TESE
727

PARA-RAIOS PARA SISTEMAS DE MÉDIA TENSÃO CARACTERISTICAS TECNICAS E APLICAÇÃO A SISTEMAS DE POTÊNCIA

MANUEL LUIS B. MARTINEZ

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

PÁRA-RAIOS PARA SISTEMAS DE MÉDIA TENSÃO CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E APLICAÇÃO A SISTEMAS DE POTÊNCIA

Aluno - Eng. Manuel Luís Barreira Martinez

Orientador - Prof. Dr. João Roberto Cogo

Itajubá - Dezembro 1992

CLASS. 621.316.98.004.14(043.2)
CUTT. M385p
TOMBO 727

Duty, Honor, Country

(Douglas McArthur, Speach at WestPoint Military Academy)

To Manuel Martinez Alonso,
My Father, Friend and Teacher

and

To Flávio de Barros Camargo
My Teacher and Friend

You are the best example to be followed on "Duty, Honor, ..."

Preâmbulo

Whereas there is nothing more necessary for promoting the improvement of Philosophical Matters, than the communicating to such, as apply their Studies and Endeavours that way, such things as are discovered or put in practice by others; is therefore thought fit to employ the Press, as the most proper way to gratifie those, whose engagement in such Studies, and delight in the advancement of Learning and profitable Discoveries,...

Philosophical Transactions of The Royal Society - London
First page, First Number, Monday, March 6th, 1664/5

Este Trabalho é dedicado a todos aqueles que dispendem a maior parte de suas vidas profissionais, ombro a ombro, lado a lado, permanentemente afastados dos movimentados e ruidosos planaltos da vida porém, profundamente decididos a devotar seus esforços e conhecimentos à árdua tarefa de compreender e explorar os infindáveis meandros que compõem as Ciências da Engenharia, e que, deste modo, atravessam os umbrais da História, anônimos mas, indubitavelmente, imprescindíveis.

Manuel Luís Barreira Martinez
Adaptação de Trecho de Winston L.S. Churchill

Aos meus pais; Manuel e Lídia; meus irmãos Carlos, Maria Clara, Cynthia, José Roberto, Maurício e sobrinhos Daniela, Guilherme, Aline.

E, a Maria Helena; que, de modo estóico, participa e colabora para que esta aventura cheque a um bom termo.

Quaisquer palavras pouco significado apresentam perto do muito que ela representa.

Normalmente a parte mais difícil de qualquer tarefa é a relacionada aos agradecimentos às pessoas que para ela contribuiram pois , via de regra, a memória nos falha e, deste modo, alguém relembrado e citado como de mérito o deveria ser. No entanto, mesmo correndo o risco de se incidir nesta falta, é necessário que sejam destacadas algumas pessoas que muito contribuiram para o termo deste trabalho, dentre estas:

Os amigos e companheiros

Francisca M. Knoll, Ademar Ghoiama, Airton Violin, Antônio Oliveira, Antônio F. Netto, Arthur Diégues, Cláudio Magnanini, Duílio M. Leite, Flávio de Barros Camargo, Flávio Duarte D. Barros, Humberto Marimbondo, James Monteiro, jânio Itiiro Akamatsu, João K. Cogo, Jorge Franco Neto, José Augusto Ciqueira, José Henrique M. Fernandez e Demais Companheiros da ELETRONORTE, Luis A. Cardinha, Luis Cantana, Márcio Drummond, Marco P. Pereira, Marcos A. Mendes Carneiro, Marcos Tadeu Jirschick, Mário Kubota, Paulo César Baz Esmeraldo, Paulo Kodaira, Paulo G. Pereira, Olímpio L. Silva, Oswaldo Sidney Manalli, Roberto C. Maciel, Rogério T. Verdolin, Rubens D. Fuchs, Saboru Aita, Sérgio Yamazaki, por seu constante apoio e encorajamento ao longo de todos estes anos.

Muito Obrigado como Amigo e Colega;

Itajubá, 15 de Janeiro de 1993

This work objective is to present a series of concepts related to medium voltage surge arresters design, construction, testing and application improving, in this way, their utilization.

The First Chapter presents a series of basic concepts and also a short historical technic evolution. The second one, presents and details the surge protection equipment presently used, dealing with design and performance characteristics and also failure problems and countermeasures.

Following, a series of comments regarding the positive and negative aspects of the National and International Technical Standards on Surge Arresters and a final discussion on the State of the Art are shortly presented in the Third Chapter and Four respectively.

Finally, in the Fifth Chapter an extensive reference review, regarding all the aspects presented through this text, is presented and, for further details must be consulted.

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma série de conceitos relativos ao projeto, construção, ensaios e aplicação de pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão, de modo a possibilitar, através de um melhor entendimento de suas características, sua correta utilização.

O desenvolvimento histórico trilhado pelos dispositivos utilizados na proteção dos sistemas elétricos de potência contra surtos de tensão, bem como, alguns dos conceitos posteriormente utilizados ao longo de todo o texto são inicialmente abordados no Primeiro Capítulo. O Segundo Capítulo apresenta os principais equipamentos utilizados no presente para a proteção contra surtos de tensão, ou seja, os centelhadores, os pára-raios a carboneto de silício e os a óxido metálico, e detalha suas características de projeto e desempenho, bem como, os problemas resultantes de sua falha.

Subsequentemente, o Terceiro Capítulo apresenta uma série de comentários sobre a normalização nacional e internacional sobre pára-raios definindo de modo qualitativo seus pontos polêmicos. Por sua vez, os comentários finais, bem como, as possíveis tendências do estado da arte são apresentadas no Quarto Capítulo.

Finalmente, o Último Capítulo apresenta uma extensa revisão bibliográfica sobre os assuntos abordados ao longo de todo o texto.

E, DEUS DISSE AO HOMEM:

"COLOQUEI-TE NO CENTRO DO MUNDO PARA QUE POSSAS OLHÁ-LO MAIS FACILMENTE E VER TODAS AS COISAS QUE CONTÉM.
NÃO TE CRIEI NEM CELESTE E NEM TERRESTRE, NEM MORTAL NEM IMORTAL,
PARA QUE POSSAS SER TEU ÚNICO EDUCADOR E MESTRE DE TI MESMO,
E QUE POSSAS DAR A TI MESMO A TUA PRÓPRIA FORMA".

Picco della Mirandola - 1485

AO LONGO DE MEUS ANOS TENHO ESTADO EM CONTACTO MUITOS HOMENS:

ALGUNS BONS; ALGUNS DOTADOS DE UM INTELECTO BRILHANTE; ALGUNS EXTREMANENTE CIOSOS DE SEUS DEVERES; ALGUNS POSSIDORES DE UMA SIMPLICIDADE PESSOAL, DITA FRANCISCANA, DESPIDOS DE QUALQUER VAIDADE E; FINALMENTE ALGUNS, ESTES MUITO POUCOS, SEMPRE DISPOSTOS A ANALISAR O NOVO E TRANSMITI-LO SEM QUALQUER SENTIMENTO; EM TESE, O IDEALIZADO NA FRASE ACIMA.

O PROFESSOR DOUTOR FLÁVIO DE BARROS CAMARGO, REUNIA ESTAS E MAIS QUALIDADES E COMO O TAL SERÁ SEMPRE LEMBRADO:

DESCANSE EM PAZ, MEU VELHO AMIGO

ITAJUBÁ, JULHO 1993

Preâmbulo ____ V

Dedicatória ____ VII

Agradecimentos ____ IX

Abstract ____ XIII

Resumo ____ XV

Indice ____ I.1

Capítulo - I Introdução e Comentários Iniciais

I.1 - Histórico Geral e Conceitos Básicos sobre a Tecnologia dos Pára-raios para Sistemas de Potência ____ I.1

I.2 - Evolução Histórica da Proteção Contra Surtos ____ I.14
I.2.1 - Os Centelhadores ____ I.15
I.2.2 - Os Primeiros Elementos Não Lineares ____ I.22
I.2.3 - Os Resistores Não Lineares, Elementos Válvula ____ I.28

I.3 - Considerações sobre o Estado da Arte ____ I.32

Capítulo - II Equipamentos para Proteção Contra Surtos de Tensão

II.1 - Centelhadores ____ II.1
II.1.1 - Centelhadores Haste - Haste ____ II.4
II.1.2 - Centelhadores Tubulares ____ II.10

Capítulo - V Bibliografia

V.1 - Bibliografia Geral e Histórica _____ v.1

Anexos

I - INTRODUÇÃO E COMENTÁRIOS INICIAIS

And he that will not apply New Remedies, must expect New Evils.

(Francis Bacon, 1561-1626)

I.1 - HISTÓRICO GERAL E CONCEITOS BÁSICOS SOBRE A TECNOLOGIA DOS PÁRA-RAIOS PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA

"The world belongs to the dissatisfied".
I believe in this saying absolutely.
For me the one great underlying principle of all human progress is that "Divine discontent" makes men strive for better conditions and improved methods.
(Charles Proteus Steinmetz)

Aparentemente, todo o *"poderoso"* aparato técnico utilizado no controle das sobretensões teve sua origem na observação, contemplação e, principalmente, vontade de dominar o *"Fogo dos Deuses"*, que desde os primórdios da humanidade impunha terror, inspirava respeito e, era habilmente explorado por alguns, um pouco mais dotados.

O desenvolvimento da percepção coletiva, ou seja, do *"Descontentamento Divino"*, oriundo da observação contínua de uma série de fenômenos, na maioria das vezes com a total ausência de meios de técnicos minimamente adequados e que mesmo sob ótica de qualquer observador moderno menos avisado, apresentam contornos nítidamente lógicos, veio a constituir o que os antigos denominavam, com muita propriedade, *"Philosophical Matters"* e que, modernamente, constitui a ainda incipiente *"Ciência"*, que via de regra, para o momento, fornece, quando muito, algumas pistas,

com sorte, provavelmente corretas.

O fato é que vão longe os dias onde meia dúzia de eleitos perscrutavam os céus em busca de algo desconhecido, primeiramente, de uma fórma de energia, o fogo, que lhes impunha terror mas que, adequadamente explorado, lhes apresentavam possibilidades de poder muito além de seu entendimento. Hoje o domínio sobre as formas de energia representado, pelas grandes unidades geradoras, subestações e sistemas de transmissão, transcende as idéias mais mirabolantes imaginadas por qualquer dos grandes *"Filósofos"*, no entanto, o velho *"Fogo dos Deuses"*, em parte desmistificado, porém não de todo conhecido, continua presente na vida da humanidade, e quando por algum dos azares da vida se manifesta resulta em uma série de inconvenientes e transtornos relacionados com a ausência de energia, com os quais algumas sociedades gostariam, se possível, não mais conviver.

Dentro deste contexto, as técnicas de proteção contra surtos se encontram intimamente relacionadas com o desenvolvimento dos sistemas elétricos e, a exemplo dos mesmos são relativamente recentes, pois o primeiro pára-raios*, efetivamente eficiente, um pára-raios classe distribuição, desenvolvido pela *"Stanley Electric Manufacturing Company"*, [1-3] uma das empresas formadoras da *"General Electric"*, ainda não é centenário.

** Nota -*

→ *O termo pára-raios, bem como, seus equivalentes, em francês, parafoudres, em inglês, ligthning arresters, atualmente, não mais se presta para, perfeitamente, definir o real papel que desempenham estes dispositivos no controle dos surtos de tensão que atingem os sistemas elétricos, fato já reconhecido em âmbito internacional e, que em alguns casos, determinou a escolha de uma designação mais adequada.*

Seguindo a seqüência lógica dos acontecimentos, o desenvolvimento dos pára-raios termo que, inicialmente, perfeitamente descrevia a função

desempenhada por estes dispositivos na proteção dos sistemas elétricos, contemplou 3 fases principais,[4] intimamente ligadas ao progresso da emergente indústria da eletricidade, nos fins do *"Século XIX"* e início do *"Século XX"*, bem como, uma fase complementar, com características altamente tecnológicas, no fim da *"Década de 70"*, ou seja:

I) - *Primeira Fase:- Determinada pela evolução dos circuitos elétricos que apresentam potência de curto-circuito desprezável, a exemplo de circuitos telegráficos e de telefonia;*

II) - *Segunda Fase:- Determinada pela evolução dos sistemas elétricos em média tensão e reduzida potência de curto-circuito, a exemplo de circuitos de distribuição primária, iluminação, transporte;*

III) - *Terceira Fase:- Determinada pela evolução dos sistemas elétricos em alta tensão e elevada potência de curto-circuito, a exemplo dos sistemas de transmissão de potência e energia; e*

IV) - *Quarta Fase:- Determinada pela evolução dos sistemas elétricos em extra alta tensão e elevada potência de curto-circuito, a exemplo dos grandes sistemas de transmissão de potência e energia, sistemas em corrente contínua e subestações blindadas.*

Imediatamente após a implementação dos primeiros circuitos telegráficos através de grandes extensões continentais, notadamente, na *"América do Norte"*, fez-se necessário prever meios para realizar a sua proteção contra descargas atmosféricas, fornecida dentro dos limites tecnológicos da época, por meio de diminutos centelhadores, fato ainda extremamente comum, nas instalações telefônicas atuais.

Um ponto peculiar a estes sistemas é o baixo nível de curto-circuito disponível em, virtualmente, todos os seus pontos, fato que atua no sentido de prover seus centelhadores de uma característica de operação, virtualmente, automática, permitindo pois, que o sistema retorne as suas

condições operativas, iniciais, sem atuação complementar, por parte de qualquer dispositivo auxiliar.

O ponto de atuação dos centelhadores, ou seja, o valor instantâneo de um impulso tensão a partir do qual os mesmos entram em condução, desviando as correntes associadas ao impulso para a terra, define a primeira das grandezas características dos dispositivos de proteção contra surtos de tensão convencionais, denominada tecnicamente *"Tensão Disruptiva - U_D"*.

O advento dos sistemas elétricos de potência, e sua evolução na direção de níveis de tensão mais elevados implicou em um novo problema, ou seja, controlar a corrente de curto-circuito, para a terra, subseqüente a atuação dos centelhadores, tecnicamente denominada *"Corrente Subseqüente - I_{Sub}"* e, deste modo, permitir ao pára-raios retornar a sua condição operacional prévia, apto a responder a novos impulsos, este, talvez, o ponto chave de todas as pesquisas e principal propulsor do desenvolvimento que ocorreu nas primeiras *3 décadas* do *"Século XX"*.

Neste ponto, a imaginação dos técnicos e engenheiros, associada a falta de meios adequados para corretamente avaliar o desempenho dos equipamentos protetores e protegidos produziram autênticos primores, dignas peças de engenharia, em tese, perfeitos monumentos a inteligência que, na maioria dos casos, definiram todos os princípios que norteiam os projetos dos modernos pára-raios para sistemas de potência.

Definir nomes, datas, feitos nas áreas correlatas à proteção contra surtos de tensão se constitui em uma tarefa extremamente delicada, pois foram vários os pontos chaves e sempre, com absoluta certeza, alguns, em qualquer lista, hão de permanecer incógnitos porém, convém ressaltar que a primeira investigação de cunho científico sobre o problema relacionado com a interrupção das *"Correntes Subseqüentes"* foi reportada em maio de *1894*, via o *"American Institute of Electrical Engineers - AIEE"* por *"A.J.Wurts"*, conceituando os fenômenos relacionados com os *"non arcing metals"*, ligas em *"zinco - cobre"*, utilizadas até hoje, virtualmente, pela maioria dos fabricantes de pára-raios, na construção de centelhadores, que apresentam a propriedade de conduzir corrente em uma

direção, mas que, no entanto, necessitam de uma tensão extremamente alta* para iniciar a condução de corrente na direção reversa.

** Nota -*

→ *Obviamente, quando comparada com a tensão necessária para iniciar processo de condução no sentido "direto".*

Durante muitos anos esta idéia foi amplamente utilizada na construção dos pára-raios multi-centelhadores, em tese, um centelhador dotado de elevado grau de sofisticação, na literatura técnica, denominados *"pára-raios multi-centelhadores"*. Segundo este princípio, os pára-raios permaneciam em condução subseqüentemente a descarga de um impulso de corrente por alguns semi-ciclos da tensão em freqüência industrial, ou seja, conforme tecnicamente definido, conduzindo corrente subseqüente,* o que implica, que este tipo de construção só é adequado para circuitos em corrente alternada com baixa potência de curto circuito.

** Nota -*

→ *Neste caso, virtualmente, um curto-circuito fase terra.*

Por muitos anos, a principal tarefa dos projetistas de pára-raios ficou concentrada em uma série de peculiaridades envolvidas na utilização de resistências conectadas em série* com os pára-raios multi-centelhadores, principalmente, em sistemas de alta potência de curto-circuito, onde, via de regra, devido principalmente a fragilidade de todo o sistema, meio ciclo de corrente subseqüente, que como agravante pode assumir o valor da corrente de curto-circuito fase terra, é mais que suficiente para danificar o pára-raios.

** Nota -*

→ *Definindo um dos principais projetos básicos de pára-raios, utilizado*

até o presente, ou seja, os pára-raios com centelhadores série e suas variantes.

O principal problema imposto por esta solução, ou seja, pela conexão de uma resistência, normalmente, linear, em série com os centelhadores é o fato que, ao mesmo tempo que atua no sentido de reduzir a corrente subseqüente, a sua presença colabora para aumentar o nível de proteção, no caso específico, a queda de tensão, na resistência série, denominada, *"Tensão Residual - U_{Res}"*.

Uma análise, mesmo superficial deste fato, implica na necessidade de se utilizar, nestes casos, uma resistência variável, ou seja, não linear, alta o suficiente, para reduzir a corrente subseqüente e adequadamente baixa para não resultar em um nível de proteção elevado. É notório que, dentro do espaço temporal discutido, a ciência dos materiais elétricos se encontrava em estágio embrionário, e os materiais semi-condutores, ou seja, não lineares, eram virtualmente desconhecidos, deste modo, a solução encontrada, que implica em curto-circuitar a resistência série através de multi-centelhadores paralelos, apesar de extremamente simples, pode ser considerada como brilhante, definiu uma série de conceitos utilizados nos projetos dos centelhadores ativos das últimas gerações de pára-raios a carboneto de silício.*

** Nota -*

→ *Os impulsos de corrente de baixa amplitude circulam através da resistência série, enquanto que, os de elevada amplitude, circulam através dos multi-centelhadores paralelos, o que em tese, resulta em um nível de proteção reduzido. Com respeito a limitação das correntes subseqüentes, o resistor série, atua no sentido de desestabilizar o arco formado nos multi-centelhadores, paralelo, facilitando sua extinção pelos multi-centelhadores série em alguns semi-ciclos.*

Tão logo os níveis de curto-circuito dos sistemas elétricos começaram a

crescer, principalmente, após o advento das linhas de transmissão em alta tensão, os pára-raios multi-centelhadores passaram a falhar sistematicamente[3-4], normalmente, devido a ausência de *"Reselagem"*, ou seja, por falha na interrupção da *"Corrente Subseqüente"* que, ao circular por algumas dezenas de semi-ciclos, impõem uma sobrecarga inadmissível aos eletrodos dos centelhadores.*

* *Nota -*

→ *Data desta época as primeiras noções sobre surtos em altas freqüências relacionados com manobras nos sistemas elétricos*[3-4] *e seus efeitos no desempenho dos equipamentos utilizados na proteção contra surtos de tensão. Digno de nota, é o fato de que problemas semelhantes a estes, voltaram a ocorrer, praticamente, 50 anos após, nos pára-raios a carboneto de silício para sistemas em extra-alta tensão.*

Contornar a série de fenômenos responsáveis pelas falhas que ocorrem com os pára-raios multi-centelhadores em sistemas elétricos em alta tensão, implica, em realizar uma revisão global dos projetos de pára-raios, ou seja, definir novas soluções para os resistores série, bem como, para os centelhadores. A primeira solução, para estes fenômenos, efetivamente viável, utilizou uma série de dispositivos eletrolíticos, conhecidos como, *"células em alumínio"*, para desempenhar o papel de um resistor, por sua vez, conectado ao sistema elétrico através de um centelhador, usualmente, com a forma de chifre[5] e, ao conjunto assim formado, a literatura técnica denomina *"pára-raios eletrolítico"* ou *"pára-raios em alumínio"*.

Apesar de seu excelente desempenho em campo, devido ao seu elevado custo de manutenção, extremamente laboriosa,[5] realmente um autêntico exercício de paciência, pois dependendo do caso, significa desmontar e remontar todo o sistema no campo, bem como, a baixa relação *"Custo Equipamento Protegido - Equipamento Protetor"*, o campo de aplicação dos *"pára-raios eletrolíticos"* foi praticamente restrito as grandes subestações de sistema, nas quais predominou absoluto por mais de uma

década, até o advento dos primeiros *"pára-raios a estado sólido"*, por volta do fim dos anos *10* e início dos anos *20*.

Os inconvenientes existentes nos *"pára-raios eletrolíticos"*, bem como, outros problemas de menor monta, começaram a ser contornados a partir do momento que foram dedicados esforços no sentido de se desenvolver um pára-raios dotado das características apresentadas pelos eletrolíticos sem, no entanto, necessitar de muita atenção adicional, além das tradicionais inspeções, normalmente, bi-anuais.

Um dos primeiros pára-raios que atenderam estas condições[4→6] foram os *"pára-raios a filme óxido - OF"*, de construção física similar a dos *"pára-raios eletrolíticos"*, ou seja, um centelhador, no caso específico, semi-esférico em série com um resistor, tendo como componente básico, um composto químico seco, normalmente, na forma de pó que, uma vez, ligeiramente aquecido muda drasticamente da condição de composto condutor para a de composto isolante.

Um outro tipo de pára-raios utilizado na substituição dos *"pára-raios eletrolíticos"* e que apresenta, praticamente, as mesmas vantagens oferecidas pelos *"pára-raios a filme óxido - OF"*, era o *"pára-raios autovalve"* desenvolvido pela *Westinghouse Electric Corporation*,[7] de construção física similar a dos *"pára-raios a filme óxido"*, ou seja, um centelhador semi-esférico em série com elemento construído segundo um princípio denominado *"Autovalve"**.

* *Nota -*

→ *A denominação "Autovalve" se constitui em um padrão para os pára-raios fabricados pela Westinghouse Electric Corporation portanto, torna-se conveniente ressaltar que os princípios gerais aqui abordados são relativos somente aos primeiros pára-raios denominados "Autovalve" e não aos modernos pára-raios a carboneto de silício e a óxido metálico que por algum acaso venham a receber esta denominação.*

O sistema *"Autovalve"* resultou em uma série de pára-raios razoavelmente

utilizada, no entanto, dotada de um custo extremamente elevado e de construção bastante elaborada.

A evolução do sistema *"filme óxido"*, objetivando obter uma série de pára-raios para sistemas em média tensão, dotados de custo compatível com o dos equipamentos protegidos, resultou no sistema, tecnicamente denominado *"pellet"*,* baseado em alguns princípios da química coloidal que, abordam o comportamento das partículas sólidas, em específico, os que tratam da adesão e recobrimento de partículas de grande diâmetro por aquelas de menor diâmetro, ou seja, o princípio do recobrimento das cerejas por partículas de açucar.[8] As denominadas *"pellets"* são obtidas através do processamento e recobrimento, com um material isolante na forma de pó, no caso, pequenas esferas de *"Peróxido de chumbo - PbO_2"* que, em tese resulta na transformação de cada esfera em uma *"célula a filme óxido"*.

* *Nota -*

→ *O sistema "pellet" foi responsável pelo surgimento, no Brasil, de uma série de pára-raios denominados "pára-raios a pó socado", normalmente construídos com carboneto de silício, na forma de pó e, conforme o próprio nome diz, socado em um invólucro, via de regra, em porcelana, ou seja, que não apresenta nenhuma das características do sistema "filme óxido" e por este modo, tremendamente sujeita a falhas.*

Por esta época já corriam, aproximadamente, *40 anos* da introdução dos princípios que definem o comportamento dos *"non arcing metals"* e, durante este período ocorreu uma série de progressos no sentido de, adequadamente, determinar as grandezas relacionadas com os surtos de tensão nos sistemas elétricos, principalmente as de origem atmosférica,* bem como, construir equipamentos e definir técnicas de ensaio representativas que, em conjunto, com a evolução dos sistemas elétricos e da ciência dos materiais resultou em uma mudança drástica nas técnicas de proteção contra surtos, cujo ponto de inflexão, virtualmente responsável pela disseminação dos pára-raios nos sistemas elétricos foi

a introdução dos *"resistores não lineares a carboneto de silício - SiC"*, no início da década de *30*.[1-2-9-10]

** Nota -*

→ *Tendo em mente a ausência de meios técnicos mais sofisticados pois, por esta época, eram conhecidos, basicamente, os elos magnéticos e os klidonógrafos,*[9] *estes dados podem ser considerados como incipientes, fato que, no entanto, não impediu que os mesmos fossem utilizadas como base para muitos estudos posteriores.*

Os resistores a carboneto de sílicio foram os primeiros corpos sólidos, dotados de todas as principais características necessárias a construção de pára-raios compactos, em tese, de custo reduzido e, principalmente, dotados de desempenho compatível com a crescente sofisticação dos sistemas elétricos. A partir da introdução dos resistores a carboneto de silício no mercado, primeiramente, nos pára-raios *"Tipo Vented"*,*[11] bem como, em conjunto com a evolução dos sistemas elétricos de potência, os projetos de pára-raios passaram a ser revistos em bases, virtualmente, quinqüenais[11] e, deste modo, as técnicas de proteção contra surtos de tensão evoluiram rapidamente, fato que permitiu a crescente redução nos níveis de suportabilidade dos equipamentos, sem a qual, a construção, obviamente, em termos econômicos, dos grandes sistemas de transmissão em extra e ultra-alta tensão seria dificultada.

** Nota -*

→ *Os primeiros pára-raios a carboneto de silício foram construídos na forma multi-unidades, tensão nominal de 12 kV, e permitiam que fossem realizadas inspeções internas periódicas. Convém ressaltar que, no entanto, os seus centelhadores eram selados em um invólucro em porcelana. Este procedimento, em tese, pois o estabelecimento de uma periodicidade adequada das inspecões pode resolver em parte o problema, não é recomendado, pois a presença de umidade atua no sentido de comprometer o desempenho dos resistores a carboneto de*

silício que, normalmente, são submetidos a um processo de formação de trincas e, posteriormente falha por descarga externa nesta região. [12-13]

A evolução dos projetos de *"pára-raios a carboneto de silício"*, também denominados de *"pára-raios convencionais"*, em parte abordada, no Item *II.2* teve seus principais esforços dirigidos ao aperfeiçoamento de seus centelhadores que, no decorrer de suas etapas evolutivas, foram equipados com dispositivos para permitir a equalização do potencial interno,* cujo desempenho, conforme posteriormente constatado, é tremendamente influenciado pela presença de contaminação ambiental, bem como, passaram a atuar ativamente no processo de interrupção da corrente subseqüente, logo após a introdução do princípio do sopro magnético, por fins dos anos *50*, início dos anos *60*, fato que, implicou na segunda grande revolução nas técnicas de proteção contra surtos pois, possibilitou a redução simultânea da corrente subseqüente e do nível de proteção contra surtos,** com reflexos, virtualmente, imediatos nos níveis de suportabilidade do isolamento dos equipamentos, principalmente os em alta e extra-alta tensão, ou seja, em última análise, nos custos de implantação dos grandes sistemas.

Nota -

* - *Circula pelos pára-raios sob "Tensão Fase Terra - $U_{\phi T}$", uma corrente de pequena amplitude, por exemplo entre 30 μA e 4 mA, com características determinadas pelo sistema de equalização de potencial, normalmente, constituído por resistores não lineares, denominada de "Corrente de Fuga - I_F"; e*

** - *Projetar um pára-raios, no caso com centelhadores, implica em atuar sobre duas grandezas conflitantes pois, reduzir os níveis de proteção implica em aumentar a corrente subseqüente que, por sua vez, atua no sentido de reduzir a capacidade de interrupção dos centelhadores série. A introdução do princípio do sopro magnético permite reduzir a tensão aplicada aos resistores a carboneto de*

silício e, deste modo, a corrente subseqüente.

Com a contínua evolução dos sistemas elétricos de potência o papel desempenhado pelos pára-raios na proteção contra surtos de tensão passou a ser cada vez mais relevante, no entanto, alguns dos pontos fracos apresentados pelos pára-raios construídos com resistores a carboneto de silício, oriundos de limitações impostas pelos centelhadores, mesmos os mais modernos, passaram, sistematicamente, a serem realçados e dentre estes o mais importante, sem sombra de dúvida, foi o baixo desempenho apresentado frente a descargas de manobra, estas extremamente importantes nos grandes sistemas em extra e ultra-alta tensão em corrente alternada. Como agravante, o baixo desempenho frente a descargas de manobras foi realçado, principalmente, nos últimos anos, por um comportamento, em tese, inadequado frente a grande parte das solicitações existentes nos sistemas em corrente contínua* e nas subestações blindadas.**

Notas -

* - *A ausência de zeros na forma da tensão implica na necessidade de se trabalhar em qualquer sistema de corrente contínua, com pára-raios a carboneto de silício com centelhadores ativos e, neste caso, convém ressaltar que o ciclo de operação, ou seja, trabalho térmico imposto pela descarga de corrente subseqüente é, virtualmente, sempre o máximo, fato que, estatisticamente, atua no sentido de reduzir sua vida útil; e*

** - *Devido a presença de centelhadores série e, por conseguinte, do retardo por eles impostos, os pára-raios a carboneto de silício podem se revelar inadequados em instalações blindadas sujeitas a surtos de frente rápida.*

Paralelamente, à evolução tecnológica dos sistemas elétricos, a associação entre *"Cerâmica Técnica"* e o *"Desenvolvimento dos*

Semi-condutores a Estado Sólido", proporcionou o início de uma intensa fase de pesquisas, objetivando a obtenção de novos materiais para uso eletrotécnico e, como fruto destes esforços, praticamente, nos fins dos anos *70*, um resistor não linear[14] composto por *"Óxido de Zinco - ZnO"*, um óxido metálico, dopado com uma mistura de outros óxidos metálicos, passou a ser utilizado na construção de pára-raios.

Os pára-raios a óxido metálico, devido a características particulares de seus resistores, ou seja, seu alto grau de não linearidade, podem ser construídos sem centelhadores de espécie alguma, se bem que, esta não foi a linha, originalmente, adotada por todos os fabricantes,* fato que, permite aos pára-raios a óxido metálico apresentar desempenho superior ao dos a carboneto de silício frente a descargas de manobras, bem como, nos sistemas de corrente contínua e nas substações blindadas.

** Nota -*

→ *A General Electric adotou, inicialmente, em seus pára-raios, classe estação, centelhadores paralelos, já a Ohio Brass, inicialmente, adotou em seus pára-raios, classe estação, centelhadores série.*

No momento, a evolução dos pára-raios a óxido metálico, conforme, parcialmente, abordado no Item *II.3*, segue um conjunto de orientações cujo principal objetivo é o projeto de resistores compactos, dotados de melhor desempenho frente as solicitações impostas pelos sistemas,[15-16] bem como, avaliar quais os reais ganhos que seriam obtidos com a reintrodução dos centelhadores série nos projetos de pára-raios para sistemas em média tensão.[17→20]

permitir a circulação livre de ar, rigidamente conectadas a um suporte isolante em mármore ou porcelana. Um único terminal de terra se encontra conectado aos cilindros exteriores e os terminais de linha, em número de 2, aos cilindros interiores, conforme mostra a Figura *I.2.1.*

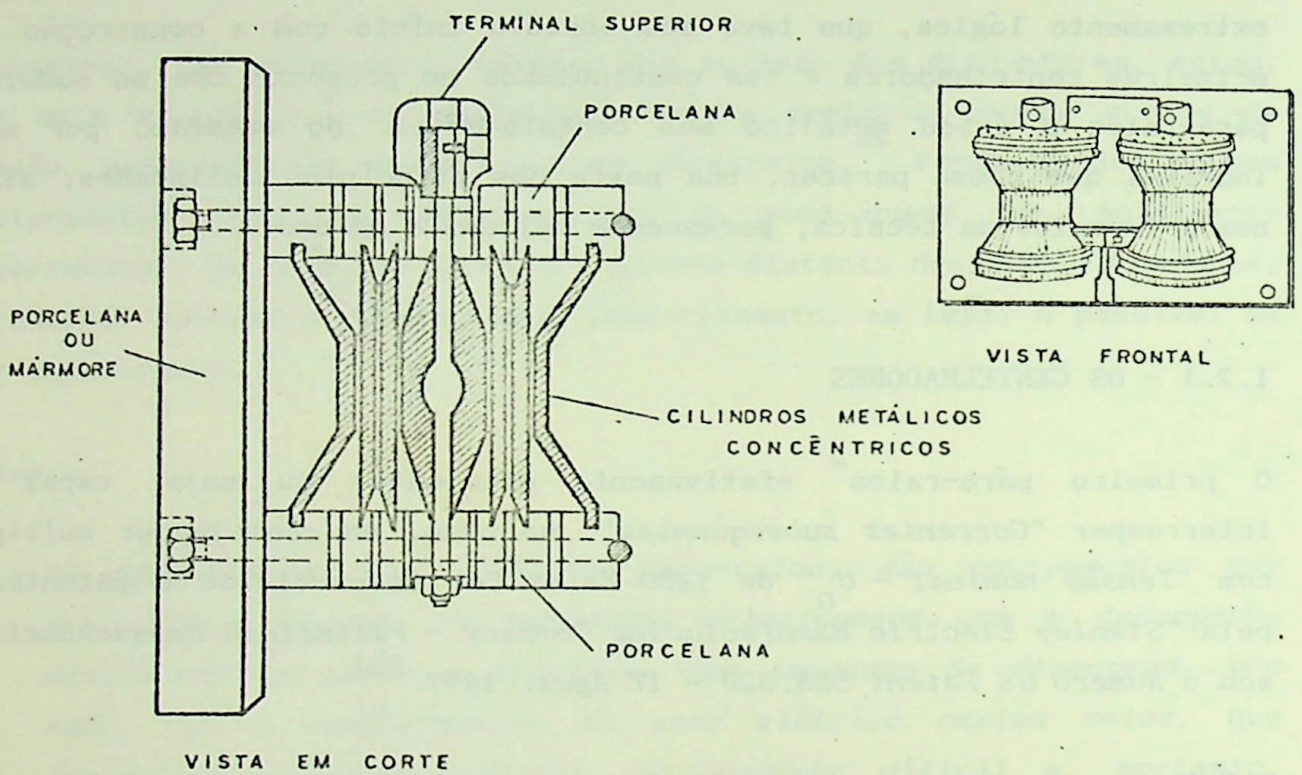


Figura I.2.1 - Pára-raios Stanley Electric Manufacturing Company Conforme Patente US 588.320 de 17 Agosto 1897[3]

Os impulsos de corrente atingem o cilindro central do pára-raios e, entre os terminais de linha e terra existem 3 espaçamentos em ar perfazendo um total de *4.7625 mm*, capaz de suportar, sob freqüência industrial, única real possibilidade de se medir a suportabilidade de dielétricos na época, uma tensão de *5 kV.** Uma vez vencida a rigidez dielétrica do meio entre os eletrodos, o impulso de corrente passa a circular pelo pára-raios sendo seguido pela corrente subseqüente que, devido a forma dos eletrodos cilíndricos, sofre um deslocamento ascendente sendo, por conseguinte, extinta em um dos zeros da forma de

tensão.**

Notas -

* - *Medidas realizadas em alta freqüência, não há indicação sob qual valor, apontam uma suportabilidade inferior a 2.5 kV*

** - *Para circuitos com tensão de operação superior a 1 kV, estes dispositivos são conectados em série.*

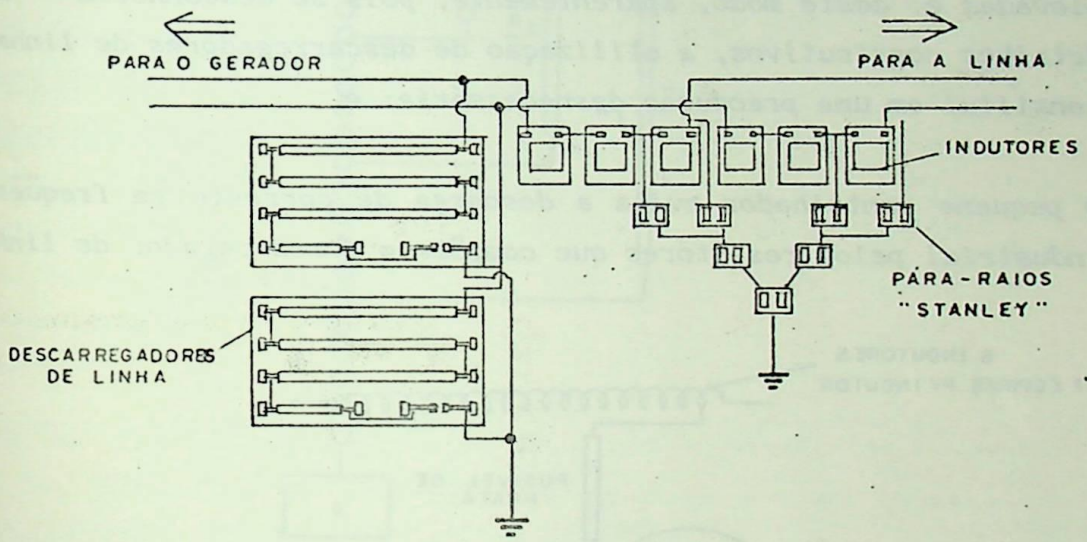


Figura I.2.2 - Diagrama de Conexão de um Pára-raios Stanley Electric Manufacturing Company[3]

A Figura *I.2.2* mostra o diagrama de conexão de um pára-raios "*Stanley Electric*", no qual é possivel notar a existência de bobinas auxiliares* entre cada pára-raios e o equipamento protegido. Quando utilizado na proteção de entradas de linhas, este pára-raios necessita de um equipamento complementar para prover a descarga da mesma, denominado, "*Descarregador de linhas*"** constituído de um pequeno centelhador em série*** com resistores, da ordem de *50 MΩ*, tubulares, construídos com

partículas metálicas oxidadas.

