PRH} C_L C_{HL}$$

$$b_1 = R_{PRL}(C_L + C_{HL})$$

$$c_0 = NP_{PRH}C_{HL}$$

vem:

$$I_1(s) = \frac{1}{b_1}\left[\frac{a_1 s}{\left(s+\frac{1}{b_1}\right)} + \frac{c_0}{\left(s+\frac{1}{b_1}\right)}\right] \qquad (3.1.4.31)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na *equação 3.4.1.31*, vem:

$$I_1(t) = \frac{1}{b_1^{\,2}}\left[a_1 b_1 - (a_1 - b_1 c_0)\right]\varepsilon^{-\frac{1}{b_1}t} \qquad (3.1.4.32)$$

Substituindo os valores das variáveis da *equação 3.1.4.32*, vem:

$$I_1(t) = \frac{NP_{PRL}}{R_{PRL}}\frac{C_{HL}}{(C_L + C_{HL})^2}\left[R_{PRL}C_L(C_L + C_{HL})U_0(t) + C_{HL}\varepsilon^{-\frac{1}{R_{PRL}(C_L+C_{HL})}t}\right] \qquad (3.1.4.33)$$

<u>*Cálculo da corrente*</u> $I_2(s) = I_{PRL}(s)$<u>:</u>

$$I_2(s) = \frac{\begin{bmatrix}\left(\frac{1}{sC_{HL}} + \frac{1}{sC_L}\right) & \frac{NP_{PRH}}{s} \\ -\frac{1}{sC_L} & 0\end{bmatrix}}{\Delta} \qquad (3.1.4.34)$$

ou seja, resolvendo apropriadamente a *equação 3.1.4.34*, vem:

$$I_2(s) = \frac{C_{HL}NP_{PRH}}{\left[sR_{PRL}(C_L + C_{HL}) + 1\right]} \qquad (3.1.4.35)$$

Colocando em evidência: o termo do numerador e o termo que multiplica *s* no denominador da *equação 3.1.4.35*, bem como repetindo o equacionamento feito a partir da *equação 3.1.4.17* do *ítem II.1*, vem:

$$I_2(s) = \frac{C_{HL} NP_{PRH}}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})} \frac{1}{\left[s + \frac{1}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})} \right]}$$

Como:

$$c_0 = C_{HL} NP_{PRH}$$

$$d_1 = R_{PRL}(C_L + C_{HL})$$

vem:

$$I_2(s) = \frac{c_0}{d_1} \frac{1}{\left[s + \frac{1}{d_1} \right]}$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na acima, vem:

$$I_2(t) = \frac{c_0}{d_1} \varepsilon^{-\frac{1}{d_1} t}$$

Substituindo os valores das variáveis da equação acima, bem como considerando que $I_2(t) = I_{PRL}(t)$ vem:

$$I_{PRL}(t) = \frac{NP_{PRH}}{R_{PRL}} \frac{C_{HL}}{(C_L + C_{HL})} \varepsilon^{-\frac{1}{R_{PRL}(C_L + C_{HL})} t}$$

De modo simplificado, para o valor de pico da corrente no pára-raios, vem em t=0:

$$I_{PRL} = \frac{NP_{PRH}}{R_{PRL}} \frac{C_{HL}}{(C_L + C_{HL})} \qquad (3.1.4.36)$$

Devido a ausência de um trecho de linha entre os bornes de B.T. do transformador e os pára-raios, a solução da *equação 3.1.4.36* é iterativa, pois é necessário assumir um valor de R_{PRL} que resulta em uma corrente e por conseguinte, em uma tensão residural U_{RES} que redefinem um novo valor de R_{PRL}.

NOTA:

Nos casos onde existem pára-raios a óxido de zinco e cabos de barramentos entre os bornes do transformador e o pára-raios as *equações 3.1.3.28 e 3.1.4.36*, são transformadas em:

$$I_{PRL} = \frac{2UC_{HL}}{Z_P(Z_S + R_{PRL})C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\sqrt{k}}\left[\left(\frac{k_2}{k_3}\right)^{\frac{k_2}{k}} - \left(\frac{k_2}{k_3}\right)^{\frac{k_3}{k}}\right] \qquad (3.1.4.37)$$

Onde:

$$k_1 = \frac{2UC_{HL}}{Z_P(Z_S + R_{PRL})C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\sqrt{k}}$$

$$k_2 = \frac{(Z_S + R_{PRL})(C_L + C_{HL}) + Z_P(C_H + C_{HL}) - \sqrt{k}}{2(Z_S + R_{PRL})\left[C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\right]}$$

$$k_3 = \frac{(Z_S + R_{PRL})(C_L + C_{HL}) + Z_P(C_H + C_{HL}) + \sqrt{k}}{2(Z_S + R_{PRL})\left[C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\right]}$$

$$k = Z_P{}^2(C_H + C_{HL})^2 + (Z_S + R_{PRL})^2(C_L + C_{HL})^2 - 2Z_P(Z_S + R_{PRL})\left[(C_H C_L) + C_{HL}(C_H + C_L) - C_{HL}{}^2\right]$$

e;

$$I_{PRL}(t) = \frac{NP_{PRH}}{(Z_P + R_{PRL})}\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL} + C_L}\right) \qquad (3.1.4.38)$$

Considerando a *equação 3.1.4.36*, para $I_{PRL} < 5[kA]$, sendo:

$$R_{PRL} = \frac{\sqrt{2}U_N[5Z_S - U_{TH}] + U_{TH}U_{RES_{[kA]L}}}{5\left[U_{TH} - \sqrt{2}U_N\right]} \qquad (3.1.4.39)$$

Onde:

$$U_{TH} = 2U\frac{C_{HL}}{C_{HL} + C_L} \qquad (3.1.4.40)$$

É possível obter:

$$I_{PRL} = \frac{2NP_{PRH}}{U_{TH}}\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right)\left[\frac{5\left(U_{TH}-\sqrt{2}U_{NL}\right)}{\left(5Z_S-\sqrt{2}U_{NL}+U_{RES_{5[kA]L}}\right)}\right] \qquad (3.1.4.41)$$

Simplificando adequadamente a equação 3.1.4.41, vem:

$$I_{PRL} = \frac{5\left[\frac{2NP_{PRH}}{U_{TH}}\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right)-\sqrt{2}U_{NL}\right]}{\left(5Z_S-\sqrt{2}U_{NL}+U_{RES_{5[kA]L}}\right)} \qquad (3.1.4.42)$$

Para $5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]$, vem:

$$I_{PRL} = \frac{\left[\frac{10NP_{PRH}}{U_{TH}}\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right)-5\left(2U_{RES_{5[kA]L}}-U_{RES_{10[kA]L}}\right)\right]}{\left(U_{RES_{10[kA]L}}-U_{RES_{5[kA]L}}\right)} \qquad (3.1.4.43)$$

O equacionamento acima foi desenvolvido considerando transformadores monofásicos ou trifásicos em conexão estrela aterrada - estrela aterrada. Para um transformador com os enrolamentos ligados em estrela aterrada - delta devem ser levadas em conta mudanças nas capacitâncias que devem ser substituídas por seus equivalentes, ou seja:

$$C'_H = \frac{C'_H}{2}$$

$$C'_{HL} = \frac{C'_{HL}}{2} \qquad (3.1.4.44)$$

$$C'_L = \frac{C'_H}{2} + C'_L$$

Onde:

C'_H = Capacitância para a Terra dos Enrolamentos de Alta Tensão Curto-circuitados;

C'_{HL} = Capacitância entre os Enrolamentos de Alta Tensão e de Baixa Tensão;

C'_L = Capacitância para a Terra dos Enrolamentos de Baixa Tensão Curto-circuitados.

3.1.5 - Cálculo Simplificado da Corrente de Descarga do Pára-raios de um Transformador:

A seguir são mostrados quadros dos resumos de equações para um transformador com os enrolamentos ligados em estrela aterrado - estrela aterrado, que permitem o cálculo da corrente de descarga dos pára-raios ligados aos enrolamentos de A.T. e de B.T. do respectivo transformador.

TABELA I - Pára-raios ligados ao terminal do enrolamento de A.T. com cabo

A.T.	$I_{PRH} < 5[kA]$	$5[kA] < I_{PRH} < 10[kA]$
SiC	$I_{PRH} = \dfrac{5U_d}{U_{RES_{5[kA]}}}$	$I_{PRH} = 5 + \dfrac{5[U_d - U_{RES_{5[kA]}}]}{\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}\right]}$
ZnO	$I_{PRH} = \dfrac{5[2U - \sqrt{2}U_n]}{[U_{RES_{5[kA]}} - \sqrt{2}U_n - 5Z_1]}$	$I_{PRH} = \dfrac{5\left[2U + (U_{RES_{10[kA]}} - 2U_{RES_{5[kA]}})\right]}{\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}} + 5Z_1\right]}$

TABELA II - Pára-raios ligados ao terminal do enrolamento de B.T. com cabo

B.T.	$I_{PRL} < 5[kA]$	$5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]$
** SiC	$I_{PRL} = \dfrac{\left[10U\left(\dfrac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right)\right]}{[5Z_2 + R_{PRL}]}$	$I_{PRL} = \left[\dfrac{2U\left(\dfrac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right)\left[5\left(U_{d_L} + U_{RES_{10[kA]_L}} - 2U_{RES_{5[kA]_L}}\right)\right]}{\left[5Z_2\left(U_{d_L} + U_{RES_{10[kA]_L}} - 2U_{RES_{5[kA]_L}}\right) + U_{d_L}\left(U_{RES_{10[kA]_L}} - U_{RES_{5[kA]_L}}\right)\right]}\right]$
ZnO	$I_{PRL} = \dfrac{5\left[2U\left(\dfrac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right) - \sqrt{2}U_{n_L}\right]}{\left[5Z_2 + U_{RES_{5[kA]_L}} - \sqrt{2}U_{n_L}\right]}$	$I_{PRL} = \dfrac{5\left[2U\left(\dfrac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right) - \left(2U_{RES_{5[kA]_L}} - U_{RES_{10[kA]_L}}\right)\right]}{\left[U_{RES_{10[kA]_L}} - U_{RES_{5[kA]_L}}\right]}$

TABELA III - Pára-raios ligados ao terminal do enrolamento de B.T. sem cabo

B.T.	$I_{PRL} < 5[kA]$	$5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]$
*** SiC	$I_{PRL} = \dfrac{5U_d}{U_{RES_{5[kA]}}}$	$I_{PRL} = 5 + \dfrac{5[U_d - U_{RES_{5[kA]}}]}{\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}\right]}$
* ZnO	$I_{PRL} = \dfrac{2UC_{HL}}{Z_1 R_{PRL}[C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L]\sqrt{k}}\left[\left(\dfrac{k_2}{k_3}\right)^{\frac{k_2}{k}} - \left(\dfrac{k_2}{k_3}\right)^{\frac{k_3}{k}}\right]$	

TABELA IV - Pára-raios ligados ao terminal dos enrolamentos de A.T. e de B.T. com cabo

A.T.	$I_{PRH} < 5[kA]$	$5[kA] < I_{PRH} < 10[kA]$
SiC	$I_{PRH} = \frac{5U_d}{U_{RES_{5[kA]}}}$	$I_{PRH} = 5 + \frac{5[U_d - U_{RES_{5[kA]}}]}{[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}]}$
ZnO	$I_{PRH} = \frac{5[2U - \sqrt{2}U_n]}{[U_{RES_{5[kA]}} - \sqrt{2}U_n + 5Z_1]}$	$I_{PRH} = \frac{5\left[2U + (U_{RES_{10[kA]}} - 2U_{RES_{5[kA]}})\right]}{\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}} + 5Z_1\right]}$

B.T.	$I_{PRL} < 5[kA]$	$5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]$
** SiC	$I_{PRL} = \frac{\left[10NP_{PRH}\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right)\right]}{[5Z_2 + R_{PRL}]}$	$I_{PRL} = \left[\frac{2NP_{PRH}\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right)\left[5\left(U_{dL} + U_{RES_{10[kA]_L}} - 2U_{RES_{5[kA]_L}}\right)\right]}{\left[5Z_2\left(U_{dL} + U_{RES_{10[kA]_L}} - 2U_{RES_{5[kA]_L}}\right) + U_{dL}\left(U_{RES_{10[kA]_L}} - U_{RES_{5[kA]_L}}\right)\right]}\right]$
ZnO	$I_{PRL} = \frac{5\left[2NP_{PRH}\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right) - \sqrt{2}U_{n_L}\right]}{\left[5Z_2 + U_{RES_{5[kA]_L}} - \sqrt{2}U_{n_L}\right]}$	$I_{PRL} = \frac{5\left[2NP_{PRH}\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right) - \left(2U_{RES_{5[kA]_L}} - U_{RES_{10[kA]_L}}\right)\right]}{\left[U_{RES_{10[kA]_L}} - U_{RES_{5[kA]_L}}\right]}$

TABELA V - Pára-raios ligados ao terminal dos enrolamentos de A.T. e de B.T. sem cabo

A.T.	$I_{PRH} < 5[kA]$	$5[kA] < I_{PRH} < 10[kA]$
SiC	$I_{PRH} = \frac{5U_d}{U_{RES_{5[kA]}}}$	$I_{PRH} = 5 + \frac{5[U_d - U_{RES_{5[kA]}}]}{\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}}\right]}$
ZnO	$I_{PRH} = \frac{5[2U - \sqrt{2}U_n]}{[U_{RES_{5[kA]}} - \sqrt{2}U_n + 5Z_1]}$	$I_{PRH} = \frac{5\left[2U + (U_{RES_{10[kA]}} - 2U_{RES_{5[kA]}})\right]}{\left[U_{RES_{10[kA]}} - U_{RES_{5[kA]}} + 5Z_1\right]}$

B.T.	$I_{PRL} < 5[kA]$	$5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]$
*** SiC	$I_{PRL} = \frac{5NP_{PRH}}{U_{RES_{5[kA]}}}\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right)$	$I_{PRL} = NP_{PRH}\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL}+C_L}\right)\left[5 + \frac{5[U_{dL} + 2U_{RES_{10[kA]_L}} - U_{RES_{5[kA]_L}}]}{U_{dL}\left[U_{RES_{10[kA]_L}} - U_{RES_{5[kA]_L}}\right]}\right]$
* ZnO	$I_{PRL} = \frac{NP_{PRH}C_{HL}}{Z_1R_{PRL}[C_{HL}(C_H + C_L) + C_HC_L]\sqrt{k}}\left[\left(\frac{k_2}{k_3}\right)^{\frac{k_2}{k}} - \left(\frac{k_2}{k_3}\right)^{\frac{k_3}{k}}\right]$	

OBS: *na Tabela II não foi considerado os efeitos das reflexões no fim do cabo.*

Nas *Tabelas I , II e IV* deve-se observar:

*

$$k_1 = \frac{NP_{PRH}C_{HL}}{Z_1(Z_2 + R_{PRL})C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\sqrt{k}}$$

$$k_2 = \frac{(Z_2 + R_{PRL})(C_L + C_{HL}) + Z_1(C_H + C_{HL}) - \sqrt{k}}{2(Z_2 + R_{PRL})\left[C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\right]}$$

$$k_3 = \frac{(Z_2 + R_{PRL})(C_L + C_{HL}) + Z_1(C_H + C_{HL}) + \sqrt{k}}{2(Z_2 + R_{PRL})\left[C_{HL}(C_H + C_L) + C_H C_L\right]}$$

$$k = Z_1^2(C_H + C_{HL})^2 + (Z_2 + R_{PRL})^2(C_L + C_{HL})^2 - 2Z_1(Z_2 + R_{PRL})\left[(C_H C_L) + C_{HL}(C_H + C_L) - C_{HL}^2\right]$$

As equações para o pára-raios a Óxido de Zinco ligado sem cabo ao terminal do enrolamento de B.T. apresentadas nas *Tabelas III e V*, são iterativas, devido a dependência entre o nível de proteção do pára-raios e a corrente de descarga. Sendo assim, é necessário asssumir um valor do R_{PRL}, que resulta em uma corrente, e por conseguinte, em uma tensão residual que redefinem um novo valor do R_{PRL}.

No caso para o intervalo entre $5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]$, a equação é semelhante a equação apresentada para o intervalo entre $I_{PRL} < 5[kA]$, contudo é necessário substituir o valor adequado para a R_{PRL}, calculado para o intervalo em questão.

**

No caso dos pára-raios Convencionais as equações apresentadas nas *Tabelas II e IV*, somente são válidas, quando:

$$2NP_{PRH}\left(\frac{C_{HL}}{C_{HL} + C_L}\right) > U_{d_L}$$

U_{d_L} =Tensão disruptiva do pára-raios ligado no terminal do enrolamento de B.T.

***

Condição de Atuação dos Pára-raios Convencionais Ligados aos Terminais de B.T.:

Reescrevendo a *equação 3.1.1.15*, mostrada anteriormente, vem:

$$U_L(t) = U_H(t)\frac{C_{HL}}{(C_{HL}+C_L)}$$

$$RTC = \frac{U_L(t)}{U_H(t)} = \frac{C_{HL}}{(C_{HL}+C_L)} \qquad (3.1.5.1)$$

e:

$$RNP_{PR} = \frac{NP_{PRL}}{NP_{PRH}} \qquad (3.1.5.2)$$

Onde:

RTC = Relação de Transferência Capacitiva;

RNP_{PR} = Relação do Nível de Proteção do Pára-raios

Através das *equações 3.1.5.1 e 3.1.5.2*, é possível obter a *"Condição Mínima"* para que o pára-raios do lado de B.T. entre em condução, ou seja:

$$\frac{NP_{PRL}}{NP_{PRH}} < \frac{C_{HL}}{(C_{HL}+C_L)} \qquad (3.1.5.3)$$

ou:

$$\frac{U_{dPRL}}{U_{dPRH}} < \frac{C_{HL}}{(C_{HL}+C_L)} \qquad (3.1.5.4)$$

Onde:

U_{dPRL} = Tensão Disruptiva de Impulso do Pára-raios no lado de B.T.

3.1.6 - Comentários e Conclusões:

I - Quanto aos Pára-raios Ligados aos Terminais Primários:

A máxima corrente de descarga dos pára-raios convencionais ligados aos terminais primários, presumívelmente em A.T., de acordo com a *Tabela I*, independe das características do sistema ao qual estão ligados, no caso específico uma linha de transmissão representada por sua impedância de surto. Nestes casos a corrente de descarga depende unicamente das características próprias do pára-raios.

Ainda conforme *Tabela I* já no caso dos pára-raios a óxido de zinco, a corrente de descarga pelos pára-raios, depende das características do sistema ou seja, da impedância de surto

da linha de transmissão, bem como da resistência apresentada no instante em que o mesmo entra em condução.

A diferença básica entre a amplitude das duas correntes, está relacionada com o fato das capacitâncias que representam o modelo do transformador, quando de pára-raios a óxido de zinco não se carregarem, o que ocorre com os pára-raios do tipo convencional.

A análise das equações para as correntes dos pára-raios ligados aos terminais primários, presumivelmente, em A.T. mostra que a amplitude das mesmas independe da conexão do transformador.

No caso de os enrolamentos do transformador estarem ligados em estrela - delta, apenas são alteradas as tabelas referentes aos pára-raios ligados aos enrolamentos de B.T., uma vez que conforme apresentado anteriormente as capacitâncias que modelam o transformador não são as mesmas.

I - Quanto aos Pára-raios Ligados aos Terminais Secundários:

Os pára-raios convencionais ligados aos terminais secundários, por hipótese em B.T., do transformador, atuam, a corrente através deles é elevada, devido ao fato das capacitâncias que modelam o transformador estarem carregadas, sendo pois descarregadas na resistência apresentada pelos pára-raios, no instante em que os mesmos entram em condução. Com isto, caso estes pára-raios atuem antes dos correspondentes primários em A.T., por falha ou má coordenação eles podem vir a falhar por excesso de corrente.

De acordo com os manuais de fabricantes de pára-raios do tipo convencional, para uma mesma classe de tensão, com o aumento da tensão nominal do pára-raios $U_{N_{PR}}$, a tensão disruptiva do pára-raios U_d tende a se aproximar da tensão residual $U_{RES_{5[kA]}}$. Logo a corrente que circula pelo pára-raios, no instante em que o mesmo entra em condução, pode ser reduzida a níveis entre $5[kA] < I_{PRL} < 10[kA]$ quando da escolha adequada dos pára-raios.

$U_{N_{PR}}[kV]$	$U_d[kV]$	$U_{RES_{10[kA]}}[kV]$	$U_d / U_{RES_{5[kA]}}$
10,5	37,0	34,0	0,920
12,0	40,0	39,0	0,975
15,0	50,0	48,0	0,960

Tabela I - Dados das Tensões para o Pára-raios do tipo Convencional

Na *Tabela I*, são apresentados dados de pára-raios tipo convencional para um transformador com a tensão do lado de B.T. $U_{N_{B.T.}} = 13,8[kV]$.

Segundo a *Tabela I* as correntes de descarga pelos pára-raios ligados aos terminais secundários diminuem quando a relação $U_d / U_{RES_{5[kA]}}$ se aproxima ou são inferiores à unidade.

No caso de os pára-raios a óxido de zinco, este apresenta uma corrente de descarga não muito elevada, quando comparado com a que circula por um pára-raios convencional, pois, nestes casos, as capacitâncias que modelam o transformador não se carregam.

Estando o pára-raios a óxido de zinco, ligado diretamente à bucha do transformador, a corrente que passará pelo mesmo, possui maior amplitude, conforme mostra a *equação 3.1.3.28*, representada na *Tabela II*. Uma vez que a resistência apresentada pelo pára-raios em estudo, no instante em que o mesmo entra em condução depende da corrente, a solução é iterativa, o que implica em que seja assumido adequadamente o valor do R_{PRL}.

Com o aumento da tensão nominal do pára-raios a óxido de zinco $U_{N_{PR}}$, a corrente que circula pelo pára-raios não sofre alteração considerável, de acordo com a *equação 3.1.4.37*, representada na *Tabela III*.

A corrente de descarga dos pára-raios convencionais são bastante influenciadas pelo aumento do comprimento do cabo que faz a conexão entre o mesmo e a bucha do transformador.

Para um cabo com um comprimento $L_{CABO} \leq 30[m]$, sistema basicamente à parâmetros concentrados os pára-raios tipo convencional devem atuar quando;

$$\frac{U_{dPRL}}{U_{dPRH}} < \frac{C_{HL}}{(C_{HL} + C_L)} \qquad (3.1.6.1)$$

Onde:

U_{dPRL} = Tensão Disruptiva de Impulso do Pára-raios no lado de B.T.

Contudo, aumentado o comprimento do cabo entre os valores: $30 \leq L_{CABO} \leq 300[m]$, os pára-raios convencionais ligados aos terminais dos cabos apresentam maior probabilidade de atuação uma vez que, a tensão transferida dobra de amplitude ou seja:

$$I_{PRL} = \frac{2NP_{PRH}\left(\frac{C_{HL}}{(C_{HL} + C_L)}\right)}{(R_L + R_{PRL})} \qquad (3.1.6.2)$$

Considerando $I_{PRL} < 5[kA]$, vem:

$$R_{PRL} = \frac{U_{RES_{5[kA]_L}}}{5}$$

Substituindo na *equação 3.1.6.2*, vem:

$$I_{PRL} = \frac{\left[10NP_{PRL}\left(\frac{C_{HL}}{(C_L + C_{HL})}\right)\right]}{(5R_L + R_{PRL})}[kA] \qquad (3.1.6.3)$$

A equação 3.1.6.3, mostra como a corrente no pára-raios ligados aos terminais remotos de cabos depende da sua impedância.

No caso de um pára-raios a óxido de zinco, este problema não ocorre, uma vez que o mesmo apresenta um caminho contínuo para a corrente, ou seja, não possui tensão disruptiva.

3.2 - Desempenho Frente a Descargas de Manobras Transferidas:

3.2.1 - Introdução:

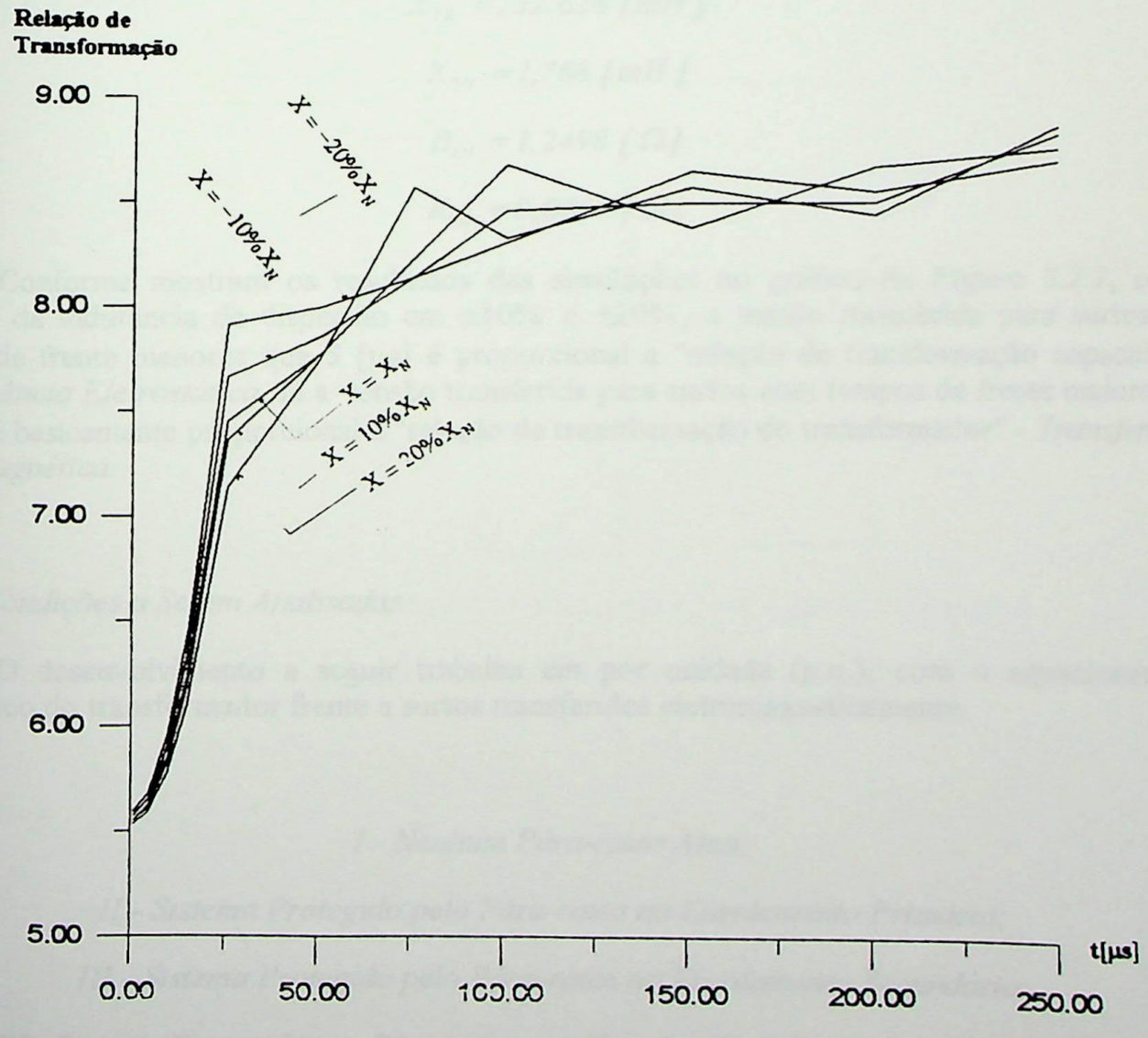


Figura 3.2.1 - Relação de Transformação em Função do Tempo de Frente do Impulso

Após um período em que as capacitâncias distribuídas do transformador influem significativamente no valor e na forma de resposta do surto transferido, segue-se um período de tempo no qual os efeitos das indutâncias distribuídas tornam-se mais significativos.