Notas -

* - *As bobinas conectadas entre os pára-raios e o equipamento protegido, também conhecidas como "Choke Coils", são divididas em segmentos de polaridade oposta e, dispostas de modo a apresentar um elevado coeficiente de indução mútua;*

** - *Com função básica, de descarregar as cargas acumuladas nas capacitâncias das linhas, que nestes níveis de tensão não são elevadas e, deste modo, aparentemente, pois se desconhecem*[3] *mais detalhes construtivos, a utilização de descarregadores de linha se constitui em uma precaução desnecessária; e*

*** - *O pequeno centelhador evita a descarga de corrente em freqüência industrial pelos resistores que compõem o descarregador de linhas.*

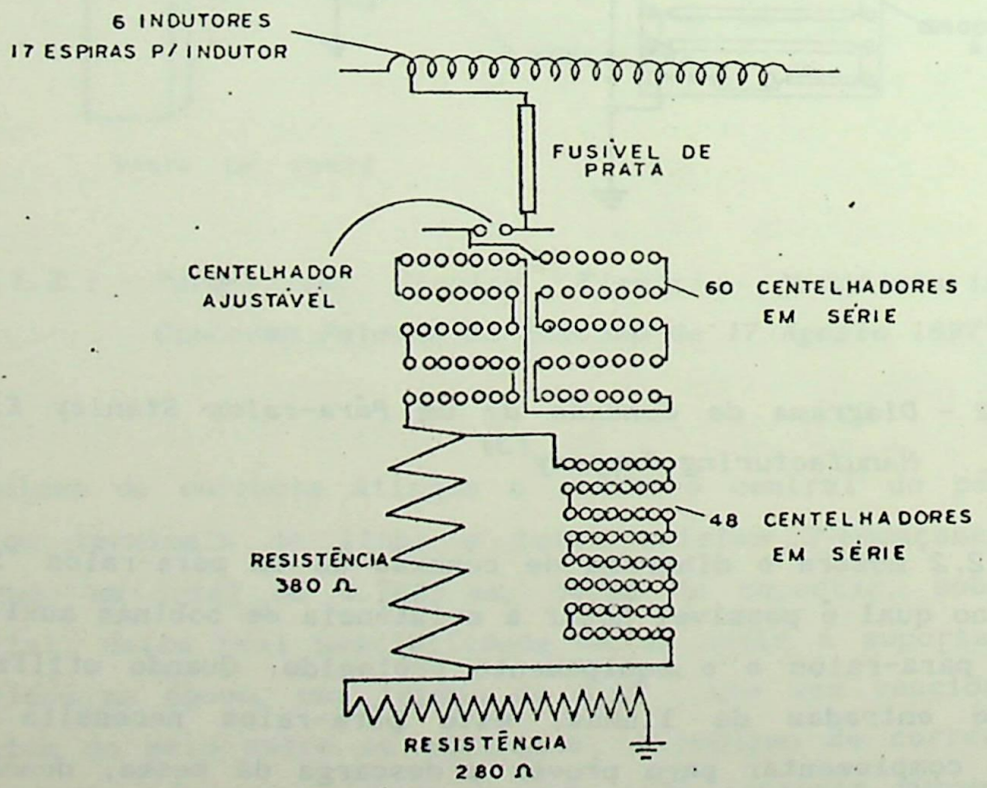


Figura I.2.3 - Circuito Equivalente de um Pára-raios Multi-Cilindros Construído pela Westinghouse Electric Corporation[3]

A Figura *I.2.3*, mostra, de forma esquemática os pára-raios construídos pela *"Westinghouse Electric Corporation"*, com base nos fundamentos teóricos relativos aos fenômenos associados aos *"non-arcing metals"*, utilizados em uma das linhas de transmissão da *"UHE de Niagara Falls"*, conhecidos como, *"pára-raios multi-centelhadores"*, [3-5-22-24] ou ainda, *"pára-raios multi-cilindros"*. [21-23-24]

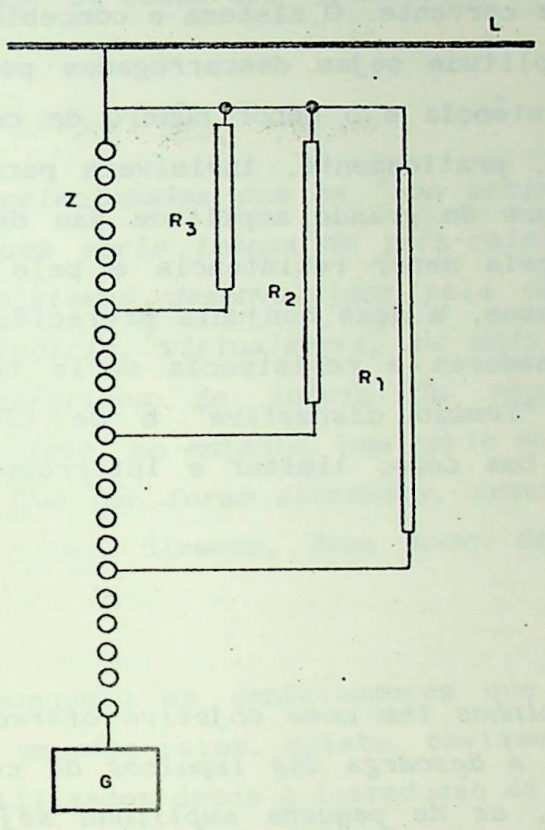


Figura I.2.4 - Circuito Equivalente de um Pára-raios Multi-Cilindros Variante Multi-Caminhos [3-5-22-24]

Conforme mostra a Figura *I.2.3* os *"pára-raios multi-cilindros"*, em específico para *"Tensão nominal - U_n"* de *20 kV*, são compostos por um fusível, cujo objetivo é desconectar o pára-raios defeituoso do sistema, em série com um arranjo formado por um centelhador esférico principal, ajustável, dois conjuntos de cilindros, construídos com um liga metálica dotada de característica *"non arcing"*, separados por um espaçamento em ar da ordem de *0.79375 mm*, que constituem o sistema *"centelhadores multi-cilindros"* e, por dois resistores, um dos quais com *380 Ω* curto-circuitado, durante a descarga de impulsos de grande amplitude por um dos conjuntos de cilindros. O sistema assim constituído, adequado

somente para instalação interna, é montado em painéis em mármore sobre rodas de modo a prover maior flexibilidade de operação e manutenção.

A Figura *I.2.4* mostra uma variante de *"pára-raios multi-centelhadores"* largamente utilizada, denominada *"pára-raios multi-caminhos"*, [3-5-22-24] que é projetado para oferecer uma série seletiva de caminhos para a descarga dos impulsos de corrente. O sistema é concebido de modo que os impulsos de pequena amplitude sejam descarregadas pelo caminho série formado pela maior resistência e o menor número de centelhadores fato que, em tese, as torna, praticamente, invisíveis para os sistemas de potência.* Já os impulsos de grande amplitude são descarregados pelo caminho série formado pela menor resistência e pelo maior número de centelhadores. Nestes casos, a ação conjunta oferecida pela associação entre número de centelhadores e resistência série tem como objetivo apresentar valores de *"Tensão disruptiva"* e de *"Tensão residual"*, razoavelmente próximos, bem como, limitar e interromper as *"Correntes subseqüentes"*.**

Notas -

** - O sistema multi-caminhos tem como objetivo oferecer uma série de possibilidades para a descarga dos impulsos de corrente, de modo que, principalmente, os de pequena amplitude sejam, virtualmente inócuos, pois, as correntes subseqüentes associadas com os mesmos são limitadas, pela elevada resistência série, a alguns ampéres;*

*** - O sistema adotado tenta reproduzir, de maneira extremamente engenhosa, o comportamento não linear oferecido pelos resistores a carboneto de silício e a óxido metálico, ou seja, tenta oferecer um caminho de elevada resistência para impulsos de pequena amplitude, bem como, um caminho de baixa resistência para impulsos de elevada amplitude.*

O sistema *"multi-caminhos"* foi utilizado na construção de pára-raios com *"Tensão nominal - U_n"* de até *10 kV*, já o sistema *"multi-centelhador"*, como tradicionalmente concebido, foi utilizado na construção de

pára-raios com *"Tensão nominal - U_n"* superior a *10 kV*.[22]

Uma série imensa de pára-raios que fazem uso dos princípios relativos aos *"non-arcing metals"* foram construídos no início do *Século XX*, em ambos lados do *Atlântico* e, deste modo, poucas diferenças, em alguns casos, somente física, apresentam em relação aos *"pára-raios multi-centelhadores"* ou mesmo aos *"pára-raios multi-caminhos"*.*

** Nota -*

→ *Os princípios relacionados com os "non arcing metals" permitiram a construção de uma série imensa de pára-raios, em específico, foram abordados os sistemas desenvolvidos pela General Electric e pela Westinghouse Electric, virtualmente, os dois maiores fabricantes de equipamentos elétricos do início do século.*[26] *É conveniente ressaltar que existe, no entanto, uma série de sistemas, razoavelmente semelhantes, e que não foram abordados, desenvolvidos por companhias européias tais como, Siemens, Asea Brown Boveri, Sprecher Energie, entre outras.*

Aliado a este conjunto de centelhadores que procuram desempenhar a função básica de um pára-raios, existe, obviamente, uma série imensa de centelhadores, utilizados desde a introdução da industria telegráfica e, dentre estes, os mais utilizados são os centelhadores haste-haste, esfera-esfera e chifre. Uma série de outros centelhadores, não tão elaborados quanto o sistema *"multi-centelhadores"* foi desenvolvida, objetivando, principalmente, melhorar o desempenho frente a impulsos com alta taxa de crescimento, mas, em qualquer dos casos o principal problema é o relativo a interrupção das *"Correntes subseqüentes"*, cujo valor máximo, nos centelhadores, fica por volta de *100 Ampéres*,[25] fato incompatível com o desenvolvimento de qualquer sistema em alta tensão e potência e que, fatalmente, implica na interrupção do fornecimento de energia por atuação da proteção contra sobre correntes e, em último caso, na destruição dos centelhadores ou correspondentes pára-raios.

Contornar a série de fenômenos responsáveis pelas falhas que ocorrem com

os centelhadores ou correspondentes pára-raios multi-centelhadores implica em rever globalmente os projetos de pára-raios, ou seja, abandonar a concepção básica relacionada com os centelhadores, bem como, definir novas soluções para os resistores série.

I.2.2 - OS PRIMEIROS ELEMENTOS NÃO LINEARES

A primeira solução, objetivando a construção de um resistor não linear, efetivamente viável, utilizou uma série de dispositivos eletrolíticos, conhecidos como, *"células em alumínio"*.[5-6]

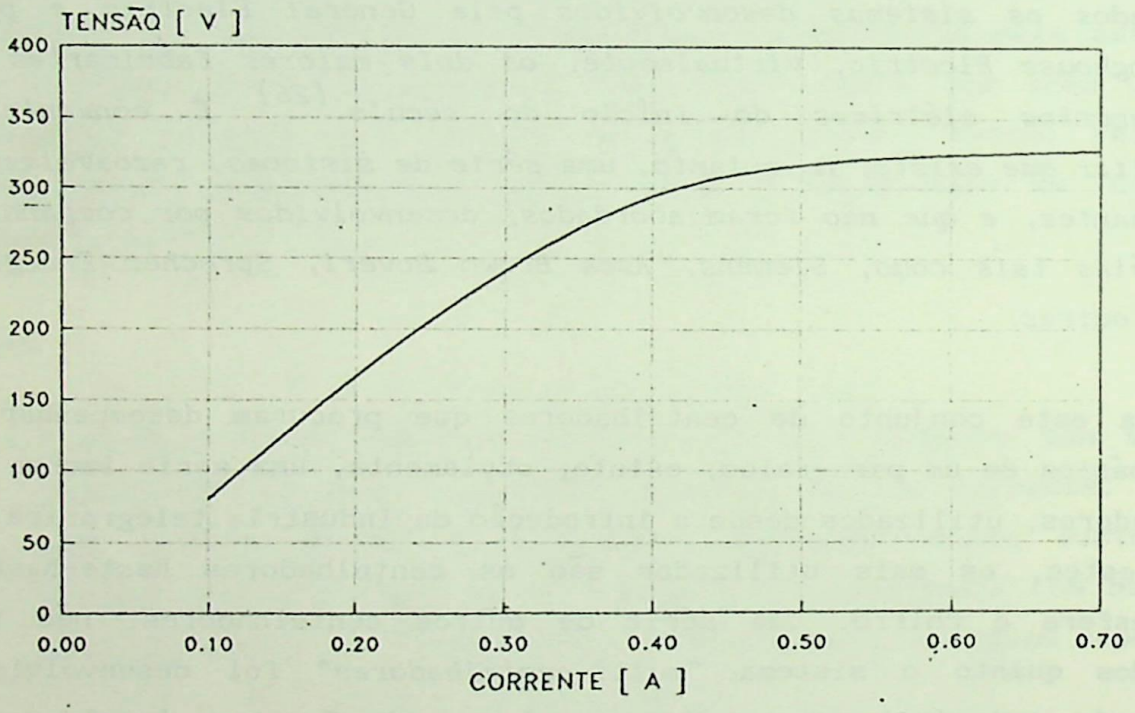


Figura I.2.5 - Característica Tensão - Corrente de uma Célula em Alumínio[6]

A resistência oferecida a passagem de corrente pelas células em alumínio, se encontra diretamente relacionada com a espessura da camada de hidróxido de alumínio, um material isolante, formada pela própria corrente, depositada sobre os eletrodos, estes, normalmente, com forma cônica. Conforme mostra a Figura *I.2.5*, por projeto, cada célula em alumínio suporta uma tensão aplicada entre *250 Volts* e *300 Volts* que,

superada, resulta em uma perfuração pela qual circula corrente que, por sua vez, atua no sentido de recompor o filme de hidróxido de alumínio, fato que resulta em um processo dinâmico de limitação de corrente.

As principais desvantagens oferecidas pelos *"pára-raios eletrolíticos"* são, praticamente, de carácter operacional,[5] e, dentre elas, destacam-se a necessidade de recomposição, em bases diárias, do filme de hidróxido de alumínio, em tese, uma espécie de recarga, o uso de um eletrólito, que em alguns casos, também necessita ser reposto, o elevado grau de dificuldade ao se realizar ensaios para determinar sua condição operativa em campo, ou seja, basicamente, seu nível de carregamento, bem como, os problemas impostos pela sua manutenção periódica, extremamente, trabalhosa e, portanto, de alto custo, realmente um autêntico exercício de paciência, pois, dependendo do caso, significa desmontar, remontar e recarregar com eletrólito, todo o sistema no campo.

Os inconvenientes existentes com as *"células em alumínio"*, foram, em parte, contornados a partir do momento da introdução das *"células a filme óxido - OF"*,[4→6] construídas com um composto químico seco, normalmente, na forma de pó que uma vez, ligeiramente, aquecido muda drasticamente da condição de composto condutor para a de composto isolante.

No caso das *"células a filme óxido - OF"* desenvolvido pela *General Electric"* foi utilizado, como componente básico do resistor série, um composto denominado *"Peróxido de chumbo - PbO_2"*, normalmente, na forma de pó, que sob o efeito de temperaturas da ordem de aproximadamente *150°Celsius* sofre uma redução para *"Chumbo vermelho - Pb_3O_4"*, composto que, por sua vez, apresenta reduzida resistividade e que sob o efeito de temperaturas ligeiramente, superiores, sofre nova redução se transformando em *"Litargíria - PbO"*, composto que, por sua vez, apresenta elevadíssima resistividade.*

* *Nota -*

→ *Os Óxidos de bismuto, utilizados nos resistores a óxido metálico, além*

de outros compostos químicos apresentam características físicas semelhantes as do Peróxido de chumbo.

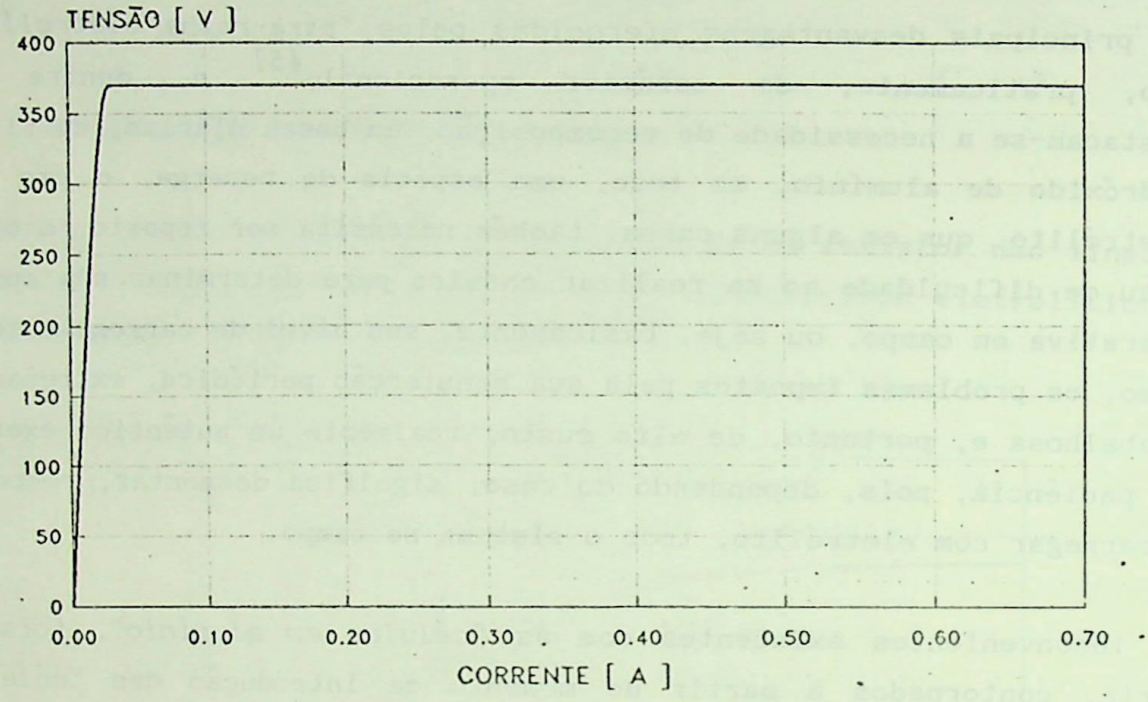


Figura I.2.6 - Característica Tensão - Corrente de uma Célula a Filme Óxido[6]

As células em *"Peróxido de chumbo - PbO_2"*, que uma vez conectadas em série constituem os resistores dos *"pára-raios a filme óxido"* são constituídas por dois eletrodos metálicos, revestidos por um material isolante,* normalmente um verniz, separados por um anel em porcelana e preenchidas com *"Peróxido de chumbo - PbO_2"*. Soa óbvio que a descarga de um impulso de corrente, primeiramente, implica na perfuração da camada de verniz isolante, fato que, consequentemente, resulta na geração de calor e elevação da temperatura, e, a partir do momento que a temperatura atinge valores em torno de *150°Celsius*, é formado um filme isolante de *"Litargíria - PbO"*, que atua no sentido de selar a perfuração que deu início a todo processo.

** Nota -*

→ *Dependendo do material utilizado no revestimento dos eletrodos é*

possível controlar a tensão, a partir da qual todo o processo de condução de corrente tem início.

Conforme mostra a Figura *I.2.6*, antes da ruptura dielétrica da camada isolante que reveste os eletrodos das *"células a filme óxido - OF"* circula pela mesma, uma corrente de pequena amplitude, relacionada com as possíveis fugas pela camada isolante e através do anel de porcelana, a partir da ruptura, que se manifesta em um ou mais pontos do eletrodo o fluxo de corrente, virtualmente, não encontra nenhuma resistência e, devido a densidade de corrente nos pontos de perfuração do filme isolante ser elevada, a temperatura cresce sob taxas elevadas e, deste modo, tem início o processo de transformação do *"Peróxido de chumbo - PbO_2"* em *"Litargíria - PbO"*, que resulta na reconstituição do filme isolante e na limitação da corrente.

Um outro tipo de célula utilizada na substituição das *"células em alumínio"* e que apresenta, basicamente, as mesmas vantagens oferecidas pelas *"células a filme óxido - OF"*, são os *"elementos válvulas"* desenvolvidos pela *Westinghouse Electric Corporation*, com base no princípio *"Autovalve"*.

O conjunto de idéias embutido atrás do princípio *"Autovalve"*, desenvolvido pela *Westinghouse Electric Corporation*, assume a hipótese de que é possível construir um pára-raios sem auxílio de elementos resistivos de espécie alguma, fato que, em última análise, implica na construção de um centelhador que apresente para tensão disruptiva um valor, aproximadamente, igual a queda de tensão entre seus eletrodos quando da descarga de corrente, em tese, a definição de um pára-raios ideal.

A corrente flui através de um centelhador via descargas disruptivas ou luminosas, a queda de tensão durante uma descarga disruptiva em um meio dielétrico, ou seja, entre os terminais de um arco elétrico, é da ordem de *50 Volts*, enquanto que, durante uma descarga luminosa é da ordem de algumas centenas de *Volts*, logo, por razões eminentemente práticas, as

descargas luminosas são as preferidas e, estudos mostram que em centelhadores com espaçamento entre eletrodos de, aproximadamente, até *0.127 mm* a queda de tensão nas descargas luminosas é constante para uma grande faixa de densidades de corrente.* De modo complementar, caso o material dos eletrodos apresente resistividade elevada, a descarga é distribuída ao longo de toda a face do eletrodo, ou seja, as concentrações de corrente e calor são evitadas e, deste modo, a descarga não evolui na direção da formação de um arco.

** Nota -*

→ *As descargas luminosas que ocorrem em pequenos centelhadores apresentam um comportamento semelhante ao relativo as pré-descargas em grandes centelhadores tubulares.*

Todo o processo é, pelo menos, em tese, perfeitamente coerente, sendo que o único senão se encontra no fato de que o espaçamento adequado para que seja encontrada uma solução, pelo menos viável, é da ordem de *0.0762 mm*, ou seja, aparentemente inexequível, pelo menos na época. No entanto, é amplamente conhecido o fato de que a disrupção de um dielétrico gasoso entre eletrodos, separados por espaçadores cerâmicos, ocorre junto aos mesmos e sob um valor de tensão bastante inferior ao necessário para provocar a disrupção deste meio dielétrico,* este fato é o utilizado na construção dos primeiros *"pára-raios autovalve"*.

** Nota -*

→ *Este fenômeno é presentemente utilizado nos centelhadores equipados com pré-ionizadores para controlar a tensão disruptiva.*

A estrutura utilizada pela *Westinghouse Electric Corporation* em seus primeiros *"pára-raios autovalve"*, é constituída por uma coluna de eletrodos separados por espaçadores, em mica, de modo a resultar em centelhadores, com distância entre eletrodos da ordem de *0.127 mm*, e

suportabilidade de aproximadamente *350 Volts*, a capacidade de descarga de corrente destes dispositivos é, por sua vez, controlada pela seleção de eletrodos com área adequada.

O processo de evolução do sistema *"filme óxido"*, objetivou, em última instância, obter uma série de pára-raios para sistemas em média tensão, dotados de custo compatível com o dos equipamentos protegidos e, deste modo, resultou no sistema, tecnicamente, denominado *"pellet"*, baseado em princípios da química coloidal que, abordam o comportamento das partículas sólidas, em específico, os que tratam da adesão e recobrimento de partículas de grande diâmetro por aquelas de menor diâmetro, As denominadas *"pellets"* são obtidas através do processamento e recobrimento, com um material isolante na forma de pó, de pequenas esferas de *"Peróxido de chumbo - PbO_2"* que, em tese resulta na transformação de cada esfera em uma *"célula a filme óxido"*.

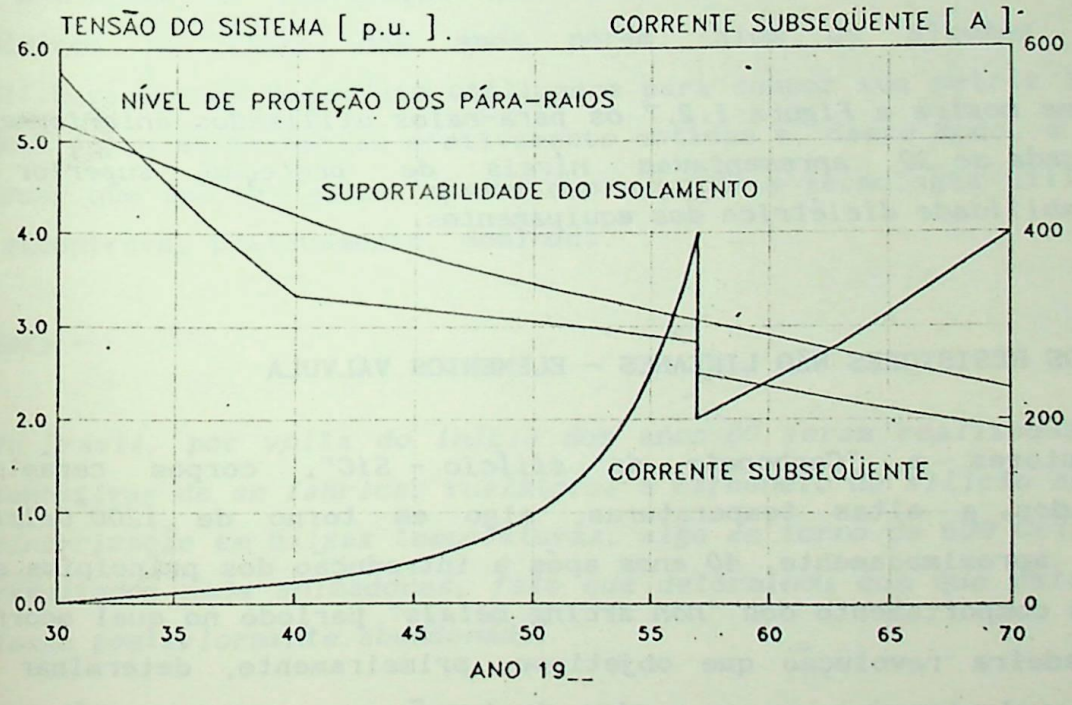


Figura I.2.7 - Níveis de Proteção Corrente Subseqüente dos Pára-raios e a Suportabilidade Dielétrica dos Equipamentos[27]

Os pára-raios distribução tipo *"pellet"* permaneceram no mercado por, aproximadamente *30* anos e, quando comparados com os a *"filme óxido - OF"*

são de construção bem mais simplificada, pois são constituídos por um invólucro em porcelana contendo, em seu interior, um conjunto de centelhadores planos separados por espaçadores cerâmicos e uma quantidade de *"pellets"* compatível com a *"Tensão nominal - U_n"* do pára-raios.

Os sistemas acima são os mais representativos das primeiras tentativas de se projetar elementos resistivos não lineares para a construção de pára-raios, que teve seu grande impulso,* conforme mostra a Figura *I.2.7*, por volta dos meados dos anos *30* com a introdução dos primeiros resistores a carboneto de silício, *[1-2-10-27]* também conhecidos, a semelhança dos centelhadores projetados segundo o princípio *"Autovalve"* conforme definido pela *Westinghouse Electric Corporation*, como *"elementos válvula"*.

* *Nota -*

→ *Conforme mostra a Figura I.2.7 os pára-raios utilizados anteriormente a Década de 30 apresentavam níveis de proteção superior a suportabilidade dielétrica dos equipamentos.*

I.2.3 - OS RESISTORES NÃO LINEARES - ELEMENTOS VÁLVULA

Os resistores a *"Carboneto de silício - SiC"*, corpos cerâmicos sinterizados a altas temperaturas, algo em torno de *1200°Celsius* surgiram, aproximadamente, *40 anos* após a introdução dos princípios que definem o comportamento dos *"non arcing metals"* período no qual ocorreu uma verdadeira revolução que objetivou, primeiramente, determinar as grandezas relacionadas com os surtos de tensão nos sistemas elétricos, principalmente, as de origem atmosférica, bem como, construir equipamentos e definir técnicas de ensaio representativas.

Os resistores a carboneto de sílicio, conforme, parcialmente, abordado no Item *II.2*, foram os primeiros corpos sólidos, dotados de todas as principais características necessárias à construção de equipamentos

compactos, haja vista, que os primeiros pára-raios a carboneto de silício permitiram uma redução em volume e peso em torno de *78 %* e *28 %*, respectivamente, o que implica, principalmente, em uma redução de custos em equipamento e investimento em área, principalmente, nas subestações.

A partir da *Segunda Guerra Mundial* a evolução ocorrida em termos tecnológicos, colaborou para que fossem projetados pára-raios a carboneto de silício cada vez mais sofisticados, dotados de níveis de proteção cada vez mais reduzidos que, em conjunto com a evolução dos sistemas elétricos de potência, passaram a apresentar bases de revisão, virtualmente, quinqüenais, fato que permitiu às técnicas de proteção contra surtos de tensão, evoluirem rapidamente, proporcionando uma crescente redução nos níveis de suportabilidade dos equipamentos e, por conseguinte, nos seus custos diretos.

Os processos de fabricação dos resistores a carboneto de silício evoluiram ao longo dos anos porém, além de algumas pequenas modificações, nos materiais utilizados para compor sua matriz isolante, poucas foram as melhorias efetivamente obtidas e, deste modo, é possível afirmar que por volta dos meados dos anos *70* a tecnologia utilizada já se encontrava, praticamente, dominada.*

** Nota -*

→ *No Brasil, por volta do início dos anos 80 foram realizadas algumas tentativas de se fabricar resistores a carboneto de silício através de sinterização em baixas temperaturas, algo em torno de 600°Celsius, com resultados nada animadores, fato que determinou com que esta técnica fosse posteriormente abandonada.*

O grau de sofisticação atingido pelos pára-raios a carboneto de silício atingiu o seu ápice com a construção dos *"Pára-raios ALUGARD - II"*, pela *General Electric*, equipados com centelhadores ativos e um sistema de equalização de potencial bastante elaborado, de modo, a permitir frente a descargas atmosféricas um comportamento, normalmente, superior aos

seus equivalentes a óxido metálico.*

** Nota -*

→ *Isto é um fato e, basta para tanto, que sejam consultados os respectivos catálogos técnicos mas, considera-se conveniente relembrar, que não é somente o Nível de Proteção Frente a Impulsos Atmosféricos, ou mesmo, Frente a Impulsos de Manobra, o responsável pela definição do desempenho de um pára-raios, mas sim, qual é a sua resposta frente a um conjunto de solicitações, em tese, impostas pelo sistema, que uma vez analizadas de modo isolado podem implicar em conclusões dúbias, obviamente inconsistentes.*

O rápido incremento da *"Cerâmica Técnica"* para fins eletrotécnicos permitiu, praticamente, nos fins dos anos *70*, fabricar um novo resistor não linear, composto por *"Óxido de Zinco - ZnO"*, um óxido metálico, dopado com uma mistura de outros óxidos metálicos, que a exemplo dos resistores a carboneto de silício, são corpos cerâmicos sinterizados a altas temperaturas, algo em torno de *1250°Celsius*.

Os pára-raios a óxido metálico devido a características particulares de seus resistores, ou seja, seu alto grau de não linearidade são, presentemente, exceto em alguns casos específicos,* construídos sem centelhadores de espécie alguma, se bem que esta não foi a linha, originalmente adotada por todos os fabricantes e, deste modo, apresentam desempenho superior ao dos a carboneto de silício frente a descargas de manobras, bem como, nos sistemas de corrente contínua e nas subestações blindadas, conforme, parcialmente, abordado no Item *II.3*.

** Nota -*

→ *Alguns fabricantes de pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão, no Brasil*[18-20] *e nos Estados Unidos*[19] *e de pára-raios especiais para proteção de torres de transmissão de sistemas em alta tensão contra descargas de retorno adotam*

centelhadores série em seus pára-raios a óxido metálico.

As solicitações impostas aos resistores a óxido metálico utilizados nos pára-raios sem centelhadores são, obviamente, superiores as impostas aos seus equivalentes a carboneto de silício e, deste modo, sua introdução, principalmente, nos sistemas de extra-alta tensão foi acompanhada de uma série de estudos com objetivo de determinar seu desempenho em campo. Um dos primeiros pontos fracos detectados foi a existência de um processo de degradação, relativamente acentuado, frente a solicitações em freqüência industrial, que após uma série de experiências foi praticamente contornado com a introdução de uma série de resistores com desempenho mais estável não só frente a estas solicitações como, também as relacionadas com impulsos de origem atmosférica e de manobra e, deste modo, utilizados, indistintamente, em pára-raios para sistemas em média, alta, extra-alta e ultra-alta tensão.

Os resistores a óxido metálico apresentam características técnicas, quando comparadas com as fornecidas pelos a carboneto de silício, extremamente constantes e isto propicia com que sejam definidos processos produtivos dotados de um elevado grau de automação, fato que permite, em tese, a redução dos custos que, fatalmente implica na descontinuidade de produção dos pára-raios a carboneto de silício, pelo menos, para sistemas em alta tensão e superiores.

I.3 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTADO DA ARTE

The knowledge of the world is only to be acquired in the world
(Philip, Earl of Chesterfield, 1694 - 1773)

A constante procura por novos horizontes, associada ao desenvolvimento populacional e econômico é, normalmente, acompanhada de uma crescente necessidade por energia elétrica, uma de suas formas mais puras e, deste modo, tendo em mente que os processos de desenvolvimento de qualquer sociedade moderna se fizeram as custas da exaustão dos recursos mais próximos aos centros de consumo, o desenvolvimento contínuo, implica na exploração de novos recursos que, obviamente, por se situarem a distâncias, via de regra, consideráveis, são responsáveis por um conjunto de dificuldades adicionais.

Logo, a necessidade de explorar novos e distantes recursos energéticos, bem como, a elevada demanda imposta pelas sociedades modernas, tem atuado como forte propulsor no desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência, cujos dispositivos de proteção contra sobretensões e sobrecorrentes, os pára-raios e os disjuntores,* respectivamente, foram e são ainda no presente projetados com base em uma razoável série de considerações retiradas de anos de experiências de campo e laboratório.

** Nota -*

→ *Neste caso, o termo "pára-raios" é utilizado em seu sentido mais amplo, já o termo "disjuntores" é utilizado com o intuíto de representar somente seus polos, ou seja, parte do equipamento completo.*

Considerando que o progresso das técnicas associadas a proteção contra surtos de tensão se encontra intimamente correlacionado com o

desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência foi somente a partir da introdução dos pára-raios a carboneto de silício e do advento dos computadores digitais a, aproximadamente, *30* anos atrás, que as mesmas foram enormemente impulsionadas, pois, foi este fato que associado a uma série de melhorias nos métodos e equipamentos para ensaios em laboratório e em campo, que permitiram gerar uma massa crítica de dados sobre as solicitações dielétricas impostas aos equipamentos, que possibilitou a execução de uma série de estudos, cujo principal resultado foi a definição de um conjunto de procedimentos que tem como objetivo, otimizar a expansão dos sistemas elétricos de potência.

Principalmente, após o advento dos sistemas em *345 kV*, nos quais foram detectados os primeiros problemas relativos a capacidade de absorção de energia, a evolução dos projetos de pára-raios foi, sistematicamente, realizada com o auxílio de constantes realimentações originárias de experiência de campo, por sua vez, substancialmente suportadas por resultados de estudos de transitórios e de ensaios em laboratório.

Com relação ao atual estágio das técnicas de proteção contra surtos, a utilização plena destes procedimentos tem permitido concentrar esforços na determinação das solicitações impostas pela poluição nos pára-raios a óxido metálico para sistemas de alta e extra-alta tensão;[28-29] na proteção de torres de transmissão por pára-raios a óxido metálico* contra de descargas de retorno;[30] na substituição de resistores de pré-inserção por pára-raios a óxido metálico;[31] na aplicação de centelhadores em subestações em alta tensão;**[32→36] na definição de técnicas adequadas para a proteção de subestações blindadas,[15] transformadores,*** cabos isolados de potência;**** na utilização de invólucros de material polimérico; na definição da capacidade de absorção de energia dos resistores a óxido metálico;[37-38] no envelhecimento frente a impulsos de corrente entre outros.

Notas -

* - *Normalmente em locais de solos de alta resistividade e, usualmente, são construídos com centelhadores série pois, deste*

modo, evitam falhas permanentes para a terra;

** - *A Norma ANSI - C62.2 relata uma série de procedimentos relativos a aplicação de centelhadores em subestações de até 138 kV. e, no momento, estão sendo realizados estudos de modo a permitar estender esta aplicação para subestações em 230 kV;*

*** - *Os estudos que estão sendo realizados tem como objetivo, instalar resistores a óxido metálico junto a bobinas específicas que compõem os enrolamentos dos transformadores, ou pára-raios diretamente imersos em óleo como em pequenos transformadores de distribuição;*[39] *e*

**** - *Desenvolvimento de pára-raios "Tipo Elbow" e similares.*

Por seu lado, as pesquisas em termos de novos materiais e técnicas de produção também tem evoluido de modo bastante rápido e o principal objetivo destes trabalhos é a obtenção de resistores a óxido metálico mais compactos, robustos e capazes de fornecer níveis de proteção mais reduzidos;* a substituição de alguns dos óxidos dopantes por equivalentes de menor custo e,[40] principalmente, obter resistores a óxido metálico aptos a proteger circuitos eletrônicos.**

Nota -

* - *Principalmente frente a impulsos atmosféricos; e*

** - *Estes resistores necessitam possuir baixa tensão nominal, bem como, um mínimo de resistência mecânica; em última análise, grãos de elevado diâmetro médio, fato, que implica no desenvolvimento de novas técnicas cerâmicas, ou em trabalhar com outros materiais.*

II - EQUIPAMENTOS PARA PROTEÇÃO CONTRA SURTOS DE TENSÃO

All animals are equal, but some are more equal than others
(George Orwell, Animal Farm)

II.1 - CENTELHADORES

Semper Fidelis
(U.S. Mariner Corps)

Os centelhadores foram os primeiros e, sem sombra de dúvidas, os mais simples dispositivos de proteção contra sobretensões. Estes dispositivos, na sua forma mais básica são construídos com o auxílio de um eletrodo móvel, conectado a linha de suprimento do equipamento que se deseja proteger, por exemplo, um transformador, e de um eletrodo fixo, conectado geralmente diretamente à terra, ou às partes metálicas dos equipamentos protegidos.

Existem vários tipos construtivos de centelhadores para sistemas em média tensão, que podem, dependendo do caso, apresentar características protetivas ligeiramente diferentes umas das outras. Dentre estes tipos, os mais utilizados são os apresentados na Figura *II.1.1.*

O maior problema imposto por um centelhador é o fato do mesmo oferecer um caminho de baixa impedância para a terra após sua disrupção pois, estabelece-se entre os eletrodos um arco de baixa impedância. Lembrar que a queda de tensão em um arco elétrico é basicamente função de seu comprimento e das condições de dissipação de calor. A corrente, em freqüência nominal que segue a operação de um centelhador, pára-raios, ou qualquer outro dispositivo de proteção contra sobretensões é denominada de Corrente Subseqüente. Em conseqüência disto, dependendo da tensão do sistema supridor, atentar que em circuitos de baixa tensão, telefônicos por exemplo, a queda de tensão no arco entre eletrodos é

relativamente alta, fato que permite a extinção natural da corrente subseqüente, bem como da impedância equivalente vista do ponto de instalação do centelhador, pode vir a se estabelecer entre eletrodos, um arco de característica permanente, que vai ser interrompido pela atuação de um dispositivo de proteção contra faltas para a terra.

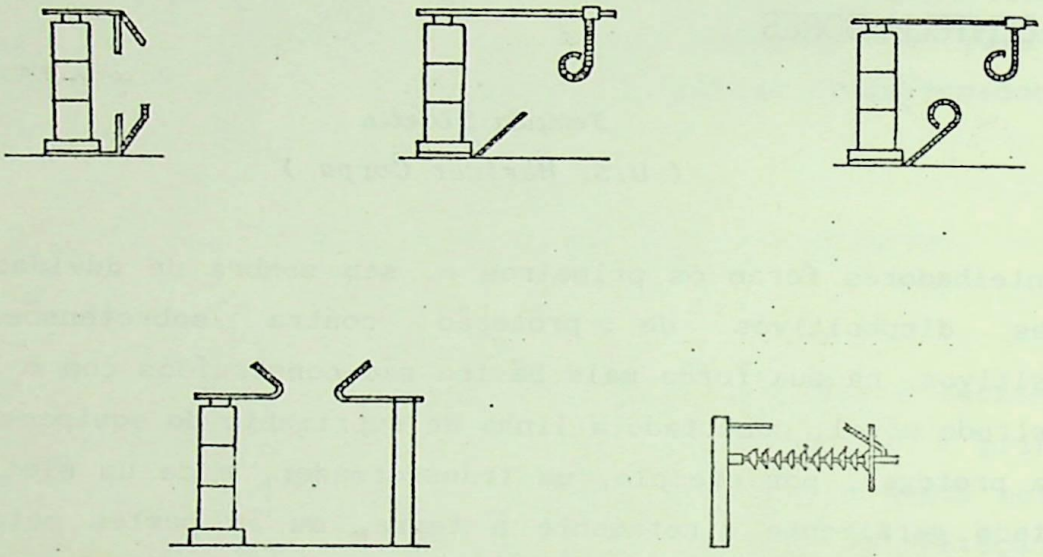


Figura II.1.1 - Tipos Construtivos de Centelhadores[1]

Do exposto acima, dependendo do caso, tem-se :

- Quase todas as operações de centelhadores, atentar que os centelhadores possuem capacidade limitada de interrupção de corrente subseqüente, que se encontra ainda relacionada com a tensão entre os eletrodos, normalmente na faixa de *50* a *100* ampéres, criam faltas nos sistemas que podem vir a afetar a confiabilidade do suprimento de muitos consumidores pois, mesmo quando o centelhador opera uma única vez por ano em um alimentador radial típico, esta operação resulta em um grande número de desligamentos devido ao grande número de transformadores conectados à rede, comprometendo, deste modo,

seriamente, os índices padrão de desempenho dos sistemas.

- As elevadas amplitudes de corrente de falta existentes nos alimentadores modernos, dotados de características menos radiais, associadas a operações freqüentes, que resultam, virtualmente, sempre em faltas, aumentam o número de atuações e, por conseguinte, o desgaste dos equipamentos de proteção contra sobrecorrentes, junto as subestações ou mesmo a ramais específicos.

- A descarga de correntes elevadas, em freqüência industrial, causa a erosão dos dos eletrodos dos centelhadores resultando em níveis de proteção mais elevados, ou seja, margem de segurança reduzida.

Outra desvantagem apresentada pelos centelhadores, no caso, os aplicáveis à sistemas em média tensão, é o diminuto espaçamento em ar entre os eletrodos que pode vir a resultar na morte de pequenos pássaros e animais, fato que atua no sentido de aumentar o número de desligamentos, reduzindo pois a confiabilidade do sistema.

Óbviamente, as principais vantagens dos centelhadores são, as relacionadas com o seu baixo custo, robustez e simplicidade de construção.

Em termos técnicos, as falhas, envolvendo centelhadores, de modo direto, eventos, de baixíssima probabilidade, raramente afetam a confiabilidade dos sistemas ou mesmo a segurança do público em geral.

A aplicação de centelhadores, no contexto de sistemas em média tensão, fica restrita pois, a locais de baixo nível ceráunico, baixo nível de curto circuito e baixa densidade de carga, aliado, se possível, a dispositivos de proteção contra sobrecorrentes dotados de religamento automático. Nestes casos, as desvantagens acima apresentadas não comprometem sériamente a operação e a confiabilidade do sistema ao qual os centelhadores estão aplicados.

De modo geral, a aplicação de centelhadores à sistemas de distribuição,

consiste em determinar, experimentalmente, a característica tensão disruptiva - tempo até a disrupção versus espaçamento para o tipo construtivo escolhido, caso a mesma não exista, e ajustar qual o espaçamento é necessário para que não ocorra a operação do centelhador em condições consideradas normais, impondo desligamentos desnecessários, e que seja suficiente para oferecer a margem de segurança desejada, limitando assim, as sobretensões passíveis de impor danos aos equipamentos.

II.1.1 - CENTELHADORES HASTE - HASTE

Ao conjunto, par de eletrodos na forma de haste e espaçamento em ar, variável, denomina-se centelhador haste - haste.

A disrupção de um centelhador haste - haste, cujos princípios básicos se encontram delineados no *Anexo - I*, é uma função do espaçamento entre eletrodos e do tempo. Isto significa que o nível de proteção oferecido por este dispositivo depende da forma e do tempo de duração do surto de tensão incidente bem como das condições ambientais existentes.

II.1.1.1 - SUPORTABILIDADE FRENTE A TENSÕES EM FREQÜÊNCIA INDUSTRIAL

O espaçamento de um centelhador haste - haste deve ser ajustado de modo a que o mesmo venha a suportar as tensões operativas em freqüência industrial sob as piores condições atmosféricas. Consequentemente, por recomendação e resultados de campo, o espaçamento entre os eletrodos é ajustado, de modo que o centelhador venha a suportar a máxima sobretensão em freqüência industrial, fato que implica que:

$$U_{d_{60_{Hz}}} = 1.50\sqrt{2}\, U_{60_{Hz\ Max.}} \qquad (II.1.1.1.1)$$

onde :-

$U_{d_{60_{Hz}}}$ = Suportabilidade em Freqüência Industrial [kV_{Crista}];

$U_{60_{Hz\ Max.}}$ = Máxima Sobretensão em Freqüência Industrial [kV]

Logo, a suportabilidade média em freqüência industrial de um centelhador é dada por:

$$\overline{U}_{d_{60}} = U_{d_{60_{Hz}}} + 3\,\sigma \qquad (II.1.1.1.2)$$

onde :-

$\overline{U}_{d_{60}}$ = Suportabilidade Média em Freqüência Industrial [kV_{Crista}]; e

σ = Desvio Padrão da Tensão Disruptiva [kV_{Crista}]

Para a freqüência de 60 Hz, σ = 2 %, logo vem que:

$$\overline{U}_{d_{60}} = 1.06\ U_{d_{60_{Hz}}} \qquad (II.1.1.1.3)$$

O valor de suportabilidade, médio calculado acima, necessita ser corrigido segundo as condições atmosféricas, de modo a refletir o efeito das condições ambientais do local de instalação dos centelhadores, ou seja:

$$\overline{U}_{d_{60_P}} = \frac{KH}{KD}\ \overline{U}_{d_{60}} \qquad (II.1.1.1.4)$$

onde :-

$\overline{U}_{d_{60_P}}$ = Suportabilidade Média Padrão em Freqüência Industrial;

KH = Fator de Correção devido a Umidade; e

KD = Fator de Correção devido a Densidade do Ar.

A Figura II.1.2 mostra para um centelhador haste - haste qual a relação existente entre a suportabilidade média padrão em freqüência industrial e o espaçamento entre eletrodos. Com auxílio desta característica, o procedimento acima descrito, pode vir a ser tomado em sentido inverso e, deste modo, torna-se possível determinar qual a suportabilidade de um

centelhador ajustado para um determinado espaçamento entre eletrodos.

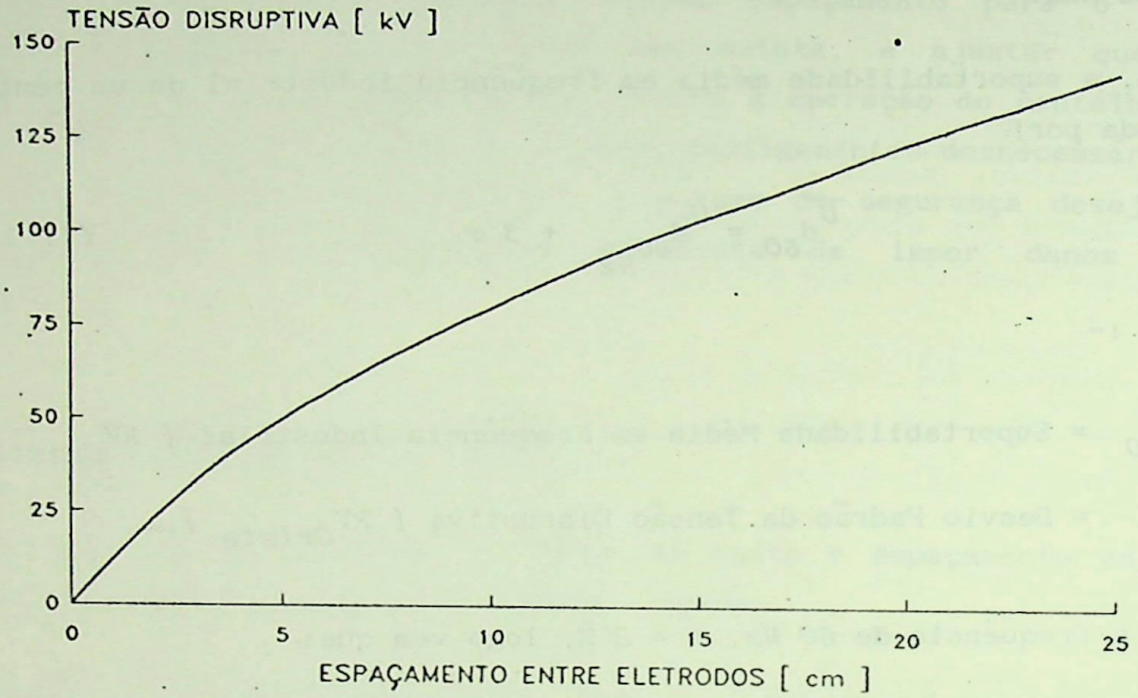


Figura II.1.2 - Suportabilidade Média Padrão de um Centelhador Haste - Haste[2]

II.1.1.2 - SUPORTABILIDADE FRENTE A IMPULSOS ATMOSFÉRICOS

Conforme posto, devido aos mecanismos de disrupção, existe uma dependência entre os valores de tensão disruptiva dos centelhadores e a forma de onda, isto implica, no caso de impulsos atmosféricos, impulsos rápidos com frente de onda da ordem de *1.0 μs*, que a disrupção se verifica para valores de tensão U_{dI}, mais elevados.

No cálculodo nível de proteção oferecido pelos centelhadores é comum fazer uso dos valores de tensão disruptiva frente a impulso com polaridade negativa, haja vista, que os mesmos são os que resultam nas maiores tensões suportáveis, ou seja, os que, uma vez utilizados, resultam no maior nível de proteção ou menor margem de segurança, deste modo vem:

$$U_{dI_{M_P}} = \overline{U}_{dI_P} + 3\,\sigma \qquad (II.1.1.2.1)$$

onde:

$U_{dI_{M_P}}$ = Máxima Tensão Disruptiva a Impulso Atmosférico Polaridade Negativa Padrão *[kV Crista]*;

$\overline{U}_{dI_P}$ = Tensão Disruptiva a Impulso Atmosférico Polaridade Negativa Media Padrão *[kV Crista]*; e

σ_I = Desvio Padrão sob Impulso Atmosférico

Para impulsos atmosféricos, $\sigma_I = 3\ \%$, logo vem que:

$$U_{dI_{M_P}} = 1.09\ \overline{U}_{dI_P} \qquad (II.1.1.2.2)$$

Os níveis de proteção são definidos quando de impulsos plenos, para tempos até a disrupção de *6 μs, 8 μs e 16 μs*, e, quando de impulsos íngremes para tempos até a disrupção da ordem de *0.5 μs*.

Atentar que, as correções, devido as condições atmosféricas, a exemplo do anteriormente exposto, devem vir a ser utilizadas quando do cálculo do valor correto do nível de proteção oferecido pelos centelhadores, o que finalmente resulta em:

$$U_{dI_M} = \frac{KD}{KH}\ U_{dI_{M_P}} \qquad (II.1.1.2.3)$$

onde:

U_{dI_M} = Máxima Tensão Disruptiva a Impulso Atmosférico Polaridade Negativa nas Condições Locais *[kV Crista]*.

De modo a consolidar o acima expôsto, seja determinar o ajuste de um centelhador para um sistema de *34.5 kV*, submetido as seguintes condições:

$U_{60Hz_{Max.}} = 1.25\ U_{\phi T}$

Condições Atmosféricas para Tensão Disruptiva Mínima

$T = 20\ ^{\circ}C$

$P = 730\ mm\ Hg$

Umidade Relativa = 20 %

Condições Atmosféricas para Tensão Disruptiva Máxima

$T = 35\ ^{\circ}C$

$P = 770\ mm\ Hg$

Umidade Relativa = 80 %

Conforme expôsto, seja determinar o espaçamento para a máxima tensão em freqüência industrial, que deve vir a ser suportada pelo centelhador.

$U_{60Hz_{Max.}} = 25\ kV$

$\overline{U}_{d_{60_{Hz}}} = 1.50\sqrt{2}\ \ 25$ $\qquad$ $\overline{U}_{d_{60_{Hz}}} = 53\ kV$

$U_{d_{60_{Hz}}} = 1.06\ 53$ $\qquad$ $U_{d_{60_{Hz}}} = 56.2\ kV$

Considerando as equações para *"Correção Condições Ambientais"* a seguir:

$$KD = \left\{ \frac{P_{M_{vd}}}{P_{Atm}} \right\}^{m} \left\{ \frac{273 + T_P}{273 + T_{M_{vd}}} \right\}^{n} \qquad (II.1.1.2.4)$$

Logo, para as condições de *"Suportabilidade Mínima"*, considerando:

$D_s < 1\ Metro$, vem que, $m=n=1$, o que implica em:

$$KD = \frac{730}{760}\ \frac{273 + 25}{273 + 35} \qquad KD = 0.977$$

$$KH = \{\ 1.042\ \kappa\ \}^{\varphi} \qquad (II.1.1.2.5)$$

Sob condições de *Tensão em Freqüência Industrial*, para:

$D_s < 1\ Metro$, implica em: $\varphi = 1.00$

Considerando ainda, $\kappa = 1.05$, vem:

$$KH = \{\ 1.042\ 1.05\ \}^{1.000} \qquad KH = 1.094$$

Finalmente:

$$U_{d_{60_P}} = 56.2 \frac{1.094}{0.977} \qquad U_{d_{60_P}} = 62.9 \text{ kV}$$

Isto resulta em um espaçamento entre eletrodos "D_s" de 84 mm.

Uma vez determinado o espaçamento entre eletrodos, deve-se proceder ao cálculo do nível de proteção oferecido, deste modo vem:

- *Nível de Proteção para Impulso Pleno:*

Considerando a *"Característica Tensão Disruptiva para Tempos até a Disrupção de 3 μs"*:

$$\overline{U}_{dI} = 87 \text{ kV}$$

o que segundo *(II.1.1.2.2.)* implica em:

$$U_{dI_M} = 1.09\ 87 \qquad U_{dI_M} = 94.8 \text{ kV}$$

Logo, para as condições de *"Suportabilidade Máxima"*, considerando:

$D_s < 1$ *Metro*, vem que, $m=n=1$, o que implica em:

$$KD = \frac{770}{760} \frac{273 + 25}{273 + 35} \qquad KD = 0.980$$

Sob condições de *Impulso Atmosférico Polaridade Negativa*, vem:

$$\varphi = 0.80$$

Considerando ainda, $\kappa = 0.85$, vem:

$$KH = \{ 1.042\ 0.85 \}^{0.800} \qquad KH = 0.907$$

Finalmente:

$$U_{dI_{M_P}} = 94.8 \frac{0.980}{0.907} \qquad U_{dI_{M_P}} = 102.5 \text{ kV}$$

- Nível de Proteção para Impulso Íngreme:

Considerando a *"Característica Tensão Disruptiva para Tempos até a Disrupção de .5 μs"*, vem:

$\overline{U}_{dI} = 208.5\ kV$

o que segundo *(II.1.1.2.2)* implica em:

$U_{dI_M} = 1.09\ 208.5$ $\qquad\qquad$ $U_{dI_M} = 227.3\ kV$

Logo, para as condições de *"Suportabilidade Máxima"* vem;

$KD = 0.980$ $\qquad$ e; $\qquad$ $KH = 0.907$

Finalmente:

$$U_{dI_{M_P}} = 227.3\ \frac{0.980}{0.907} \qquad\qquad U_{dI_{M_P}} = 245.6\ kV$$

Os Níveis de Proteção, conforme acima determinados, devem ser, em primeira instância, confrontados com a suportabilidade frente a impulso pleno e cortado dos equipamentos que constituem a instalação.

De modo orientativo, tem-se para a *"Classe de Tensão"* de *36.2 kV*, os seguintes valores:

Impulso Pleno → 200 kV
Impulso Cortado → 220 kV

No caso acima, a proteção é efetiva somente para impulsos plenos, fato extremamente comum, e plenamente indesejável, principalmente, quando da presença de isolamentos não auto regenerativos, como no caso de transformadores.

II.1.2 - CENTELHADORES TUBULARES

Os centelhadores tubulares contornam uma das principais desvantagens oferecidas pelos centelhadores haste - haste, no caso, o fato dos mesmos

não poderem descarregar corrente de baixa amplitude, na faixa de *1 a 3 kA*, sem que ocorra a disrupção completa do meio dielétrico entre os eletrodos. Isto reduz significativamente a freqüência de operação dos centelhadores, e, por conseguinte, a de operação da proteção contra sobrecorrentes do sistema, haja vista que, correntes elevadas, resultam somente de descargas diretas às linhas ou aos equipamentos que em sistemas de distribuição, são eventos, dotados de probabilidade relativamente baixa.

Básicamente, um centelhador tubular é construído por dois eletrodos tubulares paralelos, sendo, geralmente, um dos tubos montado verticalmente sobre uma estrutura metálica aterrada e o outro montado sobre um isolador pedestal e conectado ao condutor da linha, conforme Figura *II.1.3*.

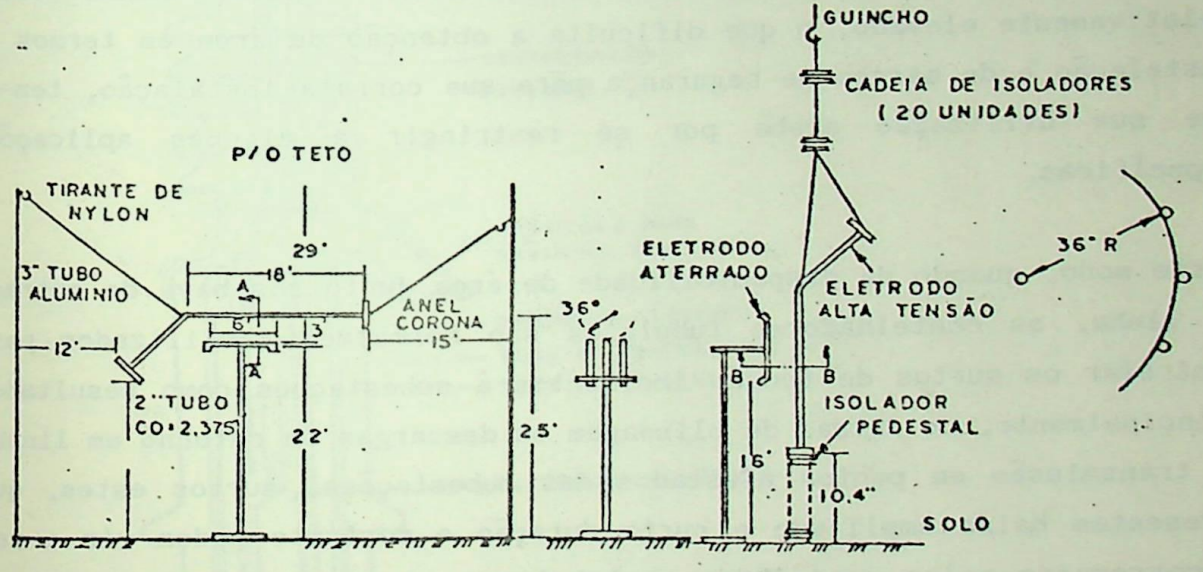


Figura II.1.3 - Centelhador Tubular[3-4]

A característica dos centelhadores tubulares em permitir a passagem de correntes de baixa amplitude, sem a ocorrência de disrupção total do meio dielétrico entre os eletrodos, reside, no fato da disrupção destes centelhadores ser controlada, basicamente, pela área, relativamente alta, dos eletrodos tubulares, fato que implica que, uma parcela apreciável da corrente é descarregada quando dos fenômenos relativos à

pré - descarga entre os eletrodos, colaborando pois, para a redução da probabilidade de ocorrência de disrupção completa entre eletrodos.

O fenômeno relativo a pré - descarga entre eletrodos, implica no depósito de cargas num determinado período de tempo, em outros termos, escoamento de corrente, nos canais condutores formados entre os mesmos. Em eletrodos de forma tubular, devido a existência de multiplicidade elevada de canais é possível depositar nos mesmos, mais carga do que se consegue em eletrodos haste - haste, e isto, sem que ocorra progressão dos canais na direção de uma ruptura completa do dielétrico entre eletrodos, sendo esta, a explicação física resumida para o comportamento específico dos centelhadores tubulares.

Conforme exposto, os centelhadores tubulares apresentam um desempenho melhor que os haste - haste, no entanto, devido ao seu tamanho físico relativamente elevado, o que dificulta a obtenção de área em termos de instalação e de margem de segurança para sua correta instalação, tem-se que sua utilização acaba por se restringir a algumas aplicações específicas.

Deste modo, quando da disponibilidade de área junto aos bays de entrada de linha, os centelhadores tubulares são normalmente utilizados para controlar os surtos de tensão incidentes à subestações como resultado, principalmente, de falhas de blindagem ou descargas de retorno em linhas de transmissão em pontos afastados das subestações, surtos estes, que apresentam baixa amplitude e curta duração e portanto podem vir a ser descarregados pelos centelhadores tubulares sem impor uma condição de falta ao sistema

Em outros casos, os centelhadores tubulares podem vir a ser localizados em pátios de subestações, sendo que nestes casos, a sua principal função passa a ser, prover em grandes subestações, em regiões remotas das mesmas, uma proteção complementar à proteção principal de linha determinada por pára-raios.

O comportamento físico após a disrupção dos centelhadores tubulares é

semelhante ao dos centelhadores haste - haste, logo, os critérios para sua seleção são os mesmos anteriormente descritos, atentar porém, ao fato de centelhadores distintos apresentarem características de suportabilidade provávelmente distintas.

II.1.3 - PÁRA-RAIOS A EXPULSÃO, TUBOS PROTETORES

Os pára-raios a expulsão foram históricamente, o próximo passo na evolução da tecnologia de centelhadores, sendo projetados para interromper as correntes subseqüentes, relacionadas com as atuações dos centelhadores, sem, no entanto, impor condições de falta aos sistemas.[5]

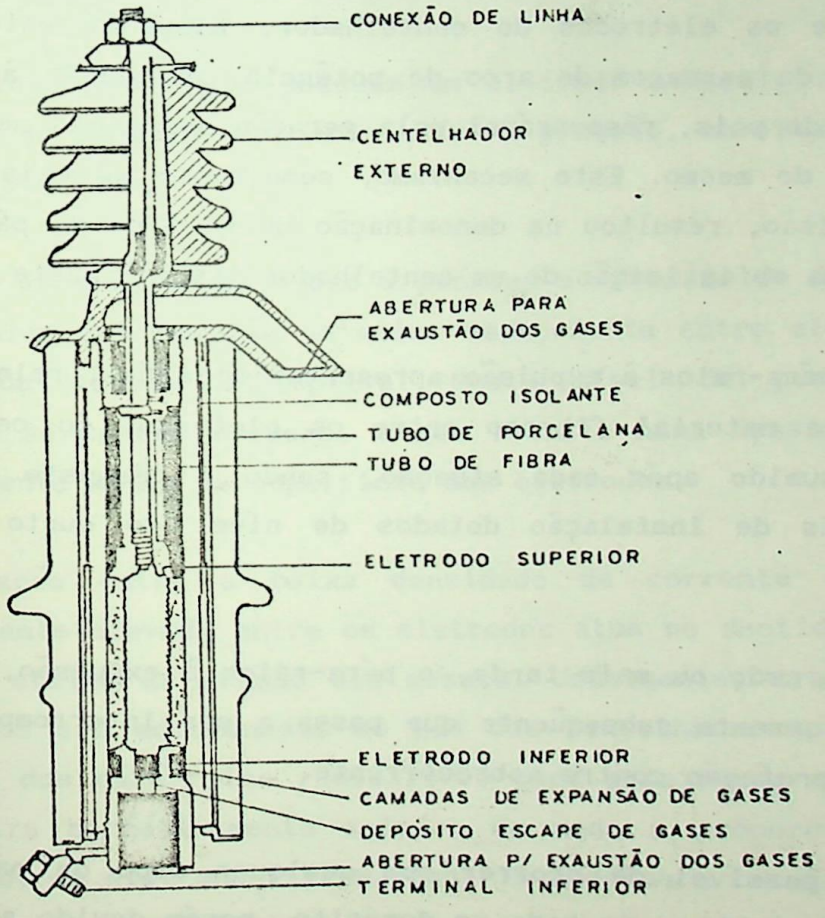


Figura II.1.4 - Vista em Corte de um Pára-raios à Expulsão[6]

A Figura *II.1.4* mostra um vista típica em corte de um pára-raios a

expulsão. Este equipamento, é constituído, básicamente, por dois centelhadores em ar em série, e devido a existência de uma equalização de potencial com características tipicamente capacitiva, o centelhador superior controla a característica disruptiva, ou seja, de atuação de todo o conjunto.

Após a disrupção do centelhador superior, o centelhador inferior, que não possue rigidez dielétrica elevada, entra imediatamente em condução.

O centelhador inferior é projetado, de modo a propiciar meios para o resfriamento do arco associado à corrente subseqüente, aumentando a queda de tensão no mesmo e permitindo sua extinção natural no zero da corrente. Isto é conseguido com auxílio de um material fibroso especial localizado entre os eletrodos do centelhador, material este, que é queimado quando da passagem do arco de potência, associado à corrente subseqüente, sendo pois, responsável pela geração dos gases necessários ao resfriamento do mesmo. Este mecanismo, semelhante ao existente nos fusíveis à expulsão, resultou na denominação deste tipo de pára-raios, nada mais que uma sofisticação de um centelhador haste - haste.

Na prática, os pára-raios à expulsão apresentam vida útil relativamente limitada, pois o material fibroso entre os eletrodos do centelhador inferior é consumido após cada atuação, sendo o desgaste acelerado quando de locais de instalação dotados de nível de curto circuito elevado.

Deste modo, mais cedo ou mais tarde, o pára-raios à expulsão, falha na interrupção da corrente subseqüente que passa a ser interrompida pelos dispositivos de proteção contra sobrecorrente.

O fato acima é passível de ocorrer com qualquer tipo de pára-raios, portanto não se constitue de todo um demérito, porém devido ao tipo de construção adotado nos pára-raios à expulsão, que não permite uma identificação fácil dos pára-raios defeituosos, tem-se que é virtualmente impossível determinar do solo, ou seja, sem uma inspeção local, quais são as peças defeituosas, e deste modo, um ou mais

pára-raios à expulsão, defeituosos, podem vir a se constituir em uma fonte de ocorrências aparentemente inexplicáveis.

Por estas razões, os pára-raios à expulsão, não são mais aplicados a sistemas de potência e os existentes estão sendo substituídos.

II.1.4 - CENTELHADORES A GÁS

Uma maneira de se evitar a influência do meio ambiente, por exemplo: umidade, densidade relativa, nos níveis de proteção oferecidos pelos centelhadores, conforme discutido, é confinar os eletrodos dos mesmos em um ambiente herméticamente selado e controlado.

Os centelhadores a gás possuem um eletrodo central, confinado em uma atmosfera de argônio ou neônio a baixa pressão, envolta por um cilindro metálico aterrado.

A pressão interna ao cilindro é próxima a *"Pressão de Paschen"*, que é o mínimo valor que resulta no maior espaçamento entre eletrodos para uma determinada tensão disruptiva. Neste nível de pressão, os arcos elétricos se tornam difusos, o que resulta numa densidade de corrente relativamente baixa na superfície dos eletrodos.

A combinação entre a baixa densidade de corrente e o espaçamento relativamente elevado entre os eletrodos atua no sentido de minimizar a taxa e o efeito da erosão dos mesmos. Usualmente, traços de elementos radioativos são adicionados ao gás dos centelhadores, lembrar que, ao contrário dos pára-raios radioativos para construção civil, o ambiente se encontra herméticamente selado, de modo a proporcionar, uma fonte permanente, de elétrons livres, contribuindo para tornar os tempos até a disrupção mais consistentes.

Como resultado destas medidas, os centelhadores a gás, fornecem níveis de proteção, relativamente mais uniformes, ao longo de uma boa faixa impulsos de tensão.

A exemplo dos centelhadores em ar, os centelhadores a gás, não possuem capacidade efetiva para forçar a interrupção de correntes subseqüentes e, deste modo, sua aplicação a sistemas de potência em média tensão, restringe-se a limitar as sobretensões existentes entre neutros primário e secundário, separados, onde, sua capacidade de suportar correntes em freqüência industrial de baixa amplitude por tempo relativamente elevado, se constitue em vantagem.

II.1.5 - CENTELHADORES A VÁCUO

Os centelhadores a vácuo exploram os princípios de interrupção de corrente no alto vácuo, de modo, a eliminar os problemas oriundos da interrupção de corrente subseqüente. Este fato, se constitue num desafio, haja vista a características disruptivas relativamente imprevisíveis e instáveis dos espaçamentos em vácuo. [6]

Os centelhadores a vácuo são, presentemente, construídos na forma de protótipos com auxílio de garrafas de disjuntores a vácuo nas quais, mantém-se os contactos permanentemente afastados. O espaçamento assim obtido é responsável pelo controle das características disruptivas bem como pela extinção da corrente subseqüente.

Em princípio, os centelhadores a vácuo se apresentam como uma alternativa mais compacta, confiável e dotada de características de interrupção de corrente subseqüente superior aos centelhadores a ar, porém na prática, de momento, se constituem numa alternativa cara e não apresentam uma característica de interrupção de corrente subseqüente consistente com os níveis de proteção necessários, haja vista que os níveis de proteção requerem um espaçamento entre *1* e *2.5 mm* e os de extinção *6 mm*.

É óbvio que, nestes casos, deve-se fazer uso de centelhadores com dispositivos de disparo, ou seja, trigger, auxiliar, de modo que, a disrupção do vácuo entre eletrodos, se inicie de modo independente do espaçamento, isto, no entanto, se constitue numa idéia aplicável somente

a protótipos de laboratório.

II.1.6 - APLICAÇÃO DE CENTELHADORES NO BRASIL

Grande parte da experiência com a aplicação de centelhadores no Brasil é oriunda de Estudos de Coordenação de Isolamento em Subestações para Sistemas de Alta Tensão, ou seja, no presente caso, até *138 kV*, sendo a empresa precursora da utilização, desta técnica, a *Companhia Energética de São Paulo - CESP*, através da subestação de *São Carlos II*, com estudos iniciados em *1979*. [7-8]

Os resultados desta experiência foram extremamente positivos tanto em termos econômicos quanto técnicos, e, deste modo, foi possível obter, em alguns casos, economia substancial de recursos, bem como, desempenho praticamente idêntico ao de subestações protegidas de acordo com técnicas tradicionais.

Este tipo de aplicação tem-se difundido cada vez mais, e deste modo, várias empresas do setor elétrico a exemplo da *Companhia Paranaense de Energia Elétrica - COPEL*, da *Companhia Energetica de Minas Gerais - CEMIG*, de *Furnas Centrais Elétricas*, das *Centrais Elétricas do Norte do Brasil - ELETRONORTE*, entre outras, tem investido recursos em ensaios de laboratório e estudos na aplicação desta técnica aos seus sistemas, com resultados muito promissores. [9→11]

Com respeito aos sistemas em média tensão, até *34.5 kV* a única iniciativa digna de nota está sendo desenvolvida pela *Companhia Paranaense de Energia Elétrica - COPEL*, em sistemas radiais dotados de baixo nível de curto circuito. Os resultados desta experiência, apesar de considerados, como extremamente animadores, fato plenamente factível, haja vista o sucesso obtido com esta técnica quando de sua aplicação a níveis de tensão superior, continuam até o presente momento, inexplicavelmente sem divulgação.

Quanto as considerações que devem vir a ser seguidas quando da aplicação

de centelhadores aos sistemas de potência, existem algumas pequenas diferenças com respeito aos níveis de tensão de sistema, pois os mesmos, determinam basicamente, qual o tipo e intensidade da solicitação impressa ao centelhador.

II.1.6.1 - APLICAÇÃO DE CENTELHADORES A SISTEMAS EM ALTA TENSÃO

Os centelhadores, quando de sistemas para alta tensão tem sido utilizados em substituição aos pára-raios instalados nos bays de linha de transmissão nos níveis de tensão de *69 kV* e *138 kV*, é usual no entanto, manter nestes casos pára-raios junto aos transformadores.

Para a aplicação correta dos centelhadores deve-se determinar, primeiramente, os níveis de proteção, bem como, a suportabilidade sob condições de falta, ou seja, curto circuito franco, dos vários arranjos possíveis para centelhadores, isto, através de uma exaustiva série de ensaios em laboratório. Uma vez definidos estes níveis, com o auxílio de programas digitais, elabora-se uma série de estudos que visam determinar o ajuste, ou seja, o espaçamento entre os eletrodos do centelhador, a adequabilidade do arranjo físico adotado para as subestações, bem como, levantar dados sobre o provável comportamento de várias das condições operativas previstas.

A escolha do ajuste dos centelhadores, quando de sistemas de alta tensão, deve contemplar os seguintes pontos: *[7-8]*

- Os centelhadores não devem atuar quando de solicitações normais em freqüência industrial, mesmo sob condições atmosféricas adversas;

- Os centelhadores não devem atuar quando de solicitações decorrentes de descargas atmosféricas, diretas, oriundas de falhas de blindagem, ou induzidas, estando o disjuntor de entrada de linha na condição de fechado, pois isto implica em falta franca para a terra na entrada da subestação e conseqüente atuação da proteção, fato que impõem uma

interrupção no fornecimento de energia;

- Só é permitida atuação dos centelhadores estando o disjuntor de entrada de linha na condição de aberto, ou seja, fornecimento de energia interrompido, ou quando de descargas atmosféricas de intensidade tal que resultem numa descarga indireta em qualquer estrutura, fato, que por si só, impõe um desligamento; e

- Para o nível de tensão de *242 kV*, considerado, no presente, como o limite tecnológico para a aplicação de centelhadores a sistemas de potência, têm-se que, os mesmos, não devem atuar quando de solicitações decorrentes de manobras, principalmente, as oriundas de operações de energização ou religamento de linhas de transmissão. Deste modo, a aplicação de centelhadores a este nível de tensão acaba por se tornar limitada a situações muito específicas.

Logo, os estudos de sobretensões e coordenação de isolamento devem contemplar as seguintes etapas:[11]

→ *Estudos para a Condição de Disjuntor Aberto;*

- Estes estudos tem, por objetivo, verificar a adequabilidade do arranjo físico da entrada de linha, bem como, determinar o espaçamento entre os eletrodos do centelhador, quando de solicitações oriunda de falhas de blindagem.

  O espaçamento entre eletrodos, definido com base, nas solicitações impostas por impulsos atmosféricos, deve vir a ser confrontado com a suportabilidade necessária, quando de solicitações em freqüência industrial.

→ *Estudos para a Condição de Disjuntor Fechado.*

- Estes estudos tem, por objetivo, verificar a adequabilidade do arranjo físico e operativo das subestações para o espaçamento entre

os eletrodos do centelhador determinado anteriormente, quando de solicitações oriundas, principalmente, de falhas de blindagem.

Nestes casos, é recomendável realizar estudos complementares sobre descargas indiretas, passíveis de ocorrer no campo, de modo a determinar quais valores de tensão resultam dentro das subestações, pois os centelhadores de linha, provavelmente, devem vir a atuar nestas ocasiões, fato que implica na injeção de um surto extremamente íngreme para dentro da subestação sob estudo, com resultados, a primeira vista, imprevisíveis.

Os problemas que necessitam ser contornados, na grande maioria das ocasiões, são os seguintes: *[7-8-11]*

- O posicionamento de seccionadores, verificado quando dos estudos que contemplam a condição de disjuntor aberto;

- A necessidade de se fazer uso de transformadores de potencial capacitivos *TPC's*, bem como, seu posicionamento com respeito aos centelhadores,

- O posicionamento dos cabos de guarda das *3* ou *4* primeiras estruturas, verificado, na grande maioria dos casos, quando dos estudos que contemplam falhas de blindagem para a condição de disjuntor fechado;

- Melhoria do aterramento do encabeçamento das linhas que partem das subestações, no caso, também para as *3* ou *4* primeiras estruturas, verificado quando dos estudos que contemplem descargas indiretas para a condição de disjuntor fechado.

- Evitar configurações operativas problemáticas, bem como, quantificar o grau de incerteza envolvido, verificado quando dos estudos que contemplem descargas indiretas para a condição de disjuntor fechado.

Um ponto se torna óbvio em todo este procedimento, as medidas acima são

plenamente exequíveis quando das fases de projeto, portanto devem ser objeto de discussão por esta ocasião. Modificações, que resultam em substancial economia de recursos, as vezes, não podem vir a ser tomadas pois o estágio atual da subestação as impedem.

Quanto as configurações operativas problemáticas, na maioria dos casos, as mesmas são oriundas de arranjos físicos inadequados à Coordenação de Isolamento com o auxílio de Centelhadores, exemplo típico dos arranjos em Barra Principal e Transferência, resta pois, saber a adequabilidade ou mesmo da necessidade de se fazer uso dos mesmos.

II.1.6.2 - APLICAÇÃO DE CENTELHADORES A SISTEMAS EM MÉDIA TENSÃO

Os centelhadores, quando de sistemas para média tensão, tem sido utilizados na proteção de pequenos transformadores para o nível de tensão *13.8 kV* e ramais de linhas de distribuição para os níveis de tensão de *13.8 kV* e *34.5 kV*.

No momento, a aplicação de centelhadores, em sistemas de média tensão, segue o critério delineado anteriormente, não se verificando nenhum cuidado extra com respeito a atuação dos dispositivos de proteção contra sobrecorrentes. Isto se deve, em parte, principalmente, ao comportamento do isolamento das linhas de distribuição frente a impulsos atmosféricos que são, inclusive, fortemente solicitadas por descargas induzidas, fato que, em alguns casos, implica em um número de desligamentos por ano, acima dos padrões mínimos exigidos para o fornecimento de energia elétrica.

II.2 - PÁRA-RAIOS CONVENCIONAIS A CARBONETO DE SILÍCIO

You never know what is enough, unless you know what is more than enough
(William Blake, 1757 - 1827)

Os pára-raios a carboneto de silício, também denominados pára-raios tipo válvula ou pára-raios convencionais são constituídos por um centelhador em ar, geralmente múltiplo, em série com um ou mais resistores a Carboneto de Silício - *SiC*, também denominados de elementos válvula.

Os pára-raios a carboneto de silício surgiram como dispositivos de proteção contra surtos de tensão, dotados de capacidade própria de interrupção de correntes subseqüentes, estas, resultantes de descargas de corrente, de origem predominantemente atmosférica. Deste modo, estes dispositivos eliminaram a maior desvantagem oferecida pelos centelhadores em ar, ou seja, a ocorrência de uma falta, de carácter, na maioria dos casos, permanente, e por conseguinte a interrupção do fornecimento de energia elétrica, por conta da atuação dos dispositivos de proteção contra sobre correntes.

A nível mundial, para os sistemas de alta e extra alta tensão, os pára-raios a carboneto de silício tem sido gradualmente substituídos por pára-raios a óxido metálico, básicamente pelo fato das características técnicas oferecidas por estes últimos, principalmente em termos de suportabilidade frente a surtos de manobra, serem muito superiores. Deste modo, a produção de pára-raios a carboneto de silício para estes sistemas vem sendo descontinuada.

Com respeito aos sistemas em média tensão, no caso mais típico, sistemas aéreos, onde as solicitações, principalmente, as oriundas de manobras, não são muito elevadas, tem-se que as vantagens oferecidas pelos pára-raios a óxido metálico, quando comparadas, com o custo de soluções equivalentes, não se apresentam como compensadoras. Deste modo, os pára-raios a carboneto de silício, nestes níveis de tensão, continuam a

apresentar utilização bastante elevada.

A Figura *II.2.1* mostra a vista em corte de um pára-raios a carboneto de silício para sistemas de distribuição, bem como, detalha cada uma de suas partes componentes.

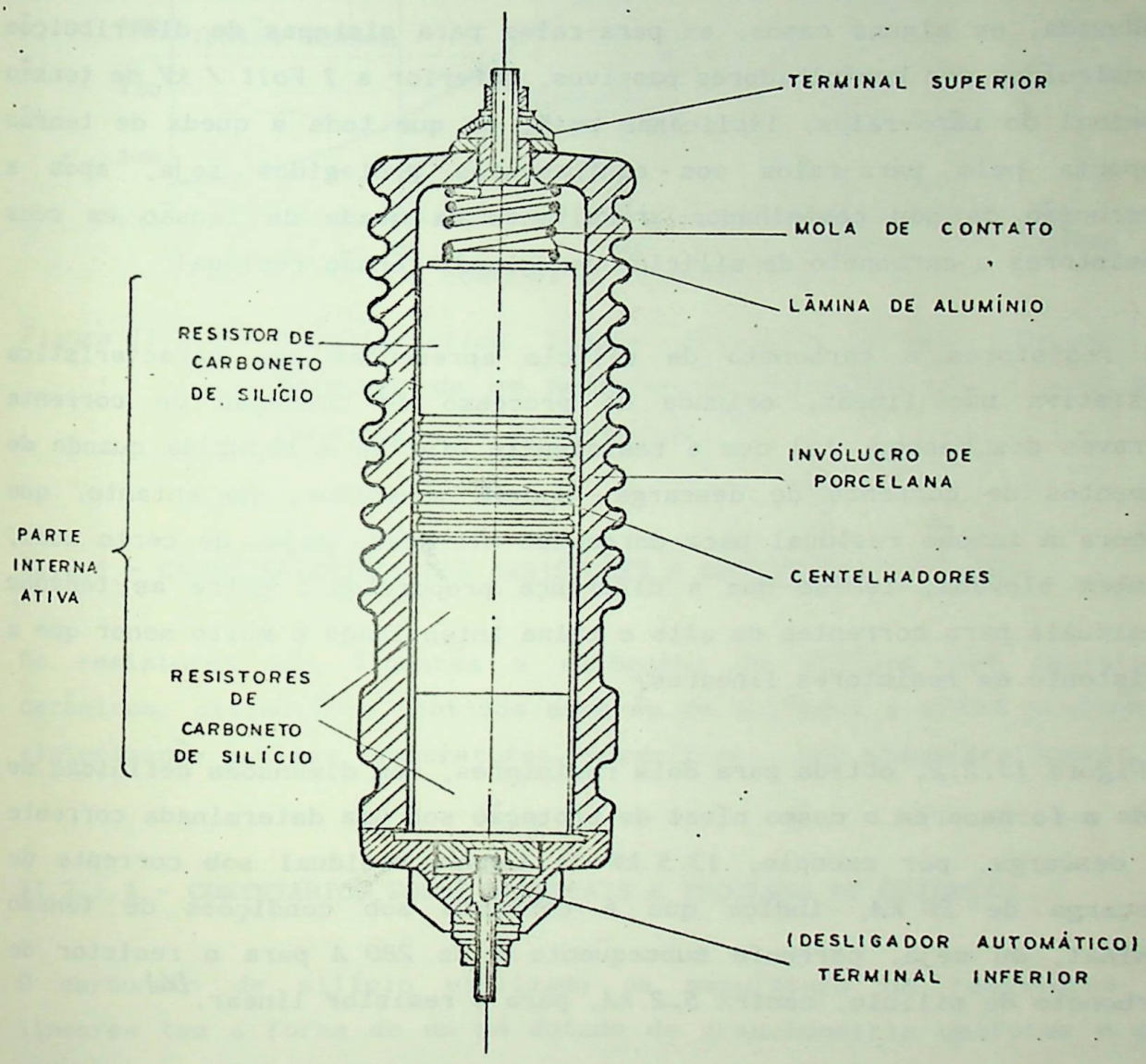


Figura II.2.1 - Vista em Corte de um Pára-raios para Sistemas de Distribuição (Permissão - 3M do Brasil Ltda.)