As sobretensões de manobra, são sobretensões de origem interna ao sistema, resultante de alguma alteração na condição operativa do mesmo, como por exemplo abertura ou fechamento de uma chave, curto circuito ou mesmo rejeição de carga. Estas sobretensões são importantes à medida que a tensão do sistema se eleva.

Comparando com as sobretensões atmosféricas, a duração das sobretensões de manobra são muito maiores, da ordem de centenas de microsegundos, consequentemente a magnitude de uma sobretensão de manobra é a mesma em todos os pontos de uma subestação. A transferência durante este período é um processo de indução eletromagnética entre os enrolamentos do transformador, onde o mesmo é modelado por sua indutância de dispersão.

Os gráficos mostrados na *Figura 3.2.1*, foram obtidos através de simulações em um transformador trifásico conectado em Delta A.T. - Estrela Aterrado B.T., com os seguintes dados:

$$U_{1N} = 69\ [kV]$$

$$U_{2N} = 13{,}8\ [kV]$$

$$X_{1N} = 132{,}626\ [mH]$$

$$X_{2N} = 1{,}768\ [mH]$$

$$R_{1N} = 1{,}2498\ [\Omega]$$

$$R_{2N} = 0{,}0166\ [\Omega]$$

Conforme mostram os resultados das simulações no gráfico da *Figura 3.2.1*, com a variação da indutância de dispersão em ±10% e ±20%, a tensão transferida para surtos com tempos de frente menores que 5 [μs] é proporcional a "relação de transformação capacitiva" - *Transferência Eletrostática*. Já a tensão transferida para surtos com tempos de frente maiores que 10 [μs] é basicamente proporcional a "relação de transformação do transformador" - *Transferência Eletromagnética*.

3.2.2 - Condições a Serem Analisadas:

O desenvolvimento a seguir trabalha em por unidade (p.u.), com o equacionamento monofásico do transformador frente a surtos transferidos eletromagneticamente.

I - Nenhum Pára-raios Atua;

II - Sistema Protegido pelo Pára-raios no Enrolamento Primário;

III - Sistema Protegido pelo Pára-raios no Enrolamento Secundário;

IV - Sistema Protegido por Pára-raios nos Enrolamentos Primário e Secundário.

Das condições citadas acima, dependendo da atuação do pára-raios em apenas uma fase ou em duas fases do enrolamento primário ou secundário do transformador, os sistema elétrico está exposto a dois tipos de defeito:

Defeito Fase-Terra

Defeito Fase-Fase-Terra

Sendo assim, a princípio serão analisados ambos os tipos de defeito, e na sequência aplicados às diferentes situações numeradas acima para os transformadores com os enrolamentos ligados em:

Estrela-Aterrado (Primário - A.T.) - Estrela-Aterrado (Secundário - M.T.) - Delta (Terciário - B.T.)

Estrela-Aterrado (Primário - A.T.) - Delta (Secundário - B.T.)

Delta (Primário - A.T.) - Estrela Aterrado (Secundário - B.T.)

3.2.2.1 - Defeito Fase - Terra:

Para o tipo de defeito em questão temos o seguinte diagrama de sequência para uma falta entre fase e a terra:

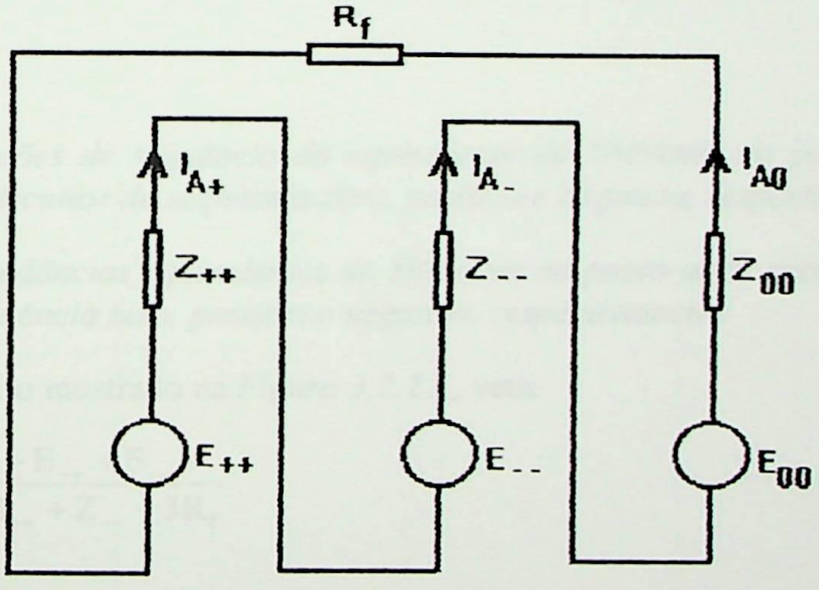


Figura 3.2.2.1 - Diagrama de Sequência para um Defeito Monofásica

No caso, as condições de contorno para as tensões e correntes são:

$I_A = I$

$I_B = I_C = I$ e:

$U_{AN} = I_A R_f$

Onde:

R_f = Impedância de Defeito entre Fase e Terra.

A partir da *Equação de Análise* são obtidas as componentes simétricas para as correntes na carga, ou seja:

$$\begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A+} \\ I_{A-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \qquad (3.2.1.1)$$

Substituindo as condições de contorno para Defeito Fase-Terra na *equação 3.2.2.1*, vem:

$$I_{A0} = I_{A+} + I_{A-} = \frac{I_A}{3} \qquad (3.2.1.2)$$

As componentes simétricas da tensão na carga: U_0, U_+ e U_- são dadas por:

$$U_{AN} = U_{A0} + U_{A+} + U_{A-} = \frac{I_A}{3} 3R_f = R_f I_A \qquad (3.2.1.3)$$

A *equação 3.2.2.1* mostra que a soma das componentes simétricas das tensões no ponto de defeito é igual ao produto da componente simétrica da corrente $\frac{I_A}{3}$ por uma impedância de valor igual a $3R_f$, implicando em um fechamento dos diagramas sequenciais, conforme *Figura 3.2.1.1*.

Considerando:

E_{00}, E_{++} e E_{--} = Tensões de sequência do equivalente de Thèvénin no ponto onde ocorre o desequilíbrio, para os circuitos de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;

Z_{00}, Z_{++} e Z_{--} = Impedâncias equivalentes de Thèvénin no ponto onde ocorre o desequilíbrio, para os circuitos de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente

e, equacionando o circuito mostrado na *Figura 3.2.1.1*, vem:

$$I_{A0} = I_{A+} + I_{A-} = \frac{E_{00} + E_{++} + E_{--}}{Z_{00} + Z_{++} + Z_{--} + 3R_f} \qquad (3.2.1.4)$$

Logo:

$$U_{A0} = E_{00} - I_{A0} Z_{00}$$

$$U_{A+} = E_{++} - I_{A+} Z_{++} \qquad (3.2.1.5)$$

$$U_{A-} = E_{--} - I_{A-} Z_{--}$$

Finalmente vem:

$$I_A = 3I_{A0} = 3\frac{E_{00} + E_{++} + E_{--}}{Z_{00} + Z_{++} + Z_{--} + 3R_f} \qquad (3.2.1.6)$$

e:

$I_A = I_B = 0$

3.2.2.2 - Defeito Fase - Fase - Terra:

Para o tipo de defeito em questão temos o seguinte diagrama de sequência para um defeito entre fase - fase - terra:

Equacionando os laços de corrente no circuito mostrado pelo diagrama da *Figura 3.2.2.1*,

$$\begin{bmatrix} (Z_{++} + Z_{--} + 2R_f) & -(Z_{--} + R_f) \\ -(Z_{--} + R_f) & (Z_{++} + Z_{00} + 2R_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I' \\ I'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{++} - E_{--} \\ E_{--} - E_{00} \end{bmatrix} \qquad (3.2.2.1)$$

Onde:

E_{00}, E_{++} e E_{--} = Tensões de sequência do equivalente de Thèvénin no ponto onde ocorre o desequilíbrio, para os circuitos de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;

Z_{00}, Z_{++} e Z_{--} = Impedâncias equivalentes de Thèvénin no ponto onde ocorre o desequilíbrio, para os circuitos de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente

R_f = Impedância de Defeito

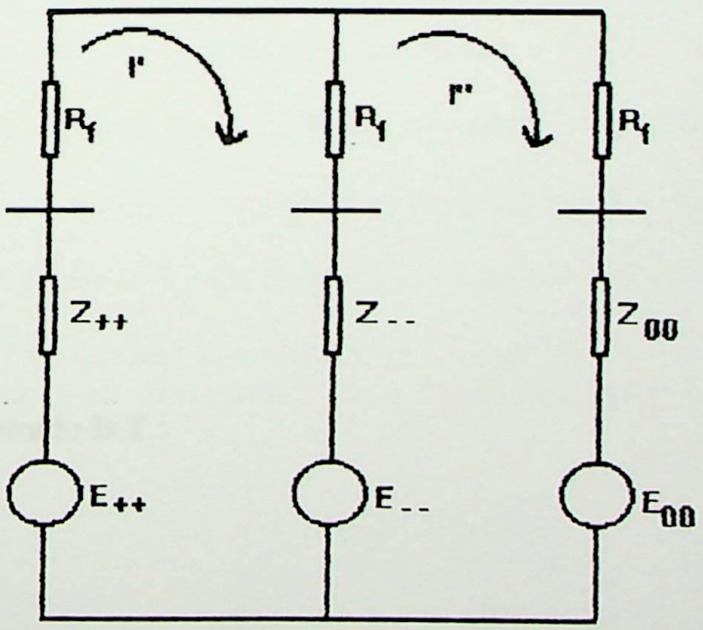


Figura 3.2.2.2 - Diagrama de Sequência para um Defeito Fase - Fase - Terra

3.2.3 - Nenhum Pára-raios Atua:

Neste caso, as tensões transferidas para os enrolamentos secundário ou terciário, foram desenvolvidas quando do *Equacionamento Via Componentes Simétricas*, reescritas a seguir:

I - Estrela-Aterrado A.T. - Estrela-Aterrado M.T. - Delta B.T.:

Tensões transferidas para o enrolamento secundário M.T.:

$$U^s_a = 2E^s_{++} + E^s_{00}$$

$$U^s_b = -E^s_{++} + E^s_{00} \qquad (3.2.3.1)$$

$$U^s_c = -E^s_{++} + E^s_{00}$$

Tensões transferidas para o enrolamento secundário B.T.:

$$U^t_a = \sqrt{3}E^t_{++}$$

$$U^t_b = 0 \qquad (3.2.3.2)$$

$$U^t_c = -\sqrt{3}E^t_{++}$$

II - Estrela-Aterrado A.T. - Delta B.T.:

Tensões transferidas para o enrolamento secundário B.T.:

$$U^s_a = \sqrt{3}E^s_{++}$$

$$U^s_b = 0 \qquad (3.2.3.3)$$

$$U^s_c = -\sqrt{3}E^s_{++}$$

III - Delta A.T. - Estrela-Aterrado B.T.:

$$U^s_a = \sqrt{3}E^s_{++}$$

$$U^s_b = -\sqrt{3}E^s_{++}$$

$$U^s_b = 0$$

3.2.4 - Pára-raios atua:

Análise do Comportamento do Pára-raios Primário - A.T.:

I - Estrela-Aterrado A.T. - Estrela-Aterrado M.T. - Delta B.T.:

Pára-raios atua

Deste modo, seja o diagrama de sequência positiva do transformador em análise, conforme mostra a *Figura 3.2.4.1*, onde:

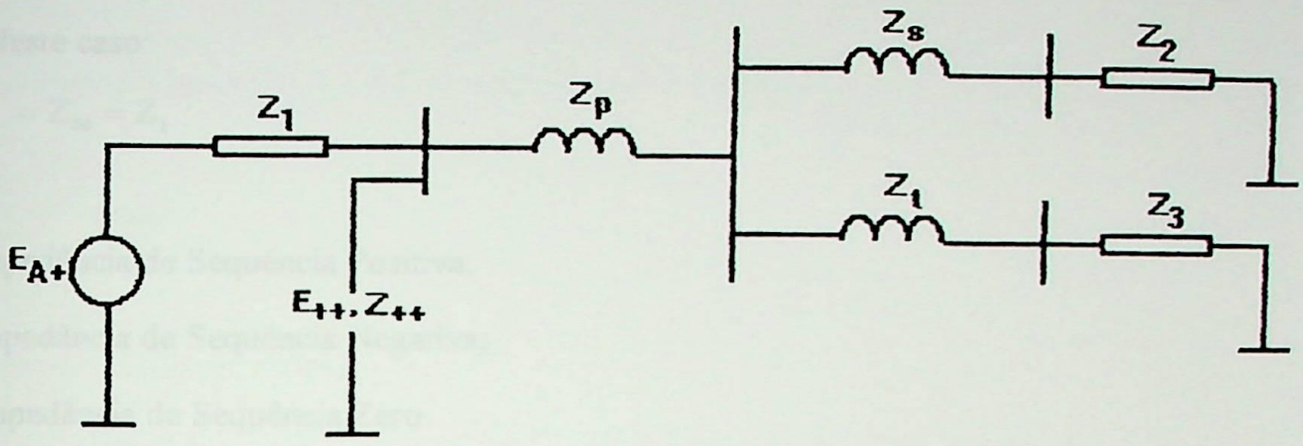


Figura 3.2.4.1 - Circuito Equivalente de Sequência Positiva de um Transformador de Três Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado - Estrela Aterrado - Delta

Onde:

Z_p = Impedância do Enrolamento Primário do Transformador;

Z_s = Impedância do Enrolamento Secundário do Transformador;

Z_t = Impedância do Enrolamento Terciário do Transformador;

Z_1 = Impedância de Surto da Linha de Transmissão no Terminal de A.T. do Transformador;

Z_2 = Impedância de Surto da Linha de Transmissão no Terminal de M.T. do Transformador;

Z_3 = Impedância de Surto da Linha de Transmissão no Terminal de B.T. do Transformador.

Analisando o circuito equivalente mostrado na *Figura 3.2.4.1* e considerando o surto incidente é possível assumir que nas etapas iniciais de condução que a impedância do transformador é muito elevada.

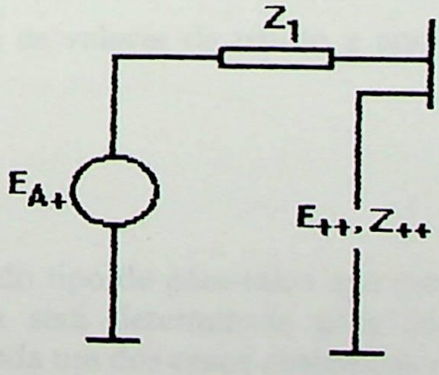


Figura 3.2.4.2 - Circuito Equivalente Simplificado da Figura 3.2.4.1

Logo apenas o pára-raios ligado ao enrolamento de A.T. do transformador está sendo solicitado pelo surto de tensão, o sistema está submetido a um defeito tipo Fase-Terra. Nestes casos, como

não ocorre transferências de surto $Z_p \approx \infty$, o que permite concluir que o circuito equivalente pode ser representado tal como na *Figura 3.2.4.2*, onde as impedâncias de sequência são vistas do ponto de defeito, ou seja dos terminais do pára-raios primário do transformador.

Neste caso:

$$Z_{++} = Z_{--} = Z_{00} = Z_1$$

Onde:

Z_{++} = Impedância de Sequência Positiva;

Z_{--} = Impedância de Sequência Negativa;

Z_{00} = Impedância de Sequência Zero.

Estando a *fase a* do transformador solicitada pelo surto atmosférico, as tensões transferidas para o enrolamento ligado em Delta (B.T.), são:

$$E_{++} = E_{--} = E_{00} = \frac{2U_A}{3}$$

Onde:

U_A = Amplitude do Impulso aplicado ao primário do Transformador [p.u.];

E_{++} = Tensão de Sequência Positiva;

E_{--} = Tensão de Sequência Negativa;

E_{00} = Tensão de Sequência Zero.

Reescrevendo a *equação 3.2.1.6*, para uma Falta Fase-Terra, vem:

$$I_A = 3I_{A0} = 3\frac{E_{00} + E_{++} + E_{--}}{Z_{00} + Z_{++} + Z_{--} + 3R_f}$$

$$I_B = I_C = 0$$

Substituindo adequadamente os valores de tensão e corrente nas devidas sequências, é obtido que:

$$I_A = \frac{2U_A}{Z_1 + R_{PRH}} \qquad (3.2.4.1)$$

A *equação 3.2.4.1* depende do tipo de pára-raios que está ligado ao terminal primário , por hipótese em A.T., sendo assim será determinada para os dois tipos de pára-raios, o convencional e a óxido de zinco, em cada um dos casos analisados, ou seja:

I - Pára-raios Tipo Convencional:

A resistência dos pára-raios convencionais é dada pela *equação 3.2.4.2*:

$$R_{PRH} = \frac{U_{RES_{5[kA]}}}{5} \qquad (3.2.4.2)$$

Logo substituindo a *equação 3.2.4.2* na *equação 3.2.4.1*, vem :

$$I_{PRH} = \frac{10U_A}{5Z_1 + U_{RES_{5[kA]}}} \qquad (3.2.4.3)$$

II - Pára-raios a Óxido de Zinco:

A resistência dos Pára-raios a óxido de zinco é dada pela *equação 3.2.4.4*:

$$R_{PRH} = \frac{\sqrt{2}U_N(5Z_1 - 2U_A) + 2U_A U_{RES_{5[kA]}}}{5(2U_A - \sqrt{2}U_N)} \qquad (3.2.4.4.)$$

Logo substituindo a *equação 3.2.4.3* na *equação 3.2.4.4*, vem :

$$I_{PRH} = \frac{5(2U_A - \sqrt{2}U_N)}{\left[5Z_1 + U_{RES_{5[kA]}} - \sqrt{2}U_N\right]} \qquad (3.2.4.5)$$

Onde:

U_N = Tensão Nominal do Pára-raios [kV];

$U_{RES_{5[kA]}}$ = Máxima Tensão Residual para Impulso de corrente 8/20 [μs] [kV];

Z_1 = Impedância de Surto da Linha de Transmissão [Ω]

Analisando a *equação 3.2.4.1* é possível concluir que a corrente através do pára-raios ligado aos terminais primários não é elevada, isto é $I_A < 5[kA]$ e basicamente independe do tipo de pára-raios utilizado convencional ou a óxido de zinco, uma vez que a tensão de surto atmosférico é limitada pela impedância de surto da linha de transmissão Z_1 que é muito superior à resistência apresentada pelo pára-raios durante a sua atuação R_{PRH}.

A *equação 3.2.4.1* também mostra que a corrente de descarga pelo pára-raios independe do tipo de conexão do enrolamento do lado do transformador que está sendo solicitado pelo surto de manobra.

Análise do Comportamento do Pára-raios Terciário - B.T.:

I - Cálculo da Impedância de Sequência Positiva vista do Enrolamento Terciário:

Do circuito equivalente de sequência positiva conforme mostra a *Figura 3.2.4.3*, vem:

$$Z_{++} = Z_t + \left[\frac{(Z_1 + Z_p)(Z_2 + Z_s)}{(Z_1 + Z_p) + (Z_2 + Z_s)} \right] \qquad (3.2.4.6)$$

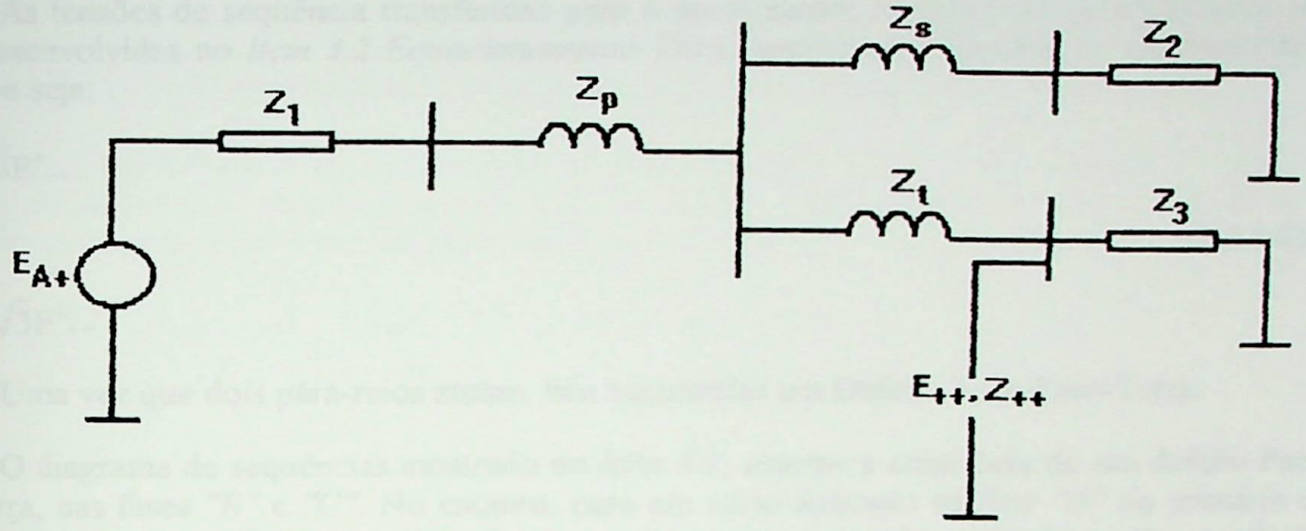


Figura 3.2.4.3 - Circuito Equivalente de Sequência Positiva de um Transformador de Três Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado - Estrela Aterrado - Delta

Resolvendo e rearranjando adequadamente a *equação 3.2.4.6*, vem:

$$Z_{++} = \left[\frac{Z_t\left[(Z_1 + Z_p) + (Z_2 + Z_s\right] + (Z_1 + Z_p)(Z_2 + Z_s)}{(Z_1 + Z_p) + (Z_2 + Z_s)} \right] \qquad (3.2.4.7)$$

II - Cálculo da Impedância de Sequência Zero vista do Enrolamento Terciário:

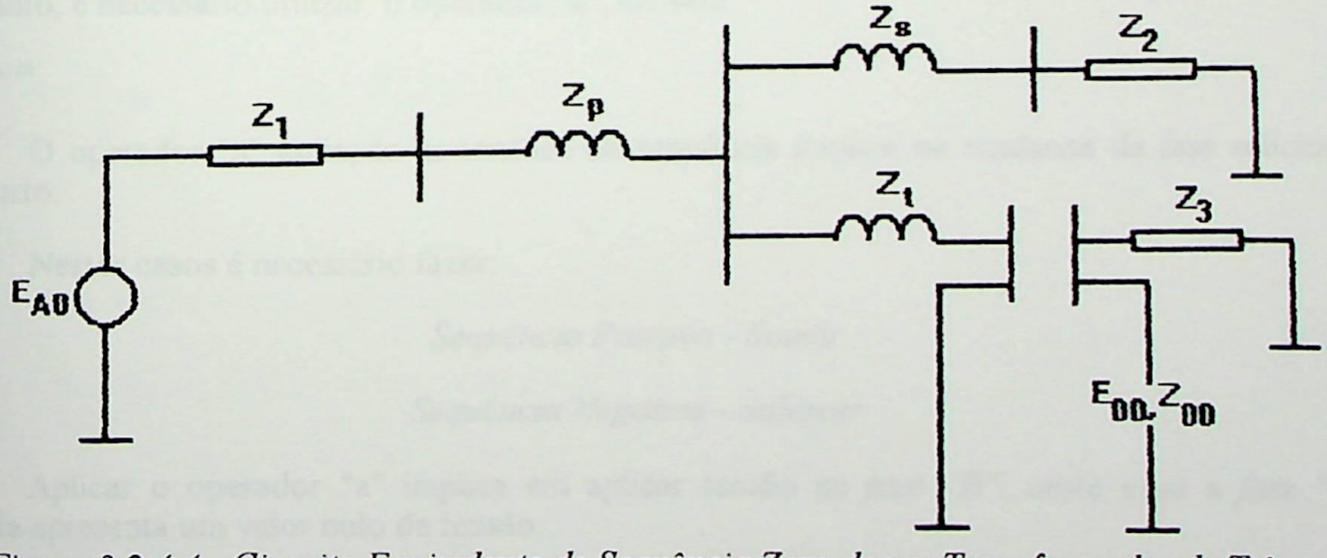


Figura 3.2.4.4 - Circuito Equivalente de Sequência Zero de um Transformador de Três Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado - Estrela Aterrado - Delta

Do diagrama de sequência zero do transformador, conforme mostra a *Figura 3.2.4.4*, vem que a impedância de sequência zero, vista do ponto de defeito, ou seja dos terminais do pára-raios conectado ao terciário do transformador, é:

$$Z_{00} = \infty \qquad (3.2.4.8)$$

As tensões de sequência transferidas para o enrolamento terciário do transformador, que foram desenvolvidas no *ítem 3.2 Equacionamento Via Componentes Simétricas*, são reescritas a seguir, ou seja:

$$\begin{aligned} U^t_a &= \sqrt{3}E^t_{++} \\ U^t_b &= 0 \\ U^t_c &= -\sqrt{3}E^t_{++} \end{aligned} \qquad (3.2.4.9)$$

Uma vez que dois pára-raios atuam, isto caracteriza um Defeito Fase-Fase-Terra.

O diagrama de sequências mostrado no *ítem 3.2*, assume a existência de um defeito Fase-Fase-Terra, nas fases *"B"* e *"C"*. No entanto, para um surto aplicado na *fase "A"* do primário do transformador, a *fase "B"* do terciário do mesmo apresenta um valor nulo de tensão, conforme mostram as *equações 3.2.5.5* das tensões transferidas.

Dos circuitos de sequência, as tensões em [p.u.], para a condição padrão, ou seja, defeito nas *fases "B" e "C"* são:

$$E^t_{++} = 2U_A\varepsilon^{j30}$$

$$E^t_{--} = 2U_A\varepsilon^{-j30}$$

$$E^t_{00} = 0$$

Logo é necessário adequar a fase das tensões de sequência do terciário à condição real, para tanto, é necessário utilizar o operador "a", ou seja:

$$a = 1\varepsilon^{j120}$$

O operador "a" aplicado às tensões de sequência implica na mudança da fase solicitada pelo surto.

Nestes casos é necessário fazer:

Sequência Positiva - Somar

Sequência Negativa - Subtrair

Aplicar o operador "a" implica em aplicar tensão na *fase "B"*, neste caso a *fase "C"* terciária apresenta um valor nulo de tensão.

Logo é necessário aplicar o operador "a^2", ou seja:

$$a^2 = 1\varepsilon^{j240}$$

Deste modo:

$$E^t_{++} = 2U_A\varepsilon^{j270}$$

$E'_{--} = 2U_A \varepsilon^{-j270}$

$E'_{00} = 0$

Onde:

U_A = Amplitude do Impulso aplicado ao primário do Transformador [p.u.]

Logo, reescrevendo o sistema mostrado pela *equação 3.2.2.1*, desenvolvido a partir do diagrama de sequência para um defeito tipo Fase-Fase-Terra e considerando as tensões de sequência transferidas para o terciário do transformador, vem:

$$\begin{bmatrix} (Z_{++} + Z_{--} + 2R_f) & -(Z_{--} + R_f) \\ -(Z_{--} + R_f) & (Z_{++} + Z_{00} + 2R_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I' \\ I'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{++} - E'_{--} \\ E'_{--} - E'_{00} \end{bmatrix}$$

Fazendo:

$Z_{++} = Z_{--} = Z_p$

$R_f = R_{PRL}$

$E'_{++} = 0$

$$\begin{bmatrix} 2(Z_p + R_{PRL}) & -(Z_p + R_{PRL}) \\ -(Z_p + R_{PRL}) & (Z_p + Z_{00} + 2R_{PRL}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I' \\ I'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{++} - E'_{--} \\ E'_{--} \end{bmatrix} \qquad (3.2.4.10)$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} 2(Z_p + R_{PRL}) & -(Z_p + R_{PRL}) \\ -(Z_p + R_{PRL}) & (Z_p + Z_{00} + 2R_{PRL}) \end{bmatrix}$$

Resolvendo a matriz acima e simplificando adequadamente,vem:

$$\Delta = (Z_p + R_{PRL})\left[2(Z_p + Z_{00} + 2R_{PRL}) - (Z_p + R_{PRL})\right]$$

Cálculo de I':

$$I' = \frac{\begin{bmatrix} E'_{++} - E'_{--} & -(Z_p + R_{PRL}) \\ E'_{--} & (Z_p + Z_{00} + 2R_{PRL}) \end{bmatrix}}{\Delta}$$

Resolvendo adequadamente a matriz e efetuando a divisão e simplificando adequadamente, vem:

$$I' = \frac{E'_{++}(Z_p + Z_{00} + 2R_{PRL}) - E'_{--}(R_{PRL} + Z_{00})}{(Z_p + R_{PRL})\left[2(Z_p + Z_{00} + 2R_{PRL}) - (Z_p + R_{PRL})\right]} \qquad (3.2.4.11)$$

Cálculo de I":

$$I'' = \frac{\begin{bmatrix} 2(Z_p + R_{PRL}) & E'_{++} - E'_{--} \\ -(Z_p + R_{PRL}) & E'_{--} \end{bmatrix}}{\Delta}$$

Resolvendo adequadamente a matriz e efetuando a divisão, vem:

$$I'' = \frac{(E'_{++} - E'_{--})}{\left[2(Z_p + Z_{00} + 2R_{PRL}) - (Z_p + R_{PRL})\right]} \qquad (3.2.4.12)$$

Substituindo as impedâncias e tensões de sequência, positiva, negativa e zero nas *equações 3.2.4.11* e *3.2.4.12*, bem como rearranjando e simplificando adequadamente, são determinados I' e I".

As correntes de fase, são obtidas a partir da *Equação de Síntese*, mostrada a seguir:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A+} \\ I_{A-} \end{bmatrix} \qquad (3.2.4.13)$$

Do diagrama de sequências mostrado no *ítem 3.2*, para um defeito Fase-Fase-Terra, vem:

$$I_{A+} = I'$$

$$I_{A-} = I'' - I' \qquad (3.2.4.14)$$

$$I_{A0} = -I''$$

Substituindo as igualdades mostrada pela *equação 3.2.4.14*, na *Equação de Síntese*, rearranjando e simplificando adequadamente vem:

$$I_A = 0$$

$$I_B = \frac{2U_A}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})} \qquad (3.2.4.15)$$

$$I_C = -\frac{2U_A}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})}$$

Onde:

$$Z_{++} = Z_{--} = Z_p$$

No caso, de atuação do pára-raios primário do transformador, vem:

$$U_A = NP_{PRH}$$

$$I_A = 0$$

$$I_B = \frac{NP_{PRH}}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})} \qquad (3.2.4.16)$$

$$I_C = -\frac{NP_{PRH}}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})}$$

Onde:

NP_{PRH} = Nível de Proteção do Pára-raios Primário do Transformador [kV].

Assumindo tensões em valores de crista, e substituindo a impedância equivalente vista do ponto de defeito Z_p , na *equação3.2.5.10*, e simplificando adequadamente, vem:

Com:

$$A_1 = \frac{(Z_1 + Z_p)}{U_H^{\,2}}$$

$$A_3 = \frac{(Z_3 + Z_t)}{U_T^{\,2}}$$

$$A_{30} = \frac{Z_t}{U_T^{\,2}}$$

$$K_T = \frac{(Z_T + R_{PRT})}{U_T^{\,2}}$$

$$I_{PRT_A} = 0$$

$$I_{PRT_B} = \frac{2U_A(A_1 + A_2)}{U_H\left[(A_1A_2) + K_T(A_1 + A_2)\right]MVA}\,[p.u.] \qquad (3.2.4.17)$$

$$I_{PRT_C} = -\frac{2U_A(A_1 + A_2)}{U_H\left[(A_1A_2) + K_T(A_1 + A_2)\right]MVA}$$

Nas *equações 3.2.4.17*, as grandezas estão em por unidade [p.u.], pois apresentam grandezas dos três enrolamentos do transformador, logo vem:

$$I_{PRT_A} = 0$$

$$I_{PRT_B} = \frac{2U_A(A_1 + A_2)}{\sqrt{3}U_H U_T\left[(A_1A_2) + K_T(A_1 + A_2)\right]} \qquad (3.2.4.18)$$

$$I_{PRT_C} = -\frac{2U_A(A_1 + A_2)}{\sqrt{3}U_H U_T\left[(A_1A_2) + K_T(A_1 + A_2)\right]}$$

Onde:

U_A = Amplitude do Impulso Aplicado ao Primário do Transformador [kV];

U_H = Tensão Fase-Fase do Enrolamento Primário do Transformador [kV];

U_M = Tensão Fase-Fase do Enrolamento Secundário do Transformador [kV];

U_L = Tensão Fase-Fase do Enrolamento Terciário do Transformador [kV];

Z_1, Z_2 e Z_3 = Impedância de Surto da Linha de Transmissão nos Terminais de A.T., M.T. e de B.T. do Transformador respectivamente em [Ω]

A corrente fornecida pelas *equações 3.2.4.18* depende do tipo de pára-raios que está ligado no terminal terciário, sendo assim deve ser determinada para os dois tipos de pára-raios existentes no mercado, ou seja:

I - Pára-raios Convencionais:

Reescrevendo a *equação 3.2.4.2* para a resistência do pára-raios convencionais, vem:

$$R_{PRH_T} = \frac{U_{RES_{5[kA]_T}}}{5}$$

Substituindo a *equação 3.2.4.2*, na constante K_T acima, vem:

$$K_T = \frac{\left(5Z_T + U_{RES_{5[kA]T}}\right)}{5U_T^{\,2}} \qquad (3.2.4.19)$$

II - Pára-raios a Óxido de Zinco:

Uma vez que a posição relativa entre o cabo terciário em B.T. e o pára-raios não permite levantar a dependência entre tensão residual e corrente de descarga no pára-raios as *equações 3.2.4.18* são resolvidas iterativamente.

Análise do Comportamento do Pára-raios Secundário - M.T.:

I - Cálculo da Impedância de Sequência Positiva vista do Enrolamento Secundário:

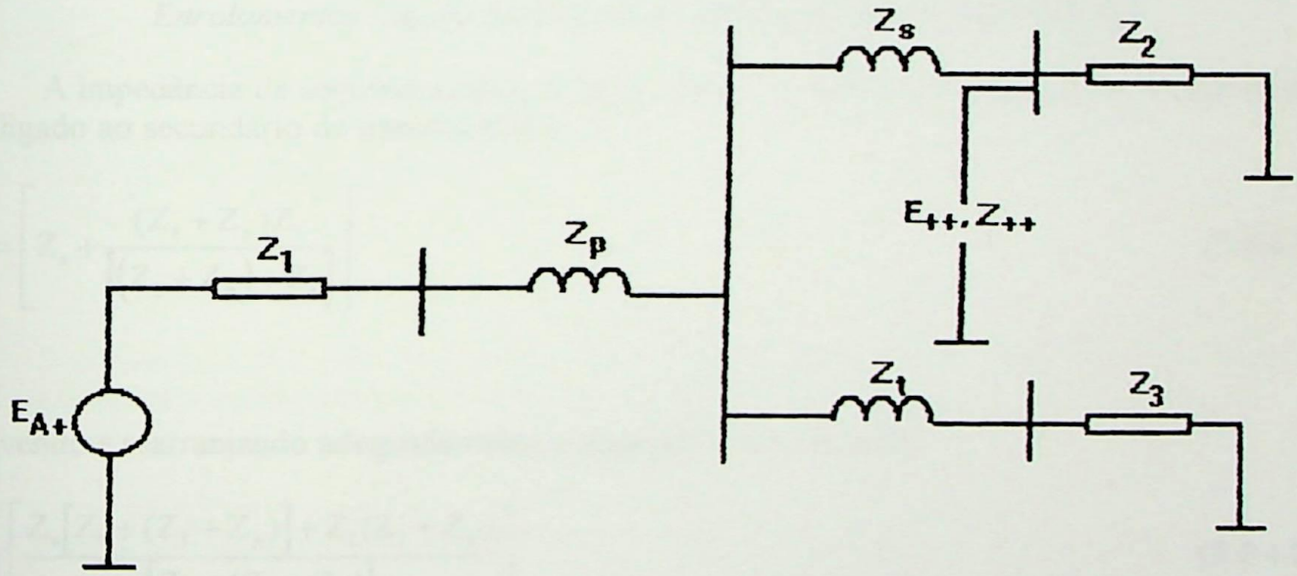


Figura 3.2.4.5 - Circuito Equivalente de Sequência Positiva de um Transformador de Três Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado-Estrela Aterrado-Delta

Do circuito equivalente de sequência positiva mostrado na *Figura 3.2.4.5*, vem:

$$Z_{++} = \left[Z_s + \frac{(Z_1 + Z_p)(Z_3 + Z_t)}{(Z_1 + Z_p) + (Z_3 + Z_t)} \right] \qquad (3.2.4.20)$$

Resolvendo e rearranjando adequadamente a *equação 3.2.5.20*, vem:

$$Z_{++} = \left[\frac{Z_s\left[(Z_1 + Z_p) + (Z_3 + Z_t)\right] + (Z_1 + Z_p)(Z_3 + Z_t)}{(Z_1 + Z_p) + (Z_3 + Z_t)} \right] \qquad (3.2.4.21)$$

II - Cálculo da Impedância de Sequência Zero vista do Enrolamento Secundário:

Seja ainda, o diagrama de sequência zero do transformador, conforme mostra a *Figura 3.2.4.6*:

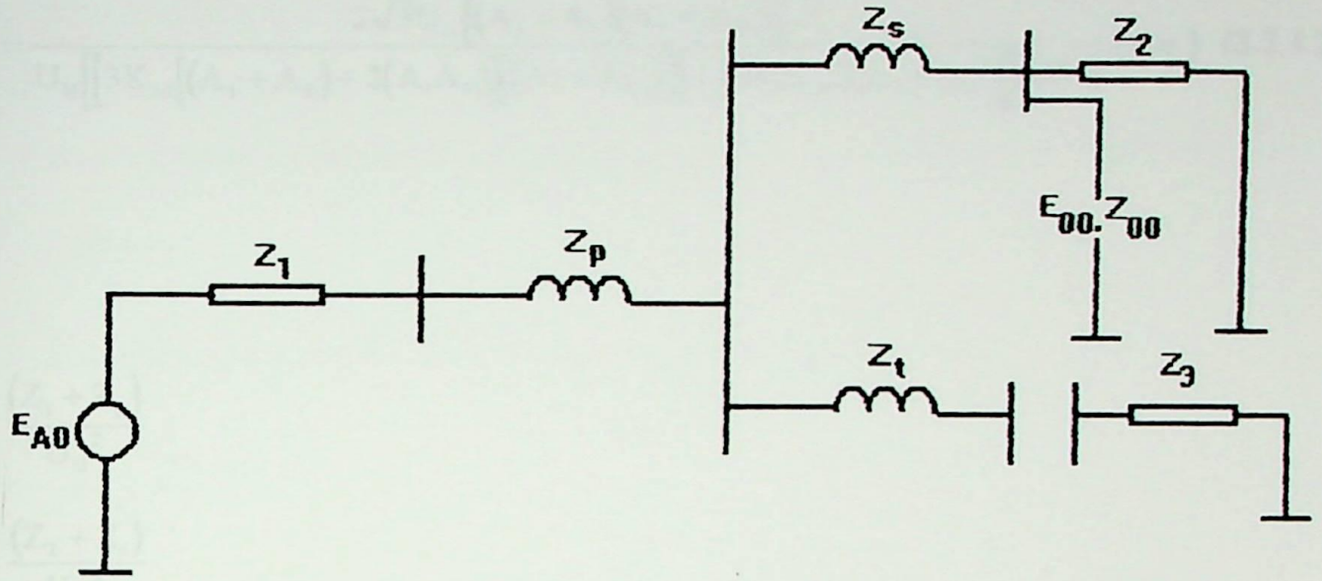


Figura 3.2.4.6 - Circuito Equivalente de Sequência Zero de um Transformador de Três Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado-Estrela Aterrado-Delta

A impedância de sequência zero, vista do ponto de defeito, ou seja dos terminais do pára-raios ligado ao secundário de transformador, é:

$$Z_{00} = \left[Z_s + \frac{(Z_1 + Z_p)Z_t}{\left[\left(Z_1 + Z_p\right) + Z_t\right]} \right] \qquad (3.2.4.22)$$

Resolvendo e rearranjando adequadamente a *equação 3.2.4.22*, vem:

$$Z_{00} = \left[\frac{Z_s\left[Z_t + (Z_1 + Z_p)\right] + Z_t(Z_1 + Z_p)}{\left[Z_t + (Z_1 + Z_p)\right]} \right] \qquad (3.2.4.23)$$

As tensões de sequência transferidas para o enrolamento secundário M.T. do transformador que foram desenvolvidas quando do equacionamento *Via Componentes Simétricas*, são reescritas a seguir:

$$U^s_a = 2E^s_{++} + E^s_{00}$$

$$U^s_b = -E^s_{++} + E^s_{00} \qquad (3.2.4.24)$$

$$U^s_c = -E^s_{++} + E^s_{00}$$

Uma vez que um pára-raios atua, fato que caracteriza um defeito Fase-Terra, sendo que:

$$U^{s}_{a} = 2E^{s}_{++} + E^{s}_{00} = E^{s}_{++} = E^{s}_{00} = U_A$$

Logo:

$$I_{PRM} = \frac{2\sqrt{3}U_A\left[(A_1 + A_2)(A_1 + A_{30})\right]}{U_H\left[\left[3K_M\left[(A_1 + A_2) + 2(A_1A_3)\right](A_1 + A_{30})\right]\right] + \left[(A_1A_{30})(A_1 + A_3)\right]MVA} [p.u.] \quad (3.2.4.25)$$

Com:

$$A_1 = \frac{(Z_1 + Z_p)}{U_H^{\,2}}$$

$$A_2 = \frac{(Z_2 + Z_s)}{U_M^{\,2}}$$

$$A_{30} = \frac{Z_t}{U_T^{\,2}}$$

$$K_M = \frac{(Z_s + R_{PRM})}{U_M^{\,2}}$$

Na *equação 3.2.4.25*, as grandezas estão em por unidade [p.u.], pois apresentam grandezas dos três enrolamentos do transformador, logo vem:

$$I_{PRM} = \frac{2U_A\left[(A_1 + A_2)(A_1 + A_{30})\right]}{U_H U_M\left[\left[3K_M\left[(A_1 + A_2) + 2(A_1A_3)\right](A_1 + A_{30})\right]\right] + \left[(A_1A_{30})(A_1 + A_3)\right]} \quad (3.2.4.26)$$

No caso, de atuação do pára-raios primário do transformador, vem:

$$2U_A = NP_{PRH}$$

$$I_{PRM} = \frac{NP_{PRH}\left[(A_1 + A_2)(A_1 + A_{30})\right]}{U_H U_M\left[\left[3K_M\left[(A_1 + A_2) + 2(A_1A_3)\right](A_1 + A_{30})\right]\right] + \left[(A_1A_{30})(A_1 + A_3)\right]} \quad (3.2.4.27)$$

Onde:

NP_{PRH} = Nível de Proteção do Pára-raios Primário do Transformador [kV].

A corrente fornecida pelas *equações 3.2.4.27*, dependem do tipo de pára-raios que está ligado ao terminal terciário, sendo assim deve ser determinada para os dois tipos de pára-raios existentes no mercado, ou seja:

I - Pára-raios Convencionais:

Reescrevendo a *equação 3.2.4.2* para a resistência do pára-raios convencionais, vem:

$$R_{PRM} = \frac{U_{RES_{5[kA]M}}}{5} \qquad (3.2.4.28)$$

Substituindo a *equação 3.2.4.2*, na constante K_M anterior, vem:

$$K_M = \frac{\left(5Z_M + U_{RES_{5[kA]M}}\right)}{5U_M^{\,2}} \qquad (3.2.4.29)$$

II - Pára-raios a Óxido de Zinco:

Uma vez que a posição relativa entre o cabo secundário em M.T. e o pára-raios não permite levantar a dependência entre tensão residual e corrente de descarga no pára-raios a *equação 3.2.4.27* são resolvidas iterativamente.

II - Transformador Estrela Aterrado A.T. - Delta B.T:

Análise do Comportamento do Pára-raios Primário A.T.:

Conforme discutido na *equação 3.2.4.1* reescrita, vem:

I - Pára-raios Tipo Convencional:

$$I_{PRH} = \frac{10U_A}{5Z_1 + U_{RES_{5[kA]}}} \qquad (3.2.4.30)$$

II - Pára-raios a Óxido de Zinco:

$$I_{PRH} = \frac{5(2U_A - \sqrt{2}U_N)}{\left[5Z_1 + U_{RES_{5[kA]}} - \sqrt{2}U_N\right]} \qquad (3.2.4.31)$$

Onde:

U_N = Tensão Nominal do Pára-raios [kV];

$U_{RES_{5[kA]}}$ = Máxima Tensão Residual para Impulso de corrente 8/20 [μs] [kV];

Z_1 = Impedância de Surto da Linha de Transmissão [Ω]

Análise do Comportamento do Pára-raios Secundário - B.T.:

I - Cálculo da Impedância de Sequência Positiva vista do Enrolamento Secundário:

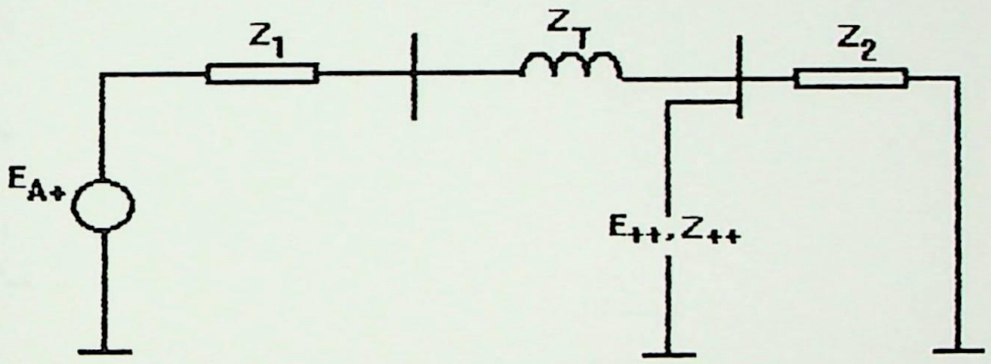


Figura 3 *lor de Dois*

Do circuito equivalente de sequência positiva conforme mostra a *Figura 3.2.4.7* vem:

$$Z_{++} = Z_1 + Z_T \qquad (3.2.4.32)$$

Onde:

Z_1 = Impedância de Surto da Linha de Transmissão ligada ao Terminal Primário;

Z_2 = Impedância de Surto da Linha de Transmissão ligada ao Terminal Secundário;

Z_T = Impedância do Transformador

II - Cálculo da Impedância de Sequência Zero vista do Enrolamento Secundário:

Seja agora o diagrama de sequência zero do transformador em análise, uma vez que analisando a *Figura 3.2.4.8*, a impedância de sequência zero é dada por:

$Z_{00} \approx \infty$

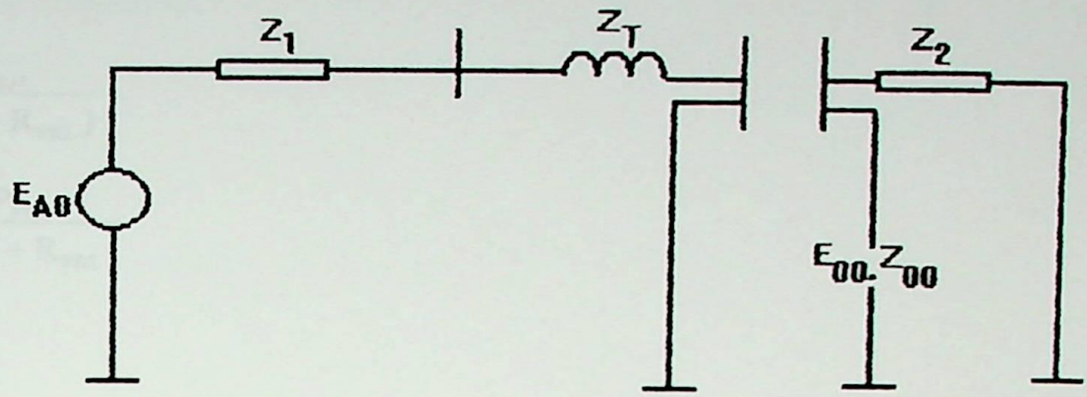


Figura 3.2.4.8 - Circuito Equivalente de Sequência Zero de um Transformador de Dois Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado - Delta

No caso as tensões de sequência transferidas para o enrolamento secundário do transformador, que foram desenvolvidas quando do *Equacionamento Via Componentes Simétricas*, são reescritas a seguir, ou seja:

$$U^s_a = \sqrt{3}E^s_{++}$$

$$U^s_b = 0$$

$$U^s_c = -\sqrt{3}E^s_{++}$$

Isto implica em:

$$I_{PRL_A} = 0$$

$$I_{PRL_B} = \frac{2U_A}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})} \qquad (3.2.4.33)$$

$$I_{PRL_C} = -\frac{2U_A}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})}$$

Onde:

$$Z_P = (Z_1 + Z_T)$$

No caso, de atuação do pára-raios primário do transformador, vem:

$$U_A = NP_{PRH}$$

$$I_{PRL_A} = 0$$

$$I_{PRL_B} = \frac{NP_{PRH}}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})} \qquad (3.2.4.34)$$

$$I_{PRL_C} = -\frac{NP_{PRH}}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})}$$

Onde:

NP_{PRH} = Nível de Proteção do Pára-raios Primário do Transformador [kV].

Assumindo as tensões em valores de crista, e substituindo a impedância equivalente vista do ponto de defeito, nas *equações 3.2.4.37*, e simplificando adequadamente, vem:

$$I_{PRL_A} = 0$$

$$I_{PRL_B} = \frac{2U_A}{\sqrt{3}U_H\left[\frac{Z_1}{U_H^{\,2}} + \frac{(Z_T + R_{PRL})}{U_L^{\,2}}\right]MVA}\,[p.u.] \qquad (3.2.4.35)$$

$$I_{PRL_C} = -\frac{2U_A}{\sqrt{3}U_H\left[\frac{Z_1}{U_H^{\,2}} + \frac{(Z_T + R_{PRL})}{U_L^{\,2}}\right]MVA}\,[p.u.]$$

Na *equação 3.2.4.35* as grandezas estão em por unidade [p.u.], pois apresentam grandezas dos dois enrolamentos do transformador, logo vem:

$$I_{PRL_A} = 0$$

$$I_{PRL_B} = \frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1\frac{U_L}{U_H} + (Z_T + R_{PRL})\frac{U_H}{U_L}\right)} \qquad (3.2.4.36)$$

$$I_{PRL_C} = -\frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1\frac{U_L}{U_H} + (Z_T + R_{PRL})\frac{U_H}{U_L}\right)}$$

A *equação 3.2.4.36* depende do tipo de pára-raios que está ligado ao terminal secundário, por hipótese em B.T., sendo assim será determinada para os dois tipos de pára-raios, o convencional e a óxido de zinco, em cada um dos casos analisados, ou seja:

I - Pára-raios Convencionais:

Reescrevendo a *equação 3.2.4.2* para a resistência do pára-raios convencionais, vem:

$$R_{PRL} = \frac{U_{RES_{5[kA]}}}{5} \qquad (3.2.4.37)$$

Substituindo a *equação 3.2.4.2*, nas *equações 3.2.4.36*, vem:

$$I_{PRL_A} = 0$$

$$I_{PRL_B} = \frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1 \frac{U_L}{U_H} + \frac{\left(5Z_T + U_{RES_{5[kA]}}\right)}{5} \frac{U_H}{U_L} \right)} \qquad (3.2.4.38)$$

$$I_{PRL_C} = -\frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1 \frac{U_L}{U_H} + \frac{\left(5Z_T + U_{RES_{5[kA]}}\right)}{5} \frac{U_H}{U_L} \right)}$$

II - Pára-raios a Óxido de Zinco:

Uma vez que a posição relativa entre o cabo terciário em B.T. e o pára-raios não permite levantar a dependência entre tensão residual e corrente de descarga no pára-raios as *equações 3.2.4.36* são resolvidas iterativamente.