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

Deste modo, o pára-raios apresenta, até o momento da atuação de seu centelhador, um comportamento passivo em relação ao sistema ao qual se encontra conectado. Logo após este instante, o mesmo passa a apresentar um comportamento ativo, sendo a queda de tensão nos centelhadores muito reduzida, em alguns casos, em pára-raios para sistemas de distribuição construídos com centelhadores passivos, inferior a *1 Volt / kV* de tensão nominal do pára-raios, implicando pois, em que toda a queda de tensão imposta pelo pára-raios aos equipamentos protegidos seja, após a disrupção de seu centelhador, resultante da queda de tensão em seus resistores a carboneto de silício, denominada tensão residual.

Os resistores a carboneto de silício apresentam uma característica resistiva não linear, oriunda do processo de condução de corrente através dos mesmos, tal que a resistência efetiva é reduzida quando de aumentos de corrente de descarga. Convém ressaltar, no entanto, que embora a tensão residual para correntes elevadas, seja, de certo modo, também elevada, tem-se que a diferença proporcional entre as tensões residuais para correntes de alta e baixa intensidade é muito menor que a existente em resistores lineares.

A Figura *II.2.2*, obtida para dois resistores, com dimensões definidas de modo a fornecerem o mesmo nível de proteção sob uma determinada corrente de descarga, por exemplo, *13.5 kV* de tensão residual sob corrente de descarga de *20 kA*, indica que a corrente sob condições de tensão nominal, ou seja, corrente subseqüente é de *280 A* para o resistor de carboneto de silício, contra *5.2 kA*, para o resistor linear. [6]

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

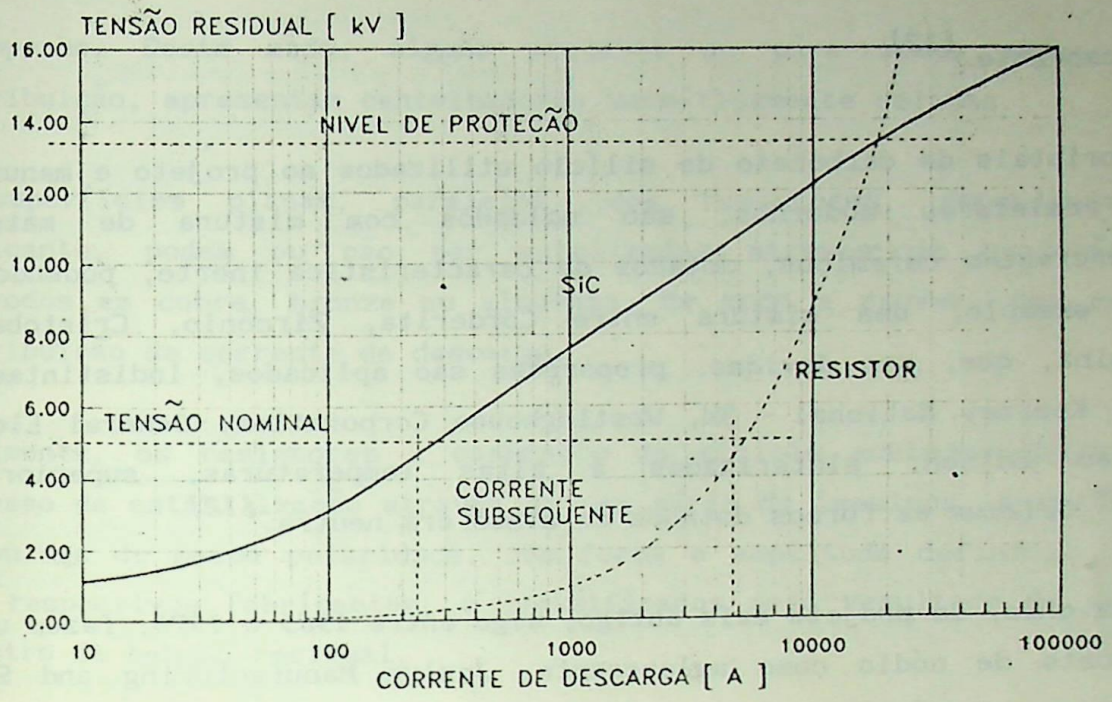


Figura II.2.2 - Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga de um Resistor de Carboneto de Silício para Pára-raios de Distribuição. [6]

II.2.1 - CARACTERÍSTICAS DOS RESISTORES A CARBONETO DE SILÍCIO

Os resistores não lineares a carboneto de silício são resistores cerâmicos, cilindricos, obtidos através de moldagem a altas pressões e sinterização a altas temperaturas, normalmente, sob atmosfera inerte.

II.2.1.1 - COMENTÁRIOS SOBRE MATERIAIS E PROCESSO DE OBTENÇÃO

O carboneto de silício utilizado na manufatura de resistores não lineares tem a forma de um pó dotado de granulometria uniforme e grau elétrico, ou seja, submetidos a um processo de dopagem.

As características elétricas dos resistores a carboneto de silício são uma função do tamanho físico dos blocos, forma, tipo de dopagem, granulometria dos cristais e da proporção e do tipo do material

aglomerante.[12]

Os cristais de carboneto de silício utilizados no projeto e manufatura de resistores modernos, são moldados com mistura de materiais aglomerantes cerâmicos, dotados de característica inerte, podendo, ser por exemplo, uma mistura entre Corderita, Zircônio, Cristobalita, Alumina, que, nas devidas, proporções são aplicados, indistintamente, pela Kearney National - 3M, Westinghouse Corporation, General Eletric, McGraw Edison, sinterizados a altas temperaturas, superiores a *1000° Celsius* em fornos dotados de atmosfera neutra.[12]

Resistores, de projeto mais antigo, algo entre *1965* e *1975*, fazem uso de silicato de sódio como aglomerante, Joslyn Manufacturing and Supply Company, um líquido que se solidifica por evaporação a temperaturas ligeiramente mais elevadas que *1000° Celsius.*

Quanto ao desempenho, os resistores moldados com silicato de sódio, além de absorver umidade, apresentam um comportamento considerado inferior, devido, principalmente, ao fato de possuirem uma capacidade de descarga de corrente aquém da obtida em resistores moldados com material cerâmico inerte.

A superfície lateral dos resistores a carboneto de silício são revestidas por um colar em resina epoxy ou cerâmico de modo a prevenir, a ocorrência de descargas laterais oriundas de correntes de amplitude elevada, impedindo pois com que os resistores sejam curto circuitados e evitando o comprometimento do desempenho dos pára-raios quando da extinção da corrente subseqüente. Estudos recentes, indicam que os colares cerâmicos são preferíveis aos em resina epoxy, pois quando da ocorrência de descargas de corrente de elevada amplitude, a análise cromatográfica dos gases internos ao pára-raios tem indicado a presença de uma quantidade substancial de produtos da decomposição da resina epoxy. A presença destes gases, implica em modificações na atmosfera interna do pára-raios,principalmente em termos de pressão, e dependendo do caso, isto pode vir a resultar em modificações na característica tensão disruptiva versus tempo do mesmo, fato que, compromente seu

desempenho. Deste modo, alguns projetos de pára-raios, mesmo para distribuição, apresentam centelhadores herméticamente selados.

As superfícies planas, paralelas, dos resistores, dependendo do fabricante, podem ou não ser metalizadas através da projeção de eletrodos em cobre, bronze où alumínio, de modo a prover, uma melhor distribuição de corrente de descarga.

Finalmente, os resistores a carboneto de silício acabados sofrem um processo de estabilização através de uma série de impulsos, normalmente 3 impulsos de mesma polaridade, com forma e amplitude definidas pelos seus respectivos fabricantes, e classificados pelo resultado do último registro de tensão residual.

II.2.1.2 - MECANISMO DE CONDUÇÃO DOS RESISTORES A CARBONETO DE SILÍCIO

A característica tensão residual versus corrente de descarga dos resistores a carboneto de silício é, basicamente, determinada pelo comportamento coletivo dos pontos de contacto entre os grãos de carboneto de silício.

Quando correntes de amplitude elevada circulam pelos resistores, devido a pequena área de contacto entre os grãos de carboneto de silício, tem-se uma grande quantidade de calor gerado. A temperatura dos pontos de contacto, fica pois, determinada pelo fluxo de calor existente entre os mesmos, que se encontram aquecidos, e a massa do resistor que se encontra a uma temperatura relativamente baixa.

Haja vista que o carboneto de silício apresenta um coeficiente de variação da resistência com a temperatura, negativo, ou seja, a resistência decresce com o aumento da temperatura e, deste modo, a resistência total do resistor decresce com o aumento da corrente, fato, que resulta na característica não linear deste tipo de resistor.

A partir de um determinado instante de tempo, os mecanismos de troca de

calor, interiores ao resistor, que tende a atingir um estado de equilíbrio térmico interno, e depois, com o meio ao seu redor, passam a ser de importância fundamental, pois os mesmos determinam a redução da temperatura dos pontos de contacto entre os grãos de carbonèto de silício, e deste modo, a resistência oferecida pelo resistor aumenta, sendo este, o fator responsável pelo fenômeno da limitação da corrente subseqüente.

A dissipação do calor dos pontos de contacto entre grãos de carboneto de silício é fortemente influenciada pela capacidade de absorção de calor do material aglomerante utilizado na manufatura do resistor, e, sua correta escolha, determina, a maior durabilidade e mesmo suportabilidade de um determinado projeto de resistor não linear.

Tendo em mente, os mecanismos acima expostos, é fácil observar que existe uma relação muito distinta entre a temperatura dos pontos de contacto, o tipo de material utilizado como aglomerante e, a amplitude e forma da corrente descarregada pelo resistor, isto implica, em última análise, que, um bom projeto de resistor a carboneto de silício deve procurar o correto balanço entre as fases, grãos de carboneto de silício e material aglomerante.

Com respeito, ao desempenho dos resistores a carbonetó de silício, o seu mecanismo de condução pode vir a induzir à problemas, que resultam em falhas, quando os mesmos são submetidos a descargas de corrente com forma não padronizada, ou seja, correntes com formas diferentes daquelas para as quais foram projetados.

Dentre as formas de corrente não padronizadas, destacam-se as correntes oriundas de impulsos atmosféricos de longa duração e, as de impulsos de manobra de alta amplitude.

Descargas de corrente de longa duração podem vir a causar aquecimento excessivo do material dos resistores a carboneto de silício, fato que, temporariamente, atua no sentido de reduzir a resistência oferecida pelos mesmos, e permite a descarga de correntes de amplitude mais

elevadas. Freqüentemente, devido à imperfeições na estrutura cristalina, pode vir a ocorrer a concentração de corrente em um canal condutor e, por conseguinte, aquecimento localizado, fato que, implica em uma queda da resistência oferecida pelo canal condutor à passagem da corrente e que colabora para concentrar mais a corrente. Eventualmente podem vir a ser atingidos valores localizados de temperatura superiores a *1500° Celsius*, o que implica na fusão, praticamente instantânea, do material do canal condutor, fenômeno conhecido como *"Tunneling"* e, por conseguinte, inutilização do resistor.[13]

Mesmo quando da ocorrência de aquecimento uniforme, aumentos anormais de temperatura podem vir a resultar no decréscimo da resistência total do resistor. Caso este decréscimo seja muito elevado, pode ocorrer que, os centelhadores não apresentem mais capacidade para interromper a corrente subseqüente e, deste modo, o pára-raios entra em modo de falha.

Uma conclusão rápida, e de importância capital, com respeito aos fenômenos acima descritos, é o fato de que os resistores a carboneto de silício possuem uma margem para sobrecargas muito reduzida e, deste modo, podem vir a ser facilmente destruídos, caso sejam submetidos a descargas que resultem em um volume total de energia absorvido, superior ao seu limite de projeto. Conforme mencionado, volumes de energia superiores aos limites de projeto podem resultar de descargas de manobra e descargas atmosféricas de longa duração. No entanto, convém ressaltar que, em resistores bem projetados, a destruição dos mesmos, na grande maioria dos casos, é resultante da composição entre a solicitação principal, ou seja, descarga de corrente de impulso, atmosférico ou manobra, e a solicitação imposta pela existência de corrente subsequente.

II.2.1.3 - NÍVEIS DE PROTEÇÃO DOS RESISTORES A CARBONETO DE SILÍCIO

Estando o centelhador do pára-raios atuado, ou seja, conduzindo corrente, a tensão em seus terminais é determinada, unicamente, pela queda de tensão em seus resistores a carboneto de silício, denominada

tensão residual, haja vista que a queda de tensão nos centelhadores, normalmente passivos, é desprezável.

A tensão residual, é utilizada na determinação do nível de proteção oferecido pelos resistores a carboneto de silício sendo, usualmente, obtida através de ensaios em laboratório, com o auxílio de impulsos padronizados.

Os fabricantes, por norma, são solicitados a publicar os valores de crista, resultantes de descargas de corrente de impulso, padronizadas, ou seja, com forma *8 x 20 μs* para amplitudes definidas, função da norma adotada quando da execução dos ensaios, por exemplo:

→ *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 kA*

Os valores acima, quando lançados em um papel, usualmente mono-log, definem a Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga, a exemplo da mostrada na Figura *II.2.2.*

Conforme acima exposto, a tensão residual, por norma, é medida para um impulso com forma *8 x 20 μs*, no entanto, haja vista a natureza aleatória das sobretensões, a utilização, indiscriminada, destes valores, realmente puntuais, apresenta pouco ou mesmo nenhuma consistência teórica, apesar de, aparentemente, funcionar, haja vista as elevadas margens de proteção adotadas em sistemas de média tensão.

Vários estudos sobre a variação da tensão residual dos resistores a carboneto de silício frente a correntes de descarga com tempos até a crista não padronizados, para a qual existe explicação física, até que satisfatória, tem sido desenvolvidos. O resultado de alguns destes estudos, na forma de um fator de correção, relativo às tensões residuais para correntes não padronizadas, ou seja, correntes com tempo até a crista diferente de *8 μs*, pode ser observado na Figura *II.2.3.* [14-15]

Com respeito a explicação física para o fato acima, é conveniente

lembrar que, a resistência do carboneto de silício se encontra diretamente relacionada com a temperatura, deste modo, correntes rápidas devem resultar em menor aquecimento, aparentemente, uma explicação convincente, porém os tempos envolvidos são muito reduzidos, quando comparados com as constantes térmicas.[14] Estudos mais recentes, em média, realizados *15 anos* após os que resultaram nas observações acima, sugerem que o fenômeno previamente detalhado consiste num erro de medição, oriundo da indução no laço, acoplamento mútuo, formado pelo resistor sob ensaio e o divisor de tensão.[15] Isto implica que, para uma determinada amplitude de corrente, a tensão residual dos resistores de carboneto de silício é, virtualmente, constante, com respeito as formas de impulso passíveis de ocorrer no campo. O fato é que, o erro de medição reproduz, indiretamente, um fenômeno que ocorre no campo, pois existe um acoplamento mútuo entre o pára-raios e o equipamento protegido, não levado em consideração na maioria dos estudos de coordenação de isolamento.

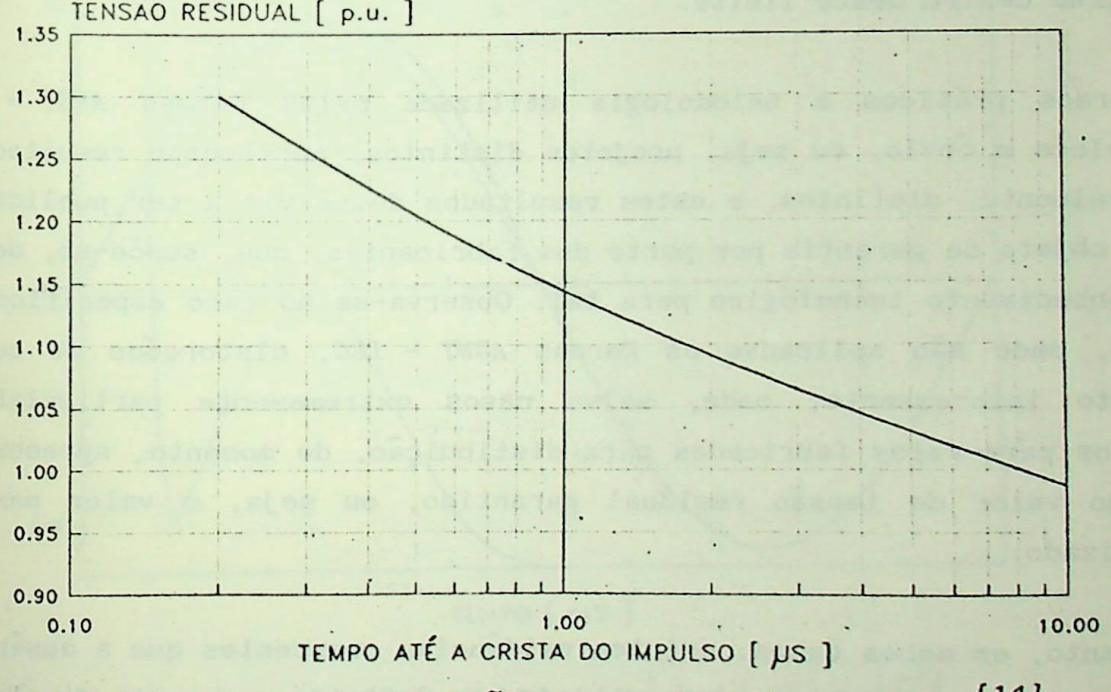


Figura II.2.3 - Fator de Correção para a Tensão Residual[14]

Com respeito a aplicação destes dados, um procedimento, comumente adotado, quando de estudos de coordenação de isolamento em sistemas de alta tensão é fazer uso de uma corrente incidente que resulte, por exemplo, numa onda viajante de tensão com taxa de crescimento da ordem

de *2000 kV / μs* e determinar qual a forma do impulso prospectivo que atinge os pára-raios da subestação e corrigir a tensão residual dos mesmos para o tempo até a crista observado. Em sistemas de distribuição em média tensão é comum realizar a coordenação de isolamento para tensões residuais relativas a correntes de impulso de *20 kA*, e, deste modo, mascarar possíveis imponderabilidades. [16]

As correções acima, principalmente a última, não são exatamente corretas, mas resultados de campo comprovam suas eficácias, pelo menos, em termos estatísticos.

Ao contrário das Normas *ABNT - IEC*, as Normas *ANSI - CSA*, não padronizam, de modo formal, os níveis de proteção dos pára-raios, ou seja, os valores de suas tensões residuais. Exigem, no entanto, que os fabricantes informem os valores máximos de tensão residual para cada tipo de projeto, e que, a posteriori, todas as unidades produzidas se encontrem dentro deste limite.

Em termos práticos a metodologia utilizada pelas Normas *ANSI - CSA* estabelece o óbvio, ou seja, projetos distintos, apresentam resultados, provavelmente, distintos, e estes resultados devem vir a ser publicados e ser objeto de garantia por parte dos fabricantes, que, supõe-se, devem ter conhecimento tecnológico para tal. Observa-se no caso específico do Brasil, onde são aplicadas as Normas *ABNT - IEC*, distorções de cunho bastante interessante, onde, salvo casos extremamente particulares, todos os pára-raios fabricados para distibuição, de momento, apresentam o mesmo valor de tensão residual garantido, ou seja, o valor máximo normalizado.

No entanto, em ambos casos, existem evidências crescentes que a ausência de um processo de controle de qualidade bem definido por parte de alguns fabricantes tem permitido que algumas unidades produzidas, apresentem valores de tensão residual superiores ao máximo publicado.

O nível de proteção, ou seja, a tensão residual dos resistores a carboneto de silício de projeto mais recente, não apresenta variações

significativas devido ao envelhecimento ou utilização que não resulte em danos. No entanto, quando de falhas parciais, observa-se que a tensão residual sofre uma redução significativa. Já os resistores, que fazem uso de silicato de sódio como material aglomerante, estão sujeitos a aumentos da ordem de *10 %* a *20 %* em sua tensão residual quando submetidos a descargas de corrente de amplitude elevada.

II.2.1.3 - AMPLITUDE DA CORRENTE SUBSEQÜÊNTE

A seqüencia típica de operação de um pára-raios implica, que o mesmo permaneça conduzindo corrente até que, o arco, formado nos centelhadores, seja extinto quando do próximo zero da tensão em freqüência industrial, atentar que, em resistores, mesmo não lineares, tensão se encontra em fase com a corrente.

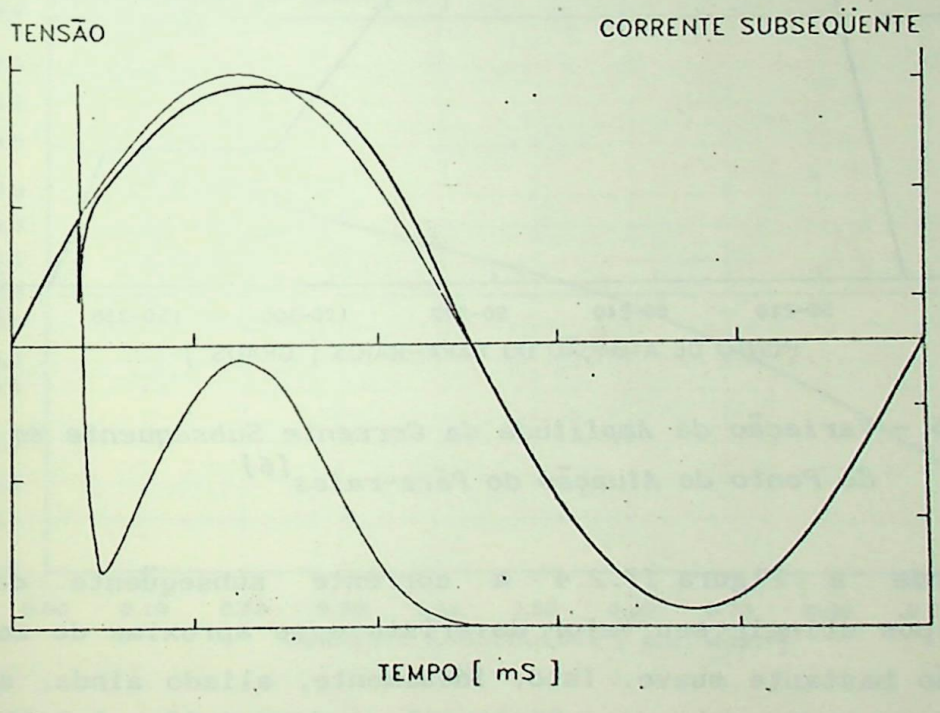


Figura II.2.4 - Forma Típica da Corrente Subseqüente[17]

Deste modo, para efeito prático, pode-se dividir a corrente através do pára-raios em duas, ou seja, especificamente:

- A corrente relativa ao impulso, de origem atmosférica ou manobra,

denominada corrente de descarga; e

- A corrente entre o tempo de extinção do impulso e o de extinção do arco nos centelhadores, denominada corrente subseqüente.

A corrente subseqüente, conforme Figura *II.2.4*, oriunda do resultado da aplicação de tensão, praticamente, senoidal, em um resistor não linear apresenta forma não senoidal.[17]

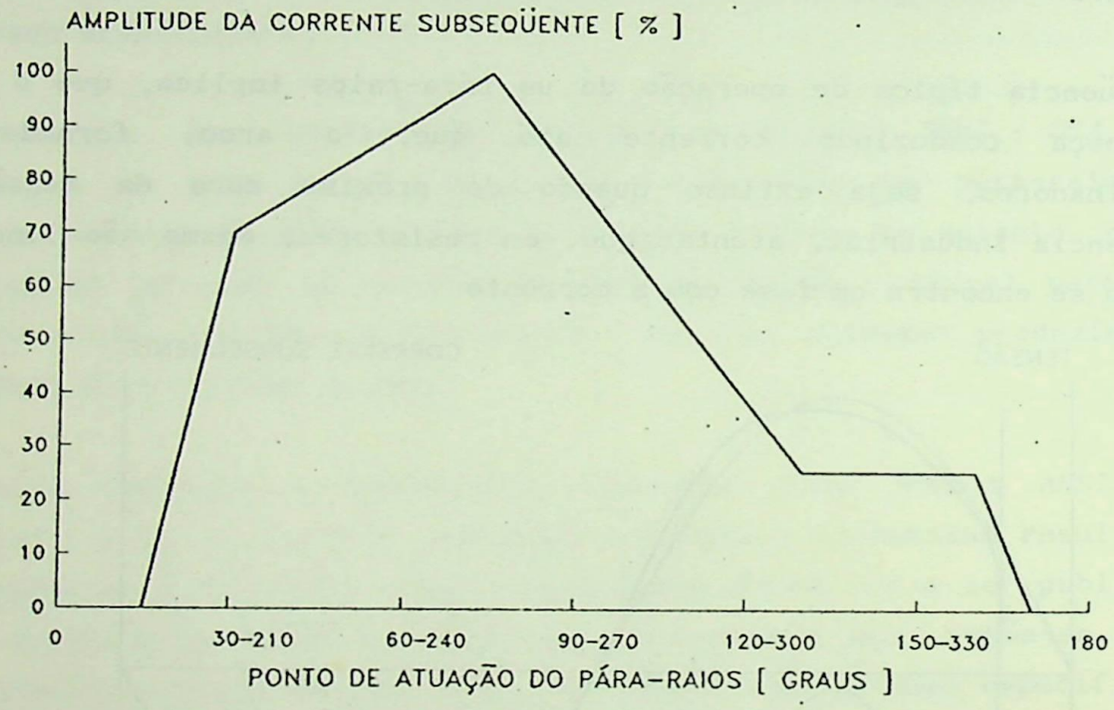


Figura II.2.5 - Variação da Amplitude da Corrente Subsequente em Função do Ponto de Atuação do Pára-raios[6]

Conforme ainda a Figura *II.2.4* a corrente subseqüente decresce rapidamente após atingir seu valor de crista e se aproxima de zero com uma inclinação bastante suave. Isto, idealmente, aliado ainda, ao fato da corrente subseqüente apresentar uma característica praticamente resistiva implica que, a extinção do arco nos centelhadores do pára-raios se processa de modo confiável, não resultando pois, em sobretensões ou outros transitórios. Convém relembrar que, quando da aproximação final do zero de corrente, pode vir a ocorrer que o arco seja extinto em um tempo ligeiramente inferior ao do zero da tensão, por exemplo, em função da indutância do circuito ao qual o pára-raios se

encontra conectado, nestes casos, surge através do centelhador, a exemplo de um disjuntor, uma tensão de restabelecimento transitória de pequena amplitude.

A amplitude, bem como a duração, ou seja, a solicitação em termos de energia relativa à corrente subseqüente, conforme Figura *II.2.4*, são funções do ponto, na onda de tensão em freqüência industrial, que o pára-raios entrou em condução, através da disrupção de seu centelhador, conforme mostra a Figura *II.2.5*.

Antes de prosseguir, é extremamente conveniente esclarecer que, em nenhuma norma técnica sobre pára-raios, a amplitude da corrente subseqüente é definida, pois é resultado do projeto, este sim, deve, independente do valor da mesma, apresentar um comportamento adequado.

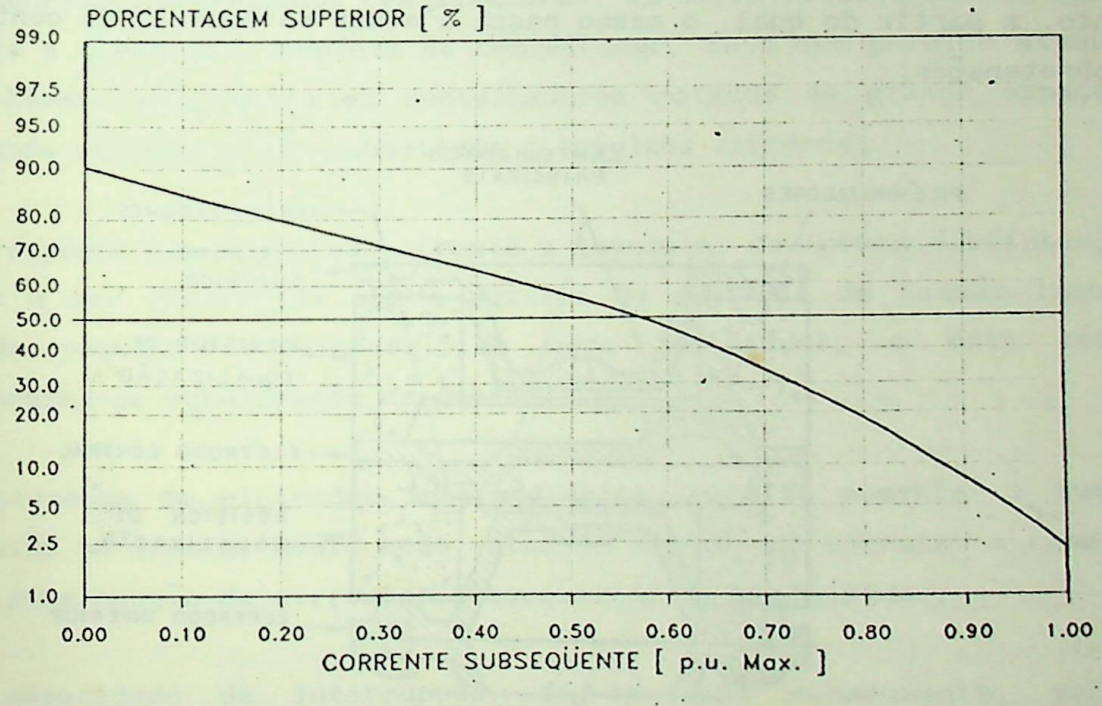


Figura II.2.6 - Distribuição Estatística das Amplitudes das Correntes Subsequentes[6]

É aparentemente intuitivo, que os impulsos atingem os pára-raios num instante de tempo, relativo a onda de tensão em freqüência industrial, totalmente aleatório, isto implica que, este fenômeno, deve vir a ser analizado de modo estatístico.

Sugere-se realizar esta análise com o auxílio da característica mostrada na Figura *II.2.6*, na qual *10 %* das operações dos pára-raios resultam em nenhuma corrente subseqüente, enquanto, *50 %* resultam em correntes subseqüentes que ultrapassam *55 %* do valor máximo possível.

O comportamento, detalhado na Figura *II.2.6*, sugere a existência de uma margem de projeto própria, inerente a todo o processo, que, vez por outra, permite acomodar a maioria das contigências operativas relativas à descargas de impulsos de longa duração ou mesmo impulsos de manobra.

II.2.2 - CARACTERÍSTICAS DOS CENTELHADORES SÉRIE

A característica disruptiva dos centelhadores série, é, virtualmente, responsável pelo nível de proteção de todo o pára-raios pois, determina o ponto, a partir do qual, o mesmo passa a atuar no sentido de controlar as sobretensões.

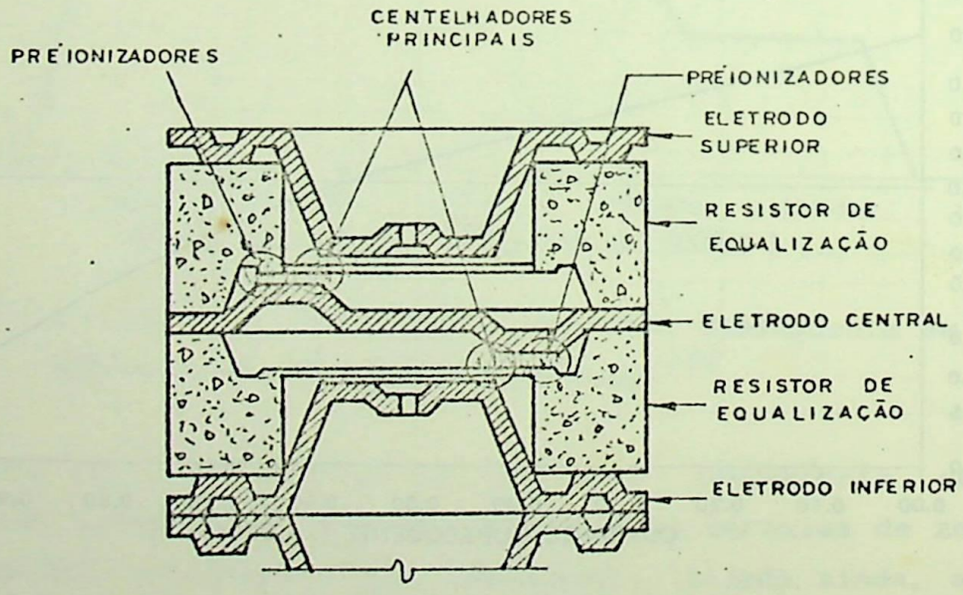


Figura II.2.7 - Arranjo Típico de um Centelhador com Espaçadores Cerâmicos Resistivos, conforme Projeto McGraw-Edison

Os centelhadores dos pára-raios, são constituídos, por conjuntos modulares com tensão nominal de *1 kV* ou *1.5 kV*, construídos com o

auxílio de eletrodos estampados em latão, cobre ou aço inox, separados do eletrodo adjacente por um espaçador, geralmente cerâmico, o que permite a formação de pequenos centelhadores, individuais, conforme mostra a Figura *II.2.7.*

É óbvio que a utilização de pequenos centelhadores, na forma de unidades individuais, em série, deve vir a apresentar algumas conseqüencias no projeto dos pára-raios, algumas delas, inclusive de extrema importância, senão seja:

- Em termos de tensão nominal, uma grande gama de pára-raios, podem vir a ser montados com o auxílio de pequenos centelhadores padronizados;

- A conexão, de pequenos centelhadores, em série reduz o atrazo de tempo para a disrupção completa do centelhador, fato que permite atenuar os problemas existentes em centelhadores dotados de grande espaçamento quando os mesmos são submetidos a impulsos íngremes;

- A resposta do centelhador frente a impulsos, de formas distintas, pode vir a ser controlada com o auxílio do controle da tensão imposta à cada pequeno centelhador; de modo individual, a esta técnica, denomina-se equalização de potencial;

- A presença de eletrodos intermediários, permite aumentar a queda de tensão no arco e, deste modo, atua no sentido de aumentar a capacidade de interrupção de correntes subseqüentes do centelhador;

- A capacidade de interrupção, de corrente subseqüente, sofre um incremento adicional, devido ao fato, do espaçamento em ar, de cada conjunto formado por dois pequenos centelhadores, permitir, através da interrupção do arco, intercalar uma grande massa de metal frio, eletrodos intermediários, fato que facilita a rápida deionização do centelhador; e

- Após a interrupção da corrente, o elevado número de eletrodos, ou

seja, a soma das quedas catódicas nos mesmos, atua no sentido de facilitar a recuperação dielétrica do meio, impedindo o reacendimento do arco nos centelhadores.

II.2.1 - CARACTERÍSTICAS DOS CENTELHADORES INDIVIDUAIS

Devido ao fato, dos mecanismos de descarga em meios gasosos serem dependentes da densidade das moléculas dos gases existentes no espaço, entre eletrodos, os invólucros dos pára-raios são herméticamente selados. Isto implica que, pelo menos, teóricamente, a característica disruptiva dos centelhadores passa a ser independente da umidade, temperatura e variações da pressão externa, bem como, se constitue em um forte indício que a perda da vedação, consiste em uma contingência extremamente grave.

Os pára-raios, além de selados, são, usualmente, preenchidos com ar seco, ou nitrogênio, não se detectando, em ambos casos, diferenças apreciáveis no comportamento da característica disruptiva dos centelhadores, pois ambos gases apresentam características disruptivas, práticamente idênticas.

Alguns projetos aplicam pressão positiva, geralmente de nitrogênio, no interior dos pára-raios, com o intuito de controlar a característica disruptiva dos centelhadores, e, nestes casos, perda de vedação, e por conseguinte, pressão interna, o que significa perda de características disruptivas, ou seja, protetivas, e inutilização, imediata e completa, do pára-raios. Nos demais casos, a perda de vedação, acaba por resultar na penetração de água no interior do pára-raios, favorecendo a formação de um processo de degradação, que manifesta seus efeitos a intervalos de tempo, geralmente, bem mais elevados.

Em sistemas de distribuição em média tensão, os surtos de tensão podem possuir formas bastante variadas, isto implica que, as tensões instantâneas, aplicadas aos centelhadores, apresentam taxas de crescimento distintas. Deste modo, o atrazo de tempo na disrupção dos

centelhadores, constituído pelos atrazos de tempo estatístico e de formação, possibilita com que os impulsos íngremes aplicados aos mesmos atinjam valores mais elevados. Por outro lado, com respeito a função de proteção contra sobretensões, isto se constitue num fato indesejável, pois, idealmente, é preferível, que os centelhadores sejam sensitivos aos níveis de tensão ao invés da forma do impulso.

O atrazo de tempo estatístico, que nada mais é que o intervalo de tempo entre o aparecimento do primeiro elétron livre e o início da avalanche disruptiva, pode vir a ser minimizado através da incorporação de dispositivos pré-ionizadores, geralmente na forma de centelhadores, aos centelhadores principais.

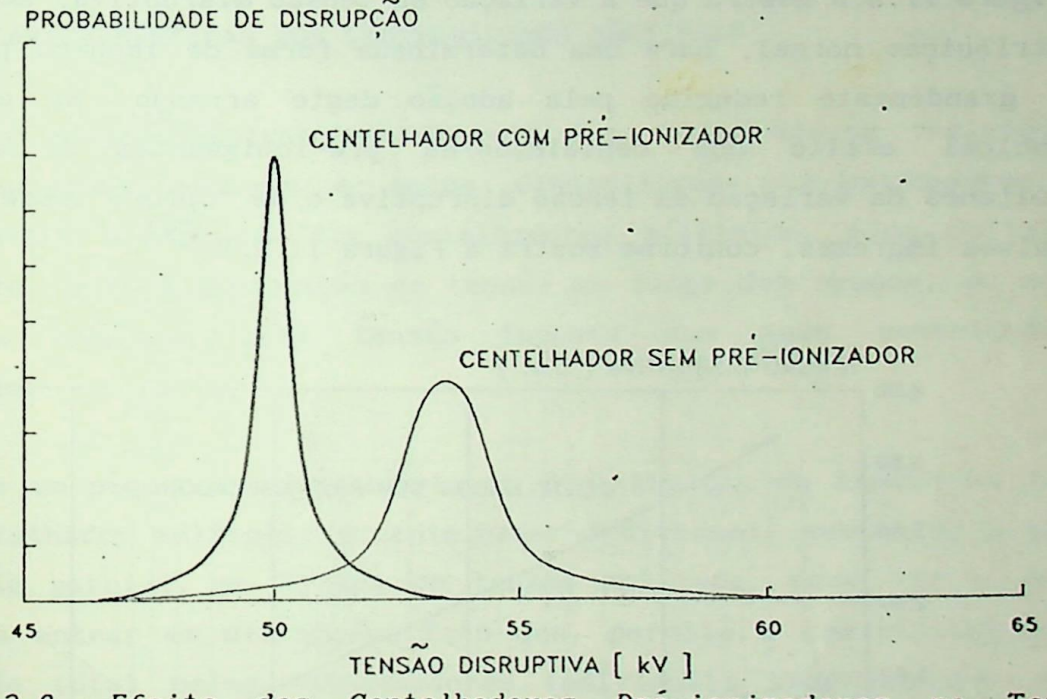


Figura II.2.8 - Efeito dos Centelhadores Pré-ionizadores na Tensão Disruptiva para Impulso com Forma Constante, conforme Projeto Ohio Brass[18]

Conforme mostrado na Figura *II.2.7*, os dois centelhadores, pré-ionizador e principal, podem vir a ser estampados em um único eletrodo, e, apesar das diferenças físicas, entre os vários tipos de pré-ionizadores, os princípios, nos quais eles se baseiam, são práticamente os mesmos, independente, do projeto de pára-raios. Um pequeno centelhador, pré-ionizador, é colocado em paralelo com o centelhador principal e,

inserido, eletricamente, ao circuito do pára-raios através de uma grande impedância, capacitiva ou resistiva. O centelhador pré-ionizador é projetado de modo a entrar em disrupção sob tensão inferior à do centelhador principal e, haja vista, que ambos dividem o mesmo espaço físico, a disrupção do centelhador pré-ionizador, é responsável pela geração dos elétrons livres, necessários ao processo de disrupção do centelhador principal. Devido a elevada impedância série, os centelhadores pré-ionizadores não conduzem corrente apreciável e, deste modo, não apresentam nenhum efeito apreciável no desempenho do pára-raios após a disrupção dos centelhadores principais que, virtualmente, os curto circuitam, conforme mostra a Figura *II.2.7.*[18]

A Figura *II.2.8* mostra que a variação da tensão disruptiva, amplitude da distribuição normal, para uma determinada forma de impulso pode vir a ser grandemente reduzida pela adoção deste arranjo. No entanto, o principal efeito dos centelhadores pré-ionizadores é a redução simultânea da variação da tensão disruptiva e do *"upturn"* observado para impulsos íngremes, conforme mostra a Figura *II.2.9.*[6]

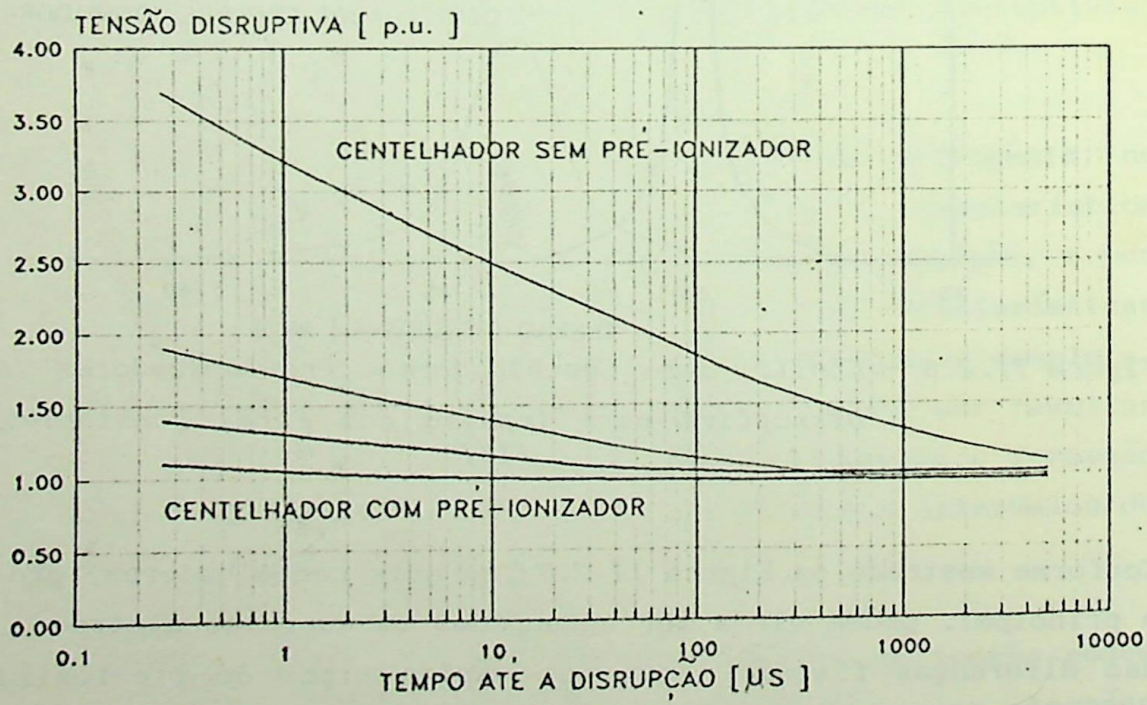


Figura II.2.9 - Efeito dos Centelhadores Pré-ionizadores na Tensão Disruptiva, inclusive para Impulsos Íngremes[6]

O tempo de atrazo de formação, ou seja, o intervalo de tempo associado com o desenvolvimento do arco, através do centelhador é, basicamente, determinado pelo espaçamento entre os eletrodos. Este atrazo de tempo é grandemente reduzido em centelhadores múltiplos, constituídos, por uma coluna de centelhadores individuais em série, devido ao fato do arco se desenvolver, de forma parcial, simultaneamente, em vários de seus centelhadores individuais.

Após a disrupção de alguns dos centelhadores individuais, a tensão aplicada é redistribuída pelos centelhadores remanescentes, produzindo um efeito conhecido como disrupção em cascata.

II.2.2 - CARACTERÍSTICAS DOS CENTELHADORES MÚLTIPLOS

Estando as características disruptivas dos centelhadores individuais asseguradas pela vedação e pelos dispositivos pré-ionizadores, a característica disruptiva dos centelhadores múltiplos, fica definida, basicamente, pela distribuição de tensão ao longo dos mesmos, ou seja, em última análise, pela tensão imposta aos seus centelhadores individuais.

No caso de um pequeno desequilíbrio na distribuição de tensão ao longo de um centelhador múltiplo, o centelhador individual, submetido a maior solicitação parcial, em termos de tensão aplicada, deve vir a ser o primeiro a entrar em disrupção, fato que, permite a redistribuição da solicitação total pelos centelhadores individuais remanescentes e, a disrupção em cascata, de todo o centelhador múltiplo. Deste modo, o desequilíbrio na distribuição de tensão nos centelhadores múltiplos é responsável pela disrupção dos mesmos, para solicitações inferiores à máxima prevista, teoricamente. Conseqüentemente, é plenamente desejável, que os centelhadores múltiplos apresentem a melhor distribuição de tensão, possível, fato também, extremamente, importante quando da interrupção de corrente subseqüente. [19]

O circuito elétrico, equivalente, de um centelhador múltiplo construído,

por exemplo, com espaçadores cerâmicos, em esteatita ou alumina, que apresentam, alta impedância série, em paralelo, com o espaçamento em ar, ou seja, entre eletrodos, é mostrado na Figura *II.2.10*.

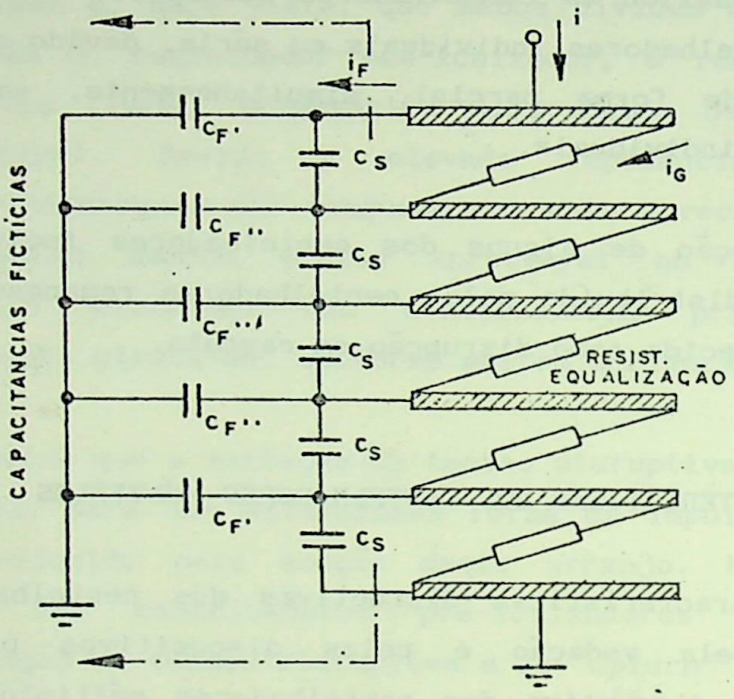


Figura II.2.10 - Circuito Elétrico Equivalente, de um Centelhador Múltiplo[19]

Nestes casos, a distribuição de tensão depende da relação entre a impedância série, geralmente, capacitiva, e a impedância de fuga, capacitiva, dos eletrodos para a terra. Nos projetos de centelhadores, previstos para trabalhar sem qualquer dispositivo extra de compensação, com intuito de melhorar a distribuição de tensão, esta relação é, usualmente reduzida; algo entre *1* e *10*, e assim, a distribuição de tensão ao longo dos centelhadores não é uniforme. Deste modo, uma maior parcela da tensão total, imposta aos centelhadores múltiplos, é aplicada ao centelhador individual mais próximo do terminal de linha do pára-raios e subseqüentes, fato que, implica na disrupção total do centelhador, para níveis de tensão inferiores ao nível de projeto desejado.

A Figura *II.2.11* mostra o valor da sobretensão aplicada ao par de eletrodos, ou seja, centelhador individual, superior, de um centelhador

múltiplo, projetado para *7.5 kV* de tensão nominal, em função da relação entre as capacitâncias série dos centelhadores individuais e de fuga para a terra dos eletrodos dos mesmos, estas, em primeira aproximação, supostas como constantes.

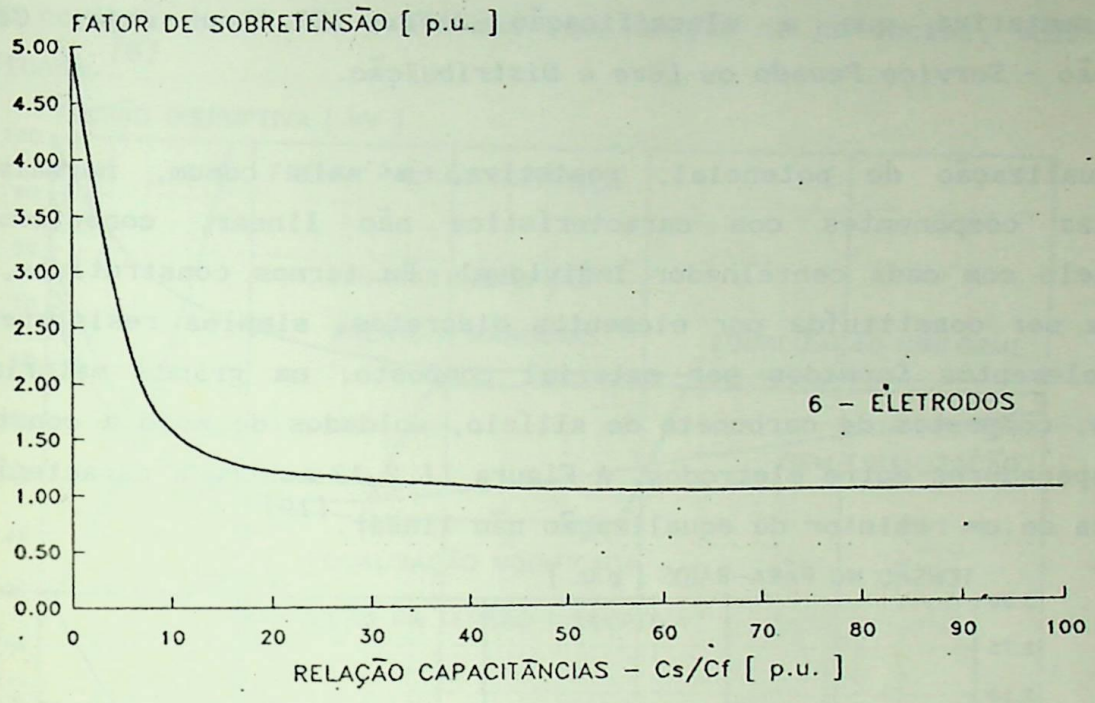


Figura II.2.11 – Sobretensão Aplicada ao Centelhador Individual Superior de um Centelhador Múltiplo em Função da Relação entre Capacitâncias Série e de Fuga[19]

A distribuição não uniforme de tensão em centelhadores múltiplos, torna-se mais pronunciada em pára-raios para tensões nominais superiores a *15 kV*. Nestes casos, é necessário fazer uso de um número desproporcional de centelhadores individuais, caso não se faça uso de nenhum dispositivo para equalização de potencial quando, da construção de seus centelhadores múltiplos. Por outro lado, é conveniente alertar que, a concentração de tensão, em determinados centelhadores, pode, dependendo do caso, conduzir a uma concentração de campo elétrico, de tal ordem, que resulte em descargas parciais contínuas, fato extremamente indesejável.[20]

Conseqüentemente, praticamente todos os pára-raios, estação e classe intermediária, bem como, a maioria dos pára-raios para distribuição, construídos, para tensões nominais mais elevadas, são equipados com

elementos capazes de prover uma forma de equalização de potencial ao longo de seus centelhadores múltiplos. Aqui cabe uma observação, optou-se, neste caso, pela classificação *ANSI - CSA*, ou seja, *Classes Estação, Intermediária* e *Distribuição*, por considerar-se a mesma mais representativa que a classificação *ABNT - IEC*, ou seja, *Classes Estação - Serviço Pesado ou Leve* e *Distribuição*.

A equalização de potencial, resistiva, a mais comum, normalmente, utiliza componentes com característica não linear, conectados em paralelo com cada centelhador individual. Em termos construtivos, pode vir a ser constituída por elementos discretos, simples resistores, ou por elementos formados por material composto, na grande maioria das vezes, compostos de carboneto de silício, moldados de modo a constituir os espaçadores entre eletrodos. A Figura *II.2.12* mostra a característica típica de um resistor de equalização não linear.[19]

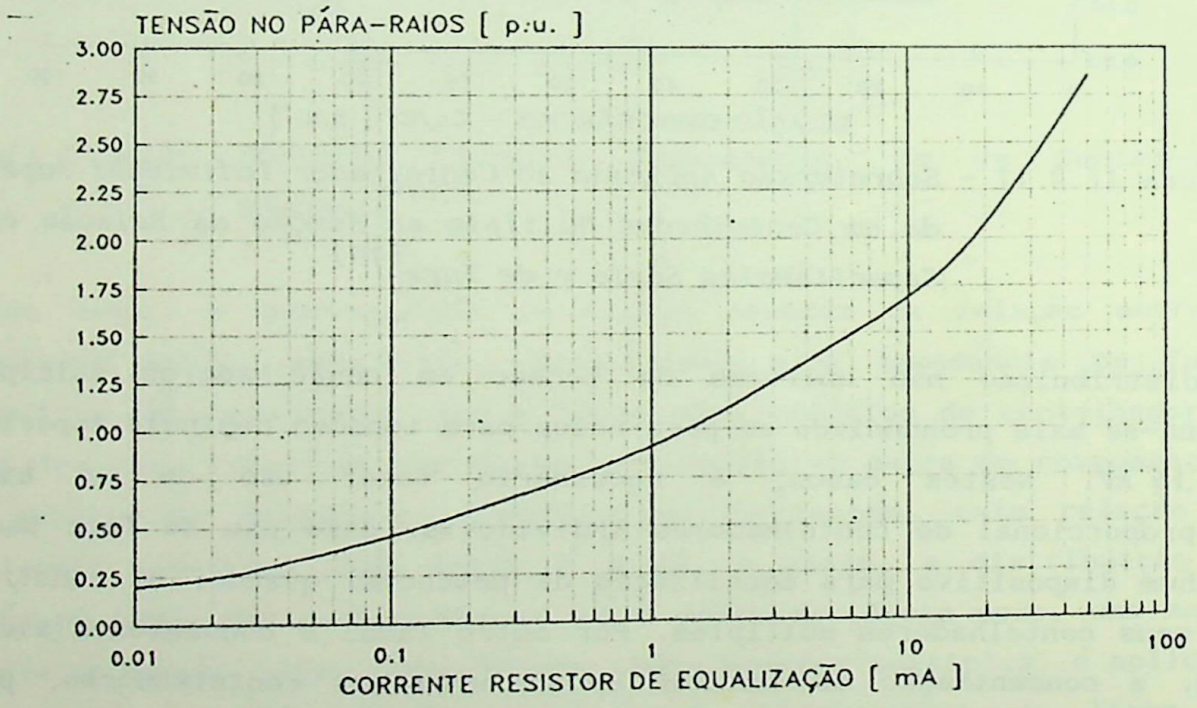


Figura II.2.12 - Característica Tensão versus Corrente de um Resistor Não Linear de Equalização de Potencial Típico[6]

Devido ao fato dos resistores de equalização de potencial apresentarem característica não linear, a energia dissipada nos mesmos sob condições de tensão nominal não é, normalmente, muito elevada, embora, o controle da tensão aplicada aos centelhadores individuais seja bastante efetivo.

inclusive, para tensões próximas à tensão disruptiva.

A Figura *II.2.13*, ilustra a eficiência da equalização de potencial, através das características disruptivas de centelhadores múltiplos para tensão nominal de *12 kV*, com e sem equalização de potencial, uniforme e modificada.[6]

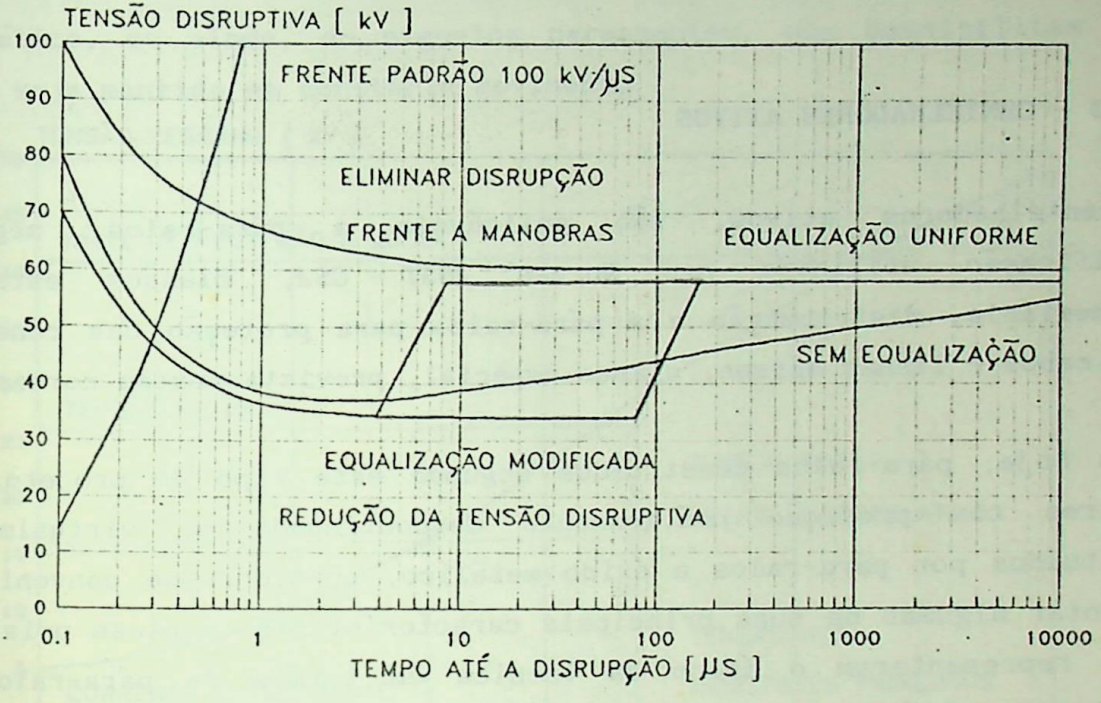


Figura II.2.13 - Característica Tensão Disruptiva de Centelhadores Dotados de Vários Dispositivos de Equalização de Potencial[6]

Através de uma complementação adequada, entre a equalização resistiva, normalmente utilizada, e uma equalização capacitiva, é possível, de modo proposital, criar uma distribuição de tensão, não uniforme, adequada para impulsos íngremes, obtendo-se deste modo, pára-raios dotados de características protetivas especiais.

Um destes arranjos, mostrado na Figura *II.2.13*, conhecido como *"centelhador para pára-raios de máquinas rotativas"* incorpora capacitores especiais para equalização de potencial, em paralelo com cada centelhador individual par. Logo, quando este tipo de centelhador é submetido a um impulso íngreme, os capacitores, virtualmente curto circuitam *50 %* dos centelhadores individuais, reduzindo pois a tensão

disruptiva do conjunto. Deste modo, este tipo de arranjo se contrapõem aos atrazos de tempo estatístico e de formação, responsáveis pelo aumento da tensão disruptiva para impulsos íngremes. Em termos práticos, estes centelhadores são aplicáveis à pára-raios utilizados na proteção de equipamentos que apresentam suportabilidade, frente a impulsos, plana ou decrescente, tais como máquinas rotativas ou transformadores a seco.

II.2.3 - CENTELHADORES ATIVOS

Os centelhadores ativos, são aplicáveis a pára-raios, segundo classificação utilizada nas Normas *ANSI - CSA*, classes estação, intermediária, distribuição e a pára-raios para proteção das conexões entre cabos e linhas aéreas, classe especial, prevista nestas normas.

Embora hoje, pára-raios construídos segundo este tipo de projeto, se encontrem com produção práticamente descontinuada e, virtualmente substituídos por pára-raios a óxido metálico, considera-se conveniente apresentar algumas de suas principais características técnicas pois, os mesmos representaram o ápice da técnica em termos de pára-raios a carboneto de silício.

Nos pára-raios com centelhadores, estes, são responsáveis pela mudança do estado, inicial, não - condutor, para o estado, intermediário, condutor, definindo pois, o início da ação de contrôle de tensão, bem como, pela interrupção das correntes subseqüentes, ou seja, pelo retorno ao estado inicial, não - condutor. Com o auxílio da Figura *II.2.2* é fácil mostrar que, qualquer redução nos níveis de proteção, resulta em aumento da corrente subseqüente, a ser interrompida pelos centelhadores.

Deste modo, em termos bem simples, qualquer tentativa de reduzir os níveis de proteção de um pára-raios, através da redução de sua tensão residual, compromete o desempenho do mesmo quando, da extinção das correntes subseqüentes, ou seja, existem limites impostos pelos centelhadores, ligados a sua capacidade de interrupção de corrente subseqüente, que impedem, a princípio, reduções sistemáticas nos níveis

de proteção.

Uma maneira de se melhorar a capacidade de interrupção de corrente subseqüente dos centelhadores, fator limitante, quando de futuras reduções dos níveis de proteção, é fazer uso, nos projetos de pára-raios, de centelhadores, que utilizem o princípio do sopro magnético, ou ainda, de magnetos permanentes, que possibilitam que o arco seja mantido em constante movimento.

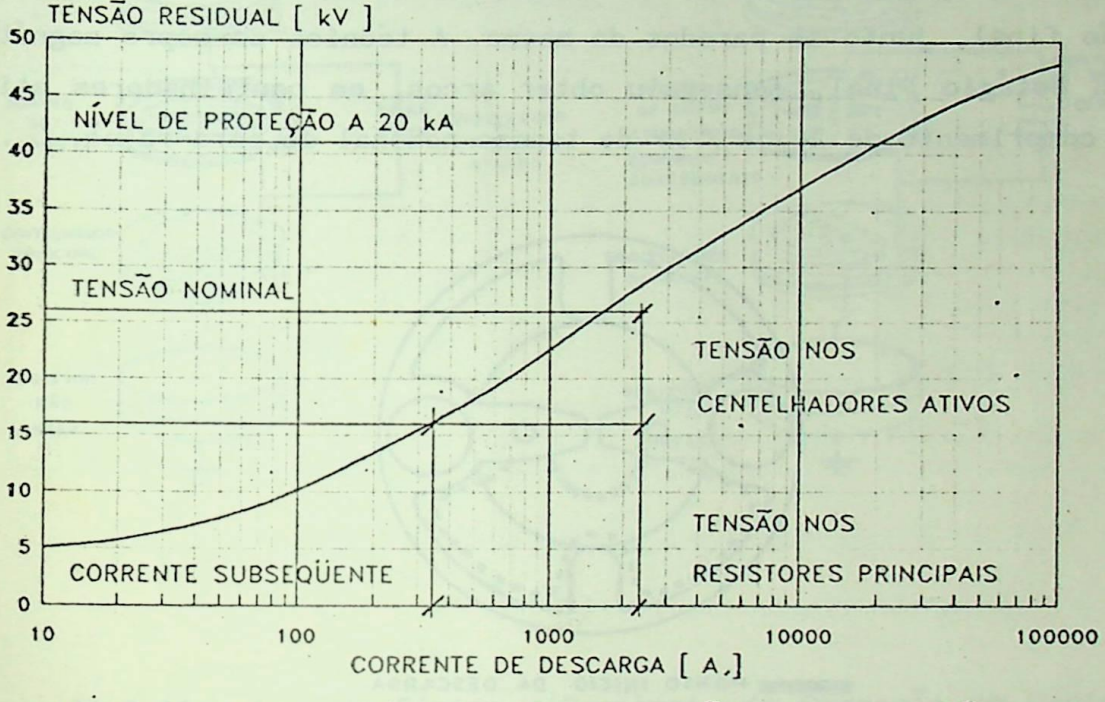


Figura II.2.14 - Característica de Operação de um Pára-raios com Centelhadores Ativos[21,22,23]

A principal diferença entre os centelhadores ativos e passivos é o fato de que os primeiros, devido, básicamente, ao alongamento e resfriamento do arco entre seus eletrodos, apresentarem uma queda de tensão relativamente elevada, conforme ilustra a Figura *II.2.14*, isto permite a redução da tensão aplicada aos resistores de carboneto de silício, bem como, o deslocamento de seu ponto de operação frente tensões em freqüência industrial.

Os centelhadores ativos, virtualmente, forçam a redução da corrente subseqüente para zero, possibilitando a interrupção da mesma antes do zero natural da tensão. Esta característica, permitiu a construção dos

primeiros pára-raios a carboneto de silício, aptos a operarem em sistemas de corrente contínua.

O alongamento e resfriamento do arco nos centelhadores é realizado dentro de câmaras de arco, horizontais, construídas em material cerâmico refratário. Conforme mostra a Figura *II.2.15*, o arco, quando da disrupção do centelhador, possui como comprimento, o espaço ditado pela pequena distância entre os eletrodos e, devido a presença de um campo magnético adequado, interior à câmara de arco, é alongado até sua posição final, junto as paredes da mesma. A técnica de sopro magnético, no seu estágio final, conseguiu obter arcos, em centelhadores ativos, com o comprimento de *20 cm / kV* de tensão nominal de pára-raios.

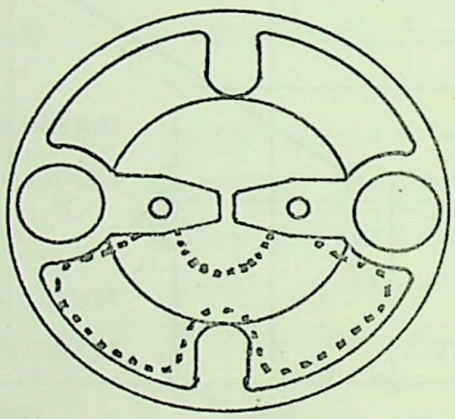


Figura II.2.15 - Deslocamento do Arco no Interior de um Centelhador Ativo[6]

O campo magnético, responsável pelo alongamento do arco é obtido com o auxílio de bobinas, conhecidas como bobinas de sopro, conectadas em série com os centelhadores individuais. De modo a evitar as sobretensões, oriundas da descarga de impulsos íngremes, as bobinas de sopro possuem um elemento de *"bypass"* constituído por um centelhador auxiliar ou por um pequeno resistor de carboneto de silício. O arranjo físico, bem como a seqüência de operação de um centelhador ativo é

mostrada na Figura *II.2.16*.

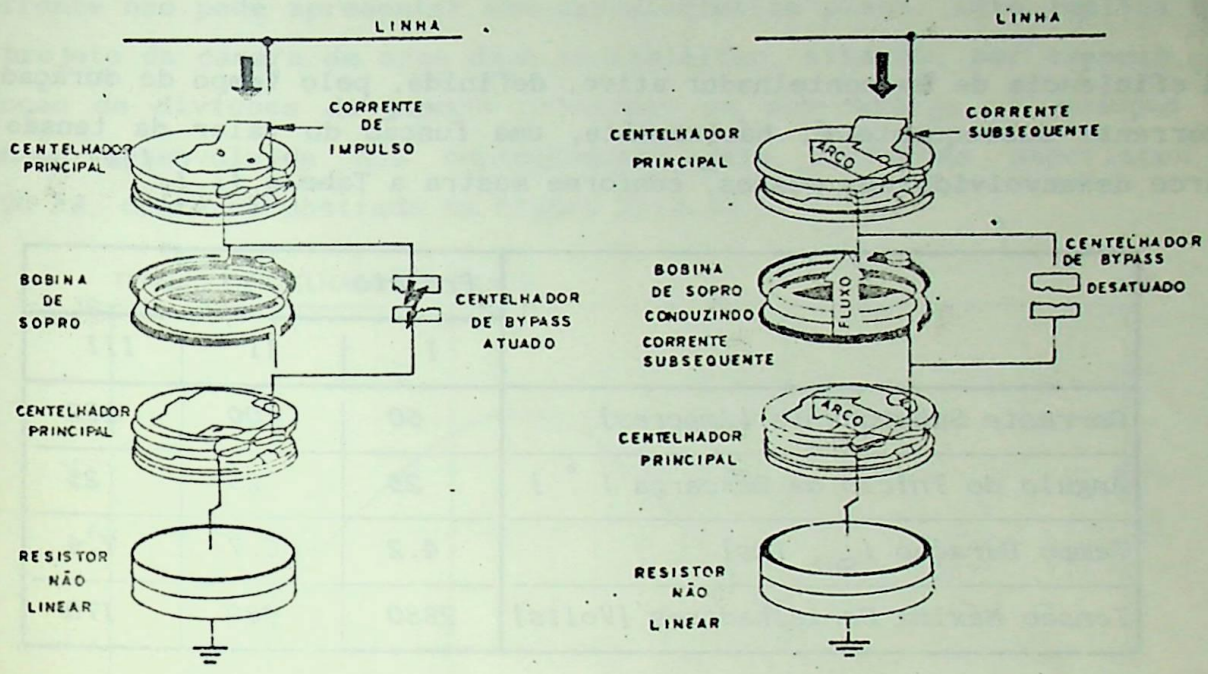


Figura II.2.16 - Arranjo Físico e Seqüencia de Operação um Centelhador Ativo, segundo General Electric[22]

Os impulsos de corrente íngremes, conforme discutido, são desviados para os elementos de "*bypass*". No entanto, haja vista que a impedância oferecida pelas bobinas de sopro sob freqüência industrial, ou seja, na região de corrente subseqüente, não é significativa, ocorre a transferência gradativa da corrente do elemento de "*bypass*" para as bobinas de sopro e, deste modo, o campo magnético gerado por esta corrente, força o deslocamento do arco dentro das câmaras de arco do centelhador.

A transferência de corrente dos elementos de "*bypass*" para as bobinas de sopro, bem como, o processo de alongamento do arco, principalmente, este

último, são processos graduais. Deste modo, a queda de tensão nos centelhadores, ou seja, no arco desenvolvido, conforme Figura *II.2.17*, apresenta um crescimento, relativamente lento, até atingir um patamar práticamente constante, no qual permanece, até a interrupção da corrente subseqüente.

A eficiência de um centelhador ativo, definida, pelo tempo de duração da corrente subseqüente é, básicamente, uma função do valor da tensão de arco desenvolvida nos mesmos, conforme mostra a Tabela *II.1.* [19]

	Projeto		
	I	II	III
Corrente Subseqüente [Amperes]	60	100	172
Ângulo do Início da Descarga [°]	25	25	25
Tempo Duração I_{Sub} [ms]	4.2	6.7	7.4
Tensão Máxima Centelhadores [Volts]	2880	380	170

Tabela II.1 - Eficiência dos Centelhadores Ativos

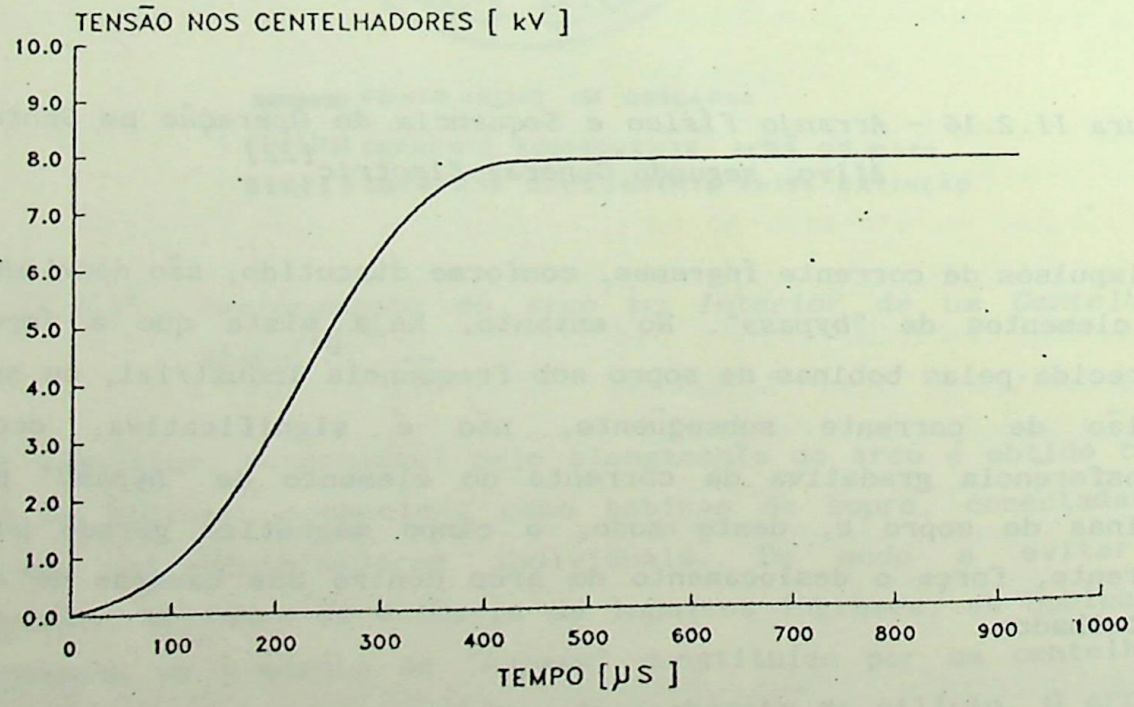


Figura II.2.17 - Característica Tensão versus Tempo Desenvolvida em um Centelhador Ativo [22]

No entanto, de modo a evitar que a característica de proteção dos pára-raios, resultado, da soma da queda de tensão nos resistores a carboneto de silício e da queda de tensão nos centelhadores ativos, ultrapasse o nível definido por projeto, inclusive, quando da interrupção de corrente subsequente, a tensão desenvolvida versus corrente não pode apresentar uma característica plana. Isto implica que o projeto da câmara de arco deve possibilitar, através, por exemplo, da adoção de divisões da câmara principal em sub-câmaras, a redução da tensão desenvolvida nos centelhadores para correntes superiores a *0.20 kA*, conforme mostrada na Figura *II.2.18*.

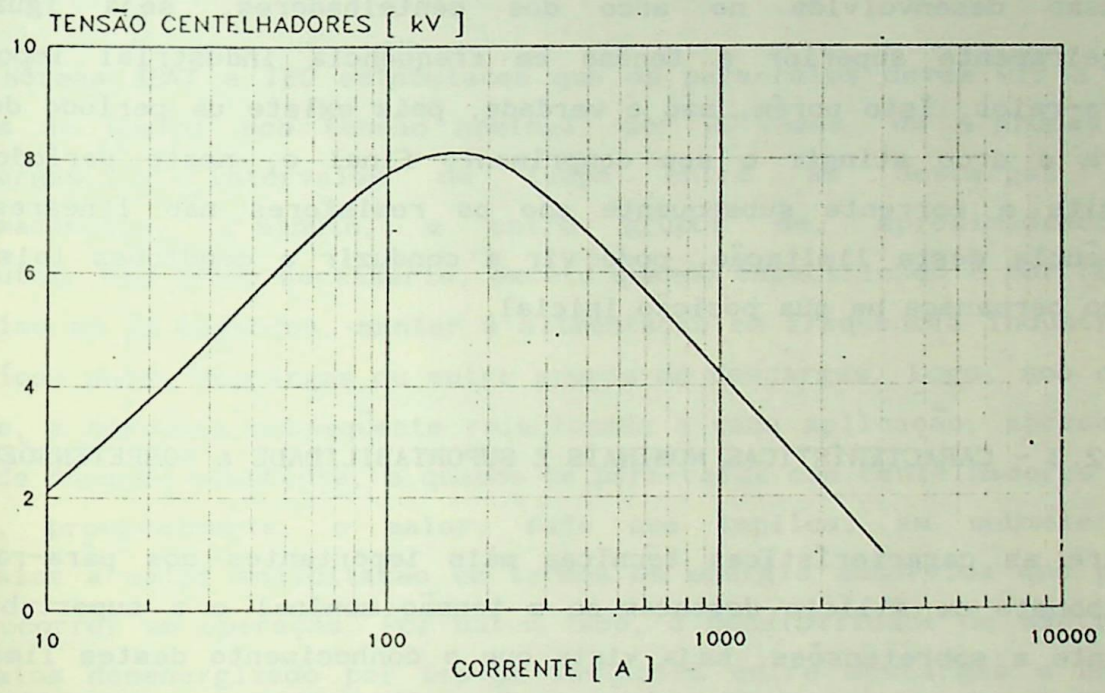


Figura II.2.18 - Característica Tensão versus Corrente de um Centelhador Ativo com Tensão Nominal de 6 kV, segundo General Electric. [22]

Um dos principais pontos fracos dos centelhadores ativos é que sua concepção de projeto é restrita a condições de contorno e sistemas bastante específicos. Normalmente, centelhadores auxiliares, bobinas, bem como, outros componentes, tais como capacitores e resistores de equalização de potencial podem vir a ser fácilmente destruídos por impulsos com forma não esperada, que resultem em mal funcionamento dos centelhadores, por exemplo, pelo fato do arco não se deslocar de sua

posição inicial, como ocorre quando da descargas de correntes de manobra com valor de crista acima do previsto em projeto, fato facilmente perceptível, da descarga de linhas de transmissão dotadas de impedância de surto, bastante distintas, sob um mesmo pára-raios. As áreas, potencialmente problemáticas, são as que envolvem altas correntes de baixa freqüência, devido por exemplo manobras de grandes bancos de capacitores, linhas de transmissão ou cabos isolados de potência.

Conforme discutido, é aparentemente possível construir um pára-raios sem resistores não lineares principais, bastando, para tanto, que a queda de tensão desenvolvida no arco dos centelhadores, seja igual, ou ligeiramente superior a tensão em freqüência industrial imposta ao pára-raios. Isto porém, não é verdade, pois existe um período de tempo para o arco atingir o seu comprimento final e, neste período, quem limita a corrente subsequente são os resistores não lineares e, a ausência desta limitação, pode vir a conduzir a condições tais que o arco permaneça na sua posição inicial.

II.2.3 - CARACTERÍSTICAS NOMINAIS E SUPORTABILIDADE A SOBRETENSÕES

Entre as características técnicas mais importantes dos pára-raios de carboneto de silício destacam-se a tensão nominal e a suportabilidade frente a sobretensões, haja vista que o conhecimento destes limites é, virtualmente, o primeiro passo no sentido da correta aplicação e utilização destes pára-raios.

II.2.3.1 - TENSÃO NOMINAL

A tensão nominal de um pára-raios é determinada pelo ensaio de ciclo de operação, que apesar de algumas diferenças de cunho conceitual, é parte constituinte de todas as normas técnicas sobre pára-raios.
As Normas *ANSI - CSA* estabelecem que os pára-raios devem vir a ser capazes de operar sob sua tensão nominal, aplicada de modo contínuo, de maneira correta, que em última análise significa, interromper a corrente

subseqüente, por *24* minutos, submetidos a correntes de descarga, de *5 kA* ou *10 kA*, função de sua classificação, a intervalos tempo de *1* minuto, e de modo sequencial, aplicadas a *15°* umas das outras. Logo, sob este enfoque, a corrente subseqüente relacionada a cada aplicação, varia em termos de tempo de duração e amplitude, quando de impulsos subseqüentes, fato que permite, em pára-raios construídos, com centelhadores ativos, obter a máxima solicitação em termos de magnitude de corrente e energia. Por outro lado, a aplicação de tensão em freqüência industrial durante todo o ensaio, é responsável pela imposição de um maior esforço térmico ao sistema de equalização de potencial dos centelhadores, caso existam.