III - Transformador Delta A.T. - Estrela Aterrado B.T:

Análise do Comportamento do Pára-raios Primário A.T.:

Conforme discutido na *equação 3.2.4.1* reescrita, vem:

I - Pára-raios Tipo Convencional:

$$I_{PRH} = \frac{10U_A}{5Z_1 + U_{RES_{5[kA]}}} \qquad (3.2.4.39)$$

II - Pára-raios a Óxido de Zinco:

$$I_{PRH} = \frac{5(2U_A - \sqrt{2}U_N)}{\left[5Z_1 + U_{RES_{5[kA]}} - \sqrt{2}U_N\right]} \qquad (3.2.4.40)$$

Onde:

U_N = Tensão Nominal do Pára-raios [kV];

$U_{RES_{5[kA]}}$ = Máxima Tensão Residual para Impulso de corrente 8/20 [μs] [kV];

Z_1 = Impedância de Surto da Linha de Transmissão [Ω]

Análise do Comportamento do Pára-raios Secundário - B.T.:

I - Cálculo da Impedância de Sequência Positiva vista do Enrolamento Secundário:

Do circuito equivalente de sequência positiva conforme mostra a *Figura 3.2.4.9* vem:

$$Z_{++} = Z_P = (Z_1 + Z_T) \qquad (3.2.4.41)$$

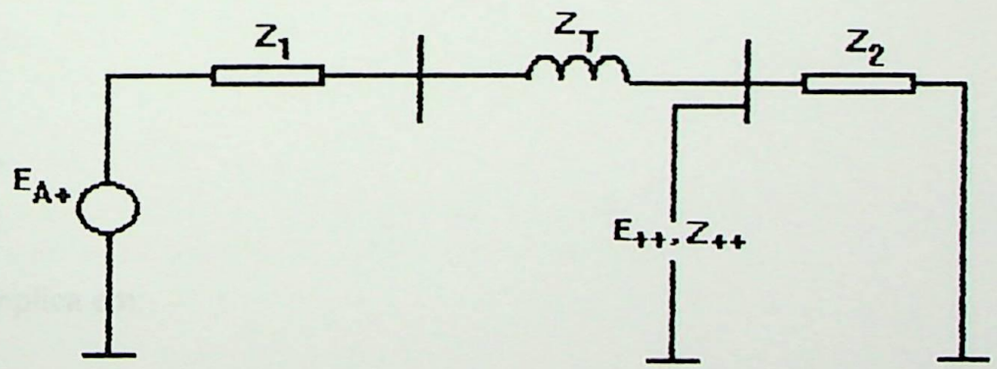


Figura 3.2.4.9 - Circuito Equivalente de Sequência Positiva de um Transformador de Dois Enrolamentos Ligado em Delta - Estrela Aterrado

Onde:

Z_1 = Impedância de Surto da Linha de Transmissão ligada ao Terminal Primário;

Z_2 = Impedância de Surto da Linha de Transmissão ligada ao Terminal Secundário;

Z_T = Impedância do Transformador

II - Cálculo da Impedância de Sequência Zero vista do Enrolamento Secundário:

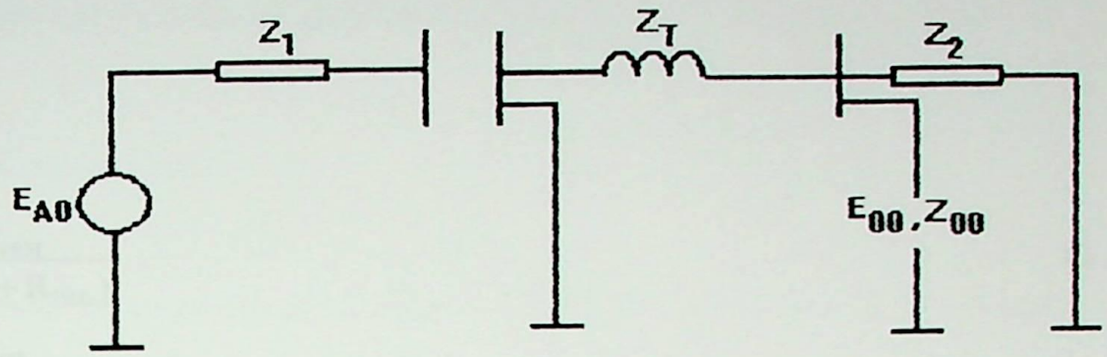


Figura 3.2.4.10 - Circuito Equivalente de Sequência Zero de um Transformador de Dois Enrolamentos Ligado em Delta - Estrela Aterrado

Seja agora o diagrama de sequência zero do transformador em análise, bem como, considerando a ordem de grandeza da impedância do transformador, conforme mostra a *Figura 3.2.4.10*, a impedância de sequência zero é dada por:

$$Z_{00} = \frac{Z_T Z_2}{(Z_T + Z_2)}$$

No caso as tensões de sequência transferidas para o enrolamento secundário do transformador, que foram desenvolvidas quando do *Equacionamento Via Componentes Simétricas*, são reescritas a seguir, ou seja:

$$U^s_a = \sqrt{3}E^s_{++}$$

$$U^s_b = 0$$

$$U^s_c = -\sqrt{3}E^s_{++}$$

Isto implica em:

$$I_{PRL_A} = 0$$

$$I_{PRL_B} = \frac{2U_A}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})} \qquad (3.2.4.42)$$

$$I_{PRL_C} = -\frac{2U_A}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})}$$

Onde:

$$Z_p = (Z_1 + Z_T)$$

No caso, de atuação do pára-raios primário do transformador, vem:

$$U_A = NP_{PRH}$$

$$I_{PRL_A} = 0$$

$$I_{PRL_B} = \frac{NP_{PRH}}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})} \qquad (3.2.4.43)$$

$$I_{PRL_C} = -\frac{NP_{PRH}}{\sqrt{3}(Z_p + R_{PRL})}$$

Onde:

NP_{PRH} = Nível de Proteção do Pára-raios Primário do Transformador [kV].

Assumindo as tensões em valores de crista, e substituindo a impedância equivalente vista do ponto de defeito, nas *equações 3.2.4.47*, e simplificando adequadamente, vem:

$$I_{PRL_A} = 0$$

$$I_{PRL_B} = \frac{2U_A}{\sqrt{3}U_H\left[\frac{Z_1}{U_H^{\,2}} + \frac{(Z_T + R_{PRL})}{U_L^{\,2}}\right]MVA}\,[p.u.] \qquad (3.2.4.44)$$

$$I_{PRL_C} = -\frac{2U_A}{\sqrt{3}U_H\left[\frac{Z_1}{U_H^{\,2}} + \frac{(Z_T + R_{PRL})}{U_L^{\,2}}\right]MVA}\,[p.u.]$$

Na *equação 3.2.4.44* as grandezas estão em por unidade [p.u.], pois apresentam grandezas dos dois enrolamentos do transformador, logo vem:

$$I_{PRL_A} = 0$$

$$I_{PRL_B} = \frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1\frac{U_L}{U_H} + (Z_T + R_{PRL})\frac{U_H}{U_L}\right)} \qquad (3.2.4.45)$$

$$I_{PRL_C} = -\frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1\frac{U_L}{U_H} + (Z_T + R_{PRL})\frac{U_H}{U_L}\right)}$$

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

A *equação 3.2.4.45* depende do tipo de pára-raios que está ligado ao terminal secundário, por hipótese em B.T., sendo assim será determinada para os dois tipos de pára-raios, o convencional e a óxido de zinco, em cada um dos casos analisados, ou seja:

I - Pára-raios Convencionais:

Reescrevendo a *equação 3.2.4.2* para a resistência do pára-raios convencionais, vem:

$$R_{PRL} = \frac{U_{RES_{5[kA]}}}{5} \qquad (3.2.4.46)$$

Substituindo a *equação 3.2.4.2*, nas *equações 3.2.4.45*, vem:

$$I_{PRL_A} = 0$$

$$I_{PRL_B} = \frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1 \frac{U_L}{U_H} + \frac{\left(5Z_T + U_{RES_{5[kA]}}\right)}{5} \frac{U_H}{U_L} \right)} \qquad (3.2.4.47)$$

$$I_{PRL_C} = -\frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1 \frac{U_L}{U_H} + \frac{\left(5Z_T + U_{RES_{5[kA]}}\right)}{5} \frac{U_H}{U_L} \right)}$$

II - Pára-raios a Óxido de Zinco:

Uma vez que a posição relativa entre o cabo terciário em B.T. e o pára-raios não permite levantar a dependência entre tensão residual e corrente de descarga no pára-raios as *equações 3.2.4.36* são resolvidas iterativamente.

3.2.5 - Cálculo Simplificado da Corrente de Descarga do Pára-raios de um Transformador:

A seguir são mostrados quadros dos resumos de equações para um transformador monofásico ou trifásico. As respectivas equações permitem o cálculo da corrente de descarga no pára-raios quando o transformador está sendo submetido a surtos de manobra.

TABELA I - Pára-raios ligado ao terminal do enrolamento de A.T.

Conforme mostrado a corrente no pára-raios independe da conexão primária do transformador.

A.T.	SiC	ZnO
I_{PRH}	$I_{PRH} = \frac{10U_A}{\left(5Z_1 + U_{RES_{5[kA]}}\right)}$	$I_{PRH} = \frac{5[2U_A - \sqrt{2}U_N]}{[5Z_1 - \sqrt{2}U_N + U_{RES_{5[kA]}}]}$

TABELA II - Pára-raios ligado ao terminal do enrolamento de B.T.
Transformador Estrela Aterrado - Delta e Delta - Estrela Aterrado

B.T.	SiC	ZnO
I_{PRL_A}	0	0
I_{PRL_B}	$I_{PRL_B} = \frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1 \frac{U_L}{U_H} + \frac{\left(5Z_T + U_{RES_{5[kA]}}\right)}{5} \frac{U_H}{U_L}\right)}$	$I_{PRL_B} = \frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1 \frac{U_L}{U_H} + (Z_T + R_{PRL}) \frac{U_H}{U_L}\right)}$
I_{PRL_C}	$I_{PRL_C} = -\frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1 \frac{U_L}{U_H} + \frac{\left(5Z_T + U_{RES_{5[kA]}}\right)}{5} \frac{U_H}{U_L}\right)}$	$I_{PRL_C} = -\frac{2U_A}{\sqrt{3}\left(Z_1 \frac{U_L}{U_H} + (Z_T + R_{PRL}) \frac{U_H}{U_L}\right)}$

TABELA III - Pára-raios ligado ao terminal do enrolamento terciário de B.T.
Transformador de Três Enrolamentos ligado em Estrela Aterrado - Estrela Aterrado - Delta

B.T.	ZnO
I_{PRL_A}	0
I_{PRL_B}	$I_{PRT_B} = \dfrac{2U_A(A_1 + A_2)}{\sqrt{3}U_H U_T\left[(A_1A_2) + K_T(A_1 + A_2)\right]}$
I_{PRL_C}	$I_{PRT_C} = -\dfrac{2U_A(A_1 + A_2)}{\sqrt{3}U_H U_T\left[(A_1A_2) + K_T(A_1 + A_2)\right]}$

TABELA IV - Pára-raios ligados ao terminal do enrolamento secundário de M.T.
Transformador de Três Enrolamentos ligado em Estrela Aterrado - Estrela Aterrado - Delta

B.T.	ZnO
I_{PRM}	$I_{PRM} = \dfrac{2U_A\left[(A_1 + A_2)(A_1 + A_{30})\right]}{U_H U_M\left[\left[3K_M\left[(A_1 + A_2) + 2(A_1A_3)\right](A_1 + A_{30})\right]\right] + \left[(A_1A_{30})(A_1 + A_3)\right]\right]}$

Com:

$$A_1 = \frac{(Z_1 + Z_p)}{U_H^{\,2}};\ A_2 = \frac{(Z_2 + Z_s)}{U_M^{\,2}};\ A_3 = \frac{(Z_3 + Z_t)}{U_T^{\,2}};\ A_{30} = \frac{Z_t}{U_T^{\,2}}\ \text{e:}$$

$$K_T = \frac{(Z_T + R_{PRT})}{U_T^{\,2}};\ K_M = \frac{(Z_s + R_{PRM})}{U_M^{\,2}}$$

No caso de pára-raios convencionais SiC, no secundário do transformador (M.T.), vem:

$$K_M = \frac{\left(5Z_M + U_{RES_{5[kA]M}}\right)}{5U_M^{\,2}}$$

No caso de pára-raios convencionais SiC, no terciário do transformador (B.T.), vem:

$$K_T = \frac{\left(5Z_T + U_{RES_{5[kA]T}}\right)}{5U_T^{\,2}}$$

Para surtos de manobra a corrente independe da posição relativa *transformador - cabo - pára-raios*, pois o cabo deve ser modelado na forma de parâmetros concentrados.

No caso dos pára-raios a óxido de zinco as equações são resolvidas iterativamente.

CAPÍTULO 4

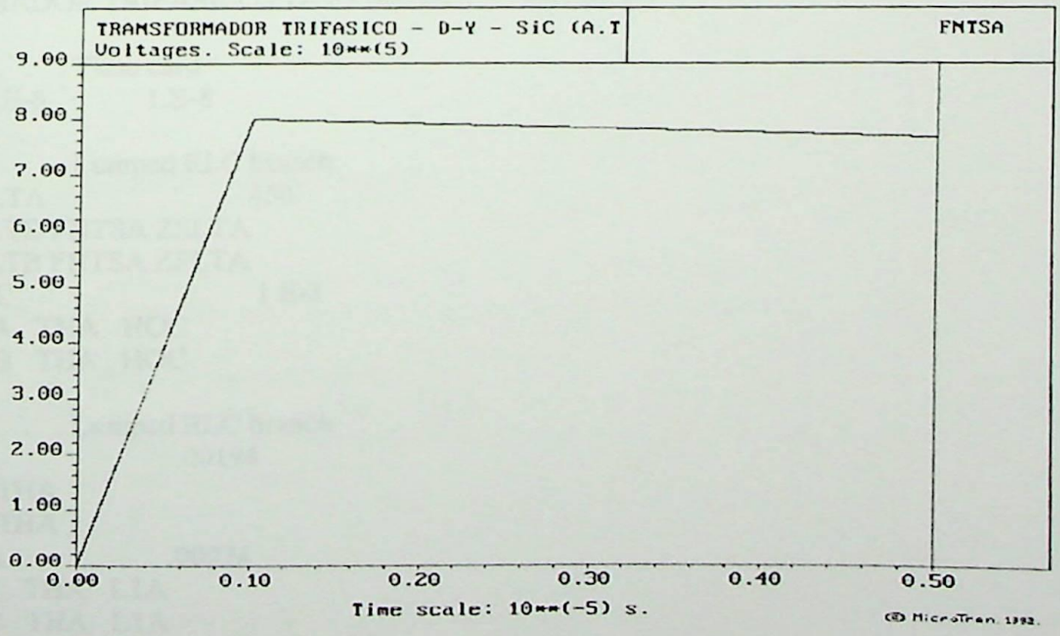
RESULTADOS COMPARATIVOS

Exemplo Simplificado a partir de dados retirados por semelhança com a Subestação da *ELETRONORTE*

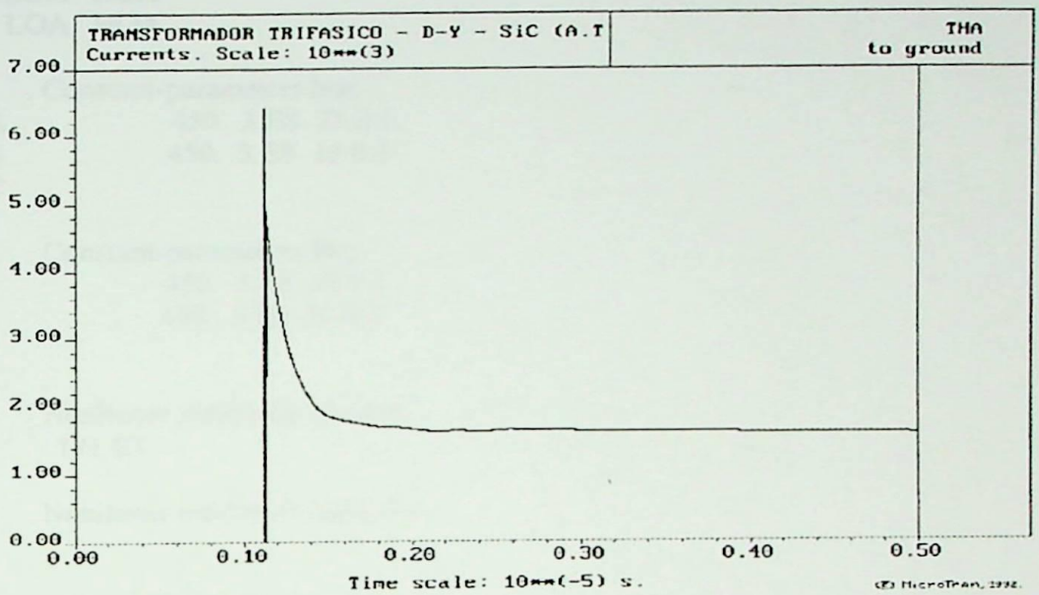
Transformador Delta Estrela-Aterrado - 69/13,8 [kV]
Pára-raios a Carboneto de Silício - SiC

Transferência Eletrostática

Tensão de Surto Aplicada no Terminal de A.T. do Transformador:



Corrente no Pára-raios A.T.:



Arquivo de Dados:

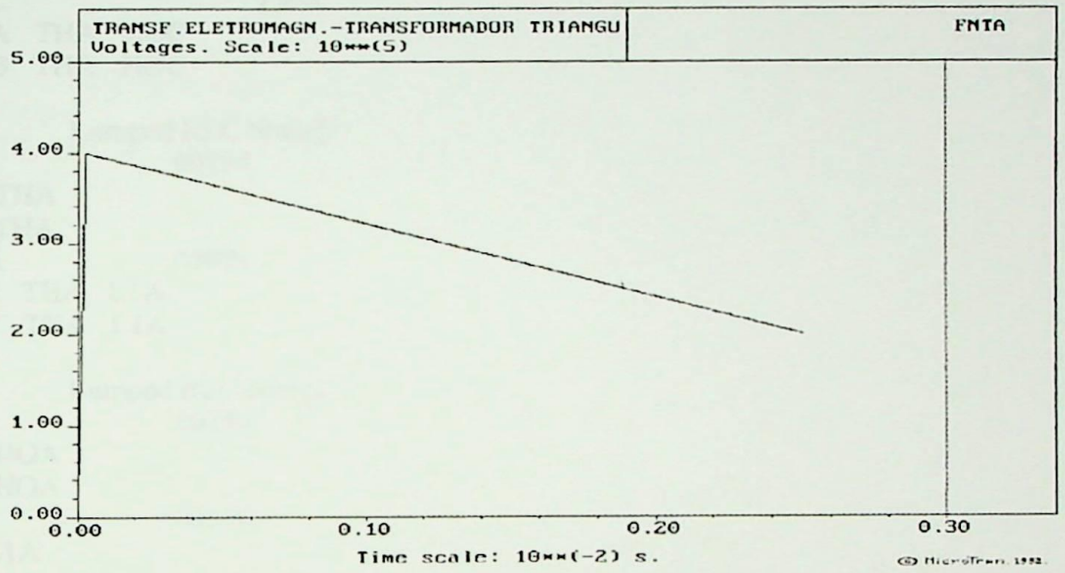
```
*
*  . . . . . . . . Case identification card
TRANSFORMADOR TRIFASICO - D-Y - SiC (A.T.) - SiC (B.T.)
*
*  . . . . . . . . Time card
  5.E-10    5.E-6          1.E-8
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
  FNTSA ZSLTA                    450.
  FNTSB ZSLTB FNTSA ZSLTA
  FNTSB ZSLTB FNTSA ZSLTA
   THA  HOC                      1.E-3
   THB  HOA  THA  HOC
   THC  HOB  THA  HOC
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
   THA                        .00194
   THB       THA
   THC       THA
   THA  L1A                   .00074
   THB  L1B  THA  L1A
   THC  L1C  THA  L1A
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
   HOA                        .00194
   HOB       HOA
```

```
   HOC       HOA
   L1A                        .00319
   L1B       L1A
   L1C       L1A
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
   LOA  HOA                   .00074
   LOB  HOB  LOA  HOA
   LOC  HOC  LOA  HOA
*
*  . . . . . . . . Constant-parameters line
-1 ZSLTA  THA                  450.  3.E8  75.0 1
-2 ZSLTB  THB                  450.  3.E8  15.0 1
-3 ZSLTC  THC
*
*  . . . . . . . . Constant-parameters line
-1  L1A PRZSA                  450.  3.E8  10.0 1
-2  L1B PRZSB                  450.  3.E8  10.0 1
-3  L1C PRZSC
*
*  . . . . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92  THA              171.E3                                  3
*
*  . . . . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
    0.0     0.0
   5.E3   167.E3
  10.E3   180.E3
  20.E3   195.E3
9999999.
*
*  . . . . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92  THB        THA     171.E3                                 3
92  THC        THA     171.E3                                 3
*
*  . . . . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PRZSA              37.E3                                   3
*
*  . . . . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
    0.0     0.0
   5.E3    31.E3
  10.E3    34.E3
  20.E3    38.E3
9999999.
*
*  . . . . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PRZSB      PRZSA      37.E3                                 3
92 PRZSC      PRZSA      37.E3                                 3
$  == End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*  . . . . . . . . Voltage or current sources
13 FNTSA       8.E5              1.E-6     4.E5     5.E-5
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1      **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
```

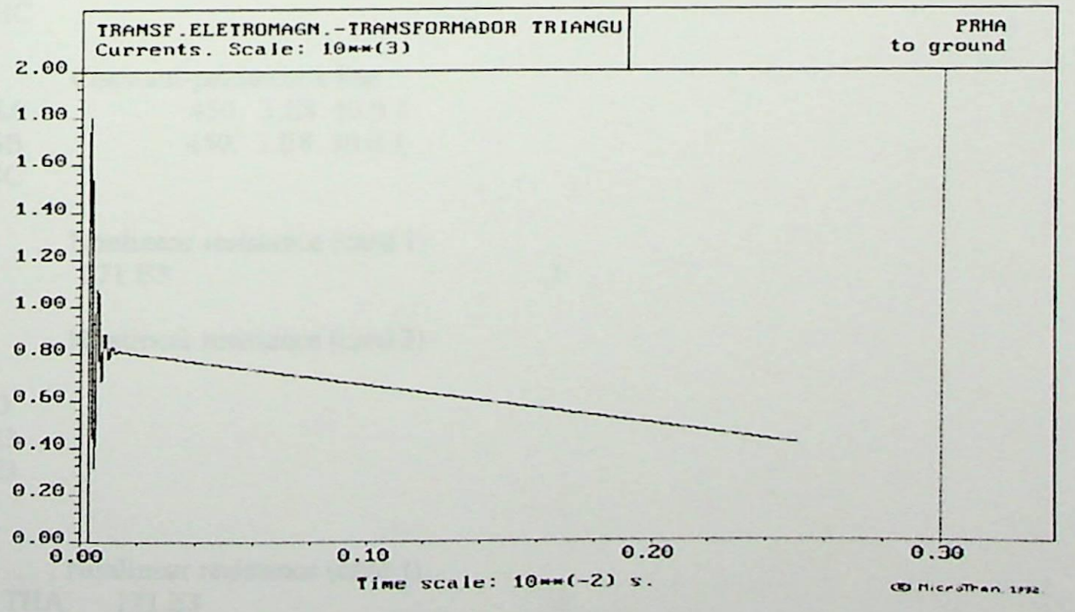
Transformador Delta Estrela-Aterrado - 69/13,8 [kV]

Transferência Eletromagnética

Tensão de Surto Aplicada no Terminal de A.T. do Transformador:



Corrente no Pára-raios:



Arquivo de Dados:

```
*
*  . . . . . . . . Case identification card
TRANSFORMADOR TRIFASICO - D-Y - SiC (A.T.) - SiC (B.T.)
*
*  . . . . . . . . Time card
   5.E-10    5.E-6          1.E-8
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
  FNTSA ZSLTA                    450.
  FNTSB ZSLTB FNTSA ZSLTA
  FNTSB ZSLTB FNTSA ZSLTA
   THA  HOC                      1.E-3
   THB  HOA  THA  HOC
   THC  HOB  THA  HOC
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
   THA                        .00194
   THB       THA
   THC       THA
   THA  L1A                   .00074
   THB  L1B  THA  L1A
   THC  L1C  THA  L1A
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
   HOA                        .00194
   HOB       HOA
   HOC       HOA
   L1A                        .00319
   L1B       L1A
   L1C       L1A
*
*  . . . . . . . . Lumped RLC branch
   LOA  HOA                   .00074
   LOB  HOB  LOA  HOA
   LOC  HOC  LOA  HOA
*
*  . . . . . . . . Constant-parameters line
-1 ZSLTA  THA                  450.  3.E8  75.0 1
-2 ZSLTB  THB                  450.  3.E8  15.0 1
-3 ZSLTC  THC
*
*  . . . . . . . . Constant-parameters line
-1  L1A PRZSA                  450.  3.E8  10.0 1
-2  L1B PRZSB                  450.  3.E8  10.0 1
-3  L1C PRZSC
*
*  . . . . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92  THA              171.E3                          3
*
*  . . . . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
    0.0    0.0
   5.E3  167.E3
  10.E3  180.E3
  20.E3  195.E3
9999999.
*
*  . . . . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92  THB       THA     171.E3                         3
92  THC       THA     171.E3                         3
*
```

```
*  . . . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PRZSA              37.E3                              3
*
*  . . . . . . . Nonlinear resistance (card 2)
    0.0    0.0
   5.E3   31.E3
  10.E3   34.E3
  20.E3   38.E3
9999999.
*
*  . . . . . . . Nonlinear resistance (card 1)
92 PRZSB     PRZSA     37.E3                              3
92 PRZSC     PRZSA     37.E3                              3
$  = =  End of level 1: Linear and nonlinear elements = = = = = = = = = = = =
$ = = =  End of level 2: Switches and piecewise linear elements = = = = = = = =
*
*  . . . . . . . Voltage or current sources
13 FNTSA      8.E5           1.E-6     4.E5     5.E-5
$ = = =  End of level 3: Sources  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =
 1      **** All voltages will be printed ****
$ = = =  Level 5: End of data case  = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = [17]
```

Surtos Transferidos Eletrostaticamente

Tabela I - Transformador Delta (A.T.) Estrela Aterrado (B.T.) - 69/13,8 [kV]

TIPO DE PÁRA-RAIOS AT	TIPO DE PÁRA-RAIOS BT	U_{PRH} [kV]	U_{PRL} [kV]	I_{PRH} [A] SIMUL.	I_{PRL} [A] SIMUL.	I_{PRH} [A] CALC.	I_{PRL} [A] CALC.
SiC	-	170,87	34,10	6400	-	6500	-
-	**SiC**	687,00	37,00	-	15100	-	15000
ZnO	-	121,50	25,40	1500	-	1560	-
-	**ZnO**	702,15	20,25	-	376,00	-	294,00 625,00* 460,0
SiC	**SiC**	170,87	34,10	6400	0	6500	0
SiC	**ZnO**	170,94	18,57	6400	96,00	6500	33,0 104,0* 68,6
ZnO	**SiC**	121,50	23,10	1500	0	1560	0
ZnO	**ZnO**	121, 50	18,30	1500	56,00	1560	11,7 61,0* 36,4

** Se considerar reflexão plena.*

Tabela II - Transformador Delta (A.T.) Estrela Aterrado (B.T.) - 69/13,8 [kV]

TIPO DE PÁRA-RAIOS AT	TIPO DE PÁRA-RAIOS BT	I_{PRH} [A] SIMUL.	I_{PRH} [A] CALC.	ERRO [%]	I_{PRL} [A] SIMUL.	I_{PRL} [A] CALC.	ERRO [%]
SiC	-	6400	6500	1,6	-	-	-
-	**SiC**	-	-	-	15100	15000	0,6
ZnO	-	1500	1560	4,0	-	-	-
-	**ZnO**	-	-	-	376,00	294,0 625,0* **460,0**	22,3
SiC	**SiC**	6400	6500	1,6	0	0	-
SiC	**ZnO**	6400	6500	1,6	96,00	33,0 104,0* 68,6	40,0
ZnO	**SiC**	1500	1560	4,0	0	0	-
ZnO	**ZnO**	1500	1560	4,0	56,00	11,7 61,0* **36,4**	54,0

Tabela III - Transformador Estrela Aterrado (A.T.) - Estrela Aterrado (M.T.) - Delta (B.T.)

230/138/13,8 [kV]

PARA-RAIOS AT	PARA-RAIOS MT	PARA-RAIOS TERC.	U_{PRH} [kV]	U_{PRL} [kV]	U_{PRT} [kV]	I_{PRH} [A]	I_{PRL} [A]	I_{PRT} [A]	I_{PRH} [A]	I_{PRL} [A]	I_{PRT} [A]
SiC	-	-	573,0	105,0	69,76	7310	-	-	7560	-	-
-	**SiC**	-	767,4	140,8	89,95	-	0	-	-	0	-
-	-	**SiC**	487,3	155,2	36,9	-	-	15000	-	-	15000
ZnO	-	-	401,0	74,7	47,7	2600	-	-	2500	-	-
-	**ZnO**	-	1,3E3	185,0	154, 0	-	224	-	-	292	-
-	-	**ZnO**	904,0	145,0	23,0	-	-	1080	-	-	540
SiC	**SiC**	**SiC**	573,0	104,0	37,0	7360	0	1200	7560	0	254
SiC	**ZnO**	**ZnO**	573,0	105,0	37,0	7450	0	800	7560	0	220
SiC	**SiC**	**ZnO**	574,0	101,4	21,8	7450	0	800	7560	0	220
SiC	**ZnO**	**SiC**	573,0	104,0	37,0	7400	0	1200	7560	0	254
ZnO	**ZnO**	**SiC**	400,0	73,0	37,0	2340	0	990	2500	0	157
ZnO	**SiC**	**SiC**	400,0	73,0	37,0	2350	0	990	2500	0	157
ZnO	**SiC**	**ZnO**	400,0	73,0	20,4	2370	0	570	2500	0	120
ZnO	**ZnO**	**ZnO**	400,0	73,0	20,4	2370	0	0	2500	0	120

Tabela IV - Transformador Estrela Aterrado (A.T.) - Estrela Aterrado (M.T.) - Delta (B.T.)

230/138/13,8 [kV]

PARA-RAIOS AT	PARA-RAIOS MT	PARA-RAIOS TERC.	I_{PRH} [A]	I_{PRH} [A]	ERRO [%]]	I_{PRL} [A]	I_{PRL} [A]	ERRO [%]]	I_{PRT} [A]	I_{PRT} [A]	ERRO [%]]
SiC	-	-	7310	7560	3,4	-	-	-	-	-	-
-	**SiC**	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-
-	-	**SiC**	-	-	-	-	-	-	15000	15000	-
ZnO	-	-	2600	250	4,0	-	-	-	-	-	-
-	**ZnO**	-	-	-	-	224	292	30,4	-	-	-
-	-	**ZnO**	-	-	-	-	-	-	1080	540 1080* **810**	33,33
SiC	**SiC**	**SiC**	7360	7560	2,7	0	-	-	1200	254	372,0
SiC	**ZnO**	**ZnO**	7450	7560	1,5	0	0	-	800	220	264,0
SiC	**SiC**	**ZnO**	7450	7560	1,5	0	0	-	800	220	264,0
SiC	**ZnO**	**SiC**	7400	7560	2,2	0	0	-	1200	254	372,0
ZnO	**ZnO**	**SiC**	2340	2500	6,8	0	0	-	990	157	531,0
ZnO	**SiC**	**SiC**	2350	2500	6,4	0	0	-	990	157	531,0
ZnO	**SiC**	**ZnO**	2370	2500	5,2	0	0	-	570	120	375,0
ZnO	**ZnO**	**ZnO**	2370	2500	5,2	0	0	-	570	120	375,0

Surtos Transferidos Eletromagneticamente

Tabela V - Transformador Delta (A.T.) - Estrela Aterrado (B.T.) - 69/13,8 [kV]

TIPO DE PÁRA-RAIOS AT	**TIPO DE PÁRA-RAIOS BT**	U_{PRH} **[kV]**	U_{PRL} **[kV]**	I_{PRH} **[A] SIMUL.**	I_{PRL} **[A] SIMUL.**	I_{PRH} **[A] CALC.**	I_{PRL} **[A] CALC.**
SiC	-	132,00	34,10	827	-	827	-
-	**SiC**	375,00	21,80	-	1440 A,C	-	1670
ZnO	-	376,00	21,80	650	-	686	-
-	**ZnO**	376,00	21,79	-	800 A,C	-	1200
SiC	**SiC**	131,10	5,27	827	0	827	0
SiC	**ZnO**	131,30	5,20	827	0	827	0
ZnO	**SiC**	106,60	11,98	650	0	686	0
ZnO	**ZnO**	106,60	11,97	650	0	686	0

Tabela VI - Transformador Delta (A.T.) - Estrela Aterrado (B.T.) - 69/13,8 [kV]

TIPO DE PÁRA-RAIOS AT	TIPO DE PÁRA-RAIOS BT	I_{PRH} [A] SIMUL.	I_{PRH} [A] CALC.	ERRO [%]	I_{PRL} [A] SIMUL.	I_{PRL} [A] CALC.	ERRO [%]
SiC	-	827	827	-	-	-	-
-	**SiC**	-	-	-	1440 A,C	1670	16,0
ZnO	-	650	686	6,2	-	-	-
-	**ZnO**	-	-	-	800 A,C	1200	50,0
SiC	**SiC**	827	827	-	0	0	-
SiC	**ZnO**	827	827	-	0	0	-
ZnO	**SiC**	650	686	6,2	0	0	-
ZnO	**ZnO**	650	686	6,2	0	0	-

Tabela VII - Transformador Estrela Aterrado (A.T.) - Estrela Aterrado (M.T.) - Delta (B.T.)

230/138/13,8 [kV]

PARA-RAIOS AT	PARA-RAIOS MT	PARA-RAIOS TERC.	U_{PRH} [kV]	U_{PRL} [kV]	U_{PRT} [kV]	I_{PRH} [A]	I_{PRL} [A]	I_{PRT} [A]	I_{PRH} [A]	I_{PRL} [A]	I_{PRT} [kA]
SiC	-	-	484,0	37,5	11,3	3030	-	-	3070	-	-
-	**SiC**	-	1255,0	279,0	32,3	-	2670	-	-	2600	-
-	-	**SiC**	1255,0	279,0	29,0	-	-	3930 A.B	-	-	5860
ZnO	-	-	405,0	221,0	18,1	2730	-	-	2900	-	-
-	**ZnO**	-	1255,0	244,0	32,3	-	1570	-	-	2190	-
-	-	**ZnO**	1255,0	403,0	24,5	-	-	2500 A.B	-	-	4700
SiC	**SiC**	**SiC**	485,0	138,5	14,6	3300	0	0	3070	0	0
SiC	**ZnO**	**ZnO**	482,0	138,5	13,9	3300	0	0	3070	0	0
SiC	**SiC**	**ZnO**	482,0	138,6	13,9	3300	0	0	3070	0	0
SiC	**ZnO**	**SiC**	482,0	138,6	14,0	3300	0	0	3070	0	0
ZnO	**ZnO**	**SiC**	405,0	200,9	17,2	2730	455	0	2900	200	0
ZnO	**SiC**	**SiC**	405,0	221,0	18,1	2730	0	0	2900	0	0
ZnO	**SiC**	**ZnO**	405,0	220,8	17,8	2730	0	0	2900	0	0
ZnO	**ZnO**	**ZnO**	405,0	200,9	17,1	2730	454	0	2900	200	0

Tabela VIII - Transformador Estrela Aterrado (A.T.) - Estrela Aterrado (M.T.) - Delta (B.T.)

230/138/13,8 [kV]

PARA-RAIOS AT	PARA-RAIOS MT	PARA-RAIOS TERC.	I_{PRH} [A]	I_{PRH} [A]	ERRO [%]	I_{PRL} [A]	I_{PRL} [A]	ERRO [%]	I_{PRT} [A]	I_{PRT} [A]	ERRO [%]
SiC	-	-	2730	3070	1,3	-	-	-	-	-	-
-	**SiC**	-	-	-	-	2670	2600	2,7	-	-	-
-	-	**SiC**	-	-	-	-	-	-	3930 A.B	5860	49,1
ZnO	-	-	2730	2900	6,2	-	-	-	-	-	-
-	**ZnO**	-	-	-	-	1570	2190	39,5	-	-	-
-	-	**ZnO**	-	-	-	-	-	-	2500 A.B	4700 E3	88,0
SiC	**SiC**	**SiC**	3300	3070	7,5	0	0	-	0	0	-
SiC	**ZnO**	**ZnO**	3300	3070	7,5	0	0	-	0	0	-
SiC	**SiC**	**ZnO**	3300	3070	7,5	0	0	-	0	0	-
SiC	**ZnO**	**SiC**	3300	3070	7,5	0	0	-	0	0	-
ZnO	**ZnO**	**SiC**	2730	2900	6,2	455	200	127,5	0	0	-
ZnO	**SiC**	**SiC**	2730	2900	6,2	0	0	-	0	0	-
ZnO	**SiC**	**ZnO**	2730	2900	6,2	0	0	-	136,0 A.B	119,	14,3
ZnO	**ZnO**	**ZnO**	2,73	2,90	6,2	455	200	127,5	0	0	-

CAPÍTULO 5

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

CONCLUSÕES

As análises comparativas são apresentadas em relação aos erros referentes a amplitude de corrente de atuação calculadas pelas fórmulas teóricas desenvolvidas no trabalho, com as simuladas, no Programa de Análise de Transitórios - ***Microtran*** para os dois tipos construtivos de pára-raios existentes no mercado, ou seja, pára-raios Convencional e pára-raios a Óxido de Zinco.

Conforme foi visto anteriormente, durante a Transferência Eletrostática, a tensão transferida para o enrolamento de Baixa Tensão (B.T.) é reduzida por uma rede equivalente de capacitâncias, uma vez que as mesmas influem significamente no valor e na forma de resposta do surto transferido. São consideradas somente as capacitâncias do enrolamento solicitado, e do enrolamento no qual a tensão transferida está sendo calculada, tanto para transformadores de dois enrolamentos, bem como, para transformadores de três enrolamentos, obtendo assim, um equacionamento simplificado.

Considerando o transformador de dois enrolamentos, em relação ao pára-raios Convencional os erros são inferiores a 2,0 [%]. Os pára-raios a Óxido de Zinco quando os mesmos estão ligados aos terminais de Alta Tensão (A.T.) do transformador o erros estão em torno de 4,0 [%].

Quando os pára-raios a Óxido de Zinco estão ligados aos terminais de B.T. o erro se torna apreciável em torno de 54,0 [%]. Isto devido ao fenômeno de ondas viajantes, uma vez que o programa utilizado nas simulações impõe que seja colocado um trecho de cabo entre o transformador e o pára-raios, consequentemente o sistema se apresenta sujeito à reflexão plena, visto que no equacionamento desenvolvido apareceria termos em somatórios, chegando a equações bem maiores que as equações simplificadas desenvolvidas, não apresentando vantagem alguma, uma vez que neste caso o sistema pode ser simulado no computador.

Em relação aos pára-raios ligados aos terminais secundário B.T., quando dos pára-raios Convencional, não atuam visto que pela condição de atuação analisada anteriormente para Surtos Transferidos Eletrostaticamente., uma vez que a tensão transferida é inferior a tensão disruptiva U_d do mesmo.

Considerando o transformador de três enrolamentos, os resultados das simulações em relação ao pára-raios Convencional, os erros são inferiores a 3,5 [%], bem como os pára-raios a Óxido de Zinco, quando os mesmos estão ligados aos terminais de A.T. do transformador os erros são inferiores a 7,0 [%].

Em relação aos pára-raios ligados aos terminais secundário de Média Tensão (M.T.) e aos pára-raios ligados aos terminais terciário de Baixa Tensão (B.T.) , no caso de atuarem os pára-raios tipo Convencional, bem como, os pára-raios a Óxido de Zinco, os erros são muito elevados, fato este, devido às múltiplas reflexões, conforme relatado acima para o caso do transformador de dois enrolamentos.

Em relação aos Surtos Transferidos Eletromagneticamente, considerando o transformador de dois enrolamentos e os pára-raios Convencionais ligados aos terminais de A.T., a corrente calculada é igual a corrente simulada no programa, considerando os pára-raios a Óxido de Zinco ligado aos terminais em questão os erros são inferiores a 6,5 [%].

No caso dos pára-raios ligados aos terminais secundário B.T., quando da atuação dos pára-raios ligados aos terminais de A.T., as tensões transferidas para os terminais de B.T., não são suficientes para a atuação dos pára-raios tipo Convencional, bem como, dos pára-raios a Óxido de Zinco uma vez que não satisfazem as condições de atuação vistas anteriormente para Surtos Transferidos Eletromagneticamente.

Estando o sistema com pára-raios tipo Convencional ligado apenas nos terminais de B.T., por exemplo, considerando o pára-raios ligado aos terminais de A.T. em estado de falha, o erro está em torno de 16,0 [%].

No caso dos pára-raios á Óxido de Zinco o erro se aproxima a 50,0 [%], uma vez que a curva não linear do pára-raios, fora considerada linearizada, conforme equacionamento apresentado anteriormente. Os erros são elevados na região onde a linearização situa abaixo da curva não linear do pára-raios, quando a curva linearizada situa acima da curva não linear, os valores calculados ficam próximos dos valores obtidos por simulação

Em relação ao transformador de três enrolamentos, os pára-raios tipo Convencional ligados aos terminais de A.T. o erro são inferiores a 8,0 [%], e quando de pára-raios tipo a Óxido de Zinco, o erro se encontra inferior a 6,5 [%].

Considerando os pára-raios Convencionais ligados aos terminais de M.T., com o pára-raios de A.T. fora de operação, o erro se encontra inferior a 3,0 [%].
No caso de o pára-raios a Óxido de Zinco, o erro aproxima a 40,0 [%], o que está relacionado com a linearizaçào da curva do mesmo.

Com a atuação do pára-raios de A.T., os pára-raios Convencionais ligados aos terminais de M.T., não atuam, e no caso de os pára-raios a Óxido de Zinco, os erros aproximam a 130,0 [%], o que está relacionado com a linearizaçào da curva do mesmo.

Em relação aos pára-raios ligados aos terminais terciário de Baixa Tensão (B.T.) , quando dos pára-raios tipo Convencional, não atuam uma vez que pela condição de atuação, contudo os pára-raios a Óxido de Zinco atuam quando satisfeitas as condições de atuação , com erros elevados, aproximando a 90,0 [%], visto que, a curva Corrente versus Tensão no pára-raios, foi linearizada sumariamente, o que implica nas equações desenvolvidas a ausência de significado quando de correntes de baixa amplitude.

O modelo do pára-raios a Óxido de Zinco utilizado é pouco recomendável pois a curva não linear do pára-raios linearizada, situa acima da curva do pára-raios, induzindo contudo a erros consideráveis, quando do cálculo da resistência apresentada pelo pára-raios, sendo que o mesmo está submetido a Surtos Transferidos.

Como sugestão futura, utilizando o equacionamento desenvolvido para o cálculo da resistência do pára-raios, por sucessivas iterações nestas equações, há a possibidade de determinação de um valor ótimo para a resistência do pára-raios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - Blume, L.F., Boyajian, A., - " Abnormal voltages within transformers "

A.I.E.E. Vol. 38 , p. 577-614 - 1919

[2] - Blume, L.F., Boyajian,.A., Camilli, G., Lennox, T.C., Minneci, S., Montsinger, V.M.,

"Transformer Engineering "

John Wiley & Sons, Inc - USA. - 1951 - 2nd. edition

[3] - Greenwood, A., - " Electrical Transients in Power Systems "
John Wiley & Sons, Inc - USA. - 1971

[4] - Silva, J.P., " Influência da Distância Entre o Pára-raios de Óxido de Zinco e o Transformador na
Coordenação de Isolamento de uma Subestação em Alta Tensão "

Dissertação de Mestrado - EFEI - Itajubá - Março de 1993

[5] - McNutt, W.J., Blalock, T.J., Hinton, R.A., " Response of Transformer Windings to System Transient Voltages "

IEEE TPAS, Vol. 93 , pp. 457-467 - 1974

[6] - Kostenko, M.P., Piotrovsky, L.M. - " Máquinas Electricas "

Editorial MIR - Moscou - Rússia - 1975

[7] - Cogo, J.R., Oliveira, J.C., Abreu, J.P.G., " Transformadores - Teoria e Ensaios "

Editora Edgard Blücher Ltda - São Paulo - Brasil - 1984

[8] - Hedman, D.E. "Teoria das Linhas de Transmissão II "

Série P.T.I. - Vol.3 - U.F.S.M. - Santa Maria - RS. , 1978

[9] - Palueff, K.K.,Hagenguth, J.H., - " Effect of Transient Voltage on Power Transformer Design -

IV " A.I.E.E. Transactions, Vol. 51, pp.601-620 - 1932

[10] - Abetti, P.A., Johnson, I.B., Schultz, A.J., - " Surge Phenomena in Large Unit Connected Steam Turbine Generators "

A.I.E.E. Transactions, Vol. 71, pp. 1035-1046 - 1952

[11] - Chang, K.H., Thompson, T.B., - " Surge Protection of Unit Connected Generators "

A.I.E.E. Transactions, Vol. 78, pp. 1580-1590 - 1960

[12] - Abetti, P.A., Davis, H.F., - " Surge Transfer in 3 - Winding Transformers "

A.I.E.E. Transactions, Vol. 73, pp. 1395-1407 - 1954

[13] - Abetti, P.A., - " Eletrostatic Voltage Distribuition and Transfer in 3 - Winding Transformers "

A.I.E.E. Transactions, Vol. 73, pp. 1407-1416 - 1954

[14] - Martinez, M.L.B., " Pára-raios para Sistemas de Média Tensão Características Técnicas e Aplicação em Sistemas de Potência "

Dissertação de Mestrado - EFEI - Itajubá - Dezembro de 1992

[15] - CIGRE WG - 33/13.09

[16] - Furnas Centrais Elétricas S.A. - Manual Técnico de Campo

[17] - Microtran Power Analysis Corporation

University of British Columbia - 1979 - 1992

TABELAS

CAPÍTULO 1

I - Impedâncias Terminais Estudadas para a Tensão Transferida Eletromagneticamente 45

II - Coeficientes da *Equação 1.2.2.26* para as Condições de Contorno da *Tabela I* 53

III - Representação de Transformadores (sem as Capacitâncias Parasitas) 72

CAPÍTULO 2

I - Eficiência dos Centelhadores Ativos 88

II - Amplitude das Correntes de Descarga para Ensaios de Ciclo de Operação 90

III - Amplitude das Correntes de Descarga para os Ensaios de Alta Corrente de Curta Duração 91

IV - Amplitude das Correntes de Descarga para os Ensaios de Baixa Corrente de Longa Duração 92

V - Parâmetros para o Circuito de Ensaio de Descarga de Linhas 93

VI - Aumento da Corrente de Fuga em Resistores a Óxido Metálico de Primeira e Segunda Geração 108

VII - Energia Máxima Absorvida devido ao Limite de Estabilidade Térmica para diversas Classes de Pára-raios 116

VIII - Energia Máxima Absorvida devido ao Choque Térmico para diversos Resistores a Óxido Metálico 117

IX - Amplitude das Correntes de Descarga para os Ensaios de Ciclo de Operação 131

X - Amplitude das Correntes de Descarga para os Ensaios de Alta Corrente de Curta Duração 132

XI - Amplitude das Correntes de Descarga para os Ensaios de Baixa Corrente de Longa Duração 134

XII - Classes de Descarga de Linhas Segundo as Normas IEC 134

XIII - Parâmetros para o Circuito de Ensaio de Descargas de Linhas 135

CAPÍTULO 3

I - Pára-raios Ligado ao Terminal do Enrolamento de A.T. 184

II - Pára-raios Ligado ao Terminal do Enrolamento de B.T. com Cabo 184

III - Pára-raios Ligado ao Terminal do Enrolamento de B.T. sem Cabo 184

IV - Pára-raios Ligado ao Terminal dos Enrolamentos de A.T. e de B.T. com Cabo 185

V - Pára-raios Ligado ao Terminal dos Enrolamentos de A.T. e de B.T. sem Cabo 185

I - Dados de Tensões para o Pára-raios do Tipo Convencional 188

I - Pára-raios Ligado ao Terminal do Enrolamento de A.T. 217

II - Pára-raios Ligado ao Terminal do Enrolamento de B.T. Transformador Estrela Aterrado-Delta e Delta Estrela Aterrado 217

IX - Pára-raios Ligado ao Terminal do Enrolamento de Terciário de B.T. Transformador Estrela Aterrado-Estrela Aterrado-Delta 218

X - Pára-raios Ligado ao Terminal do Enrolamento de Secundário de M.T. Transformador Estrela Aterrado-Estrela Aterrado-Delta 218

FIGURAS

CAPÍTULO 1

1.1.1.1 - Transformador Trifásico de Núcleo Envolvido com Enrolamentos Concêntricos 2

1.1.1.2 - Transformador Trifásico de Cinco Colunas com Enrolamentos Concêntricos 2

1.1.1.3 - Empilhamento de Núcleo Embricado 3

1.1.1.4 - Formação das Correntes de Foulcault na Junção 3

1.1.1.5 - Forma em Degraus da Secção Reta de uma Coluna 4

1.1.1.6 - Forma das Secções das Culatras 4

1.1.1.7 - Transformador Monofásico de Núcleo Envolvente e Enrolamentos Alternados 4

1.1.1.8 - Enrolamento Cilíndrico com Duas Camadas 6

1.1.1.9 - Enrolamento em Hélice 6

1.1.1.10 - Transposição de Espiras de um Enrolamento em Hélice Simples 7

1.1.1.11 - Enrolamento Contínuo 7

1.1.1.12 - Transformador Monofásico de Núcleo Envolvido com Enrolamentos sobre uma Coluna - Enrolamentos Alternados 8

1.1.1.13 - Transformador com Tanque de Radiadores 8

1.1.1.14 - Radiador Tubular Duplo com Ventilação Separada 9

1.1.1.15 - Isolador de 36,2 [kV] cheio de Óleo 10

1.1.1.16 - Isolador de 400 [kV] cheio de Óleo 10

1.1.2.1 - Representação do Enrolamento do Transformador de Potência 11

1.1.2.2 - a - Representação do Enrolamento de um Transformador; b - Componente Elementar Δx do Enrolamento 13

1.1.2.3 - Distribuição Inicial de Tensão em um Enrolamento Uniforme em Resposta a um Surto de Tensão 18

1.1.2.4 - Distribuição Inicial de Surto de Tensão e o Envelope de Oscilações com $\alpha=5$ 19

1.1.2.5 - Tensão no Terminal Secundário do Transformador 19

1.2.1.1 - Circuito Capacitivo Equivalente para Determinação do Surto de Tensão Transferido Eletrostaticamente em um Transformador de Dois Enrolamentos 20

1.2.1.2 - Capacitâncias e Correntes Elementares em um Transformador de Dois Enrolamentos 21

1.2.1.3 - Distribuição de Tensão Eletrostática para o Transformador da *Figura 1.2.1.1* . 29

1.2.1.4 - Tensão Transferida Eletrostaticamente $E_{B.T.}$ em função da Capacitância C_x com $C_1 = 0$ da *Figura 1.2.1.1* . 31

1.2.1.5 - Distribuição da Tensão Eletrostática para o Transformador da *Figura 1.2.1.1* . 32

1.2.1.6 - Tensão Transferida Eletrostaticamente $E_{B.T.}$ em função da Capacitância C_x com $C_1 = 0$ da *Figura 1.2.1.1* . 33