Já as Normas *ABNT* e *IEC* estabelecem que os pára-raios devem vir a ser capazes de operar sob tensão nominal, por *20* vezes, em *4* grupos de *5* descargas a intervalos de tempo entre as descargas de, aproximadamente, *1* minuto, e entre grupos de, aproximadamente, *30* minutos, não sendo necessário, exceto quando especificado e por tempo no máximo de *10* segundos, manter a alimentação em freqüencia industrial no período entre descargas ou entre grupos de descargas. Logo, sob este enfoque, a corrente subseqüente relacionada a cada aplicação, apresenta tempo de duração constante, e quando de pára-raios com centelhadores não ativos, provavelmente, o maior, fato que implica, em submeter o pára-raios a maior solicitação em termos de energia absorvida que pode vir a ocorrer em operação. Por outro lado, a possibilidade de manter o pára-raios desenergizado por breves instantes entre descargas e entre grupos atua no sentido de reduzir o esforço térmico imposto aos resistores de equalização de potencial quando existirem. Cuidado extra deve vir a ser tomado quando de ensaios com pára-raios equipados com centelhadores ativos.

A grande maioria das Normas, para médias tensões, definem as tensões nominais de pára-raios em termos de múltiplos inteiros de *3 kV*, exceto para tensões nominais entre *3 kV* e *12 kV*, onde a base para multiplicidade, é *1.5 kV*. Logo as tensões nominais dos pára-raios, para média tensão são as seguintes:

3, 4.5, 6, 7.5, 9, 10.5, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30 ,33, 36, 39 - kV

Um ponto importante que deve vir a ser ressaltado é que, embora a definição de tensão nominal, implique intuitivamente, na tensão sob a qual os pára-raios devem, ou podem, vir a operar por tempo indefinido, não existe nenhum requisito, em nenhuma norma técnica, que suporte esta afirmação.

A maioria dos pára-raios são, provavelmente, projetados tendo como base a sua aplicação típica, ou seja, operar praticamente, todo o tempo submetido a *80 %* da sua tensão nominal, atentar que os pára-raios são normalmente conectados entre fase e terra, saindo desta condição sómente por alguns instantes, devido a algumas contingências temporárias do sistema. É muito provável que a maioria dos pára-raios construídos com centelhadores equipados com resistores de equalização de potencial não lineares não possam, por problemas térmicos, operar sob sua tensão nominal por intervalos de tempo superiores ao estabelecido no ensaio de ciclo de operação, ou seja, algo em torno de *1500 segundos*.

II.2.3.2 - SUPORTABILIDADE FRENTE A SOBRETENSÕES

Na maioria das aplicações em sistemas de distribuição em média tensão, a tensão nominal dos pára-raios é superior a qualquer sobretensão em freqüência industrial oriunda de faltas simples à terra. Deste modo, quando de contingências em sistemas, tais como, perda de neutro, ou da operação inadequada de equipamentos, por exemplo, responsáveis pelo controle de tensão, sómente em circunstâncias extremamente raras, que normalmente envolvam, nos exemplos acima, a existência de falta simultânea, ou seja, contingência dupla, os pára-raios podem vir a ser submetidos a tensões que excedam sua tensão nominal.

Via de regra, a capacidade de um pára-raios operar na presença de tensões, em freqüência industrial, superiores a sua tensão nominal, ou seja, sobretensões, depende de sua suportabilidade frente a dois possíveis estados operativos, definidos, conforme a seguir:

Estado não Condutor - Capacidade dos centelhadores em suportar as

sobretensões sem entrar em disrupção e sem que os resistores de equalização de potencial entrem em condição de destruição por avalanche térmica, fenômeno, normalmente, conhecido como, *"Thermal Runnaway"*, semelhante ao que ocorre em resistores a óxido metálico, conforme discutido no Item *II.3.*

Estado Condutor - Capacidade dos resistores não lineares principais em suportar esforços térmicos extras, bem como, capacidade dos centelhadores em suportar e extinguir as altas correntes subseqüentes.

Uma idéia do valor que pode vir a atingir as correntes subseqüentes, e por conseguinte o esforço térmico ao qual um pára-raios é submetido por ocasião de sobretensões em freqüência industrial pode ser obtida conforme a seguir: [24]

$$I_{Sub} = I_{Sub_0} V_{p.u.}^{\alpha} \qquad (II.2.3.2.1)$$

onde:

α = Coeficiente de Não Linearidade dos Resistores a Carboneto de Silício, normalmente compreendido entre, $2 < \alpha < 4$;

I_{Sub_0} = Corrente Subseqüente para Tensão Nominal;

I_{Sub} = Corrente Subseqüente na Condição de Sobretensão $V_{p.u.}$.

As Normas Técnicas definem o menor valor de tensão disruptiva em freqüência industrial como sendo *1.5* vezes a tensão nominal, ou seja, *1.5. p.u.* da tensão nominal, para todos os pára-raios com tensão nominal inferior a *60 kV* e *1.35 p.u.* da tensão nominal para os pára-raios, segundo *ANSI - CSA*, classes estação e intermediária com, tensão nominal superior a *60 kV*, atentar que os pára-raios distribuição são fabricados para tensões nominais de até *39 kV*.

Um ponto bastante interessante a ser comentado é o fato de não existir um limite superior para a tensão disruptiva sob freqüência industrial de

um pára-raios, inclusive porque idealmente, os pára-raios não devem vir a atuar sob estas condições sobre pena de serem danificados. Os pára-raios, para a classe de distribuição, fabricados, segundo Normas *ABNT - IEC* apresentam como tensão disruptiva a freqüência industrial, tipicamente, *1.7 p.u.* da tensão nominal, em pára-raios classe *A* e entre *2.0 p.u.* e *2.2 p.u.* da tensão nominal, pára-raios série *B*.

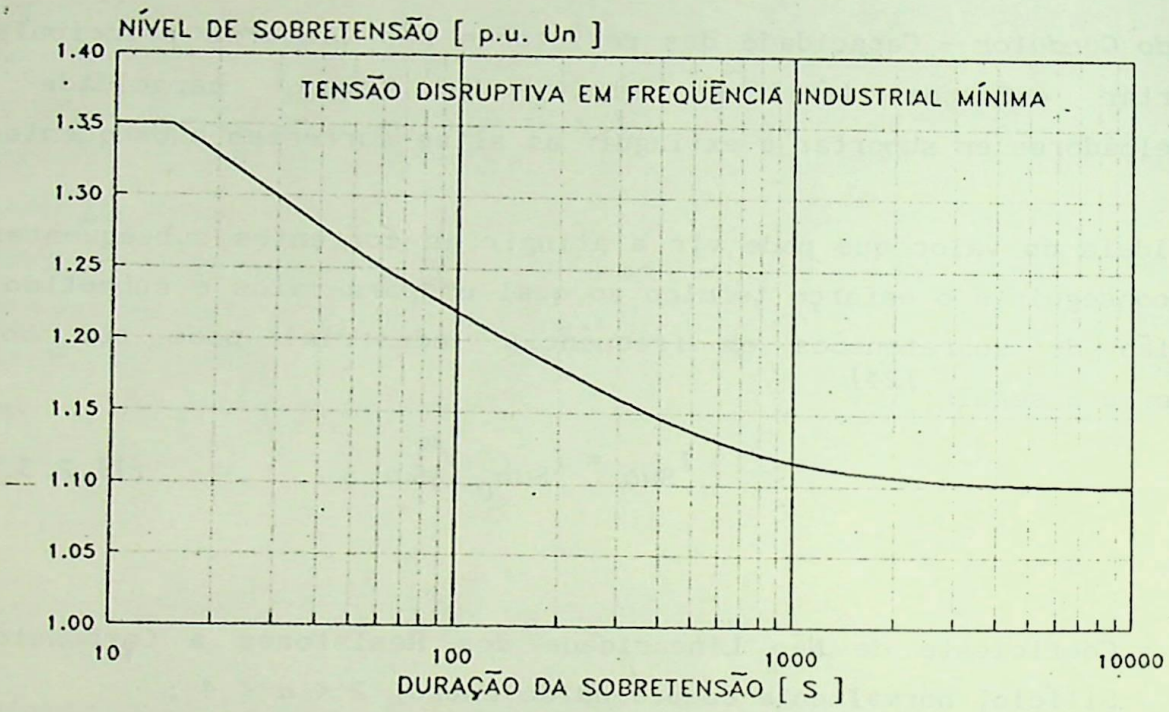


Figura II.2.19 - Suportabilidade de um Pára-raios Estação frente a Sobretensões em Freqüência Industrial, segundo Ohio Brass[25]

No entanto, o fato de um pára-raios apresentar, um nível elevado de tensão disruptiva em freqüência industrial não significa que o mesmo possa suportar tal tensão por períodos de tempo elevados. Isto pode ser facilmente verificado com auxílio dos procedimentos adotados nos ensaios normalizados, a exemplo do ensaio de tensão disruptiva em freqüência industrial, que evitam, ao máximo, expor os pára-raios a tensões superiores a sua tensão nominal.

O fator limitante, no caso de ensaios. usualmente realizados com equipamento dotado de baixa potência de curto circuito, ou seja, elevada impedância interna, é, sem sombra de dúvida, a possibilidade de

ocorrência de uma falha, de origem térmica, dos resistores de equalização de potencial, não lineares, utilizados em praticamente todos os pára-raios classe estação, intermediária e na maioria dos pára-raios de distribuição para tensões mais elevadas.

Haja vista que os aumentos da tensão aplicada aos resistores de equalização de potencial não lineares são inferiores aos aumentos do consumo de energia que, por sua vez, deve vir a ser dissipada, a suportabilidade dos pára-raios frente a sobretensões em freqüência industrial apresenta o aspecto mostrado na Figura *II.2.19.* [25]

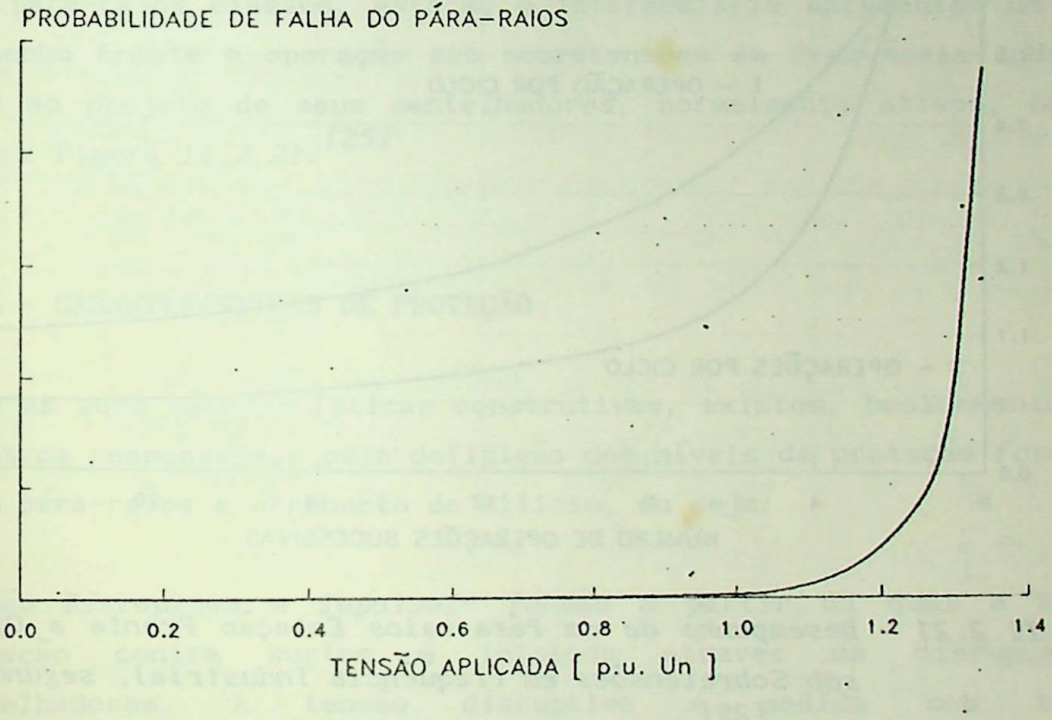


Figura II.2.20 - Natureza Estatística da Taxa de Falhas de um Pára-raios Distribuição frente a Sobretensões em Freqüência Industrial [26]

Conforme discutido, caso um pára-raios entre em condução quando submetido a uma sobretensão em freqüência industrial, a sua probabilidade de falha aumenta substancialmente pois, os centelhadores necessitam interromper uma corrente subseqüente elevada, responsável por um esforço térmico acima do previsto por projeto. A seqüência de eventos associada a estas ocorrências se encontra relacionada 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 freqüência industrial.

Os pára-raios para distribuição, normalmente, não apresentam capacidade de operação sob condições de sobretensão em freqüência industrial e deste modo sua taxa de falha quando submetidos a estas condições é determinada pelas características e suportabilidade estatística de seus componentes.[26]

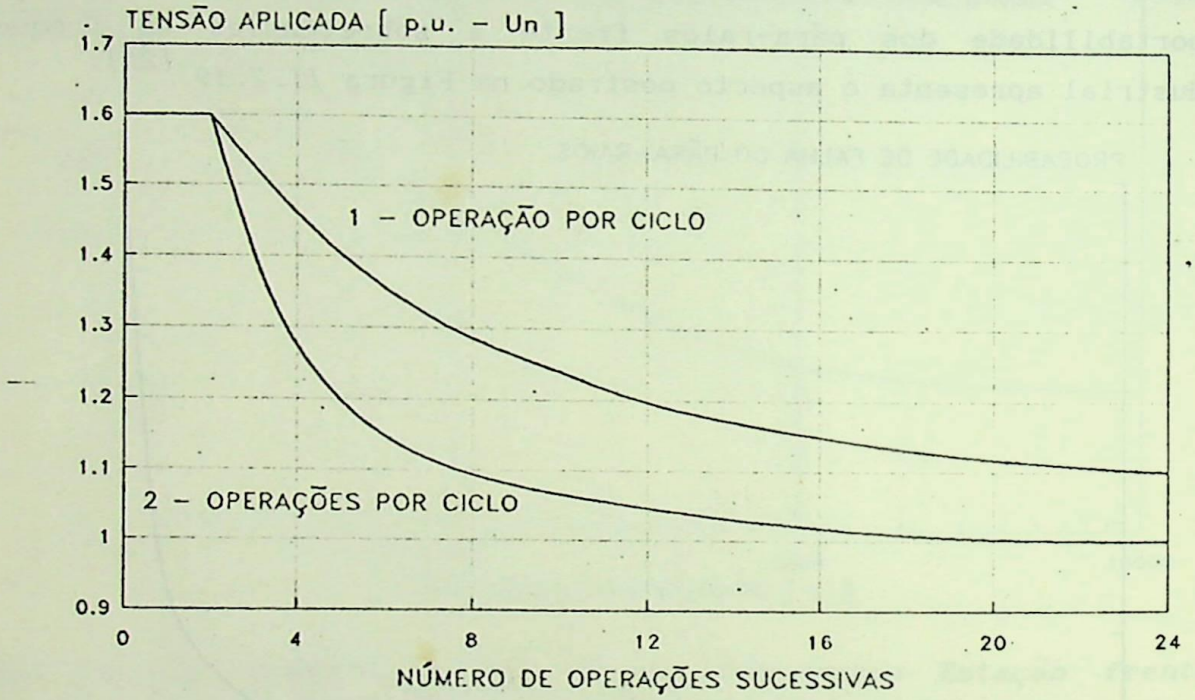


Figura II.2.21 - Desempenho de um Pára-raios Estação Frente a Operação sob Sobretensões em Freqüência Industrial, segundo Ohio Brass[25]

A definição da probabilidade de falha de um pára-raios é, de fato, uma tarefa que impõe um razoável grau de dificuldade, pois envolve dois fatores que, de modo aleatório, apresentam uma significativa influência sobre o desempenho real dos mesmos, conforme a seguir:[26]

- As tolerâncias de fabricação, exigem que a tensão nominal dos projetos dos centelhadores, seja definida, conservadoramente, de modo que, em serviço, a maioria dos pára-raios, esteja submetida a aproximadamente, *60 % - 70 %* da sua capacidade máxima de interrupção de corrente

subseqüente; e

- A disrupção dos centelhadores ocorre, de modo aleatório, em qualquer ponto da onda de tensão em freqüência fundamental, e isto implica que raramente o pára-raios interrompe sua máxima corrente subseqüente.

Deste modo, o desempenho dos pára-raios de distribuição é expresso em termos de uma crescente probabilidade de falha versus sobretensão aplicada, como mostrado na Figura *II.2.20.*

Já os pára-raios classes, estação e intermediária apresentam um melhor desempenho frente a operação sob sobretensões em freqüência industrial devido ao projeto de seus centelhadores, normalmente ativos, conforme mostra a Figura *II.2.21.*[25]

II.2.4 - CARACTERÍSTICAS DE PROTEÇÃO

Devido as suas características construtivas, existem, basicamente, dois parâmetros responsáveis pela definição dos níveis de proteção fornecidos por um pára-raios a carboneto de silicio, ou seja:

- *Tensão Disruptiva a Impulso:-* Tensão a partir da qual a ação de proteção contra surtos é iniciada através da disrupção dos centelhadores. A tensão disruptiva é medida sob impulsos representativos de solicitações de origem atmosférica, em todas as classes de pára-raios, e, sob impulsos representativos de solicitações de manobra, em pára-raios classe estação, para sistemas de *242 kV* e acima;

- *Tensão Residual:-* Tensão nos terminais do pára-raios, em resposta à corrente de descarga. A tensão residual é, normalmente, medida sob impulsos de corrente representativos de solicitações de origem atmosférica em todas as classes de pára-raios, e, raramente medida sob correntes representativas de solicitações de manobra, fato que em centelhadores ativos, dependendo do projeto, pode vir a resultar em

tensões residuais superiores as tensões disruptivas sob impulso de manobra, comprometendo, de modo irremediável, o nível de proteção oferecido por estes pára-raios.

As principais solicitações incidentes sobre os pára-raios para sistemas em média tensão são de origem atmosférica, portanto os níveis de proteção, obtidos com auxílio de ensaios específicos, conforme a seguir, devem vir a ser definidos frente estas solicitações.

II.2.4.1 - ENSAIOS DE TENSÃO DISRUPTIVA SOB IMPULSOS ATMOSFÉRICOS

Os ensaios de tensão disruptiva, frente a impulsos atmosféricos, são realizados de modo a permitir determinar a característica disruptiva dos pára-raios e, devem ser realizados no pára-raios, na sua forma completa, com todos os acessórios capazes de influenciar seu desempenho, a exemplo de abraçadeiras, que podem ou não ser aterradas.

É óbvio que os ensaios de tensão disruptiva, sob a ótica das várias normas técnicas existentes, possuem, praticamente, os mesmos objetivos, porém os métodos de ensaio, *ANSI - CSA - IEC - ABNT*, são ligeiramente diferentes.

II.2.4.1.1 - ENSAIO DE TENSÃO DISRUPTIVA NA FRENTE DO IMPULSO

Aplica-se ao pára-raios *10* impulsos, *5* em cada polaridade, com forma normalizada, ou seja, *1.2 x 50 μs*, com uma amplitude tal que resulte em uma taxa de crescimento, por exemplo, segundo as Normas *ANSI - CSA*, *25 kV/μs*, para cada *3 kV* de tensão nominal de pára-raios, fato que, implica, por exemplo, para um pára-raios de *21 kV*, em um impulso com uma taxa de crescimento efetiva de *175 kv/μs*, bem como, amplitude de pelo menos *195 kV* de crista. [27]

Já as Normas *IEC - ABNT*, para pára-raios com tensão nominal superior a *10 kV*, estabelecem a redução na taxa de crescimento dos impulsos

aplicados para *21 kV/μs*, para cada *3 kV* de tensão nominal de pára-raios, que, pelo menos, teoricamente, resulta em uma solicitação ligeiramente inferior.[28]

Com respeito ao tipo de avaliação adotado, as Normas *ANSI - CSA*, exigem que, o máximo valor obtido seja publicado e, posteriormente, que todos pára-raios produzidos, apresentem valores inferiores a este máximo. Já as Normas *IEC - ABNT* exigem que, o maior valor obtido, não ultrapasse um valor máximo normalizado, no caso da Norma *IEC*, *4.15 p.u.* para pára-raios com tensão nominal inferior a *10.5 kV* e, *3.85 p.u.* para pára-raios com tensão nominal superior a *12 kV*, inclusive. A Norma *ABNT* possui uma tabela, específica, para estes valores, porém, os mesmos são muito próximos dos valores publicados na Norma *IEC*.

Os pára-raios para máquinas rotativas são ensaiados com impulsos com forma tal que a disrupção dos centelhadores ocorra a, aproximadamente, $10 \left(\pm 3 \right) \mu s$.

II.2.4.1.2 - ENSAIO DE TENSÃO DISRUPTIVA SOB IMPULSO PLENO

Neste ensaio, é aplicado ao pára-raios impulsos de tensão, com forma normalizada, ou seja, *1.2 x 50 μs*, em ambas polaridades, em número e amplitude, que, de modo bastante interessante, haja vista, este ser um dos ensaios mais tradicionais aplicados a pára-raios com centelhadores, variam de norma para norma. Isto se deve, basicamente, ao fato de que os objetivos deste ensaio, sob a ótica das normas abordadas, serem, ligeriamente distintos.

As Normas *IEC - ABNT*, estabelecem que os pára-raios devem atuar frente a *10* aplicações de impulso, *5* aplicações para cada polaridade, com forma e amplitude normalizadas. Este enfoque, implica no fato de que os pára-raios devem, por força de norma, apresentar um limite máximo para a tensão disruptiva, limite este, a partir do qual, passam a exercer sua função de controle de tensão. O ponto em questão, é o elevado grau de liberdade, ou seja, variação, que pódem possuir os valores de tensão

disruptiva dos pára-raios normalmente produzidos, que necessitam, a princípio, apresentar valores inferiores ao máximo normalizado; fato, que impõe um interessante paradoxo, todos os pára-raios, sob este enfoque, uma vez que apresentam o mesmo nível de proteção, podem ser encarados como idênticos, o que não é real.

Já a Norma *ANSI*, apresenta como objetivo, determinar, através do método dos acréscimos e decréscimos, o impulso, com forma normalizada, de menor amplitude prospectiva, que, uma vez aplicado ao pára-raios resulte em *5* atuações consecutivas, para cada polaridade. De modo similar, a Norma *CSA* apresenta como objetivo, determinar, o impulso, com forma normalizada, e amplitude propectiva tal que, uma vez aplicado ao pára-raios, resulte em uma probabilidade de atuação de *50 %*. Sob estes enfoques, cada projeto de pára-raios é perfeitamente identificado, pois resultados, de projetos distintos são, provávelmente, diferentes entre si e se constituem, deste modo, em objeto de garantia por parte dos fabricantes.

II.2.4.2 - ENSAIOS DE TENSÃO RESIDUAL

Os ensaios de tensão residual são realizados, de modo, a determinar a característica tensão residual versus corrente de descarga de um pára-raios e, podem ser realizados no pára-raios completo ou em uma seção proporcional representativa. No caso de se fazer uso de uma seção proporcional representativa, a tensão residual do pára-raios é obtida multiplicando-se os resultados obtidos no ensaio, que, em específico, é realizado em um modelo reduzido, pelo fator de proporcionalidade, que, no caso, deve ser obtido junto aos fabricantes.

Com relação aos pára-raios utilizados nos sistemas de distribuição, o ensaio tensão residual mais significativo é o que determina a resposta destes pára-raios frente a correntes de impulso de origem atmosférica. Os ensaios de tensão residual frente a correntes de impulso de manobra possuem grande importância, apesar de, raramente realizados, somente quando de pára-raios dotados de centelhadores ativos, comuns ao sistemas

de alta e extra alta tensão.

II.2.4.2.1 - TENSÃO RESIDUAL SOB IMPULSO ATMOSFÉRICO

Neste ensaio, são aplicados impulsos de corrente, com forma normalizada, normalmente, *8 x 20 μs*, e polaridade negativa, haja vista, que a maioria das descargas atmosféricas possuem esta polaridade.

As Normas *IEC - ABNT*, estabelecem que o pára-raios deve ser submetido a impulsos de corrente com amplitude de *0.50 p.u.*, *1.0 p.u.* e *2.0 p.u.* da corrente de descarga nominal, sendo que o valor de tensão residual, relativo à corrente de descarga nominal, não deve ser superior ao máximo especificado.

Já a Norma *ANSI*, estabelece o pára-raios deve ser submetido a impulsos de corrente com amplitude de *1.5 kA*, *3 kA*, *5 kA*, *10 kA* e *20 kA*. Por sua vez, a Norma *CSA*, especifica as mesmas amplitudes de corrente para os pára-raios classe de distribuição, porém, para os pára-raios classe estação e intermediária, passa a especificar *5 kA*, *10 kA*, *20 kA* e *40 kA*. As tensões residuais obtidas, em ambos os casos, devem ser publicadas e objeto de garantia por parte dos fabricantes.

II.2.4.3 - CARACTERÍSTICAS PROTETIVAS PUBLICADAS

Com respeito as características protetivas, publicadas, o tratamento expresso em Normas é bastante conflitante. No caso específico do Brasil, a Norma *ABNT*, segue a filosofia expressa na Norma *IEC*, deste modo, os níveis de proteção publicados, com raríssimas excessões, são os valores padronizados, para tensão disruptiva e residual.

Já as Normas *ANSI - CSA*, optam por realizar, periodicamente, uma exaustiva pesquisa no universo dos pára-raios produzidos, e do conjunto de dados coletados, obtém-se uma série de tabelas, relativas aos níveis de proteção máximo e mínimo, encontrados nos pára-raios produzidos no

mercado. De modo geral, os valores máximos publicados, são utilizados de modo a estabelecer qual a real possibilidade de se utilizar um pára-raios de uma determinada tensão nominal, e os valores mínimos devem ser interpretados como os valores, mais otimistas possíveis, para as margens de proteção.

Característica Protetiva (kV - Pico)							
U_n (kV)	Tensão Disruptiva I. Atmosférico		Tensão Residual Corrente 8 x 20 μs				
	Frente Impulso	1.2x50	1.5 kA	3.0 kA	5.0 kA	10.0 kA	20.0 kA
3.0	14-25	12-22	8-10	8.4-11.5	10-12.4	11.5-13.8	12.5-15.7
6.0	27-35	23-30	16-20	17-23	20-24	22.5-26	25-30
9.0	39-48	25-30	24-30	25-34	29-36.5	32.5-41	36-46
12.0	49-60	44-54	32-40	34-46	29.5-48	43-53	49-61.5
15.0	53-75	49-63	40-50	42-55	39-60	54-65.5	60-76
18.0	61-90	58-75	48-60	51-66	46-72	65-78	71-91
21.0	69-90	66-75	56-70	59-75	68-80.5	74-90	82-103
27.0	89-89	75-98	70-80	76-86	82-89	90-96	99-107
30.0	88-95	81-88	76-89	84-97	99-101	100-110	111-124

Tabela II.2 - Característica Protetiva dos Pára-raios Distribuição

Característica Protetiva (kV - Pico) *							
U_n (kV)	Tensão Disruptiva I. Atmosférico		Tensão Residual Corrente 8 x 20 μs				
	Frente 10 μs	1.2x50	1.5 kA	3.0 kA	5.0 kA	10.0 kA	20.0 kA
3.0	12-16	11-16	9-9.5	9.5-10.5	10-11	11-12	12-13.5
4.5	16.5-18	17-18	13.5-15	14.5-17	15-17.5	16.5-19	17.5-21.5
6.0	22-24	21-24	14-19	19-21	20-22	22-24	23.5-27
7.5	26-26	26-26.5	22.5-25	24-27	25-29	27-31	29.5-35
9.0	30-32	32-32	27-28	29-32	30-33	32.5-36	35-40
12.0	39-41	39-39.5	36-38	38.5-42	40-44	43-48	47-54
15.0	47-49	46-47	42-45	46.4-48	50-51	54-55	58.5-62

Tabela II.3 - Característica Protetiva Pára-raios Classe Distribuição para Máquinas Rotativas e Transformadores a Sêco.

Característica Protetiva (kV - Pico)							
U_n (kV)	Tensão Disruptiva I. Atmosférico		Tensão Residual Corrente 8 x 20 μs				
	Frente Impulso	1.2x50	1.5 kA	3.0 kA	5.0 kA	10.0 kA	20.0 kA
3.0	11-12	11-12	5.2-7.5	6-8	6.6-9	7.5-10	8.7-12
6.0	21-21	19-19	10.4-14	11.9-14	13.2-16	15-17.5	17.4-20
9.0	31.32.5	27.5-29	15.6-21	17.9-22	19.8-24	22.5-26	26.1-28.5
12.0	40-42	35.5-37	20.8-27	23.8-29	26.4-32	30-34	34.8-37.5
15.0	50-51	43.5-47	25.9-34	30-36.5	33-39.5	37.5-43	43.5-47.5
21.0	67-68	58-64	36.3-48	41.6-51	46.1-56	52.5-60	60.9-66
24.0	76-78	66-75	41.5-54	47.6-58	52.7-64	60-68	69.6-75
30.0	94-97	81-91	51.8-68	59.4-73	65.8-79	75-86	87-95
36.0	109-116	95-97	62.2-82	71.3-87	79-95	90-102	104-113
39.0	121-126	102-102	67.4-91	77.3-97	85.5-106	97.5-114	113-126

Tabela II.4 - Característica Protetiva dos Pára-raios Classe Intermediária

Característica Protetiva (kV - Pico)							
U_n (kV)	Tensão Disruptiva I. Atmosférico		Tensão Residual Corrente 8 x 20 μs				
	Frente Impulso	1.2x50	1.5 kA	3.0 kA	5.0 kA	10.0 kA	20.0 kA
3.0	10-18	10-14	4.7-6	5.3-6.5	6-7	6.7-7.5	7.7-8.3
6.0	19-28	16-23	9.3-11	10-12	12-13	13.4-14.3	15.3-16.3
9.0	28.5-38	24-32	13.9-17	16-18	18-19.5	32.5-41	22.9-24.3
12.0	36-48	32-41	18.5-22	21.3-24	23.5-26	20-21.5	30.1-32.1
15.0	45-57	40-51	23-27.5	26.6-30	29.5-32	26.7-28.5	38.2-40
21.0	63-76	54-68	32-38.5	37.2-42	41-45	33.4-36	53.4-55.5
24.0	71-86	62-77	39.6-44	42.5-48	47-51	46.8-50	61-63.5
30.0	89-103	77-93	46.1-55	53.1-60	59-641	53.4-57	76.3-79
36.0	107-118	92-108	55.3-66	63.7-72	70.5-76	66.9-72	91.5-94.5
39.0	115-125	100-114	60-71.5	69-78	76.5-83	80-85	99.1-102

Tabela II.5 - Característica Protetiva dos Pára-raios Classe Estação

Os dados mostrados nas Tabelas *II.2* a *II.6*, retirados da Norma *ANSI C62.2* são representativos dos resultados passíveis de serem obtidos em pára-raios comercializados, respectivamente, nos mercados norte - americano e canadense, com respeito ao mercado nacional, estes dados, possuem carácter meramente orientativo.

Característica Protetiva (kV - Pico) *							
U_n (kV)	Tensão Disruptiva I.Atmosférico		Tensão Residual Corrente 8 x 20 μs				
	Frente 10 μs	1.2x50	1.5 kA	3.0 kA	5.0 kA	10.0 kA	20.0 kA
3.0	10-12	8-12	4.7-5	5.3-5.8	6-6.4	6.7-7.3	7.7-8.3
4.5	13-14	12.5-15	7-7.5	8-8.7	8.9-9.5	10-10.8	11.5-12.3
6.0	18-18	16-18	9.3-10	10.6-12	11.9-12	13.4-14.3	15.3-16.3
7.5	23-24	20-23	12-12.2	13-14.3	15-15.7	16.7-17.7	19-20.3
9.0	26-28	24-26	14-14.6	16-17.1	18-18.8	20-21.2	22.9-24.3
12.0	35-36	32-36	19-19.5	21.3-23	23.5-25	26.7-28.1	30.1-32.1
15.0	43-43	40-43	23-24.2	26.6-29	29.5-31	33.4-35	38.2-40
18.0	48-51	47-49	27.7-29	32-33.7	35-37.1	40-41.8	45.8-47.8
21.0	54-59	54-56	32.3-34	37.2-40	41-43.2	46.8-48.7	53.4-55.5
24.0	62-65	62-64	37-38.5	43-44.8	42-49.2	53.4-55.5	61-63.5
27.0	69-73	69-75	41.5-43	48-50.3	53-55.3	60-62.5	68.7-71.2

Tabela II.6 - Característica Protetiva dos Pára-raios Classe Estação para Proteção de Máquinas Rotativas e Transformadores.

Nota -

* - *As tensões nominais dos pára-raios para proteção de máquinas rotativas e transformadores a seco não se encontram padronizadas.*

A Norma *IEC*, bem como a Norma *ABNT*, por sua vez, padronizam as tensões disruptivas frente a impulso e residuais dos pára-raios, ou seja, características protetivas, em termos de valores máximos, conforme mostrado na Tabela *II.7*.

O ponto em questão, passa a ser que, esta atitude, além do fato de permitir uma razoável tolerância de fabricação, desobriga, a princípio,

os fabricantes de publicarem quais são os seus reais valores em termos de características protetivas, fato este, bastante preocupante.

Característica Protetiva (kV - Pico em p.u. Un)						
U_n (kV)	Tensão Disruptiva I.Atmosférico				Tensão Residual Corrente 8 x 20 μs	
	Frente Impulso		1.2x50 μs			
	5-10 kA	10 kA*	5-10 kA	10 kA*	5- 10 kA	10 kA*
0.6 → 1.2	6.0	-.-	5.0	-.-	5.0	-.-
1.2 → 10	4.15	-.-	3.6	2.8	3.6	-.-
10 → 120	3.85	3.20	3.33	2.6	3.33	2.8

Tabela II.7 - Tensões Disruptivas Frente a Impulsos Normalizados e Tensões Residuais de pára-raios de *5 kA*, *10 kA* - Serviço Leve e *10 kA** - Serviço Pesado

II.2.4.4 - CARACTERÍSTICAS PROTETIVAS REAIS

Recentemente, vem-se desenvolvendo várias pesquisas que apresentam como objetivo principal determinar qual a real característica protetiva oferecida pelos pára-raios produzidos e oferecidos no mercado.

Dentre as pequisas em andamento, duas, que tratam de aspectos distintos, tem seus resultados sumáriamente apresentados a seguir:

- Comportamento da Tensão Disruptiva sob Impulso Atmosférico

Nos últimos anos, vários fabricantes de pára-raios e concessionárias de energia elétrica, bem como laboratórios de alta tensão, de cunho estatal e privado, vem realizando uma série de ensaios que tem por objetivo, levantar a real característica de tensão disruptiva sob impulso atmosférico dos pára-raios produzidos no Brasil. [29-30]

Deste modo, realizou-se uma série de ensaios de tensão disruptiva sob

impulso atmosférico, normalmente, em tres amostras, de uma mesma tensão nominal de pára-raios, por fabricante. Nestes ensaios, fez-se uso do *Método da Verossimilhança*, que não é aplicado, de momento, em nenhuma das normas relativas a pára-raios para sistemas de potência, mas, que, caso utilizado, durante as etapas de desenvolvimento, destes equipamentos, conduz a resultados bastante seguros.

Tensão Disruptiva sob Impulso com Forma 8 x 20 μs *			
Fabricante	$U_{d\ 50\%}$ *(-) (kV)* ←		→ $U_{d\ 50\%}$ *(+) (kV)*
Polaridade (+)			
I	*39.21* ←	*11.78%* →	*43.83*
II	*30.97* ←	*100.80%* →	*62.19*
III	*45.72* ←	*15.26%* →	*52.70*
IV	*40.56* ←	*14.50%* →	*46.48*
Polaridade (-)			
I	*37.66* ←	*8.82%* →	*40.98*
II	*52.31* ←	*55.47%* →	*81.33*
III	*45.84* ←	*6.28%* →	*48.72*
IV	*41.68* ←	*12.33%* →	*46.82*

Tabela II.8 - Resultados de Ensaios de Tensão Disruptiva em Amostras Idênticas de Fabricantes Distintos

Nota -

* - *Resultados obtidos com auxílio de metodologia estatística tradicional*

O resultado da primeira série de ensaios, realizados em pára-raios obtidos junto a fornecedores no decorrer do ano de *1987*, se encontra na Tabela *II.8*, onde se pode observar, de modo geral, variações na tensão disruptiva crítica do pára-raios, que, em última instância, refletem tolerâncias de fabricação, da ordem de *15 %*. Este valor, a princípio, é plenamente aceitável, porém em um dos casos, apesar de, aprovado, segundo metodologia expressa na *ABNT - IEC*, obteve-se, algo em torno de

100 % como variação para a tensão disruptiva do pára-raios, fato este, inadmissível.

- *Comportamento da Tensão Residual*

Em várias ocasiões, a *Ontario Hydro* vem realizando ensaios de tensão residual em pára-raios de seus estoques e, em serviço. Estes ensaios são realizados com impulsos de corrente, com forma normalizada, ou seja, *8 x 20 μs* e amplitude de *20 kA*, segundo metodologia expressa na Norma *ANSI*. Os resultados obtidos se encontram na Tabela *II.9* e mostram que alguns pára-raios apresentam tensões residuais que excedem o máximo publicado pelos fabricantes, bem como, aproximadamente *33 %* dos pára-raios apresentam tensões residuais que excedem o máximo estabelecido por Norma.[6]

Ensaio de Tensão Residual sob Corrente 20 kA - 8 x 20 μs			
Fabricante	*Máximo Fabricante p.u.*	*Máximo Norma p.u.*	*Desempenho*
I.1	*1.19*	*1.04*	*Muito Pobre*
I.2	*1.13*	*0.93*	*Pobre*
I.3	*1.25*	*1.06*	*Muito Pobre*
II.1	*1.08*	*0.92*	*Pobre*
II.2	*1.07*	*0.91*	*Pobre*
II.3	*1.05*	*0.88*	*Pobre*
III	*1.24*	*1.13*	*Muito Pobre*
IV	*0.99*	*0.95*	*Adequado*
V	*1.19*	*1.04*	*Muito Pobre*
VI	*1.22*	*1.04*	*Muito Pobre*
VII	*0.99*	*0.92*	*Adequado*

Tabela II.9 - Resultados de Ensaios de Tensão Residual

Os resultados acima mostram sérias evidências relacionadas com falhas

nos sistemas de controle de qualidade, e, deste modo, pode ser que, uma razoável quantidade de pára-raios, dotados de qualidades, aquém das mínimas necessárias, esteja sendo comumente comercializada, fato, a princípio, extremamente preocupante pois, paga-se, e em alguns casos, muito, por um equipamento fora de especificação.

No caso dos pára-raios produzidos no Brasil, haja vista, os elevados valores de tensão disruptiva, a impulso atmosférico, e de tensão residual, padronizados pela Norma *ABNT*, ou seja, dos níveis de proteção, dificilmente, estes são ultrapassados, porém, todos os pára-raios passam a apresentar as mesmas características garantidas, e, deste modo, pouco se delinea a respeito das reais condições dos pára-raios oferecidos no mercado.

II.2.5 - DESEMPENHO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O principal objetivo da instalação de pára-raios em sistemas de distribuição é controlar as solicitações de tensão, nos equipamentos, no caso típico, transformadores, e linhas, causadas pelas descargas atmosféricas.

Como as descargas atmosféricas interagem com os sistemas de distribuição, a amplitude e a forma das correntes de descarga que atingem os pára-raios podem apresentar uma variação enorme. Deste modo, haja vista, o grau de dispersão estatístico das solicitações impostas aos pára-raios, projetá-los, de modo que, os mesmos, sejam capazes de suportar todo o espectro possível para as correntes de descarga se constitue numa prática razoavelmente antieconômica.

Deste modo, as Normas que regem a verificação do desempenho dos pára-raios tem sido desenvolvidas, com o auxílio de práticas de campo, sob a premissa de assegurar uma taxa de falha aceitável, fato, passível de confirmação, com o auxílio de ensaios e verificações periódicas em pára-raios retirados de operação, sob condições normais e de falha, como, realizado pelas concessionárias norte-americanas e canadenses.

II.2.5.1 - CORRENTES DE IMPULSO PADRONIZADAS

De modo classificatório, as Normas padronizam valores de correntes sob os quais, são definidos os níveis de proteção dos resistores não lineares dos pára-raios, bem como, valores de correntes, necessários para determinar a sua suportabilidade frente a solicitações consideradas severas, e, a sua capacidade, quando da interrupção de correntes subseqüentes.

Haja vista, o 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, capazes de verificar seu comportamento frente as solicitações oriundas de descargas de correntes, estes, são realizados em seções proporcionais, representativas do pára-raios completo, com tensão nominal, máxima, função da Norma, que orienta a execução do ensaio, de *12 kV*.

As correntes de descarga, com forma, *4 x 10 μs* e *8 x 20 μs*, solicitam os resistores não lineares a carboneto de silício de modo, praticamente, uniforme, pois, haja vista que, para ambas as formas, a duração da corrente não é elevada, fato que, impede a sua concentração em canais condutores, fenômeno, conhecido como *"tunneling"*, que, caso venha a ocorrer, acaba, por resultar, na inutilização dos resistores.

Deste modo, o aquecimento imposto aos resistores não lineares a carboneto de silício é, praticamente, constante, e, este fenômeno se processa de modo quase adiabático.

Com respeito as correntes de amplitude elevada, alguns problemas de ordem microscópica, na forma de descargas, incompletas, ou seja, ruptura de pequenos trechos da matriz isolante, internas aos resistores podem vir a ocorrer. A presença destas descargas, fáceis de serem observadas nos pára-raios a pó, socado, implica, na inutilização dos resistores não lineares, pois as mesmas atuam no sentido de criarem caminhos preferenciais para as correntes.

A forma, da corrente de impulso, padronizada, utilizada nestes ensaios, exceto as correntes de longa duração, é mostrada na Figura *II.2.22*, e é, basicamente, definida por sua amplitude, tempo de crescimento T_1, tempo até a meia amplitude T_2, em, praticamente, todas as Normas. [28-31]

O tempo de crescimento da corrente T_1, conhecido, como *"Tempo de Frente"* é definido como:

$$T_1 = 1.25 \times T_{90} \qquad (II.2.5.1.1)$$

onde:

T_1 = Tempo de Frente da Corrente de Impulso *(μs)*;

T_2 = Tempo até Meia Amplitude na Cauda do Impulso *(μs)*;

T_{90} = Intervalo de Tempo entre valores *10 %* e *90 %* da amplitude na frente do impulso.

Os valores padronizados para T_1 e T_2 se encontram na Tabela *II.10*.

*	*Nominal*		*Tolerâncias*	
	T_1 *(μs)*	T_2 *(μs)*	T_1 *(μs)*	T_2 *(μs)*
8 x 20 μs	*8*	*20*	*±10 %*	*±10 %*
4 x 10 μs	*4*	*10*	*±12.5 %*	*±10 %*
Corrente Média Atmosf.	*4.6*	*80*	*-.-*	*-.-*

Tabela II.10 - Valores Padronizados para T_1 e T_2

Nota -
** - Segundo IEC - 99.1 - 1991*

A forma *8 x 20 μs*, foi definida, tendo em vista que, quando uma corrente, com esta forma circula por um resistor não linear a carboneto de silício, obtém-se uma tensão, no caso, tensão residual, com forma, aproximada, *1.2 x 50 μs*.

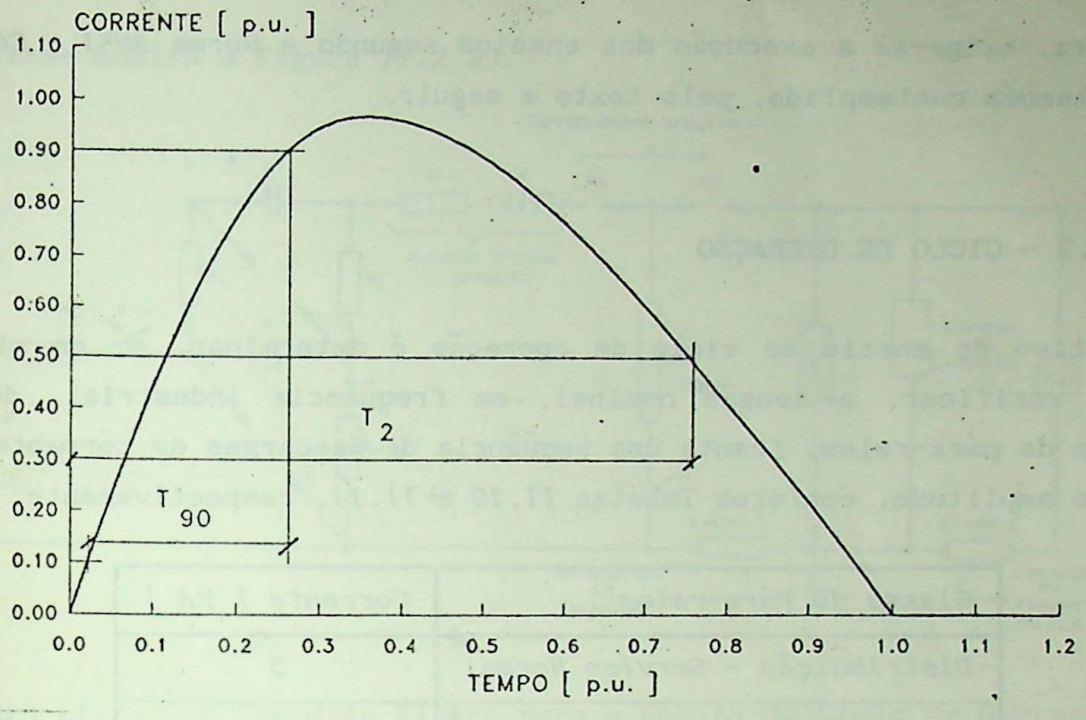


Figura II.2.22 - Forma de Corrente de Impulso Padronizada [28-31]

Conforme se observa na Tabela *II.10*, as formas, padronizadas, para os impulsos, utilizados, como referência nos ensaios, são muito menos severas, que a corrente média atmosférica esperada. Este fato, tem como objetivo, computar a redução que ocorre, na solicitação imposta aos pára-raios, oriunda da interação descarga atmosférica - sistema, entre o ponto atingido e o local de instalação do pára-raios.

As solicitações, em termos de descargas atmosféricas, são determinadas pelos seguintes ensaios que, apresentam, ligeiras variações, em termos de conceitos, sob o enfoque das várias Normas existentes:

- Ensaio de Ciclo de Operação;

- Ensaio de Suportabilidade Frente a Correntes de Amplitude Elevada; e

- Ensaio de Suportabilidade Frente a Correntes de Longa Duração.

A escolha da Norma para a realização destes ensaios se constitue numa tarefa, sob certo ponto interessante, pois existe, no caso do Brasil um conjunto de normas, específico, adaptado da Norma *IEC - 99.1*, porém, via

de regra, exige-se a execução dos ensaios segundo a Norma *ANSI - C62.1*, fato, também contemplado, pelo texto a seguir.

II.2.5.2 - CICLO DE OPERAÇÃO

O objetivo do ensaio de ciclo de operação é determinar, e, em alguns casos, verificar, a tensão nominal, em freqüência industrial, de um projeto de pára-raios, frente uma seqüência de descargas de corrente com forma e amplitude, conforme Tabelas *II.10* e *II.11*, respectivamente.

Classe do Pára-raios	*Corrente [kA]*
Distribuição - Serviço Normal	*5*
Distribuição - Serviço Pesado *	*10*
Intermediário *	*5*
Estação **	*10*

Tabela *II.11* - Amplitude das Correntes de Descarga para os Ensaios de Ciclo de Operação

Notas -

* - *Classes de Pára-raios previstas na Norma ANSI C62.1 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 C62.1 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.*

O circuito, sintético, utilizado neste ensaio, reproduz o sistema, ao qual, o pára-raios deve ser conectado, por seu *Equivalente de Thévènin*,

conforme mostra a Figura *II.2.23.*

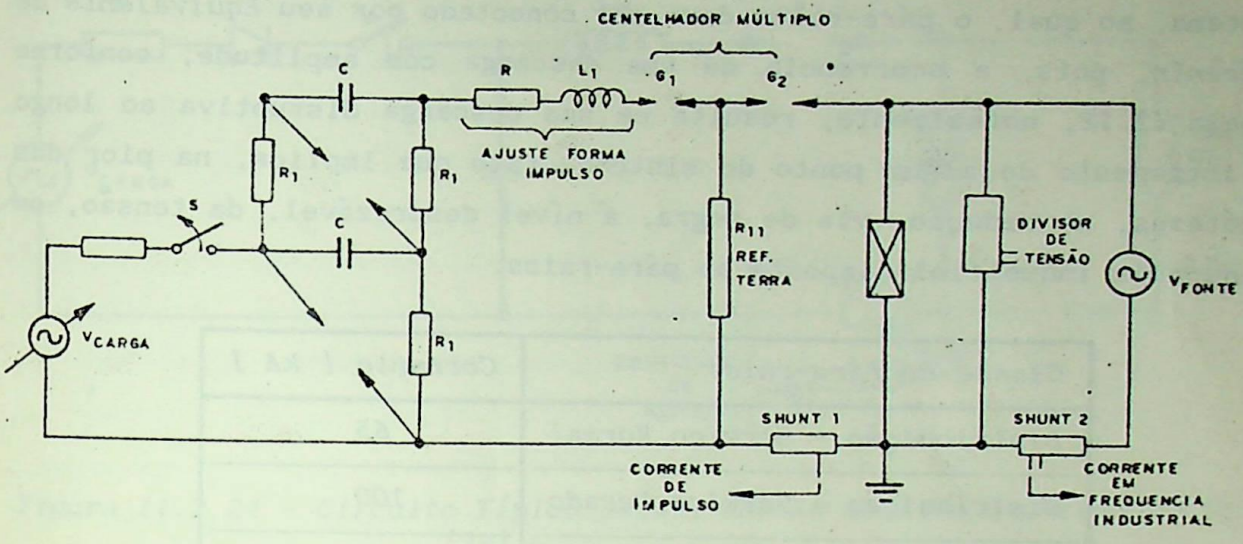


Figura II.2.23 - Circuito Típico para o Ensaio de Ciclo de Operação [32]

A *"Impedância de Thévènin"*, equivalente ao sistema, pode vir a se constituir em um ponto passível de discussão, pois, de modo ideal, é usual fazer uso de uma fonte de corrente alternada, de baixa impedância, fato que, além resultar em uma corrente subsequente, praticamente, em fase com a tensão da fonte, impõe uma elevada solicitação térmica ao pára-raios. Sob condições que contemplem uma *"Impedância de Thévènin"* elevada, é possível que ocorram problemas durante o processo de extinção da corrente subseqüente, ou seja, falhas dielétricas, que devem ser objeto de investigação, pelo menos, nas etapas de desenvolvimento de projeto.

II.2.5.3 - 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, representada por uma corrente com forma e amplitude conforme Tabelas *II.10* e *II.12*, respectivamente.

O circuito, sintético, que deve possuir baixa indutância, utilizado

neste ensaio, conforme Figura *II.2.24*, não necessita reproduzir o sistema, ao qual, o pára-raios deve ser conectado por seu *Equivalente de Thévènin*, pois, a ocorrência de uma descarga com amplitude, conforme Tabela *II.12*, normalmente, resulta em uma descarga disruptiva ao longo do isolamento de algum ponto do sistema, fato que implica, na pior das hipóteses, na redução, via de regra, a nível desprezável, da tensão, em freqüência industrial, imposta ao pára-raios.

Classe do Pára-raios	*Corrente [kA]*
Distribuição - Serviço Normal	*65*
Distribuição - Serviço Pesado	*100*
Intermediário *	*65*
Estação *	*65*

Tabela *II.12* - 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.*

Um ponto, a seu modo, relevante, responsável, por algumas discussões, verificadas, principalmente, no âmbito da normalização adotada no Brasil, versa sobre a real necessidade, e, mesmo eficácia, do ensaio de alta corrente de curta duração. O argumento, normalmente, utilizado pelos defensores da ineficácia deste ensaio, baseia-se no fato, real, de ser, a tensão residual, desenvolvida pelo pára-raios, durante uma descarga de corrente com amplitude conforme Tabela *II.12*, superior ao *"Nível Básico de Isolamento - NBI"* dos equipamentos, conectados ao sistema. O contra - argumento, estabelece, que não é objetivo deste ensaio, verificar a *"Coordenação de Isolamento"*, pára-raios versus sistema, mas sim, sua suportabilidade, em termos de centelhadores e resistores não lineares, frente a descargas diretas.

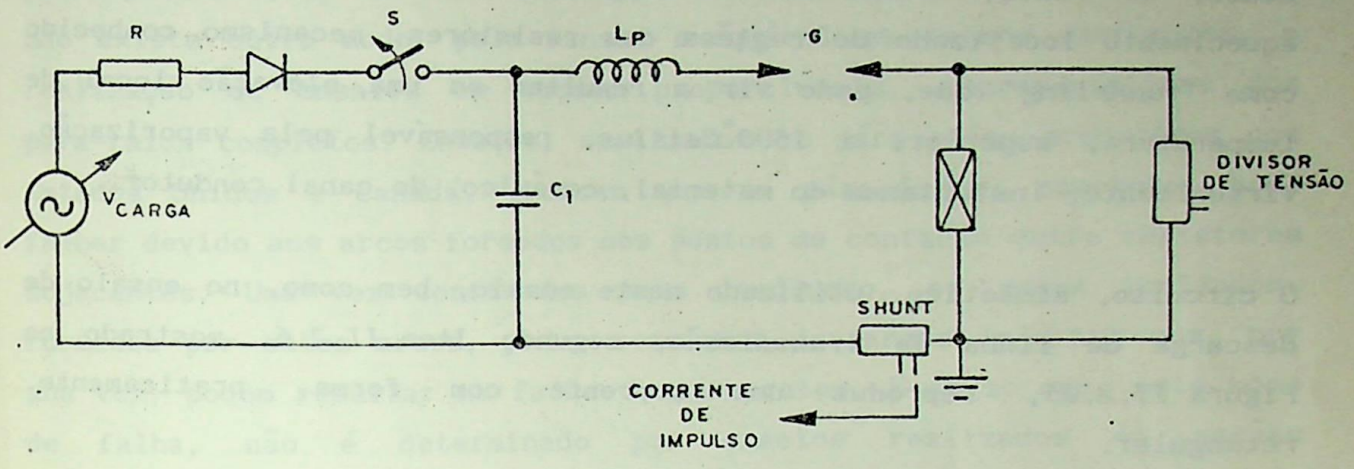


Figura II.2.24 - Circuito Típico para o Ensaio de Alta Corrente de Curta Duração[32]

II.2.5.4 - 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 uma descarga de corrente de baixa amplitude, representativas da cauda da corrente, associada a uma descarga atmosférica representada por uma corrente com forma e amplitude conforme Tabela *II.13*.

Classe do Pára-raios	*Corrente [A]*	*Duração [μs]*
Distribuição - Serviço Normal	*75*	*2000* *
Distribuição - Serviço Pesado	*250*	*2000*

Tabela *II.13* - Amplitude e Forma das Correntes de Descarga para os Ensaios de Baixa Corrente de Longa Duração

Nota -

** - Segundo IEC 99.1 1000 μs*

As correntes de longa duração, usualmente, solicitam de modo extremamente severo os resistores não lineares a carboneto de silício, pois, seu tempo de duração, suficientemente longo, da ordem de, pelo

menos, *20* vezes, o de uma descarga de curta duração, permite o aquecimento localizado de regiões dos resistores, mecanismo conhecido como *"tunneling"* que, pode vir a resultar em uma elevação local de temperatura, superior, a *1500°Celsius*, responsável pela vaporização, virtualmente, instantânea do material, cerâmico, do canal condutor.

O circuito, sintético, utilizado neste ensaio, bem como, no ensaio de descarga de linha de transmissão, segundo Item *II.2.6*, mostrado na Figura *II.2.25*, reproduz uma corrente com forma, praticamente, retangular.

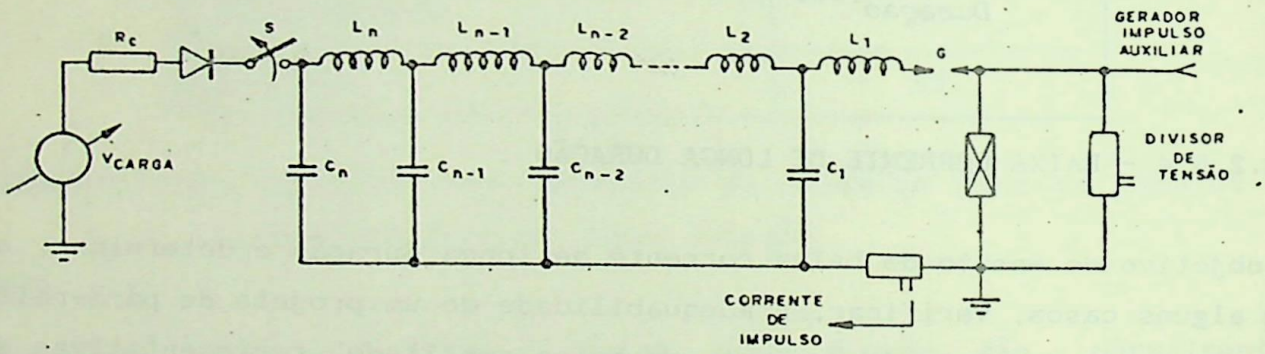


Figura II.2.25 - Circuito Típico para o Ensaio de Baixa Corrente de Longa Duração[32]

Apesar de refletir outro tipo de solicitação, devido a semelhança, em termos de equipamento e procedimento, com o ensaio de descarga de linhas de transmissão, o ensaio de baixa corrente de longa duração, é, algumas vezes, sem muito prejuízo, considerado como equivalente ao mesmo.

II.2.5.5 - COMENTÁRIOS SOBRE PROCEDIMENTOS NÃO PADRONIZADOS

Existem fortes evidências, indicativas, de que os ensaios, conforme, usualmente, realizados, não determinam de forma completa a durabilidade relativa dos diferentes tipos e projetos de pára-raios. Isto se deve,

principalmente, ao fato dos mesmos preverem, e neste caso, via de regra, não existe outro modo, pelo menos, exequível em termos econômicos, a realização de ensaios em seções proporcionais, representativas dos pára-raios completos. Ensaios, realizados em pára-raios produzidos nos Estados Unidos e Canadá, indicam que um pára-raios, completo, pode falhar devido aos arcos formados nos pontos de contacto entre resistores adjacentes. Uma vez confinados pelo invólucro, os gases ionizados, formados por estes arcos, podem ocasionar descargas internas que, por sua vez, podem resultar na falha do pára-raios. É óbvio que, este modo de falha, não é determinado por ensaios realizados em seções proporcionais, por exemplo, com tensão nominal de *3 kV*, composta, basicamente, por um único resistor não linear de carboneto de silício.

A Figura *II.2.26*, mostra o desempenho de um conjunto de pára-raios submetidos a ensaios, de ciclo de serviço, sob correntes de *20 kA* com forma *8 x 20 μs*, e, de alta corrente de curta duração, sob correntes de *65 kA* ou *100 kA*, função do projeto do pára-raios, com forma *6 x 17 μs*. Estes ensaios foram realizados em pára-raios completos, de modo, a explorar o mecanismo de falha interna, conforme descrito acima.

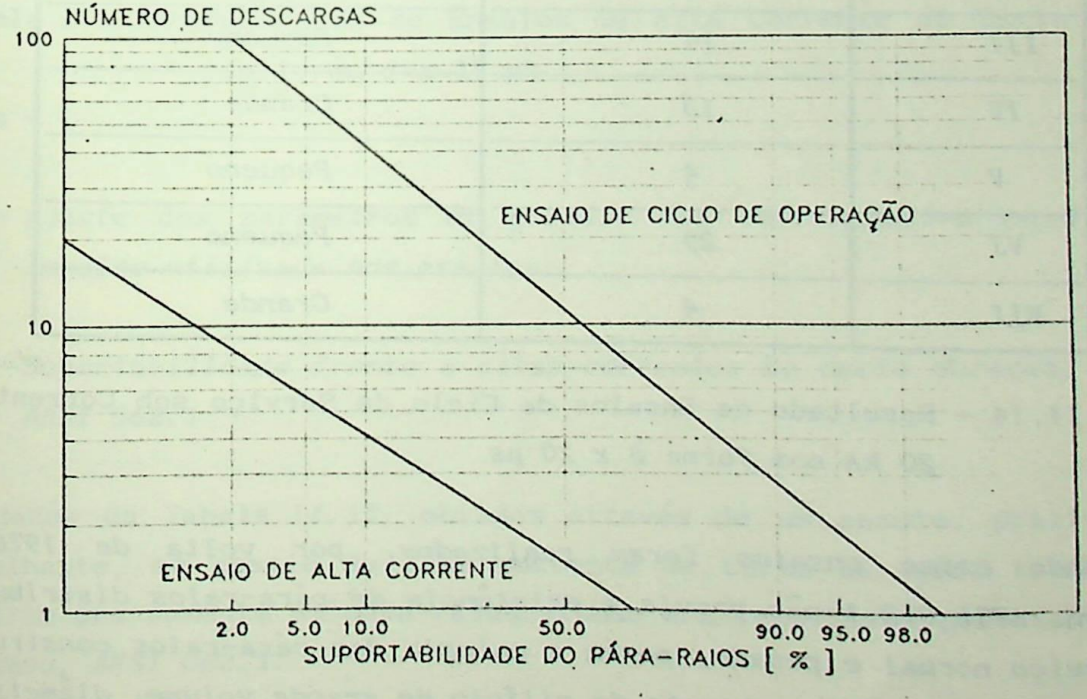


Figura II.2.26- Suportabilidade dos Pára-raios Frente aos Ensaios de Ciclo de Serviço e Alta Corrente de Curta Duração [33]

Os ensaios acima indicam que *99%* dos pára-raios devem suportar uma operação frente a uma corrente de *20 kA* com forma *8 x 20 μs* e *70%* devem sobreviver a uma descarga de alta corrente de curta duração. Este nível de suportabilidade, parece ser adequado para as condições de campo como evidenciado pela taxa de falhas frente a descargas atmosféricas, relativamente, baixa. No entanto, dados mais detalhados, conforme Tabelas *II.14* e *II.15*, mostram grandes disparidades entre projetos de pára-raios, considerados, similares, pelo menos em temos de aplicação.

Ensaio de Tensão Residual sob Corrente 20 kA - 8 x 20 μs		
Fabricante	*Número de Impulsos até a Falha*	*Tamanho dos Resistores de SiC **
I.1	*20*	*Grande*
I.2	*4*	*Grande*
I.3	*2*	*Pequeno*
II.1	*9*	*Pequeno*
II.2	*2*	*Pequeno*
II.3	*26*	*Grande*
III	*14*	*Pequeno*
IV	*13*	*Grande*
V	*4*	*Pequeno*
VI	*29*	*Pequeno*
VII	*4*	*Grande*

Tabela *II.14* - Resultado de Ensaios de Ciclo de Serviço sob Corrente de *20 kA* com forma *8 x 20 μs*

Nota -

** - Quando estes ensaios foram realizados, por volta de 1978, a Norma ANSI C62.1 não previa a existência de pára-raios distribuição serviço normal e pesado, porém a maioria dos pára-raios construídos com resistores de carboneto de silício de grande volume, diâmetro de aproximadamente 50 mm, diziam apresentar capacidade frente a surtos superior.*

Ensaio de Alta Corrente de Curta Duração - 6 x 17 μs*			
Fabricante	Número de Impulsos até a Falha	Tamanho dos Resistores de SiC	Desempenho
I.1	0	Grande 100 kA**	Muito Pobre
I.2	1	Grande 100 kA	Pobre
I.3	0	Pequeno 65 kA	Muito Pobre
II.1	1	Pequeno 100 kA	Pobre
II.2	0	Pequeno 65 kA	Muito Pobre
II.3	0	Grande 100 kA	Muito Pobre
III	3	Pequeno 65 kA	Excelente
IV	0	Grande 100 kA	Muito Pobre
V	1	Pequeno 65 kA	Pobre
VI	1	Pequeno 65 kA	Pobre
VII	0	Grande 65 kA	Muito Pobre

Tabela *II.15* - Resultado de Ensaios de Alta Corrente de Curta Duração com forma *6 x 17 μs*

Nota -

* - *Ajuste dos parâmetros do gerador foi determinativo na forma do impulso utilizada nos ensaios*

** - *Suportabilidade frente a altas correntes de curta duração, segundo ANSI C62.1*

Os dados da Tabela *II.15*, obtidos através de um ensaio, praticamente, semelhante, ao ensaio de alta corrente de curta duração, tradicional, mostram que somente um pára-raios atende aos requisitos postos em Norma, no caso, *ANSI C62.1.*

Além disto, os resultados de ambas Tabelas, *II.14* e *II.15*, em parte, confirmam um fato, de fácil determinação, quando dos ensaios de tipo de

qualquer pára-raios, e, via de regra, relegado a segundo plano, ou seja, *"A suportabildade de um pára-raios frente a descargas atmosféricas não se encontra, obrigatoriamente relacionada com o volume físico de seus resistores não lineares"*.

II.2.6 - DESEMPENHO FRENTE A DESCARGAS DE MANOBRA

As correntes relacionadas com as descargas de manobra são correntes de longa duração e, portanto, além, de permitirem a ocorrência do fenômeno de *"tunneling"*, podem conter energia em excesso quando comparadas com as correntes relativas a descargas atmosféricas.

Nestes casos, a homogeneidade, a nível microscópico, dos resistores não lineares, bem como, o mecanismo de troca de calor entre os grãos de carboneto de silício e a matriz isolante são extremamente importantes. Este último fato, ressalta a necessidade que a matriz isolante tem, em apresentar elevada capacidade térmica, quando se necessita de elevada resistência frente as solicitações impostas pelas descargas de longa duração, típicas de manobras. Os pára-raios, para sistemas de média tensão, geralmente, pára-raios, classe distribuição, raramente, são submetidos a correntes de descarga de manobra, pois, normalmente, seus centelhadores apresentam suportabilidade frente a estas formas de impulso, em por unidade da sua tensão nominal, muito elevada, fato que, impede que os mesmos entrem em disrupção, e, deste modo são, via de regra, projetados, somente, frente a solicitações relativas a descargas atmosféricas. Por outro lado, os pára-raios, classe intermediária e classe estação, adequados, na maioria dos casos, para sistemas em alta e extra alta tensão, apresentam suportabilidade frente a impulsos de manobra, em por unidade da sua tensão nominal, razoavelmente reduzida, fato que, resulta na probabilidade de atuação frente a estas solicitações, e deste modo, seu projeto necessita contemplar esta possibilidade.

Como comentário adicional, é conveniente ressaltar que o projeto de um

pára-raios, e, deste modo, a solicitação imposta ao mesmo, se encontra, obviamente, ligado a tensão nominal, e, por conseguinte, ao nível básico de isolamento dos equipamentos do sistema. Logo, o projeto de um pára-raios, acaba por se constituir em uma solução de compromisso que contempla o sistema, as solicitações impostas ao mesmo, na forma de descargas atmosféricas, e pelo mesmo, na forma de descargas de manobra, os materiais utilizados e a engenharia de produto, em termos técnicos e econômicos. Deste modo, as condições de contorno do problema, implicam na possibilidade de se projetar e construir pára-raios para sistemas de média tensão, virtualmente, imunes a descargas de manobra.

II.2.6 1 - DESCARGAS DE MANOBRA PADRONIZADAS

A suportabilidade padrão dos pára-raios, no caso, classe intermediária e classe estação, frente a descargas de manobra, relacionadas com o religamento de linhas aéreas, foi objeto de uma série de pesquisas que resultaram, no caso, das Normas *ANSI - CSA*, em uma série de modelos de linhas, na forma de impedância de surto, capacitância de seqüência positiva, comprimento e máxima sobretensão de manobra, em por unidade, consideradas como representativas, com respeito a realidade norte-americana, fato que, de certo modo, cria uma identidade sistema - ensaio. Já as Normas *IEC - ABNT*, padronizam classes de descarga de linha em termos de impedância de surto, tempo de descarga e máxima sobretensão de manobra. *[27-28-32-34]*

Convém ressaltar que não existe nenhuma equivalência, pelo menos, aparente, entre as classes de descarga de linha das normas *ANSI - CSA* e *IEC - ABNT*. O fato das Normas *IEC - ABNT* admitirem tempos de descarga, relacionados com a capacitância ou com o comprimento da linha, ou mesmo ambos, superiores aos admitidos pelas Normas *ANSI - CSA* implica, na possibilidade, das primeiras, levarem em conta os efeitos das capacitâncias de seqüência zero do sistema.

O circuito, sintético, utilizado neste ensaio é o mesmo utilizado no de baixa corrente de longa duração, conforme Figura *II.2.24*. No entanto,

considera-se conveniente, ressaltar que, os métodos de verificação dos parâmetros dos circuitos, ou seja, indutâncias, capacitâncias e resistências, utilizados, em ambos ensaios, divergem ligeiramente.

Segundo as Normas *ANSI - CSA*, os parâmetros de linha, utilizados nos ensaios de descarga de linhas em pára-raios de classe intermediária e estação, com tensões nominais compatíveis com os sistemas de média tensão são mostrados na Tabela *II.16*.[27]

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)	$3.68\ V_{60\ Hz\ Max.}$

Tabela *II.16* - Parâmetros para o Circuito de Ensaio de Descarga de Linhas

Nota -

* - *Segundo ANSI C62.1*

O circuito mostrado na Figura *II.2.24*, nada mais que um modelo reduzido de uma linha de transmissão produz um impulso de corrente com amplitude igual a:

$$I_D = \frac{U_c - U_{pr}}{Z_1} = \frac{3.68\ U_{60\ Hz\ Max.} - U_{pr}}{Z_1} \qquad (II.2.6.1.1)$$

e;

$$U_{60\ Hz_{Max.}} = K_T\ U_{\phi T} \qquad (II.2.6.1.2)$$

onde:

I_D = Corrente de descarga pelo pára-raios [*kA*]

U_c = Tensão de carga da linha [*kV*]

U_{pr} = Tensão residual do pára-raios [*kV*]

$U_{\phi T}$ = Tensão Fase - Terra [*kV*]

K_T = Fator de Sobretensão Máxima [*p.u.*], em sistemas padrão $K_T = 1.06$

A duração da corrente de descarga é obtida com auxílio de:

$$T_D = 2\ Z_1\ C_1\ D_1 \qquad (II.2.6.1.3)$$

onde:

T_D = Duração da Corrente de Descarga

Substituindo os parâmetros constantes da Tabela *II.16* vem:

$$T_D = 1620\ \mu s\ (\ Pára\text{-}raios\ Classe\ Estação\ )$$

$$T_D = 1080\ \mu s\ (\ Pára\text{-}raios\ Classe\ Intermediária\ )$$

A energia absorvida pelo pára-raios, no caso, construído com centelhadores múltiplos comuns, ou seja, que não adotam o princípio do sopro magnético, é função pelo produto da tensão residual do pára-raios, da corrente de descarga e do tempo de duração da mesma, conforme a seguir:

$$E_{PR} = U_{pr}\ I_D\ T_D = 2\ U_{pr}\ I_D\ Z_1\ D_1\ C_1 \qquad (II.2.6.1.4)$$

A Figura *I.2.2.27* mostra que a capacidade de absorção de energia dos pára-raios aumenta com a sua tensão nominal. Como, os pára-raios são construídos, de modo, modular, fato que, propicia a intercambiabilidade de componentes entre diferentes grupos de pára-raios, os fabricantes, usualmente, ensaiam os componentes frente as solicitações impostas pela classe de pára-raios mais solicitada, na qual eles devem ser utilizados, e isto, obviamente, resulta em margens conservativas de projeto.

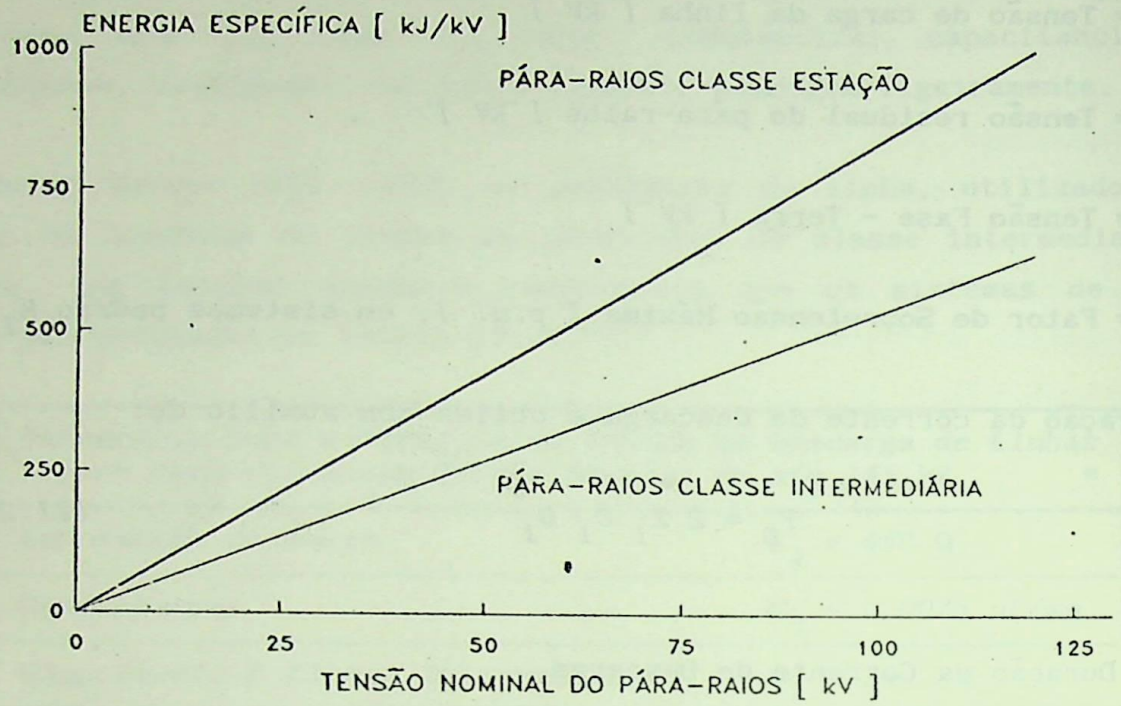


Figura II.2.27 - Capacidade de Absorção de Energia de um Pára-raios função da Tensão Nominal para Linhas com Parâmetros conforme Tabela II.16[6]

Tipicamente, pára-raios utilizados em sistemas de distribuição ou subtransmissão em média tensão são projetados levando-se em conta, os requisitos de descarga de linhas de transmissão de pára-raios com tensão nominal de *108 kV* a *144 kV*.

II.2.6 2 - COMENTÁRIOS SOBRE PROCEDIMENTOS NÃO PADRONIZADOS

A habilidade de um pára-raios em absorver energia depende da forma do surto de manobra. Este fato é, particularmente, significativo quando de pára-raios construídos com centelhadores ativos, nos quais, parte da queda de tensão, no caso, a relativa aos centelhadores, demanda um intervalo de tempo, da ordem, de *400 μs*, para se desenvolver. Deste modo, conforme mostra a Figura *II.2.28*, para uma mesma corrente de descarga, a energia absorvida por um pára-raios construído com centelhadores ativos é, normalmente, superior a energia absorvida por um

pára-raios construído com centelhadores múltiplos comuns.[22]

Fenômenos outros, dotados de característica, basicamente, não linear, a exemplo, do *"tunneling"* e dos mecanismos de desenvolvimento do arco elétrico nos centelhadores, este, típico de centelhadores ativos, podem vir a afetar a capacidade de absorção de energia dos pára-raios, e, devem, portanto, ser objeto de cuidadosa investigação nas fases de projeto.

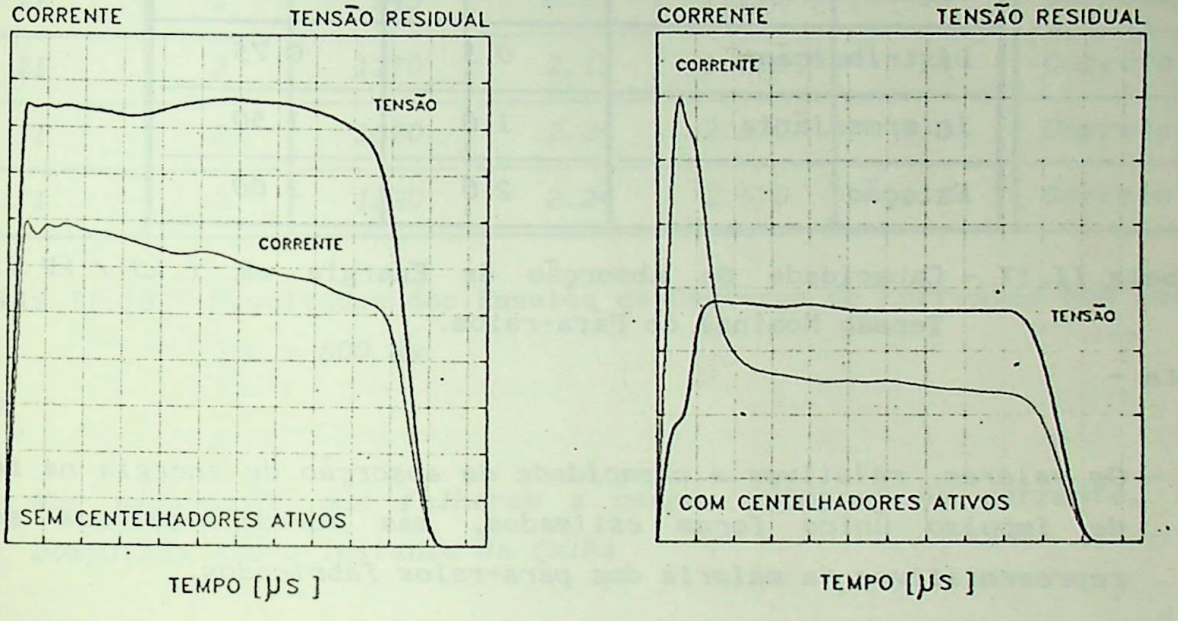


Figura II.2.28 - Oscilogramas de Ensaios de Descarga de Linhas em pára-raios Com e Sem Centelhadores Ativos[22]

A capacidade de absorção de energia de um pára-raios com centelhadores, está também relacionada, com o desempenho dos centelhadores, frente a descarga de corrente, não só, no que diz respeito ao desenvolvimento do arco entre seus eletrodos, mas também no que diz 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* Coulomb, são responsáveis por grandes deslocamentos de metal dos eletrodos que, dependendo do projeto do centelhador do pára-raios, podem vir a resultar na alteração de sua característica protetiva. Este, é um dos fatos que dificultam, e muito, a aplicação de pára-raios com centelhadores na proteção de bancos de

capacitores, para os quais, normalmente são construídos, pára-raios especiais. [35→39]

A capacidade de absorção de energia, na forma de pulso único, de pára-raios construídos a partir de meados da década de 70, pode vir a ser obtida com auxílio da Tabela *II.17*.

*Capacidade de Absorção de Energia (kJ / kV)**		
Classe do Pára-raios	*Cap.Nominal*	*Pulso Único*
Distribuição	*0.5*	*0.75*
Intermediária	*1.0*	*1.50*
Estação	*2.0*	*3.00*

Tabela *II.17* - Capacidade de Absorção de Energia em *(kJ / kV)* da Tensão Nominal do Pára-raios.

Nota -

* - *Os valores, relativos a capacidade de absorção de energia na forma de impulso único foram estimados, mas acredita-se que sejam representativos da maioria dos pára-raios fabricados.*

Com respeito aos pára-raios de distribuição, alguns ensaios específicos, cujos resultados,se encontram na Tabela *II.18*, tem sido realizados, com impulsos com forma não padronizada, normalmente, *300 x 600 μs*. A adoção desta forma de impulso o que implica na utilização de um equipamento de ensaio com indutores e capacitores concentrados, se deve ao fato desta construção apresentar uma maior facilidade quando da geração de correntes elevadas. Nestes casos, os pára-raios foram submetidos a impulsos com amplitude crescente até a ocorrência da falha, e considera-se conveniente ressaltar o fato de que, pára-raios, supostamente idênticos, apresentaram, suportabilidade frente a descargas de manobra, razoavelmente distintas entre si, o que, implica que os pára-raios de distribuição, não devem ser, genérica e indiscriminadamente, aplicados no controle de sobretensões de manobra sob pena de se obter um comportamento aquém do desejado.