1.2.1.7 - Circuito Equivalente Trifásico para Tensão Transferida Eletrostaticamente Através do Banco de Transformadores Estrela Aterrado - Delta 33

1.2.1.8 - Circuito Equivalente para a Tensão Transferida Eletrostaticamente Através do Banco de Transformadores Estrela Aterrado - Delta 34

1.2.1.9 - Tensão Transferida Eletrostaticamente em função da % do Enrolamento para a Simulação do Transformador Estrela Aterrado - Delta
34

1.2.1.10 - Sistema em miniatura montado em um Analisador de Transitórios para Estudos de Surtos Transferidos através de um Transformador 35

1.2.1.11 - Oscilogramas Típicos do Analisador de Transitórios 36

1.2.1.12 - Surto Transferido Eletrostaticamente através de um Transformador Estrela Aterrado - Delta com a Excitação em Frequência Industrial 36

1.2.1.13 - Efeito de Tensão em Frequência Industrial no Surto Transferido através de um Transformador Estrela Aterrado - Delta 37

1.2.1.14 - Circuito Equivalente para a Rede de Capacitâncias de um Transformador Monofásico Aterrado 38

1.2.1.15 - Tensão Transferida Eletrostaticamente em função da Capacitância Secundária 39

1.2.1.16 - Representação da Rede de Capacitâncias de um Transformador Monofásico 39

1..2.1.17 - Representação da Rede de Capacitâncias de um Transformador Monofásico 40

1.2.1.18 - Circuito π Equivalente a um Transformador de Dois Enrolamentos 40

1.2.1.19 - Circuito π Equivalente Modificado 41

1.2.1.20 - Rede de Capacitâncias Equivalentes para um Transformador Trifásico Ligado em Estrela Aterrado - Delta 41

1.2.1.21 - Circuito Equivalente para a Rede de Capacitâncias Equivalentes para um Transformador Trifásico Ligado em Estrela Aterrado - Delta 41

1.2.1.22 - Circuito Equivalente da *Figura 1.2.1.14* com a Impedância de Surto Z_g no Secundário
42

1.2.1.23 - Capacitâncias, Tensões e Correntes Elementares em um Transformador de Três Enrolamentos 43

1.2.2.1 - Transformador de Três Enrolamentos com Cargas Terminais 44

1.2.2.2 - Onda de Tensão Aplicada com Cauda Exponencial da Componente τ_t 45

1.2.2.3 - Circuito Equivalente para a Componente Eletromagnética 48

1.2.2.4 - Autotransformador com Enrolamento Terciário com Cargas Terminais 55

1.2.2.5 - Diagramas de Sequência Positiva, Sequência Negativa e Sequência Zero de um Transformador de Três Enrolamentos ligado em Estrela Aterrado - Estrela Aterrado - Delta. 56

1.3.1.1 - Representação no Analisador Analógico de um Transformador de Três Enrolamentos 71

1.3.1.2 - a - Derivação de um Circuito Elétrico Equivalente, b - Circuito Elétrico Equivalente de um Transformador de Três Enrolamentos 73

1.3.1.3 - a - Representação no Analisador Analógico usando um Núcleo Especial, b - Representação no Computador 74

1.3.1.4 - Circuito Equivalente para a Simulação da Impedância de Dispersão dependente da Frequência 75

CAPÍTULO 2

2.1.1.1 - Pára-raios para Sistemas de Distribuição Vista em Corte 76

2.1.1.2 - Tensão Residual versus Corrente de Descarga para um Resistor a Carboneto de Silício de um Pára-raios de Sistema de Distribuição 77

2.1.1.3 - Fator de Correção para a Tensão Residual 79

2.1.1.4 - Forma Típica da Corrente Subseqüente 80

2.1.1.5 - Variação da Corrente Subseqüente em função do Ponto de Atuação do Pára-raios 80

2.1.1.6 - Arranjo Típico da Corrente Subseqüente 81

2.1.1.7 - Efeito dos Centelhadores Pré-ionizadores na Tensão Disruptiva, Inclusive para Impulsos Íngremes 82

2.1.1.8 - Circuito Elétrico Equivalente de um Centelhador Múltiplo 83

2.1.1.9 - Sobretensão Aplicada ao Centelhador Individual Superior de um Centelhador Múltiplo em função da Relação de Capacitâncias Série e de Fuga 84

2.1.1.10 - Características da Tensão Disruptiva de Centelhadores com vários Dispositivos de Equalização de Potencial 85

2.1.1.11 - Característica de Operação de um Pára-raios com Centelhadores Ativos 86

2.1.1.12 - Deslocamento de Arco no Interior de um Centelhador 86

2.1.1.13 - Arranjo Físico e Sequência de Operação de um Centelhador Ativo 87

2.1.1.14 - Característica Tensão versus Tempo Desenvolvido em um Centelhador Ativo 87

2.1.1.15 - Característica Tensão versus Corrente de um Centelhador Ativo com Tensão Nominal de 6 [kV] 88

2.1.2.1 - Forma de Corrente de Impulso Padronizada 89

2.1.2.2 - Circuito Típico para o Ensaio de Alta Corrente de Curta Duração 91

2.1.2.3 - Circuito Típico para o Ensaio de Baixa Corrente de Longa Duração 92

2.1.3.1 - Capacidade de Absorção de Energia de um Pára-raios Função da Tensão Nominal para Linhas com Parâmetros conforme a *Tabela V* 94

2.1.4.1 - Suportabilidade de um Pára-raios Estação Frente a Sobretensões em Frequência Industrial 96

2.1.4.2 - Natureza Estatística da Taxa de Falhas de um Pára-raios de Distribuição Frente a Sobretensões em Frequência Industrial 97

2.1.4.3 - Oscilogramas de Ensaios de Descargas de Linhas em Pára-raios com e sem Centelhadores 97

2.2.1.1 - Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga de um Resistor a Óxido Metálico para Pára-raios de Distribuição 98

2.2.1.2 - Vista em Corte de um Pára-raios para Sistemas de Distribuição 99

2.2.1.3 - Regiões Condutoras da Característica Tensão versus Corrente de um Resistor a Óxido Metálico 100

2.2.1.4 - Circuito Elétrico Equivalente Macroscopicamente a um Resistor a Óxido Metálico 101

2.2.1.5 - Corrente de Fuga sob Frequência Industrial de um Resistor a Óxido Metálico 102

2.2.1.6 - Característica Potência Consumida versus Tempo para Resistores a Óxido Metálico de Primeira, Segunda e Terceira Geração 103

2.2.1.7 - Característica Relativa a Vida Útil de um Resistor a Óxido Metálico de Primeira Geração Típico 104

2.2.1.8 - Fator de Correlação da Corrente de Fuga com o Número de Descargas de Impulso para um Resistor a Óxido Metálico: a - Impulso Atmosférico; b - Impulso de Manobra 105

2.2.1.9 - Efeito de Polarização da Corrente de Fuga em um Resistor a Óxido Metálico Típico 105

2.2.1.10 - Efeito da Descarga de um Impulso de Corrente na Corrente de Fuga de Resistores a Óxido Metálico de Primeira e Segunda Geração 106

2.2.1.11 - Característica Potência Consumida por um Resistor a Óxido Metálico, Potência Dissipada por um Invólucro Típicos versus Temperatura 109

2.2.1.12 - Efeito das Variações de Tensão e Temperatura na Característica Potência versus Temperatura de um Pára-raios a Óxido Metálico 110

2.2.1.13 - Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo I 111

2.2.1.14 - Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo II 112

2.2.1.15 - Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo III 113

2.2.1.16 - Dependência da Temperatura de Operação e Limite de Estabilidade com Tensão Aplicada e a Temperatura Ambiente 114

2.2.1.17 - Dependência entre Capacidade de Absorção de Energia, Temperatura Ambiente e Tensão Aplicada aos Pára-raios 115

2.2.1.18 - Características Tensão Residual U_{RES} e Corrente de Descarga I_D de Linhas de Transmissão 118

2.2.1.19 - Característica Energia Específica [kJ / kV] Quociente de Tensão Residual por Tensão Nominal U_{RES} / U_N 119

2.2.1.20 - Características Corrente de Descarga I_D Quociente de Tensão Residual por Tensão Nominal U_{RES} / U_N 120

2.2.1.21 - Circuito de Ensaio para Análise do Desempenho de um Pára-raios a Óxido Metálico Frente ao Modo de Absorção de Energia Tipo II 121

2.2.1.22 - Circuito de Ensaio Alternativo para Análise do Desempenho de um Pára-raios a Óxido Metálico Frente ao Modo de Absorção de Energia Tipo II 122

2.2.1.23 - Detalhamento do Modo de Absorção de Energia Tipo II 123

2.2.1.24 - Características Corrente de Descarga I_D - Tempo 124

2.2.1.25 - Discretização de uma Forma Aleatória 125

2.2.1.26 - Características Corrente de Descarga I_D - Energia Específica [kJ / kV] 125

2.2.1.27 - Circuito de Ensaio para Análise do Desempenho de um Pára-raios a Óxido Metálico Frente ao Modo de Absorção de Energia Tipo III 126

2.2.1.28 - Característica Sobretensão em Frequência Industrial Tempo Completo de um Pára-raios a Óxido Metálico 127

2.2.1.29 - Discretização de um Perfil de Sobretensão Aplicado a um Pára-raios a Óxido Metálico 128

2.2.1.30 - Definição do Intervalo de Tempo Complementar 128

2.2.3.1 - Característica Energia Específica [kJ / kV] versus Quociente de Tensão Residual - Tensão Nominal U_{RES} / U_N Segundo IEC37 - WG4 138

2.2.4.1 - Espectro de Tensões de Operação de um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores 139

2.2.4.2 - Relações entre as Quatro Regiões com Tensão de Operação para vários Projetos de Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores 140

2.2.4.3 - Comportamento Eletro Térmico de um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores Submetido a Diferentes Valores de Sobretensões de Baixa Amplitude 141

2.2.4.4 - Suportabilidade Típica Frente a Sobretensões Temporárias de Baixa Amplitude de um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores sob Temperatura Ambiente de 60 [°C] 141

2.2.4.5 - Formas de Corrente e Tensão Aplicada a um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores Submetido a uma Sobretensão Temporária de Amplitude Elevada 142

2.2.4.6 - Máximo Intervalo de Aplicação das Sobretensões Temporárias de Amplitude Elevada o um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores em função da Tensão e da Impedância de Curto- Circuito do Sistema 143

CAPÍTULO 3

3.1 - Diagrama Unifilar do Sistema em Análise 144

3.2 - Circuito Monofásico correspondente ao Diagrama da *Figura 3.1* 145

3.3 - Circuito Monofásico Simplificado ao Diagrama da *Figura 3.1* 146

3.1.1 - Onda Viajante em uma Linha de Transmissão com Terminação Capacitiva 147

3.1.1.1 - Circuito Equivalente de um Transformador quando os Pára-raios não Atuam 148

3.1.1.2 - Circuito Simplificado Englobando Capacitância Equivalente do Transformador 149

3.1.1.3 - Circuito Equivalente do Transformador para Cálculo da Tensão nos Terminais de B.T. 150

3.1.1.4 - Circuito Equivalente de Thèvénin Vista dos Terminais de B.T. de um Transformador 151

3.1.2.1 - Circuito Equivalente de um Transformador Protegido por um Pára-raios Ligado aos Terminais de A.T. 152

3.1.2.2 - Circuito Equivalente Simplificado do Transformador Protegido por um Pára-raios Ligado aos Terminais de A.T. 152

3.1.2.3 - Circuito Equivalente Simplificado do Transformador Protegido por um Pára-raios a Óxido de Zinco Ligado aos Terminais de A.T. 158

3.1.3.1 - Circuito Equivalente de um Transformador Protegido por um Pára-raios Ligado aos Terminais de B.T. 162

3.1.3.2 - Circuito Equivalente de um Transformador Protegido por um Pára-raios Ligado aos Terminais de B.T. 163

3.1.3.3 - Circuito Equivalente de Thèvénin do Circuito mostrado na *Figura 3.1.3.1* 169

3.1.4.1 - Circuito Equivalente de um Transformador Protegido por um Pára-raios Ligado aos Terminais de A.T. e de B.T. 171

3.1.4.2 - Circuito Equivalente Simplificado do Transformador Protegido por um Pára-raios Convencional Ligado aos Terminais de B.T. 173

3.1.4.3 - Circuito Equivalente Simplificado do Transformador Protegido por um Pára-raios a Óxido de Zinco Ligado aos Terminais de B.T. 178

3.2.1.1 - Relação de Transformação em Função do Tempo da Frente do Impulso 190

3.2.2.1 - Diagrama de Sequência para um Defeito Monofásico 192

3.2.2.2 - Diagrama de Sequência para um Defeito Fase-Fase-Terra 194

3.2.4.1 - Circuito Equivalente de Sequência Positiva de um Transformador de Três Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado-Estrela Aterrado-Delta 196

3.2.4.2 - Circuito Equivalente da *Figura 3.2.4.1* 196

3.2.4.3 - Circuito Equivalente de Sequência Positiva de um Transformador de Três Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado-Estrela Aterrado-Delta 199

3.2.4.4 - Circuito Equivalente de Sequência Zero de um Transformador de Três Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado-Estrela Aterrado-Delta 199

3.2.4.5 - Circuito Equivalente de Sequência Positiva de um Transformador de Três Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado-Estrela Aterrado-Delta 205

3.2.4.6 - Circuito Equivalente de Sequência Zero de um Transformador de Três Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado-Estrela Aterrado-Delta 206

3.2.4.7 - Circuito Equivalente de Sequência Positiva de um Transformador de Dois Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado-Delta 209

3.2.4.8 - Circuito Equivalente de Sequência Zero de um Transformador de Dois Enrolamentos Ligado em Estrela Aterrado-Delta 210

3.2.4.9 - Circuito Equivalente de Sequência Positiva de um Transformador de Dois Enrolamentos Ligado em Delta-Estrela Aterrado 213

3.2.4.10 - Circuito Equivalente de Sequência Zero de um Transformador de Dois Enrolamentos Ligado em Delta-Estrela Aterrado 214

ANEXO 1

I - Levantamento dos Parâmetros dos Modelos de Transformadores:

1.1 - Parâmetros Obtidos do Ensaio a Vazio:

Com o ensaio a vazio de transformadores são determinados os seguintes parâmetros:

Perdas no Núcleo ou Perdas por Histerese e Foucault (P_0);
Correntes a Vazio (I_0);
Relação de Transformação (K_T) e:
Parâmetros doRamo Magnetizante (R_m , X_m , Z_m).

Além dos elementos citados acima, o ensaio a vazio permite que sejam analisados alguns fenômenos referentes ao funcionamento do transformador, como por exemplo:

- O Formato Não - senoidal da Corrente a Vazio e;

- A CorrenteTransitória de Magnetização.

1 - Perdas no núcleo :

As perdas no núcleo são produzidas pelas correntes parasitas e pela histerese magnética.

As perdas por correntes parasitas são relacionadas com as propriedades das massas metálicas submetidas a uma variação de fluxo magnético, de gerar uma força eletromotriz (f.e.m.), que resulta em correntes muito intensas, denominadas correntes parasitas. Estas correntes produzem uma força magneto-motriz.(f.m.m.), que de acordo com a lei de Lenz se opõe a causa que a produziu, isto é o fluxo, implicando assim que o efeito de tais correntes significa perda de potência.

Para que esta perda de potência seja reduzida é necessário construir o núcleo com lâminas de ferro isoladas entre si. Com isto, o valor da f.e.m. produzida em cada lamina é pequeno e atua sobre um circuito elétrico de seção menor, reduzindo assim consideravelmente o valor das correntes parasitas e portanto diminuindo a perda de potência.

A perda devido as correntes parasitas em watts por quilograma de núcleo é dada por:

$$P_F = 2{,}2 f^2 B^2 d^2 10^{-3} \qquad (1.1.1)$$

Onde:

P_F - são as perdas por correntes parasitas;
f - a frequência em [Hz];
B -valor máximo da indução nas lâminas em [Wb/m2];
d - a espessura da chapa em [mm]

As perdas por histerese magnética existem para qualquer núcleo magnético sujeito aos processos de magnetização, onde são descritos ciclos de histerese todas as vezes que a indução B mudar de sinal. Nestes casos a perda de potência é proporcional à superfície do ciclo.

A potência perdida em watts por quilograma de núcleo pode ser calculada pela fórmula de Steinmetz:

$$P_H = K_s B^{1.6} f \qquad (1.1.2)$$

Onde:

P_H - são as perdas pelo efeito de histerese;
K_s - o coeficiente de Steinmetz (que depende do tipo de material usado no núcleo);
B - valor máximo da indução com o qual o núcleo é solicitado;
f - a frequência em [Hz]

Somando-se as duas perdas analisadas, têm-se as perdas totais no núcleo de um transformador (P_0).

$$P_0 = P_H + P_F \qquad (1.1.3)$$

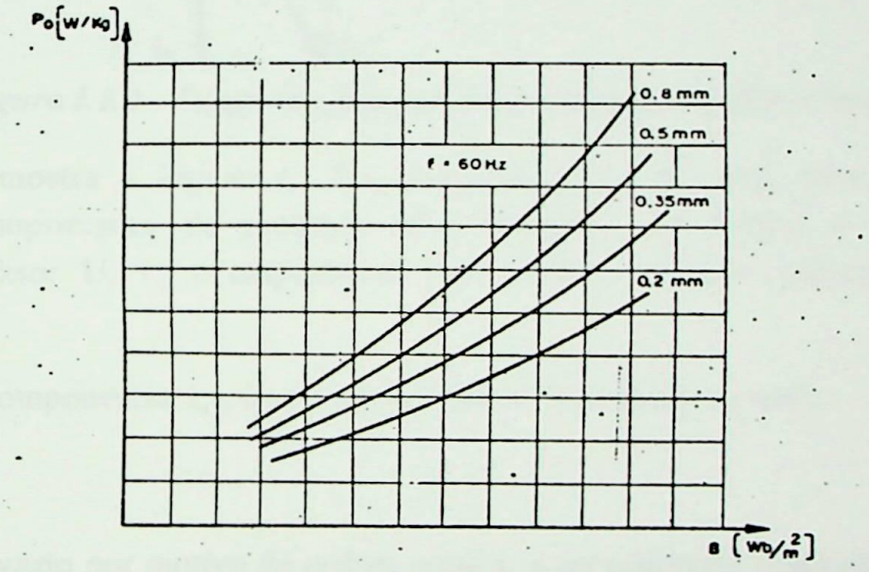


Figura I.1.1 - $P_0 = f(B)$ para diferentes valores de d para f constante

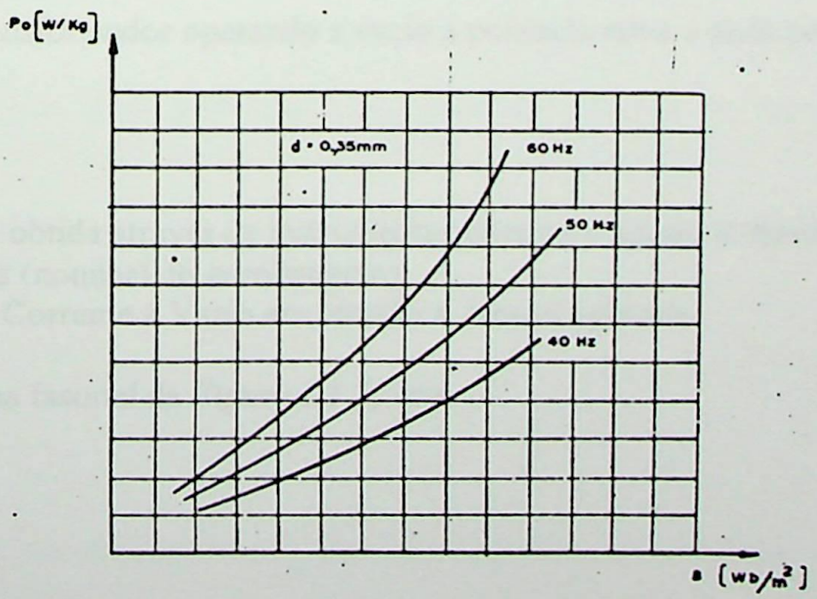


Figura I.1.2 - $P_0 = f(B)$ para várias frequências e para d constante

2 - Corrente a vazio:

A fim de compensar a perda no núcleo, o primário absorve da linha de alimentação uma corrente denominada de corrente a vazio ou corrente de excitação I_0 .Esta corrente tem por função o estabelecimento do fluxo magnético e o suprimento das perdas a vazio e, deste modo, esta corrente pode ser decomposta em duas componentes:

I_p - componente ativa tem como função compensar as perdas no núcleo.
I_q - componente reativa, que é responsável pela produção do fluxo magnético principal.

A decomposição da corrente a vazio I_0 é mostrada na *Figura I.1.3.*, bem como a tensão U aplicada no primário do transformador.

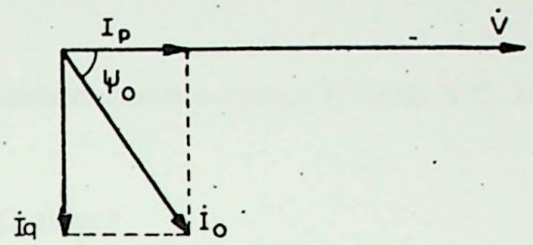


Figura I.1.3 - Diagrama fasorial para o transformador a vazio

Conforme mostra a *Figura I.1.3* a componente I_p em fase como o fasor U, I_p é responsável pelo suprimento de potência ativa dissipada no núcleo e a componente I_q perpendicular ao fasor U, I_q é responsável pela potência reativa associada ao núcleo do transformador.

Determinação das componentes I_0 , bem como do fator de potência a vazio:

a) Cálculo de I_p:

O ensaio a vazio por motivo de ordem prática, é normalmente realizado no lado de B.T. do transformador, sendo que o enrolamento alimentado, apresenta um baixo valor de resistência, a potência dissipada $r_1 I_0^2$ é muito pequena e, deste modo, pode ser desprezada, o que implica que nestas condições as perdas totais obtidas no ensaio a vazio correspondem a P_0 .

Para um transformador operando a vazio a potência ativa é dada por:
$P_0 = UI_0 \cos\psi_0$

Onde:

P_0 - Potência Ativa obtida através de instrumentos durante o ensaio a vazio;
U - Tensão aplicada (nominal do enrolamento);
ψ_0 - Defasagem da Corrente a Vazio em relação a tensão aplicada

Do diagrama fasorial da *Figura I.1.3*, vem:

$I_0 \cos\psi_0 = I_p$

Logo:

$$I_0 = \frac{P_0}{U} \qquad (1.1.4)$$

b) Cálculo de I_q:

Ainda do diagrama fasorial da *Figura I.1.3*, vem:

$$I_q = \sqrt{I_0^{\,2} - I_p^{\,2}} \qquad (1.1.5)$$

Onde:

I_0 - é obtido por meio de medida durante o ensaio a vazio, e I_p é calculado pela *equação I.1.4*.

c) Fator de potência a vazio ($\cos\psi_0$):

O fator de potência a vazio é calculado pela equação:

$$\cos\psi_0 = \frac{P_0}{UI_0}$$

De acordo com os fatores anteriormente abordados, é de interesse prático evitar ao máximo as perdas no núcleo. Sendo assim a corrente a vazio deve ser quase que totalmente utilizada para a magnetização do núcleo, implicando-se em , $I_q >> I_p$ o que levará a um elevado valor de ψ_0, portanto com o transformador operando a vazio com um baixo $\cos\psi_0$.

3 - Relação de Transformação:

A relação de transformação, é a proporção que existe entre a tensão ou a corrente do primário e a tensão ou corrente do secundário, respectivamente.

Como existem duas definições para a relação de transformação, são analisados os circuitos mostrados na *Figura I.1.4* para que ambas as definições sejam diferenciadas.

Considerando o transformador operando a vazio, foi convencionado chamar de relação de transformação teórica a seguinte relação:

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} \qquad (1.1.6)$$

Onde: E_1 e E_2 são os valores eficazes das fcem e fem induzidas nos enrolamentos primário e secundário, respectivamente.

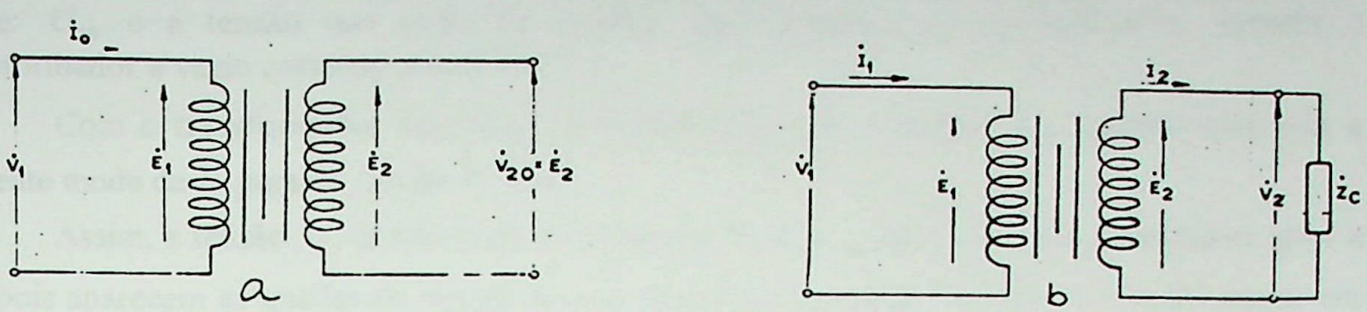


Figura I.1.4 - Condições de funcionamento de um transformador: a) Transformador a vazio; b) Transformador em carga

A *Figura I.1.4* implica na construção do circuito equivalente de um transformador a vazio, mostrado na *Figura I.1.5*.

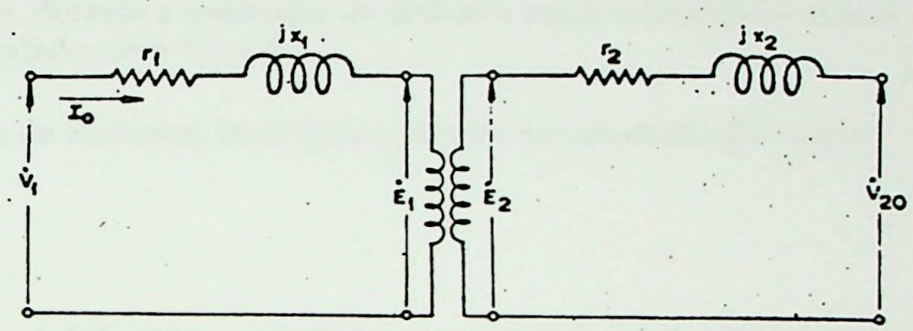


Figura I.1.5 - Circuito equivalente de um transformador a vazio

Onde:

r_1 - resistência do enrolamento primário
x_1 - reatância de dispersão do enrolamento primário
$\dot{E}_1$ - fcem induzida no primário
r_2 - resistência do enrolamento secundário
x_2 - reatância de dispersão do enrolamento secundário
E_2 - fem induzida no secundário

O equacionamento do circuito primário permite obter:

$$\dot{U}_1 = (r_1 + jx_1)\dot{I}_0 + \dot{E}_1$$

Fazendo: $r_1 + jx_1 = z_1$ e,

Considerando que z_1 é pequena, o produto $z_1 . \dot{I}_0$ pode ser desprezado, sendo assim vem:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 \qquad (1.1.7)$$

Com o transformador a vazio, $E_2 = V_{20}$ e substituindo a *equação 1.1.6* na *equação I.1.7* vem:

$$K_T \cong \frac{U_1}{U_{20}} \qquad (1.1.8)$$

Onde: U_{20} é a tensão que pode ser medida nos terminais do secundário e, estando o transformador a vazio correnspponde a fem E_2.

Com o transformador em carga, será fornecida uma corrente $\dot{I}_2$, fazendo com que a corrente mude de $\dot{I}_0$ para $\dot{I}_1$, sendo $\dot{I}_1 >> \dot{I}_0$.

Assim, a tensão U_1 já não mais seria igual a $\dot{E}_1$ e U_{20}, que antes era exatamente igual a $\dot{E}_2$, pois aparecem as quedas de tensão devido às novas correntes. Daí com o transformador em carga, é definido a uma nova relação de transformação prática dada por:

$$K = \frac{U_1}{U_2} \tag{1.1.9}$$

Nesse caso, durante a realização do ensaio a vazio é necessário aplicar a tensão nominal devido a não-linearidade entre U_1 e E_2.

Em termos de correntes, basta para a relação de transformação tem-se:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{K} \tag{1.1.10}$$

Sendo $E_1 = 4,44N_1BSf$ e aplicando-se na *equação I.1.8* para os enrolamentos primário e secundário, vem que:

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{1.1.11}$$

A *equação I.1.11* permite afirmar que a relação de transformação teórica tem o mesmo valor que a relação entre o número de espiras do primário e do secundário, esse fato é decorrente da determinação das tensões E_1 e E_2 exatamente entre os terminais dos enrolamentos onde foram induzidos.

Em estudos de surtos transferidos eletrostaticamente em transformadores, a Relação de Transformação Capacitiva, não apresenta o sentido clássico da Relação de Transformação até agora colocada no texto.

A Relação de Transformação Capacitiva é uma Relação de Capacitâncias, em que, o surto transferido do terminal de B.T. para o terminal de A.T. é menor, ou seja, é reduzido pela Relação de Transformação Capacitiva.

4 - Determinação dos parâmetros: R_m X_m e Z_m:

Ao representar o circuito equivalente de um transformador tal como mostrado na *Figura I.1.5*, as reatâncias indicadas são aquelas devido ao fluxo de dispersão. Contudo a f.c.e.m. $\dot{E}_1$ e a fem $\dot{E}_2$ são induzidas por um fluxo principal, que para ser produzido, considera a existência de uma bobina representada pela reatância X_m a qual faz parte do chamado ramo magnetizante do circuito equivalente.

Entretanto o circuito equivalente não representa as perdas no núcleo, sendo assim é necessário introduzir no ramo magnetizante uma resistência fictícia R_m que, sendo percorrida por uma determinada corrente, dissipa uma potência exatamente igual a P_0.

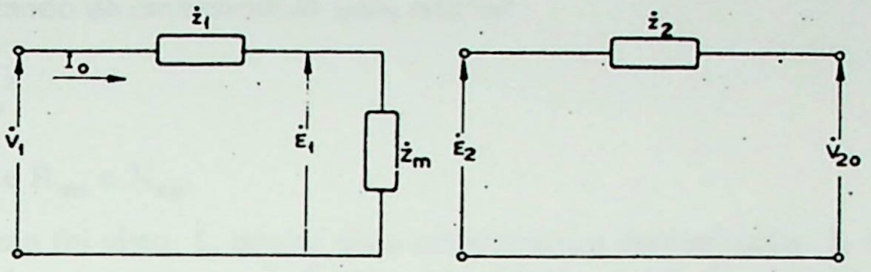


Figura I.1.6 - Circuito equivalente de um transformador, incluindo a impedância do ramo magnetizante

Logo, o ramo magnetizante é constituído por uma resistência e uma reatância, ou seja de uma maneira geral por uma impedância $\dot{Z}_m$ (impedância do ramo magnetizante), que pode ser colocada no primário ou no secundário, mas não simultaneamente nos dois enrolamentos.

Sendo assim o o circuito equivalente poderá ser representado pela *Figura I.1.6.*

Para cálculo da impedância é necessário, considerar a condição de operação a vazio e, sendo $\dot{I}_0 \dot{z}_1 \cong 0$, vem que:

$$\dot{Z}_m = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_0} \qquad (1.1.12)$$

Por outro lado, a impedância $\dot{Z}_m$ pode ser modelada pela associação série de uma resistência e uma reatância, ou de uma resistência em paralelo com outra reatância. Cada representação mostrada na *Figura I.1.7* possui suas devidas vantagens.

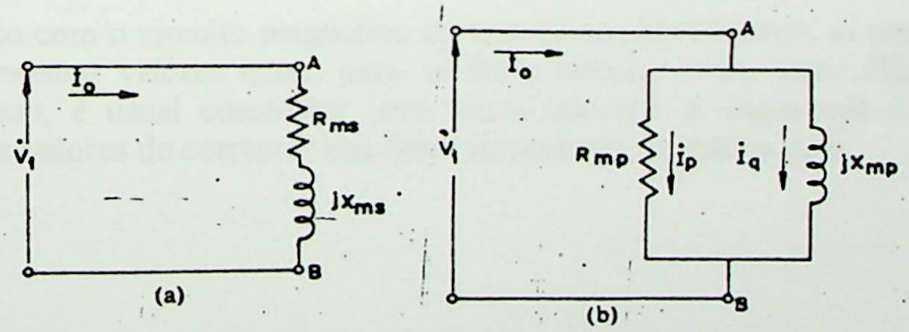


Figura I.1.7 - Associações correspondentes ao ramo magnetizante: a) série; b) paralelo

a) Determinação de R_{ms} e X_{ms}:

Pela *Figura I.1.7-(a)*, sendo R_{ms} a resistência fictícia na qual é dissipada a potência perdida no núcleo, pode-se escrever:

$$P_0 = R_{ms}.I_0^2$$

na qual:

$$R_{ms} = \frac{P_o}{I_o^{\,2}} \tag{1.1.13}$$

Em se tratando de uma conexão série tem-se:

$$X_{ms} = \sqrt{Z_{ms}^{\,2} - R_{ms}^{\,2}} \tag{1.1.14}$$

b) Determinação de R_{mp} e X_{mp}:

Como foi visto, I_0 possui duas componentes denominadas: $\dot{I}_p$ e $\dot{I}_q$, o que justifica a representação destas correntes indicadas na *Figura I.1.7-(b)*. Sendo estas componente conhecidas vem:

$$R_{mp} = \frac{U_1}{I_p} = \frac{P_0}{I_p^{\,2}} \tag{1.1.15}$$

e

$$X_{mp} = \frac{V_1}{I_q} \tag{1.1.16}$$

Convém ressaltar que os passos acima apresentados se encontram relacionados com os transformadores monofásicos.

Como os transformadores trifásicos podem ser considerados como um agrupamento de três fases enrolamentos monofásicos, com algumas considerações os passos apresentados e discutidos podem ser aplicados aos transformadores trifásicos com determinadas adaptações.

i - Corrente a vazio:

De acordo com o circuito magnético do transformador trifásico, as correntes a vazio das três poderão apresentar valores iguais para as fases laterais e um valor diferente para a fase central. Nesse caso, é usual considerar uma única corrente a vazio que é dada pela média aritmética dos três valores de correntes das fases respectivas, portanto vem:

$$I_0 = \frac{I_{01} + I_{02} + I_{03}}{3} \tag{1.1.17}$$

ii - Relação de transformação

Para os transformadores trifásicos, o cálculo da relação de transformação não é tão simples quanto para os transformadores monofásicos. Certos cuidados, devem ser tomados em função dos tipos de conexão que estão ligados os enrolamentos do transformador trifásico como por exemplo: estrela, triângulo ou ziguezague.

Todos os casos, devem ser analisados de duas maneiras tal como relacionadas abaixo:

Para a relação de transformação teórica K_T tem-se:

$$K_T = \frac{E_1}{E_2}$$

Sendo que E_1 e E_2 são medidas entre fases.

Já a relação do número de espiras (K_N) é definida como a relação entre o número de espiras por fase (enrolamentos situados numa mesma coluna do núcleo).

iii - Determinação de R_m, X_m e Z_m:

Para o cálculo das constantes R_m, X_m e Z_m , são usadas as mesmas equações anteriores porém em se tratando de transformadores trifásicos, alguns cuidados devem ser tomados:

- A determinação de R_m, X_m e Z_m , é feita por fase.
- Sendo fornecida a potência total do transformador, a mesma deve ser dividida por três para que se obtenha o valor correspondente a uma fase. Logo, de acordo com a equação abaixo vem:

$$P_0 = \frac{P_{0t}}{3}$$

As equações estão em função de tensões e correntes, logo, para cada tipo de conexão, é necessário observar as grandezas por fase.

I.1.2 - Os Parâmetros Obtidos do Ensaio de Curto-Circuito

O ensaio de curto circuito permite determinar os seguintes parâmetros

- Perdas no Cobre (P_j)
- Queda de Tensão Interna (ΔU)
- Impedância, Resistência e Reatância Percentuais (Z%, R% e X%).

a) Perdas no Cobre (P_j):

Durante o ensaio de curto-circuito são estabelecidas correntes nominais nos enrolamentos.

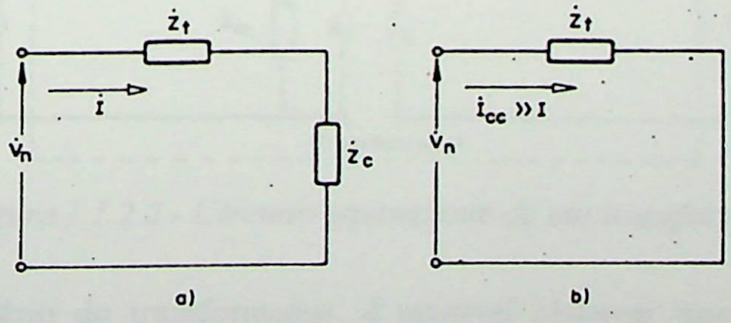


Figura I.1.2.1 - Efeito da tensão no ensaio em curto: a) em carga; b) em curto

O enrolamento de tensão inferior é curto-circuitado e uma fonte de tensão superior alimenta o transformador. Visto que as correntes são iguais às nominais, a corrente referente a tensão inferior normalmente, é de valor elevado e, deste modo, usualmente, a fonte não possui potência de curto circuito suficiente. Logo é comum neste caso alimentar o enrolamento de tensão superior do transformador.

A tensão necessária para a realização do ensaio, deve ser suficiente para que com o secundário em curto-circuito, circulem pelos enrolamentos as suas correntes nominais.

Nos circuitos mostrados na *Figura I.1.2.1* são representadas duas impedâncias em série, sendo que uma delas é muito pequena que corresponde à impedância interna do transformador, e a outra correpondendo à impedância da carga.

Os circuitos da *Figura I.1.2.1* mostram que, com o secundário curto-circuitado, a tensão necessária para a circulação das correntes nominais é bem inferior ao correspondente valor nominal.

Assim sendo, a tensão necessária para a realização deste ensaio apresenta valores, em torno de até 10% da tensão nominal (U_N) do enrolamento alimentado.

Supondo que a tensão de curto-circuito (U_{CC}) é a décima parte da tensão nominal a indução no núcleo é reduzida em 10 vezes. Sendo assim, as perdas por histerese ficam reduzidas de 40 vezes e as correntes parasitas de Foucault de 100 vezes, o que conduz a conclusão de que as perdas no núcleo podem ser desprezadas face às do cobre.

Logo, fazendo circular as correntes nominais no transformador ao se realizar o ensaio de curto-circuito, praticamente toda a potência fornecida ao transformador são perdidas por efeito Joule em ambos os enrolamentos.

b) Queda de tensão (ΔU):

O circuito equivalente da *Figura I.1.2.2*, mostra que existe uma queda de tensão no primário, que, por sua vez, influencia no valor de $\dot{E}_1$. Isto resulta em uma alteração no valor de $\dot{E}_2$, o que implica na primeira variação de tensão.

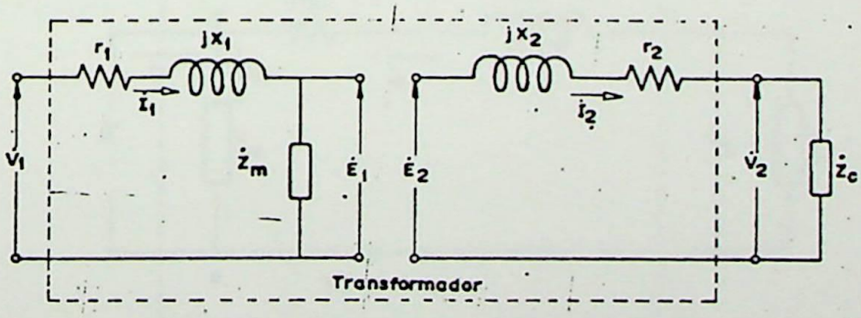


Figura I.1.2.2 - Circuito equivalente de um transformador

Ao analisar o secundário do transformador, é possível observar que o produto $(r_2 + jx_2)\dot{I}_2$ corresponde a uma queda de tensão no secundário. Logo a tensão $\dot{U}_2$ relativamente a $\dot{U}_1$ sofre duas modificações.

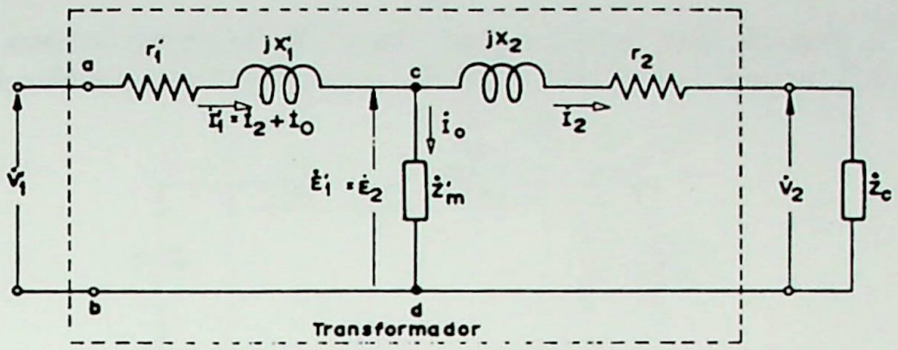


Figura I.1.2.3 - Circuito equivalente do transformador com as grandezas do primário referidas ao secundário

Na *Figura I.1.2.3* é mostrado o circuito primário referido ao secundário de um transformador onde é possível verificar que as perdas em r_1 e r_1' são idênticas. O mesmo ocorre para a energia magnética armazenada pela bobina x_1 e sua equivalente x_1' referida ao secundário.

Com:

$\dot{U}'_1 = \frac{\dot{U}_1}{K}$ = Tensão Primária Referida ao Secundário

$r'_1 = \frac{r_1}{K^2}$ = Resistência Primária Referida ao Secundário

$jx'_1 = \frac{jx_1}{K^2}$ = Reatância de Dispersão do Primário Referida ao Secundário

$\dot{I}'_1 = \dot{I}_1 K$ = Corrente do Primário Referida ao Secundário

$\dot{Z}'_m = \frac{\dot{Z}_m}{K^2}$ = Impedância do Ramo Magnetizante Referida ao Secundário

K = Relação de Transformação

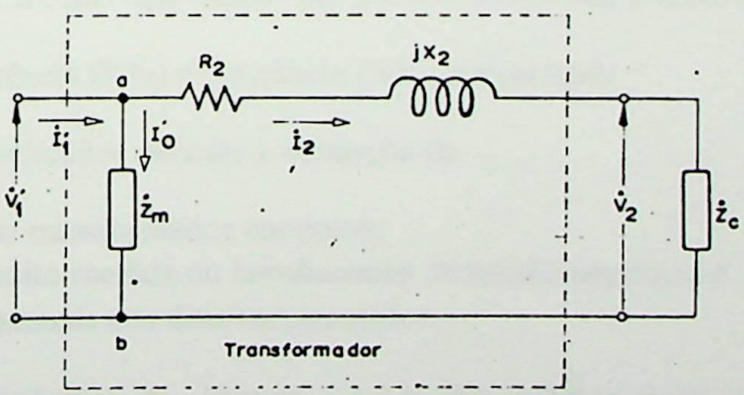


Figura I.1.2.4 - Circuito equivalente reduzido

Trabalhando com uma pequena aproximação oriunda do fato de que a queda de tensão $(r'_1 + j'x_1)$ para a corrente a vazio ser pequena, vem que a impedância $\dot{Z}'_m$ pode ser ligada diretamente aos terminais a e b. Esta alteração é mostrada na *Figura I.1.2.4* e, neste caso tem-se ainda que:

$R_2 = r_2 + r'_1$ e $X_2 = x_2 + x'_1$

Na prática é comum desprezar-se o ramo magnetizante, uma vez que $I_0' << I_2$. Logo, o circuito equivalente fica finalmente reduzido ao circuito mostrado na *Figura I.1.2.5*.

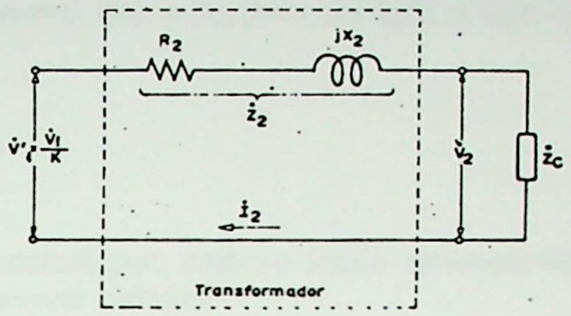
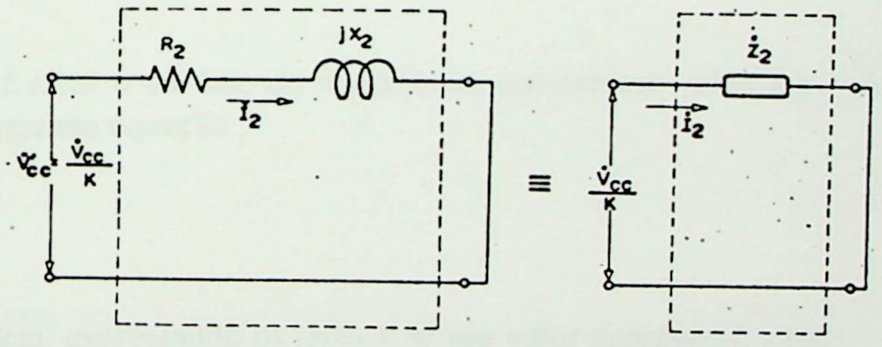


Figura I.1.2.5 - Circuito equivalente simplificado referido ao secundário

Conforme mostra a *Figura I.1.2.5* a queda de tensão total no transformador é dada por:

$$\Delta \dot{U} = \dot{Z}_2 . \dot{I}_2 \qquad (1.1.2.1)$$

A *equação I.1.2.1* mostra que ao se curto-circuitar o secundário do transformador tal como representado na *Figura I.1.2.6*, a tensão aplicada ao primário referida ao secundário é a própria queda de tensão procurada.



Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

Figura I.1.2.6 - Circuito equivalente para o transformador em curto-circuito

c) Impedância (Z%), Resistência (R%) e Reatância (X%) percentuais:

O ensaio em curto-circuito, permite a obtenção de:

- P_{CC} potência fornecida ao transformador em curto;
- U_{CC} tensão de curto-circuito medida no enrolamento de tensão superior; e
- I_{1N} e I_{2N} as correntes nominais nos dois enrolamentos.

Os circuitos equivalentes da *Figura I.1.2.6* são válidos para o ensaio de curto-circuito.Logo, o transformador como um elemento de circuito, se comporta como uma impedância $\dot{Z}_2$ constituída pela associação-série de uma resistência R_2 e de uma reatância X_2.

A potência ativa medida neste ensaio (P_{CC}) corresponde a aproximadamente a potência dissipada em r_1 e r_2, resistências dos dois enrolamentos denominadas R_2 uma resistência que representa a resistência total dos dois enrolamentos referida ao secundário e calculada como:

$$R_2 = \frac{P_{CC}}{I_{2N}^{\ 2}} \qquad (1.1.2.2)$$

Para o cálculo da resistência R_2 referida ao primário, bastaria substituir na *equação I.1.2.2* I_{1N} por I_{2N}. Para evitar a dependência com o lado de referência, tais resistências podem ser representadas por um elemento que independa do lado a que está referido. Assim sendo, é definido um novo parâmetro:

$$R\% = \frac{R_2 I_{2N}}{U_{2N}} 100 = \frac{R_1 I_{1N}}{U_{1N}} 100$$

sendo R% é a resistência percentual que, embora sendo admensional, apresenta o mesmo valor, independente do lado em que estiver referida.

Onde:

U_{1N} e U_{2N} são as tensões nominais do primário e do secundário, respectivamente;
I_{1N} e I_{2N} , as correntes nominais do primário e do secundário.

Substituindo a *Equação I.1.2.2* na expressão de R% e considerando o produto $U_{2N}I_{2N}$ igual à potência nominal do transformador
S_N, vem:

$$R\% = \frac{P_{CC}}{S_N} 100 \qquad (1.1.2.3)$$

Da *Figura I.1.2.6* o módulo da impedância equivalente referida ao secundário Z_2 pode ser calculado pela seguinte equação:

$$Z_2 = \frac{U_{1CC}}{K.I_{2N}} \qquad (1.1.2.4)$$

De preferência, expressando os termos de seu valor percentual, vem:

$$Z\% = \frac{Z_2 . I_{2N}}{U_{2N}} 100 = \frac{Z_{1N} . I_{1N}}{U_{1N}} 100$$

Substituindo Z_2 pela *equação I.12.4* e que considerando o produto $K.I_{2N}$ é igual a U_{1N} vem:

$$Z\% = \frac{U_{CC}}{U_{1N}} 100$$

Em se tratando de uma conexão série vem que:

$$X\% = \sqrt{(Z\%)^2 - (R\%)^2} \qquad (1.1.2.5)$$

Embora R%, seja adimensional, uma vez que o mesmo modela uma resistência, seu valor sofre variações com a temperatura. Sendo que o valor de X% não sofrerá variação, como Z%

corresponde a impedância equivalente da associação de X% com R%, deve também ser corrigida de acordo com a equação:

$$R\%_{\theta f} = k_{\theta} . R\%_{\theta a}$$

$$Z\%_{\theta f} = \sqrt{(R\%_{\theta f})^2 + (X\%)^2}$$

Onde:

k_{θ} é o coeficiente de correção de temperatura dado por:

$$k_{\theta} = \frac{\frac{1}{\alpha} + \theta_f}{\frac{1}{\alpha} + \theta_a}$$

α - Coeficiente de Variação da Resistência com a Temperatura;
θ_a - Temperatura Ambiente [°C];
θ_f - Temperatura Final de Operação [°C];
$R\%_{\theta f}$ - Resistência Percentual à Temperatura Final Considerada;
$R\%_{\theta a}$, - Resistência Percentual à Temperatura doEnsaio; e:
$Z\%_{\theta f}$, - Impedância Percentual à Temperatura Final Considerada

Tal como no caso do ensaio a vazio, para transformadores monofásicos, deve-se considerar como estão ligados os enrolamentos do transformador.

É comum a análise de circuitos trifásicos por uma única fase nos cálculos em Sistema de Potência, considerando as outras duas simétricas. Obviamente, tal representação só pode ser conseguida pela conexão estrela sendo que, no caso das conexões em triângulo é utilizada a sua estrela equivalente.

É possível demonstrar que os parâmetros Z, R e X em Ohms sofrem influência do tipo de conexão utilizada no transformador trifásico. No entanto, seus correspondentes valores percentuais independem do tipo de conexão do transformador, o que é mais uma vantagem dos valores percentuais.

Na sequência são mostradas expressões para os cálculos dos parâmetros percentuais empregando os resultados dos ensaios em transformadores trifásicos. Para maior entendimento são utilizados, os índices *F* junto às correntes e tensões na fase, e as grandezas na linha sem índice.

Anteriormente foi visto que:

$$R\% = \frac{R_2 . I_{NF}}{V_{NF}} 100$$

sendo:

$$R_2 = \frac{P_{CC}}{I_{2NF}^{\ 2}} 100$$

Agora um transformador trifásico e considerando que P_{CC} se refere à potência de uma fase,vem que:

$$P_{CC} = \frac{P_{CC_T}}{3}$$

Onde:

P_{CC_T} - Potência de Curto-Circuito Total.

Considerando agora um transformador ligado em estrela, e observando o problema de valores na fase e na linha, vem:

$$I_{2NF} = I_{2N}$$

$$U_{2NF} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}}$$

Substituindo essas expressões em R%, vem:

$$R\% = \frac{P_{CC_T}.I_{2N}.100}{\sqrt{3}.I_{2N}^{\ 2}.\frac{U_{2N}}{\sqrt{3}}} = \frac{P_{CC_T}}{\sqrt{3}.U_{2N}.I_{2N}} 100$$

Uma vez que $\sqrt{3}.U_{2N}.I_{2N}$ é igual a potência aparente trifásica nominal (S_N), logo:

$$R\% = \frac{P_{CC_T}}{S_N} 100$$

Finalmente, entretanto pode ser demonstrado que:

$$Z\% = \frac{U_{CC}}{U_{1N}} 100$$

Onde:

U_{CC} - Tensão de Curto-Circuito entre Fases; e:
U_{1N} - Tensão Nominal do Enrolamento Alimentado, entre Fases

Como no caso analisado para o transformador monofásico também devem ser analisadas as correções de temperatura, devido a resistência sofrer variações em seu valor com o aumento da temperatura. [7]

ANEXO 2

2 - Medidas de Capacitâncias - PONTE DOBLE

2.1 - Transformadores de Dois Enrolamentos:

Para os transformadores de dois enrolamentos são feitos quatro ensaios para a medida de capacitâncias, que serão descritos a seguir.

Ensaio 1 - Alta Energizada com Baixa Aterrada, mostrado na *Figura 2.1.1* - (posição 1).
a) Curto-circuitar individualmente cada um dos enrolamentos.
b) Conectar o cabo HV ao enrolamento de alta.
c) Conectar o cabo LV ao enrolamento de baixa.
d) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GROUND.
e) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) entre o enrolamento de alta e a terra e entre os enrolamentos de alta e baixa ($C_H + C_{HL}$).

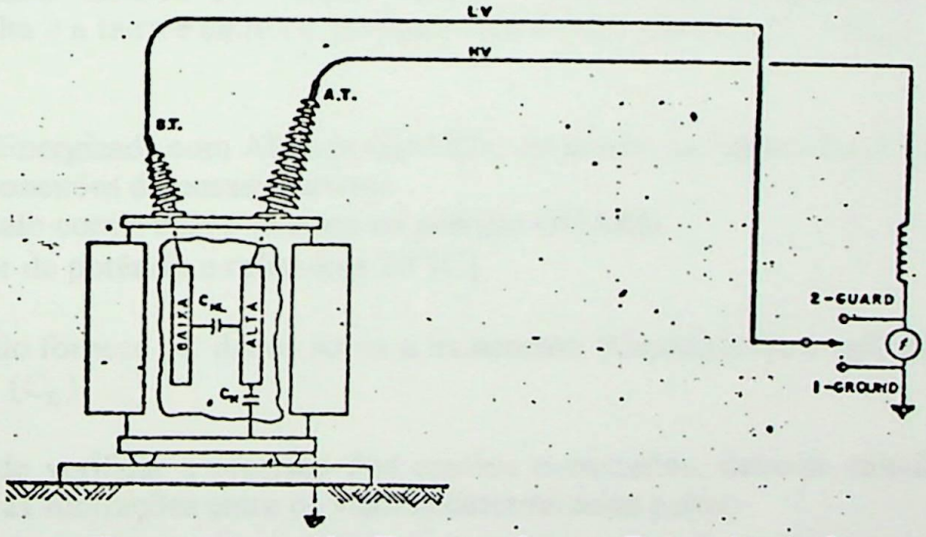


Figura 2.1.1 - Alta Energizada com Baixa Aterrada

Ensaio 2 - Alta Energizada com Baixa em GUARD, mostrado na *Figura 2.1.1* - (posição 2).

a) Conservar as conexões do ensaio anterior.
b) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GUARD.
c) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) do enrolamento de alta para a terra (C_H).

Ensaio 3 - Baixa Energizada com Alta Aterrada, mostrado na *Figura 2.1.2* - (posição 1).

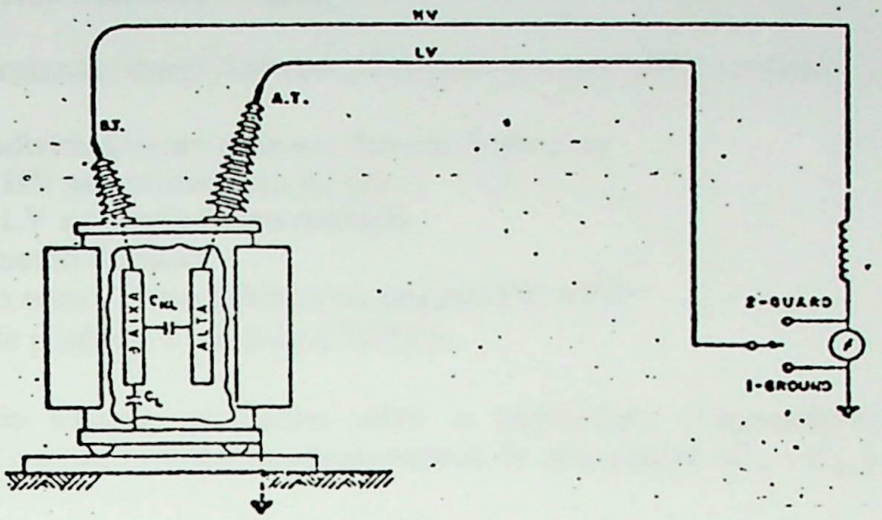


Figura 2.1.2 - Baixa Energizada com Alta Aterrada

a) Curto-circuitar individualmente cada um dos enrolamentos.
b) Conectar o cabo HV ao enrolamento de baixa.
c) Conectar o cabo LV ao enrolamento de alta.
d) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GROUND.
e) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) entre o enrolamento de alta e a terra e entre os enrolamentos de alta e baixa $(C_L + C_{HL})$.

Ensaio 4 - Baixa Energizada com Alta em GUARD, mostrado na *Figura 2.1.2* - (posição 2).
a) Conservar as conexões do ensaio anterior.
b) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GUARD.
c) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) do enrolamento de baixa para a terra (C_L).

Com o objetivo de verificar a precisão dos ensaios executados, deve-se calcular os valores de C_{HL}, fazendo-se as subtrações entre os valores determinados pelos:

Ensaio 1: $(C_H + C_{HL})$ - Ensaio 2 : (C_H); e

Ensaio 3 : $(C_L + C_{HL})$ - Ensaio 4 : (C_L)

e comparar os resultados.

2.2 - Transformadores de Três Enrolamentos:

Para os transformadores de três enrolamentos são feitos seis ensaios para a medida de capacitâncias, que serão descritos a seguir.

Ensaio 1 - Alta Energizada, Baixa Aterrada, Terciário em GUARD, mostrado na *Figura 2.2.1*.

a) Curto-circuitar individualmente cada um dos enrolamentos.
b) Conectar o cabo HV ao enrolamento de alta.
c) Conectar o cabo LV ao enrolamento terciário.
d) Aterrar o enrolamento de baixa.
e) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GUARD.
f) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) entre o enrolamento de alta e a terra e entre os enrolamentos de alta e baixa ($C_H + C_{HL}$).

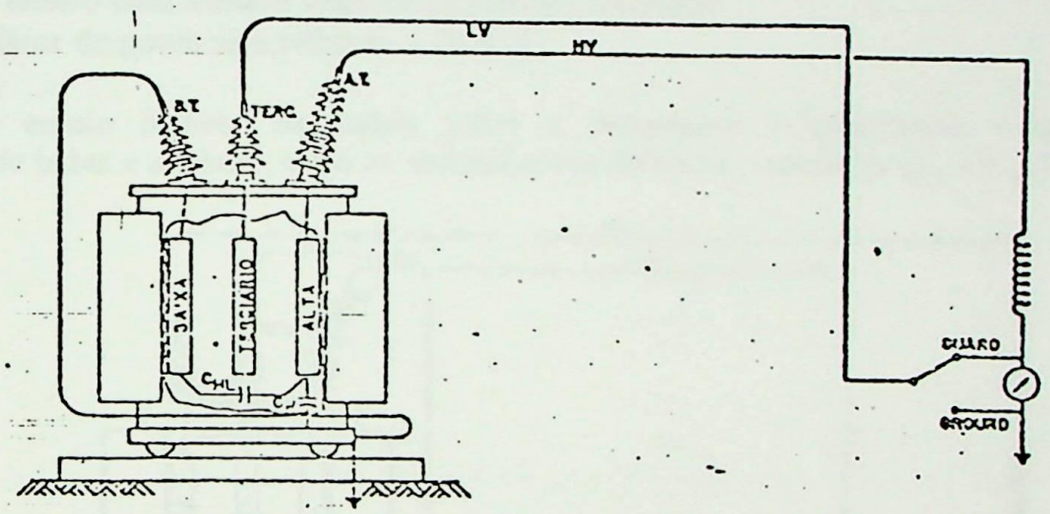


Figura 2.2.1 - Alta Energizada, Baixa Aterrada, Terciário em GUARD

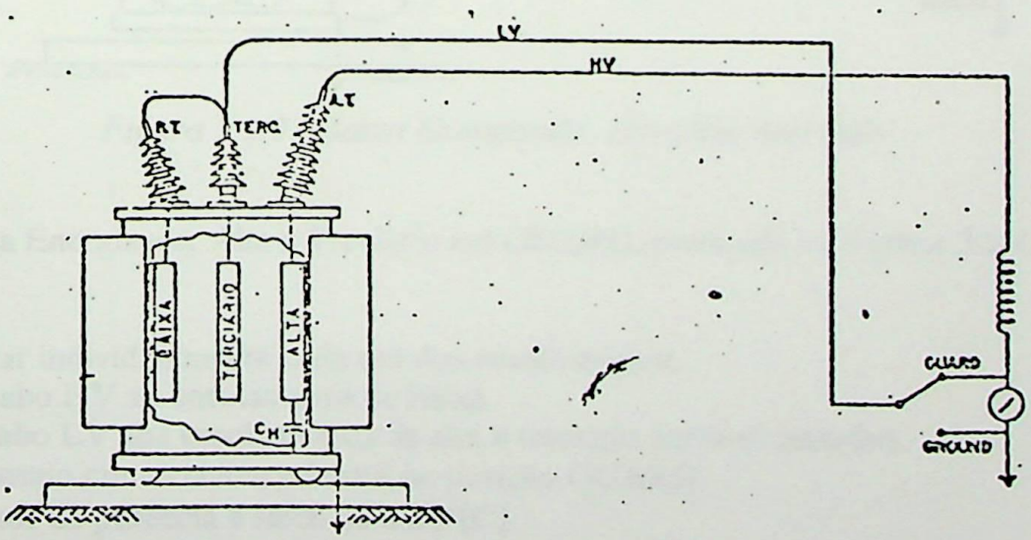


Figura 2.2.2 - Alta Energizada, Baixa e Terciário em GUARD

Ensaio 2 - Alta Energizada, Baixa e Terciário em GUARD, mostrado na *Figura 2.2.2*.

a) Curto-circuitar individualmente cada um dos enrolamentos.

b) Conectar o cabo HV ao enrolamento de alta.
c) Conectar o cabo LV aos enrolamentos de baixa e terciário curto-circuitados.
d) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GUARD.
e) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) do enrolamento de alta e a terra (C_H).

Ensaio 3 - Baixa Energizada, Terciário Aterrado, Alta em GUARD, mostrado na *Figura 2.2.3*.

a) Curto-circuitar individualmente cada um dos enrolamentos.
b) Conectar o cabo HV ao enrolamento de alta.
c) Conectar o cabo LV ao enrolamento baixa.
d) Aterrar o enrolamento terciário.
e) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GUARD.
f) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) entre o enrolamento de baixa e a terra e entre os enrolamentos de baixa e terciário ($C_L + C_{LT}$).

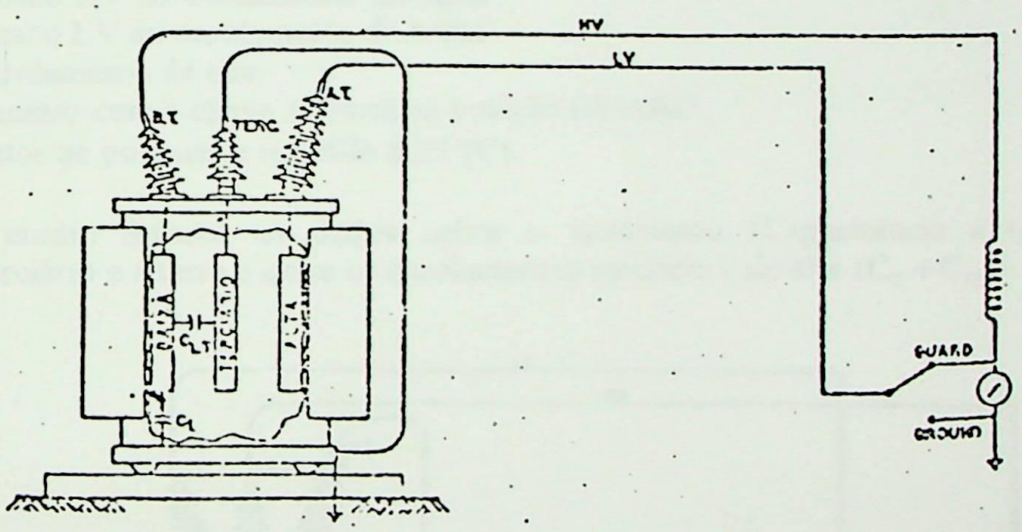


Figura 2.2.3 - Baixa Energizada, Terciário Aterrado

Ensaio 4 - Baixa Energizada, Alta e Terciário em GUARD, mostrado na *Figura 2.2.4*.

a) Curto-circuitar individualmente cada um dos enrolamentos.
b) Conectar o cabo HV ao enrolamento de baixa.
c) Conectar o cabo LV aos enrolamentos de alta e terciário curto-circuitados.
d) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GUARD.
e) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) do enrolamento de baixa e a terra (C_L).

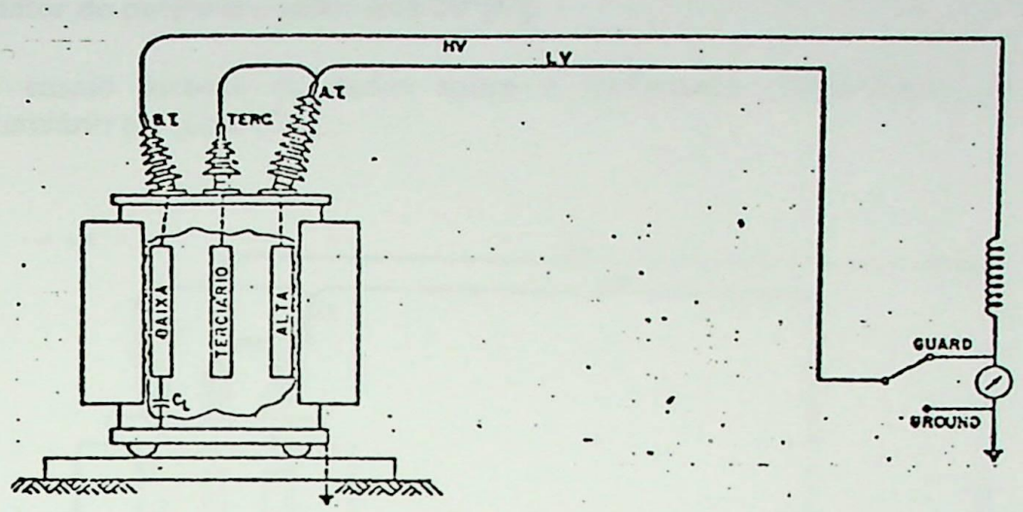


Figura 2.2.4 - Baixa Energizada, Alta e Terciário em GUARD

Ensaio 5 - Terciário Energizado, Alta e Baixa em GUARD, mostrado na *Figura 2.2.5*.

a) Curto-circuitar individualmente cada um dos enrolamentos.
b) Conectar o cabo HV ao enrolamento terciário.
c) Conectar o cabo LV ao enrolamento de baixa.
d) Aterrar o enrolamento de alta.
e) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GUARD.
f) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) entre o enrolamento terciário e a terra e entre os enrolamentos terciário e de alta ($C_T + C_{HT}$).

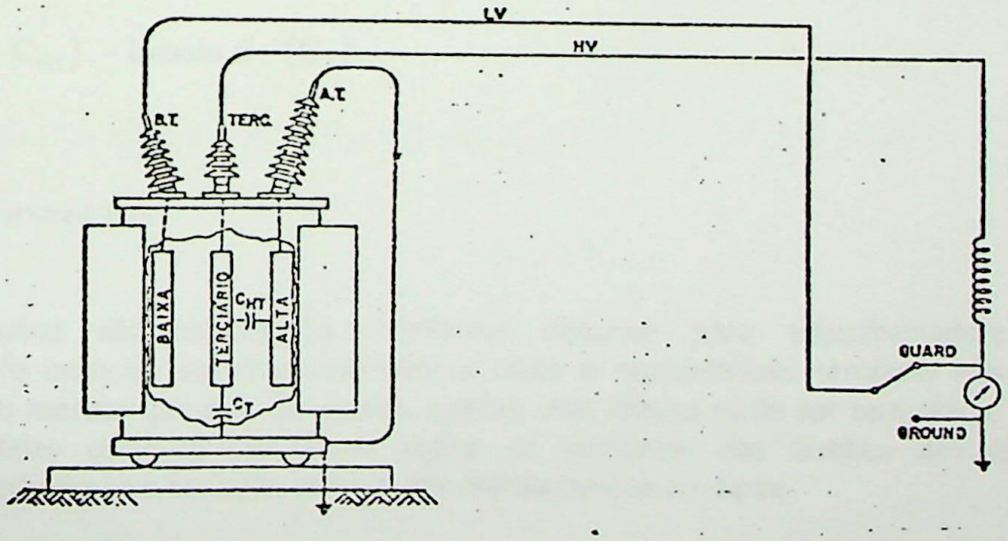


Figura 2.2.5 - Terciário Energizado, Alta e Baixa em GUARD

Ensaio 6 - Terciário Energizado, Alta e Baixa em GUARD, mostrado na *Figura 2.2.6*

a) Curto-circuitar individualmente cada um dos enrolamentos.
b) Conectar o cabo HV ao enrolamento terciário.
c) Conectar o cabo LV aos enrolamentos de alta e de baixa curto-circuitados.
d) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GUARD.

e) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) entre o enrolamento terciário e a terra (C_T).

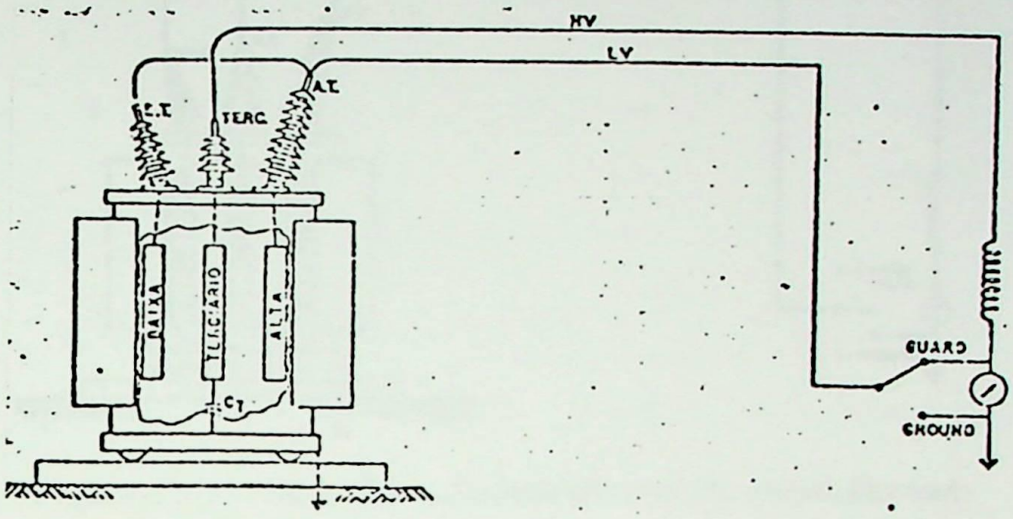


Figura 2.2.6 - Terciário Energizado, Alta e Baixa em GUARD

Com o objetivo de verificar o isolamento entre os enrolamentos, deverão ser calculados os valores de C_{HL} , C_{LT} e C_{HT} , fazendo-se as subtrações:

Ensaio 1 : $(C_H + C_{HL})$ - Ensaio 2 : (C_H)

Ensaio 3 : $(C_L + C_{LT})$ - Ensaio 4 : (C_L)

Ensaio 5 : $(C_T + C_{HT})$ - Ensaio 6 : (C_T)

2.3 - Autotransformadores:

Os ensaios são executados conforme descrito para transformadores de dois enrolamentos. No caso de autotransformadores onde o enrolamento terciário não é acessível externamente, ou mesmo que ele não existe, apenas uma leitura pode ser executada. Neste caso, este ensaio é feito curto-circuitando-se todos os terminais das buchas dos enrolamentos interligados e medindo-se a isolação entre esses enrolamentos e a terra.

Ensaio 1 - Alta e Baixa Energizada com Terciário Aterrado, mostrado na *Figura 2.3.1* (posição 1).

a) Curto-circuitar individualmente cada um dos enrolamentos.
b) Conectar o cabo HV ao enrolamento de alta e baixa.
c) Conectar o cabo LV ao enrolamento terciário.
d) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GROUND.

e) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) do enrolamento de alta e de baixa para a terra e para o terciário ($C_H + C_{HT}$).

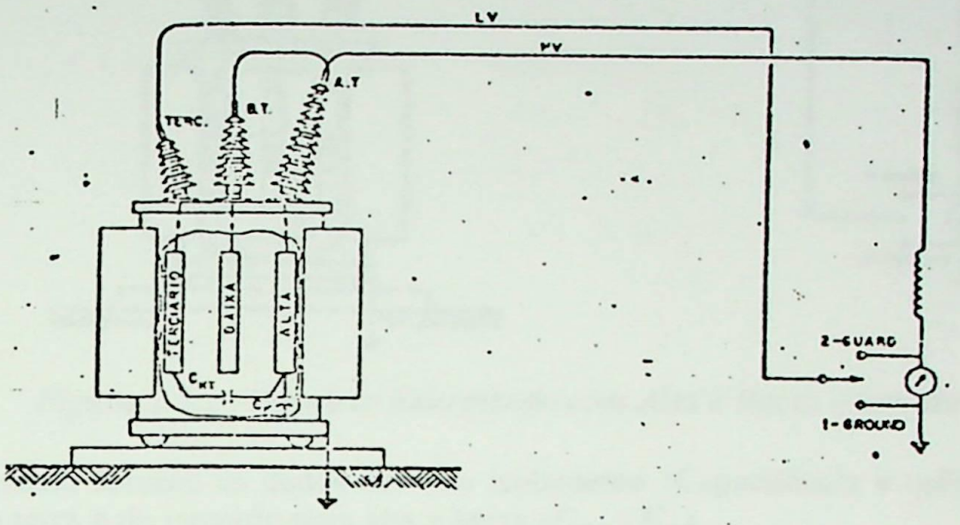


Figura 2.3.1 - Alta e Baixa Energizada com Terciário Aterrado

Ensaio 2 - Alta e Baixa Energizada com Terciário em GUARD, mostrado na *Figura 2.3.1*(posição 2).

a) Conservar as conexões do ensaio anterior.
b) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GUARD.
c) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) do enrolamento de alta e baixa para a terra (C_H).

Ensaio 3 - Terciário Energizado com Alta e Baixa Aterrada, mostrado na *Figura 2.3.2* - (posição 1).

a) Curto-circuitar individualmente cada um dos enrolamentos.
b) Conectar o cabo LV ao enrolamento de alta e baixa.
c) Conectar o cabo HV ao enrolamento terciário.
d) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GROUND.
e) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

Ensaio 4 - Terciário Energizado com Alta e Baixa em GUARD, mostrado na *Figura 2.3.2* (posição 2).

a) Conservar as conexões do ensaio anterior.
b) Executar o ensaio com a chave seletora na posição GUARD.
c) Calcular o fator de potência e referí-lo a 20°[C].

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) entre o enrolamento terciário e para a terra (C_T).

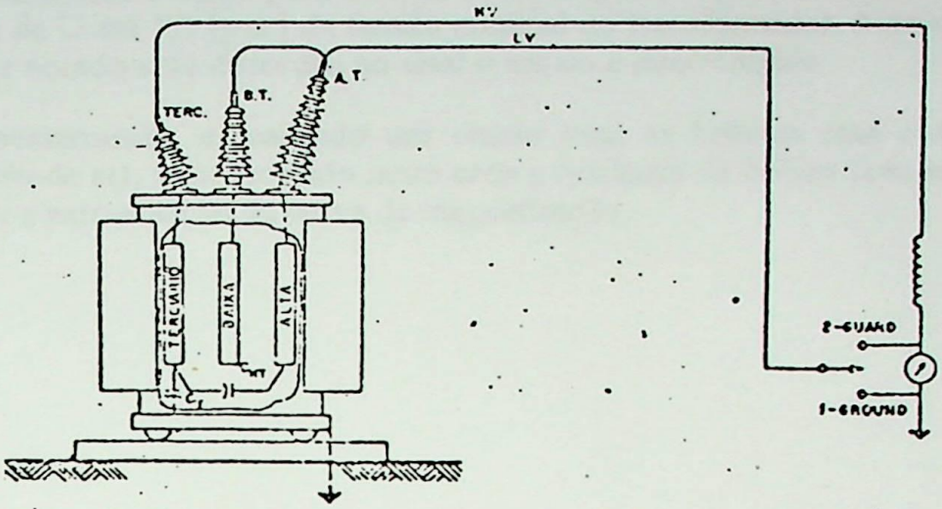


Figura 2.3.2 -Terciário Energizado com Alta e Baixa Aterrada

NOTA: Este ensaio fornece os dados sobre o isolamento (Capacitância e tgδ) do enrolamento terciário para a terra e do terciário para alta e baixa $(C_{HT} + C_T)$.

Com o objetivo de verificar a precisão dos ensaios executados deve se calcular o valor de C_{HT}, fazendo-se as subtrações:

Ensaio 1: $(C_{HT} + C_H)$ - Ensaio 2 : (C_H)

Ensaio 3 : $(C_{HT} + C_T)$ - Ensaio 4 : (C_T)

e comparar os resultados. [16]

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

2.4 - Comentários sobre os resultados dos Ensaios:

Para análise dos resultados de ensaio é de grande importância a determinação da temperatura do transformador quando da realização do ensaio. Esta deve ser adotada como sendo o valor da temperatura do óleo no topo do transformador.

Estas capacitâncias são utilizadas na construção do modelo do transformador frente a impulsos transferidos eletrostaticamente.

2.5 - Levantamento da Característica de Magnetização.

O ensaio para o levantamento da curva de magnetização do transformador é feito pelo fabricante antes deste ser montado, monitorado por um shunt de corrente e um divisor de potencial.

É feito um ensaio a vazio pelo lado de baixa tensão do transformador, com uma tensão aplicada variando de U até 1,2 [p.u.] da tensão nominal do transformador. Mantendo-se a tensão e a corrente ao ser notado uma distorção no sinal o ensaio é interrompido.

Complementarmente, é realizado um ensaio com as bobinas sem o núcleo de ferro (bobina com núcleo de ar), sendo medido neste caso a reatância da bobina com núcleo de ar, que será utilizada para a extrapolação da curva de magnetização.