Ensaio de Descargas de Manobra 300 x 600 μs						
Fabricante	Amostra	$I_{D.}$ [A]	$U_{Res.}$ [p.u. Un]	Energia [kJ/kV]	Carga * [C]	Desempenho
I	1	750	2.50	.380	.2	Falho
I	2	600	2.00	.762	.4	Correto
I	2	910	2.10	.905	.5	Falho
II	1	945	2.05	1.190	.6	Correto
II	2	1270	2.15	1.710	.8	Correto
II	2	1820	2.24	2.670	1.2	Correto
II	2	1820	2.24	2.670	1.2	Correto

Tabela *II.18* - Resultados dos Ensaios de Descarga de Correntes com Forma *300 x 600 μs.*

Nota -

* - *Nos pára-raios que falharam a carga, integral da corrente, foi computada até o instante da falha*

II.2.7 - DESEMPENHO FRENTE A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Os pára-raios a carboneto de silício podem entrar em condição de falha devido a poluição atmosférica depositada sobre seus invólucros. Os fenômenos relacionados com a polùição atmosférica podem apresentar carácter, *"Transitório ou Permanente"*, sendo que, em ambos casos, todo o mecanismo de ação dos poluentes se encontra relacionado com a presença de um eletrólito, formado pela solução dos sais que compõem o poluente em água. *[40→45]*

O processo de umedecimento da camada de poluentes sólidos, se relaciona, normalmente, com a ocorrência de chuvas leves, ou mesmo, neblina, e, o eletrólito resultante, é responsável pela formação de regiões condutoras, ou seja, dotadas de baixa impedância que, devido a

circulação de corrente, a qual, se encontra associada uma perda de energia, na forma de calor, podem se transformar em regiões secas localizadas, dotadas de alta impedância, usualmente conhecidas como *"dry bands"*. Uma vez que, os perfis dos invólucros dos pára-raios são bastante irregulares, a seção condutora, bem como, a densidade de corrente, apresentam variações substanciais ao longo do invólucro dos pára-raios. Tendo em vista que, as regiões secas se encontram, de algum modo, relacionadas com as maiores densidades de corrente, as mesmas são formadas, aleatoriamente, nas regiões de menor diâmetro, ou seja, nas regiões sob as saias o que acaba por implicar na formação de regiões isoladas condutoras ou não sob a superfície dos invólucros, acopladas as partes internas ativas dos pára-raios, em específico, aos centelhadores, através da capacitância transversal da porcelana.

Dependendo da queda de tensão impressa, às regiões secas ocorrem, sobre a superfície dos invólucros, descargas parciais, conhecidas como, *cintilações*, que podem transferir, através do acoplamento, de carácter, capacitivo entre a superfície externa e os centelhadores, valores de corrente, e, por conseguinte, tensão com amplitude suficiente para permitir que parte dos mesmos entrem em condução, conforme mostra a Figura *II.2.29*. Este processo, define uma solicitação que pode ser denominada *"Solicitação Transitória Imposta pela Poluição"*, de cunho, virtualmente, dielétrico.

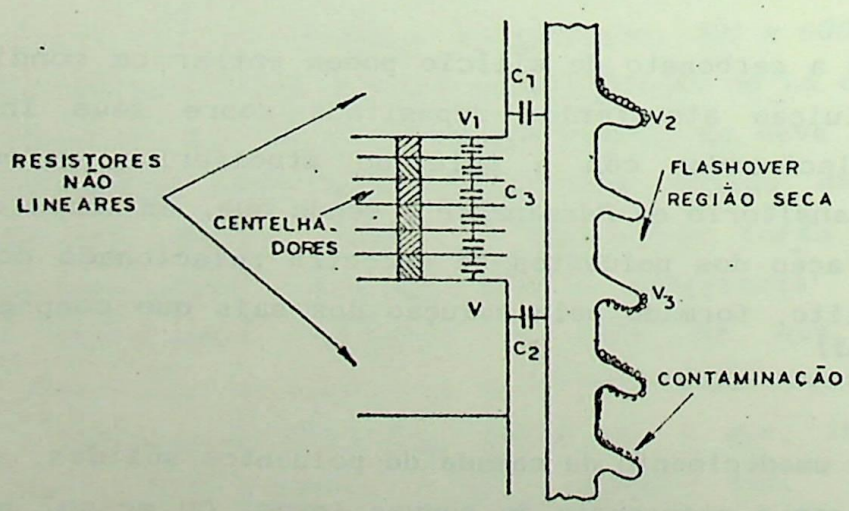


Figura II.2.29 - Fenômeno da Poluição em Regime Transitório e a Transferência de Corrente para os Centelhadores [19]

A poluição, pode ainda, função do projeto do pára-raios, impor uma solicitação de carácter, praticamente, permanente na forma de uma transferência de corrente entre a superfície poluída e o interior do invólucro do pára-raios, conforme mostra a Figura *II.30*. Este processo, define uma solicitação que pode vir a ser denominada *"Solicitação Permanente Imposta pela Poluição"*, de cunho virtualmente térmico.

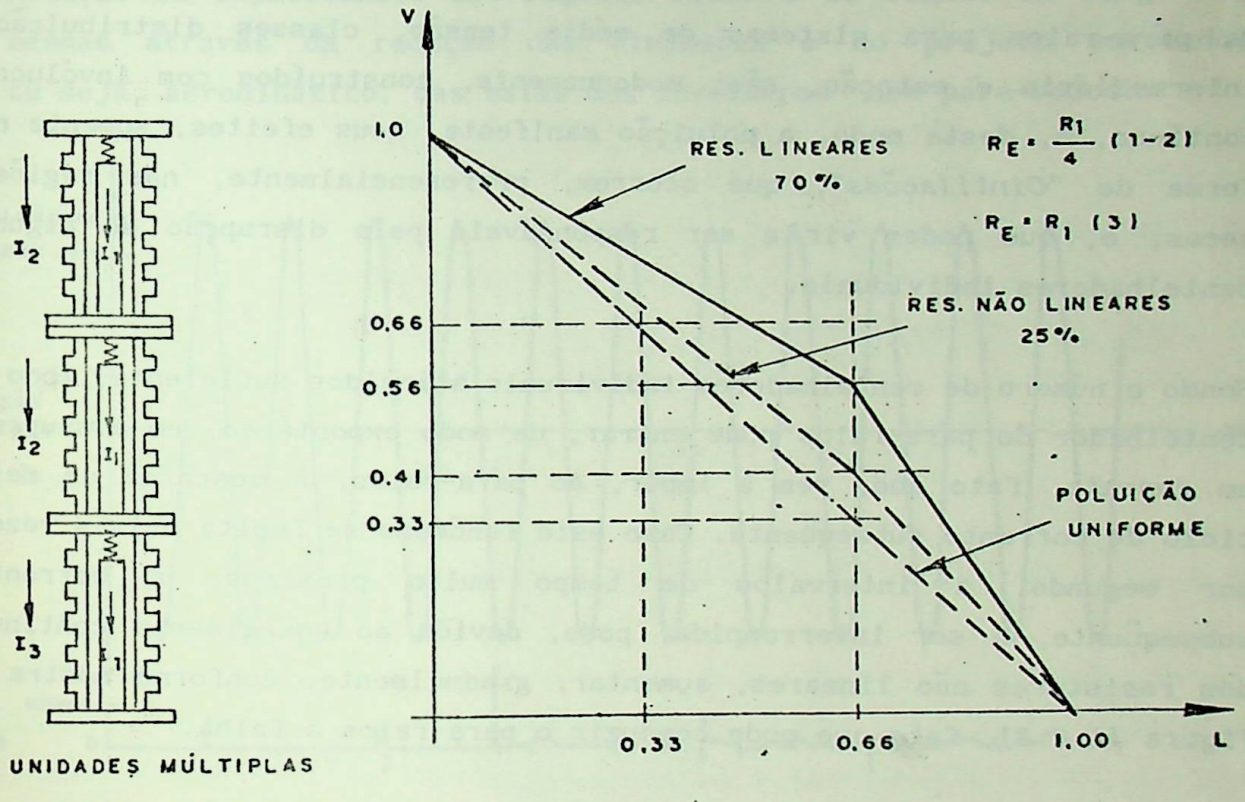


Figura II.2.30 - Fenômeno da Poluição em Regime Permanente e a Transferência de Corrente para o Interior do Invólucro de um Pára-raios[19]

Segundo a Figura *II.2.30*, a transferência de corrente se processa via o flange metálico, que existe, somente, em pára-raios construídos com unidades múltiplas, fato comum, a pára-raios das classes intermediária e estação para sistemas de alta e extra alta tensão. Nestes casos, o re-equilíbrio da distribuição da tensão interna do pára-raios é obtido devido a redistribuição de correntes entre a superfície poluída e o sistema de equalização de potencial, que fica submetido a um elevado esforço térmico, capaz de vir a danificá-lo.

A utilização de resistores de equalização de potencial não lineares permite a obtenção de uma equalização bem mais eficiente que a se obteria com resistores lineares, fato que, atua no sentido de estabilizar a característica de tensão disruptiva do pára-raios. No entanto, todo o sistema fica mais sensível, pois as solicitações térmicas impostas pela poluição são muito mais elevadas.

Os pára-raios para sistemas de média tensão, classes distribuição, intermediária e estação, são, modernamente, construídos com invólucro contínuo, e, deste modo, a poluição manifesta, seus efeitos, somente na forma de *"Cintilações"*, que ocorrem, preferencialmente, nas regiões secas, e, que podem vir a ser responsáveis pela disrupção de alguns centelhadores individuais.

Sendo o número de centelhadores individuais atingidos suficiente, todo o centelhador do pára-raios pode entrar, de modo expontâneo, em disrupção em cascata, fato que, vem a impor, ao pára-raios, a descarga de meio ciclo de corrente subseqüente. Caso este fenômeno se repita muitas vezes por segundo, a intervalos de tempo muito próximos, a corrente subseqüente, a ser interrompida, pode, devido ao aquecimento contínuo dos resistores não lineares, aumentar, gradualmente, conforme mostra a Figura *II.2.31*, fato que pode conduzir o pára-raios a falha.

As falhas de pára-raios devido a poluição podem vir a se constituir em um problema de grande relevância para sistemas classe *34.5 kV* e acima, principalmente, em regiões industriais ou costeiras.

De modo geral, os efeitos da poluição podem vir a ser minimizados adotando-se no projeto do pára-raios as seguintes medidas:

- Redução da influência da capacitância de acoplamento, superfície externa - centelhador, aumentando-se o acoplamento entre os eletrodos do centelhador. Isto pode ser obtido com o auxílio de resistores ou capacitores de equalização, que caso convenientemente dispostos podem vir a blindar eletrostaticamente os centelhadores aumentando a eficácia

desta medida;

- Redução da influência da capacitância de acoplamento, superfície externa - centelhador, através do aumento da distância entre a parede interna do invólucro e os centelhadores; e

- Redução da capacitância das regiões secas e da tensão de carga das mesmas através da redução das dimensões e do projeto adequado, ou seja, aerodinâmico, das saias dos invólucros dos pára-raios.

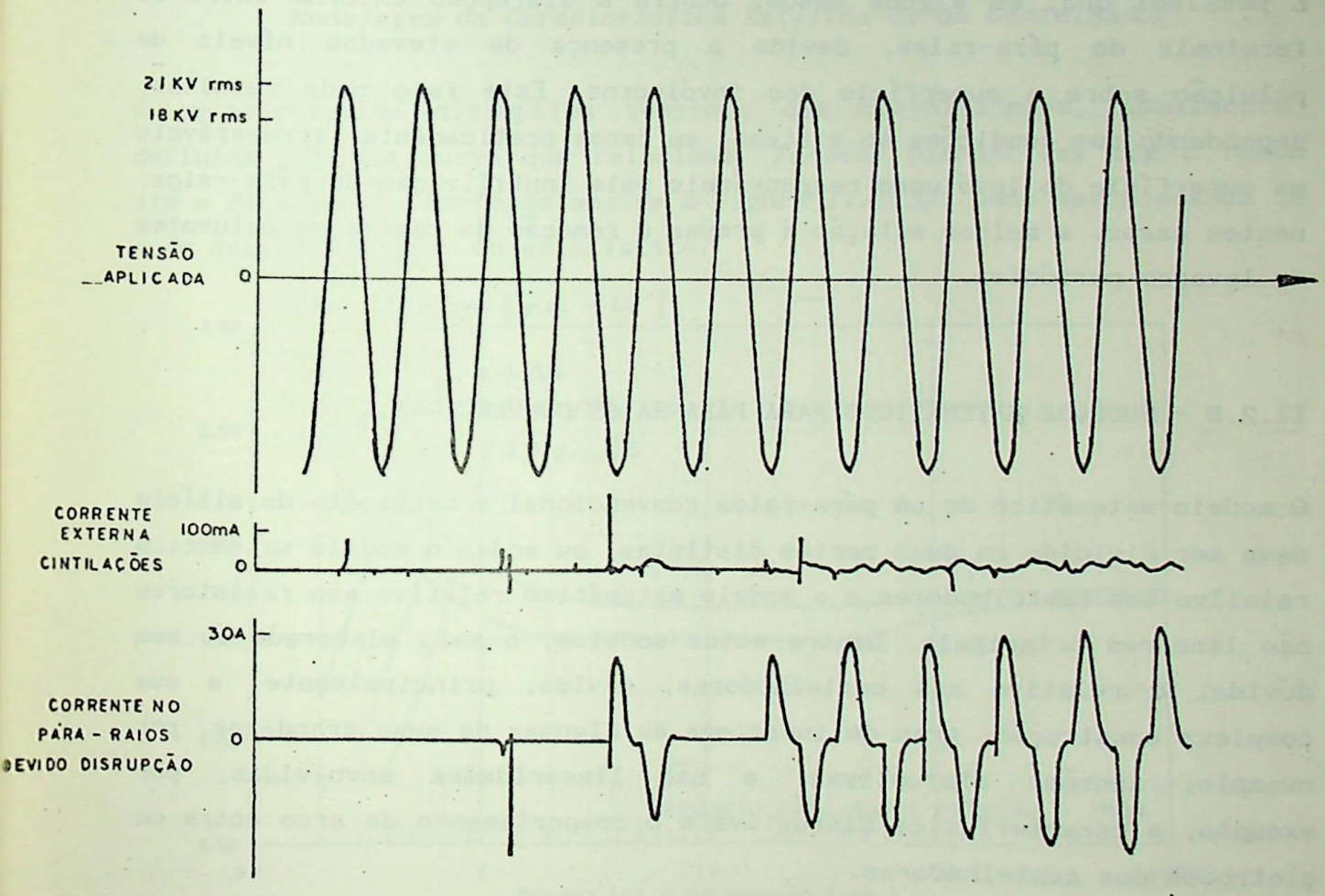


Figura II.2.31 - Corrente Interna de um Pára-raios Devido a Cintilações Oriundas da Poluição Atmosférica[6]

Ensaios em laboratório e experiência de campo tem confirmado que os projetos de pára-raios que possuem resistores de equalização de potencial não lineares, dotados de grande capacidade de escoamento de corrente, e os que possuem invólucros com grande número de saias de

pequena dimensão são, os menos susceptíveis aos mecanismos de falha impostos pela presença da poluição.

Caso não seja possível selecionar um pára-raios que incorpore estas características de projeto, o único meio que resta para reduzir as falhas resultantes da poluição é a adoção de um regime de remoção da camada de poluentes, ou lavagem, periódica, sendo que esta última, deve ser realizada no sentido do flange inferior para o superior.

É possível que, em alguns casos, ocorra a disrupção externa entre os terminais do pára-raios, devido a presença de elevados níveis de poluição sobre a superfície dos invólucros. Este fato pode resultar, dependendo das condições do sistema, em danos praticamente, irreparáveis na superfície do invólucro responsáveis pela inutilização do pára-raios, nestes casos, a melhor solução é prever a remoção da camada de poluentes ou lavagem periódica.

II.2.8 - MODELOS MATEMÁTICOS PARA PÁRA-RAIOS CONVENCIONAIS

O modelo matemático de um pára-raios convencional a carboneto de silício deve ser dividido em duas partes distintas, ou seja; o modelo matemático relativo aos centelhadores e o modelo matemático relativo aos resistores não lineares principais. Dentre estes modelos, o mais elaborado é, sem dúvida, o relativo aos centelhadores, devido, principalmente, a sua complexa construção, grau de incerteza em algumas de suas grandezas, por exemplo; tensões disruptivas, e não linearidades envolvidas, por exemplo, a característica disruptiva e o comportamento do arco entre os eletrodos dos centelhadores.

II.2.8.1 - MODELOS MATEMÁTICOS PARA CENTELHADORES

Devido a complexidade envolvida na representação completa de seu comportamento, os centelhadores, quando de estudos de sistemas são representados de uma maneira simplificada, porém, com grau de

detalhamento adequado a correta determinação das solicitações impostas ao isolamento dos sistemas e aos pára-raios. Sendo assim, a representação simplificada contempla, basicamente, a condição disruptiva do centelhador, em tese, uma característica *"estática"*, ou seja, o início da descarga de corrente pelo pára-raios e caso necessário, sòmente em pára-raios com centelhadores ativos, o desenvolvimento da tensão de arco, em tese, uma característica *"dinâmica"*.

Modelagem da Característica Estática de um Centelhador

A característica disruptiva completa dos centelhadores, usualmente, definida por uma curva que relaciona *"Tensões Disruptivas com o Tempo até a Disrupção"*, conforme mostra a Figura *II.2.32*, pode ser modelada de modo determinístico, ou estatístico.

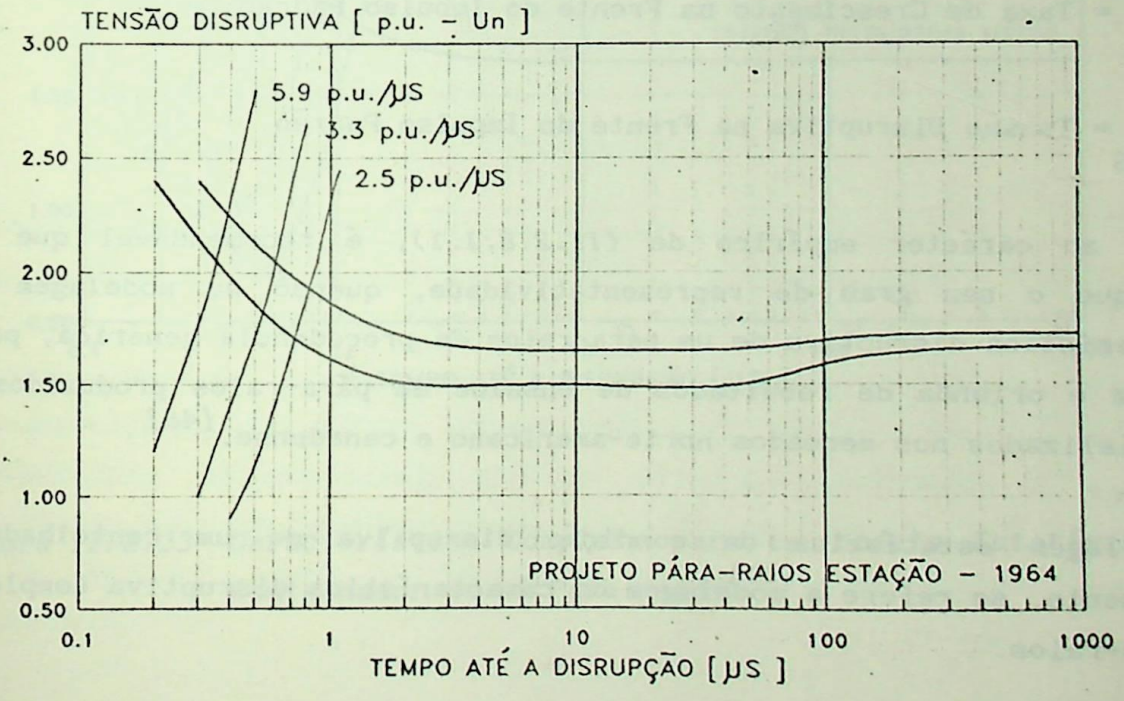


Figura II.2.32 - Característica Disruptiva Completa[46]

A modelagem determinística da condição disruptiva de um centelhador, normalmente, se refere a modelagem da característica, *"Tensão Disruptiva*

Máxima versus Tempo", parte da característica disruptiva completa, conforme mostra a Figura *II.2.32*.

A característica *"Tensão Disruptiva Máxima versus Tempo"*, obtida dos resultados do conjunto de ensaios de tensão disruptiva frente a impulso atmosférico, é, usualmente, modelada matematicamente, pela expressão:

$$U_d = [\ 1 + 0.07\ (\frac{kV_{\mu s}}{kV_{\mu s_{IP}}} - 1\ )\ ]\ U_{d\ FOWS} \qquad (II.2.8.1.1)$$

onde:

U_d = Tensão Disruptiva sob Impulso Atmosferico;

$kV_{\mu s}$ = Taxa de Crescimento do Impulso;

$kV_{\mu s_{IP}}$ = Taxa de Crescimento na Frente do Impulso Padrão; e

$U_{d\ FOWS}$ = Tensão Disruptiva na Frente do Impulso Padrão.

Devido ao carácter empírico de *(II.2.8.1.1)*, é recomendável que se verifique o seu grau de representatividade, quando da modelagem da característica disruptiva de um pára-raios de procedência genérica, pois a mesma é oriunda de resultados de ensaios em pára-raios produzidos e comercializados nos mercados norte-americano e canadense.[46]

A modelagem estatística da condição disruptiva de um centelhador, normalmente, se refere a modelagem da característica disruptiva completa do pára-raios.

Conforme mostra a Figura *II.2.33*, a modelagem estatística da condição disruptiva de um centelhador, implica em associar a cada valor de taxa de crescimento do impulso atmosférico, passível de ser aplicado ao pára-raios, um valor de *"tensão disruptiva médio"* e um *"desvio padrão"* associado. Isto, fatalmente, resulta em um modelo dotado de um grau de complexidade, relativamente, elevado, útil para estudar o comportamento

do pára-raios completo, que, no entanto, para apresentar algum significado prático demanda, uma grande quantidade de dados de entrada, fato, normalmente, incompatível com os níveis de detalhamento dos fenômenos que se pretende estudar em sistemas de potência.

Deste modo, a modelagem determinística da característica disruptiva completa, ou seja, a modelagem da característica *"Tensão Disruptiva Máxima versus Tempo"* é a preferencialmente utilizada na maioria dos estudos em sistemas de potência.

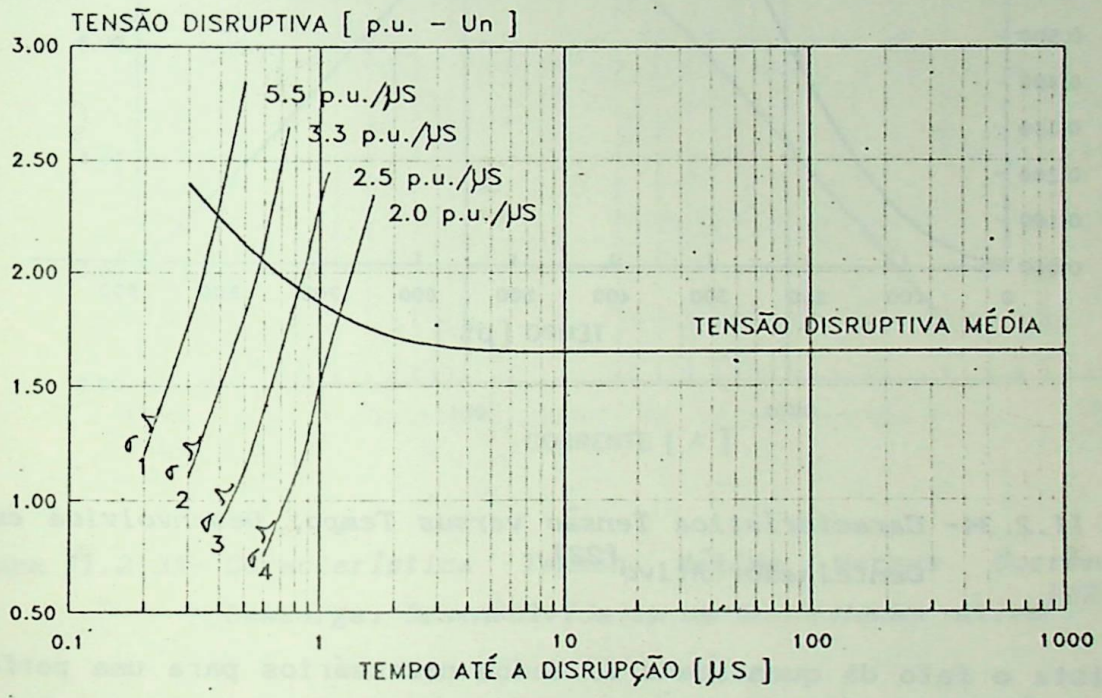


Figura II.2.33- Característica Completa para um Modelo Estatístico de Centelhador de um Pára-raios[46]

Modelagem da Característica Dinâmica de um Centelhador

A característica dinâmica de um centelhador, usualmente, definida por uma série de curvas que relacionam *"Tensão Desenvolvida versus Tempo"* e a *"Tensão Máxima versus Corrente"* conforme mostram, para uma situação particular, relativa aos valores máximos, a Figura *II.2.34*, e a

Figura *II.2.35* pode ser modelada de modo determinístico, ou estatístico.

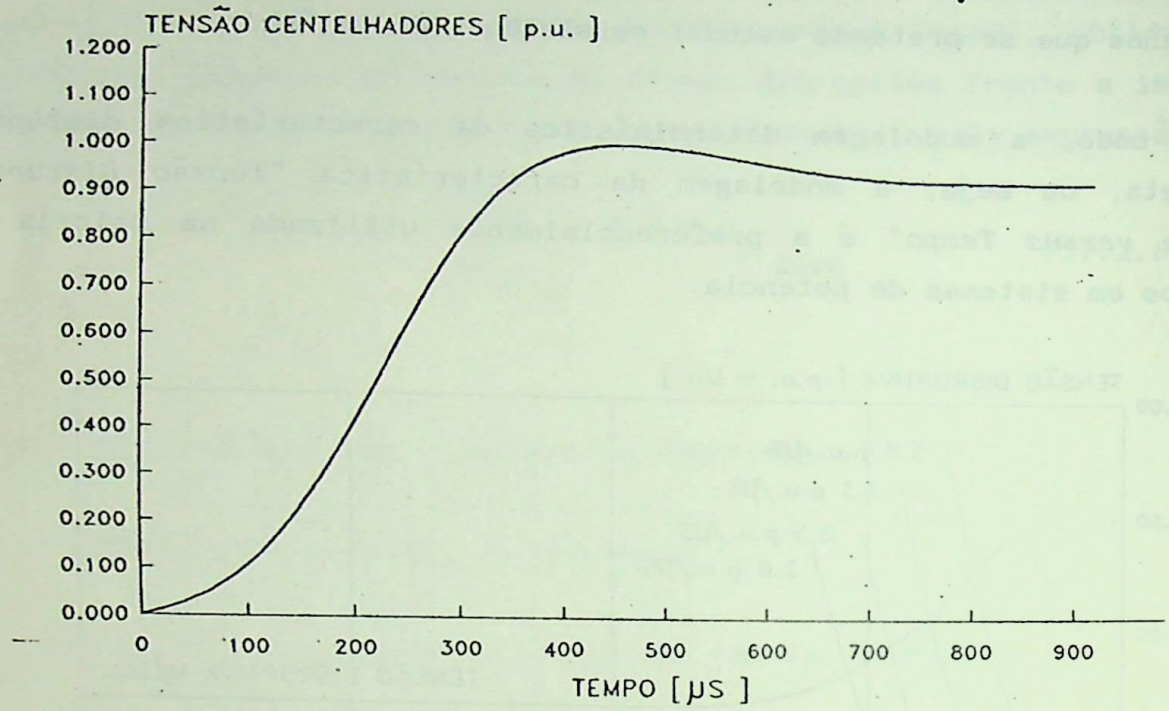


Figura II.2.34- Característica Tensão versus Tempo, Desenvolvida em um Centelhador Ativo[22]

Haja vista o fato da quantidade de dados necessários para uma perfeita definição do modelo estatístico ser elevado, via de regra adota-se, uma modelagem de cunho determinístico, ou seja, que contemple, basicamente, valores máximos para amplitudes de corrente e tempo de desenvolvimento da tensão nos centelhadores, mostrados na Figura *II.2.34* e na Figura *II.2.35*.

Via de regra, a modelagem da característica dinâmica de um centelhador procura refletir o desenvolvimento no tempo da tensão em seus terminais quando da descarga de correntes de manobra ou em freqüência industrial pois, devido aos mecanismos de transferência da corrente dos elementos de *"bypass"* para as bobinas de sopro, a tensão só atinge seu valor máximo após um intervalo de tempo da ordem de *500 µs*, o que indica que,

de modo correto, a efetiva contribuição dos centelhadores ativos na divisão da tensão e, por conseguinte, na redução da corrente através do pára-raios e da energia dissipada nos resistores não lineares, só ocorre após a descarga total das correntes de impulso atmosférico.

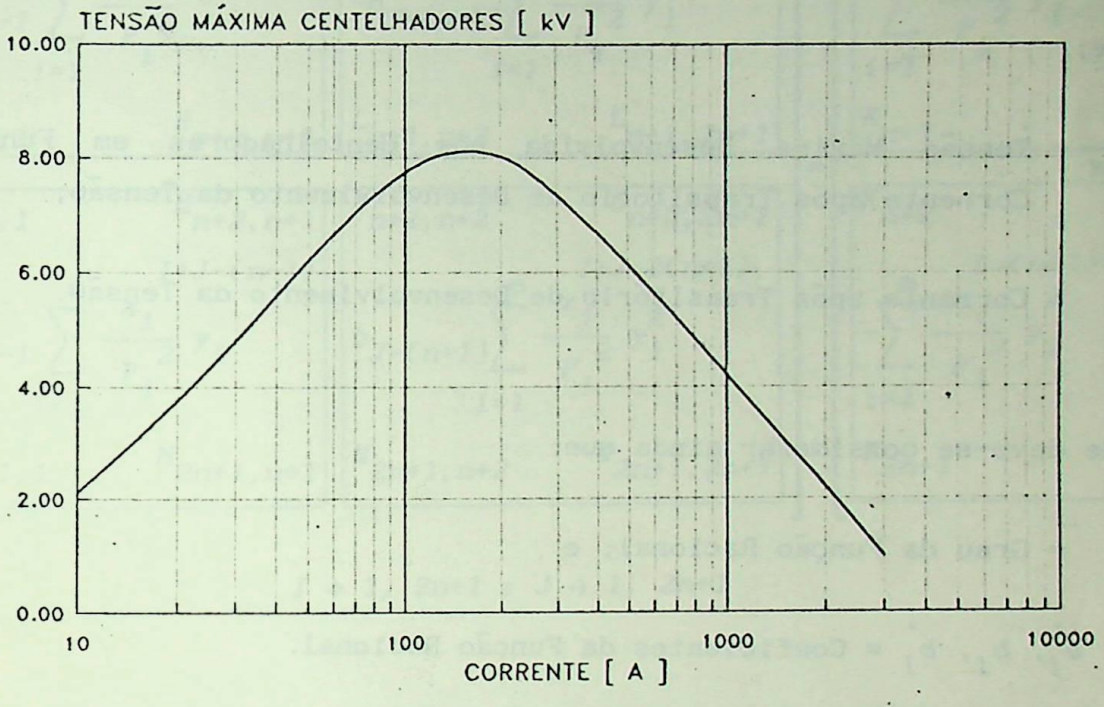


Figura II.2.35- Característica Tensão Máxima versus Corrente de Descarga, Desenvolvida em um Centelhador Ativo [22]

Devido a forma das curvas que definem a característica dinâmica de um centelhador, recomenda-se modelar as mesmas através de funções racionais, ou seja, através de um quociente de dois polinômios. [47→48]

Deste modo, vem:

$$U(t) = V_{Max} \frac{a_o + a_1 t + a_2 t^2 + \ldots\ldots\ldots + a_n t^n}{1 + b_1 t + b_2 t^2 + \ldots\ldots\ldots + b_n t^n} t \qquad (II.2.8.1.2)$$

onde:

$U(t)$ = Tensão Desenvolvida nos Centelhadores em Função do Tempo; e

t = Tempo; e

$$U_{Max} = \frac{a'_o + a'_1 I + a'_2 I^2 + \ldots\ldots\ldots + a'_n I^n}{1 + b'_1 I + b'_2 I^2 + \ldots\ldots\ldots + b'_n I^n} I \qquad (II.2.8.1.3)$$

onde:

U_{Max} = Tensão Máxima Desenvolvida nos Centelhadores em Função da Corrente após Transitório de Desenvolvimento da Tensão;

I = Corrente após Transitório de Desenvolvimento da Tensão.

Onde deve-se considerar ainda que:

n = Grau da Função Racional; e

a_i, a'_i, b_i, b'_i = Coeficientes da Função Racional.

Nota:-

O quociente entre os polinômios, pós multiplicado por U_{Max}, deve representar uma função com valores em por unidade.

Os coeficientes a_i, a'_i, b_i, b'_i são calculados iterativamente através da aplicação do *"Método dos Mínimos Quadráticos"*, que para uma função $Y = f_1(x)$, ou seja:

$$Y = \frac{a_o + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots\ldots\ldots + a_n x^n}{1 + b_1 x + b_2 x^2 + \ldots\ldots\ldots + b_n x^n} x \qquad (II.2.8.1.4)$$

Que caso venha a ser discretizada em m pares (x_i, y_i), implica em:

$$\begin{bmatrix} H_{1,1} & \cdots & H_{1,n+1} \\ & a_{J-1}\sum_{i=1}^{m}\frac{x_i^{I+J}}{P_i^2} & \\ H_{n+1,1} & \cdots & H_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} L_{1,n+2} & \cdots & L_{1,2n+1} \\ & -b_{J-(n+1)}\sum_{i=1}^{m}\frac{x_i^{I+J-(n+1)}}{P_i^2}y_i & \\ L_{n+1,n+2} & \cdots & L_{n+1,2n+1} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} K_1 \\ \sum_{i=1}^{m}\frac{x_i^{I}}{P_i^2}y_i \\ K_{n+1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_{n+2,1} & \cdots & M_{n+2,n+1} \\ & a_{J-1}\sum_{i=1}^{m}\frac{x_i^{I+J-(n-1)}}{P_i^2}y_i & \\ M_{2n+1,1} & \cdots & M_{2n+1,n+1} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} N_{n+2,n+2} & \cdots & N_{n+2,2n+1} \\ & b_{J-(n+1)}\sum_{i=1}^{m}\frac{x_i^{I+J-2(n+1)}}{P_i^2}y_i^2 & \\ N_{2n+1,n+2} & \cdots & N_{2n+1,2n+1} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} K_{n+2} \\ -\sum_{i=1}^{m}\frac{x_i^{I-(n+1)}}{P_i^2}y_i^2 \\ K_{2n+1} \end{bmatrix}$$

$$I \rightarrow 1,\ 2n+1\ ;\ J \rightarrow 1,\ 2n+1$$

onde:

$$P_i = y_i\ (\ 1 + b_1 x_i + b_2 x_i^2 + \ldots\ldots\ldots + b_n x_i^n\ ) \qquad (II.2.8.1.5)$$

De modo a contornar a não linearidade existente, o método assume a cada iteração que o valor de P_i é constante. Para iniciar o método iterativo é usualmente recomendado adotar:

$$P_i = 1.00 \qquad (II.2.8.1.6)$$

Com respeito ao grau das funções racionais utilizadas para a modelagem da característica dinâmica dos centelhadores, o ideal, em termos de simulação, é que o mesmo seja o menor possível, pois, deste modo, o tempo demandado, durante a mesma, em específico, para o cálculo dos valores assumidos pelas funções que compõem o modelo, se torna proporcionalmente reduzido. Ainda com respeito ao grau da função racional, é interessante ressaltar que, graus elevados normalmente resultam em funções descontínuas, fato que deve ser previsto quando da

programação do método, conforme mostrado no *ANEXO - II.*

II.2.8.2 - MODELOS MATEMÁTICOS PARA OS RESISTORES NÃO LINEARES

O comportamento dos resistores a carboneto de silício é, usualmente, definido por um conjunto de curvas que relacionam *"Tensões Residuais com Correntes de Descarga"*, conforme mostra a Figura *II.2.36*, na qual a dispersão entre as curvas de mínima e máxima tensão residual, leva em conta, sòmente, as tolerâncias oriundas do processo de fabricação, que, normalmente, resulta em três tipos de resistores, nominalmente denominados de *"alta - H"*, *"média - M"* e *"baixa - L"* característica.

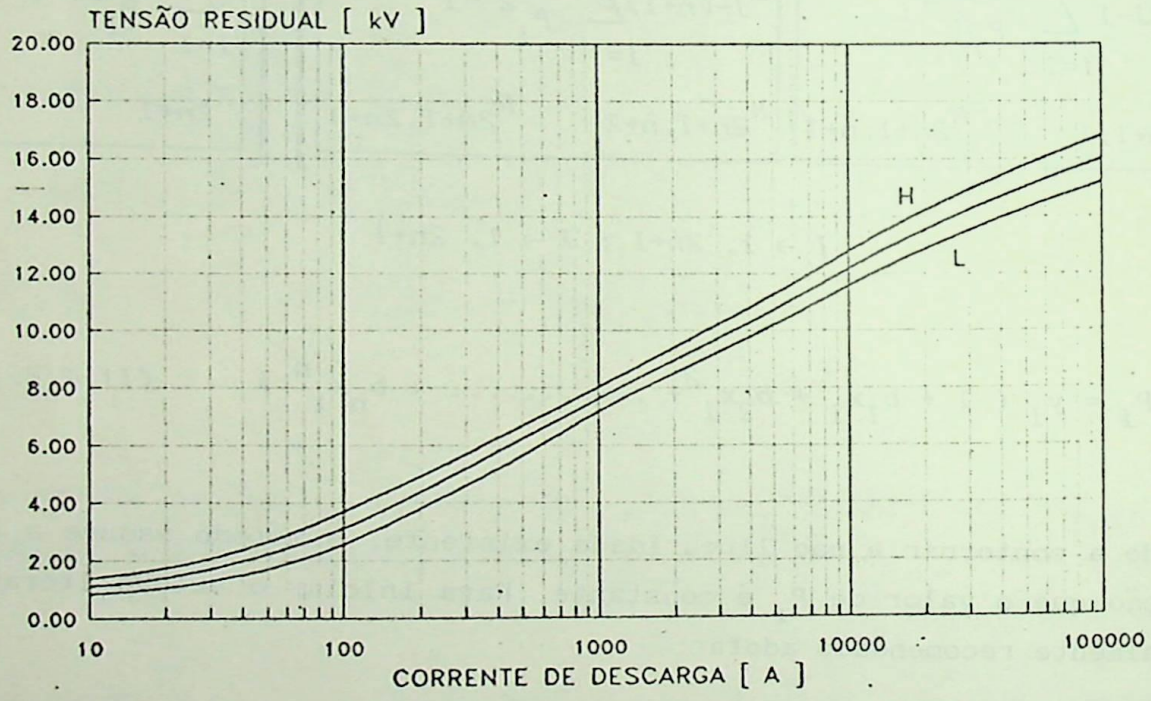


Figura II.2.36 - Característica Tensão Residual Corrente de Descarga [6]

O fato acima, pode, em primeira instância, sugerir a possibilidade de adoção de uma modelagem estatística, que na grande maioria dos estudos não apresenta significado prático algum. O usualmente recomendado neste caso é substituir a modelagem estatística por uma determinística que contemple, alternativamente, a característica *"Tensão Residual versus Corrente de Descarga Máxima"*, quando dos estudos de *"Coordenação de Isolamento"* e a característica *"Tensão Residual versus Corrente de*

Descarga Mínima", quando dos estudos de *"Absorção de Energia pelo Pára-raios"*.

Tendo em mente os comentários e restrições acima, recomenda-se modelar, a característica *"Tensão Residual versus Corrente de Descarga"* dos resistores a carboneto de silício através de uma função com a seguinte forma matemática, conhecido como *"Modelo Alpha"*. [19]

$$I = k\,U^{\alpha} \qquad (II.2.8.1.7)$$

onde:

I = Corrente de Descarga, em valores de crista [A];

U = Tensão Residual, em valores de crista [V];

k = Constante de Proporcionalidade;

α = Coeficiente de Não Linearidade.

O modelo acima necessita de *"dois pares tensão versus corrente"* para ser definido. Logo, considerando-se, (I_1, kV_1) e (I_2, kV_2) vem:

$$\alpha = \frac{Log\ I_1 - Log\ I_2}{Log\ kV_1 - Log\ kV_2} \qquad (II.2.8.1.8)$$

e;

$$k = \frac{I_1}{kV_1^{\left(\frac{Log\ I_1 - Log\ I_2}{Log\ kV_1 - Log\ kV_2}\right)}} \qquad (II.2.8.1.9)$$

Tendo em mente sua simplicidade, este modelo deve ser utilizado, com cuidado, dentro de limites, relativamente bem definidos. Idealmente é conveniente que os *"dois pares tensão versus corrente"* se encontrem na mesma década de uma representação logarítmica, e isto implica intrinsecamente que interpolações ou mesmo extrapolações devem ser cuidadosamente realizadas, recomendando-se não estende-las por mais de

uma década, conforme mostra a Figura *II.2.37.*

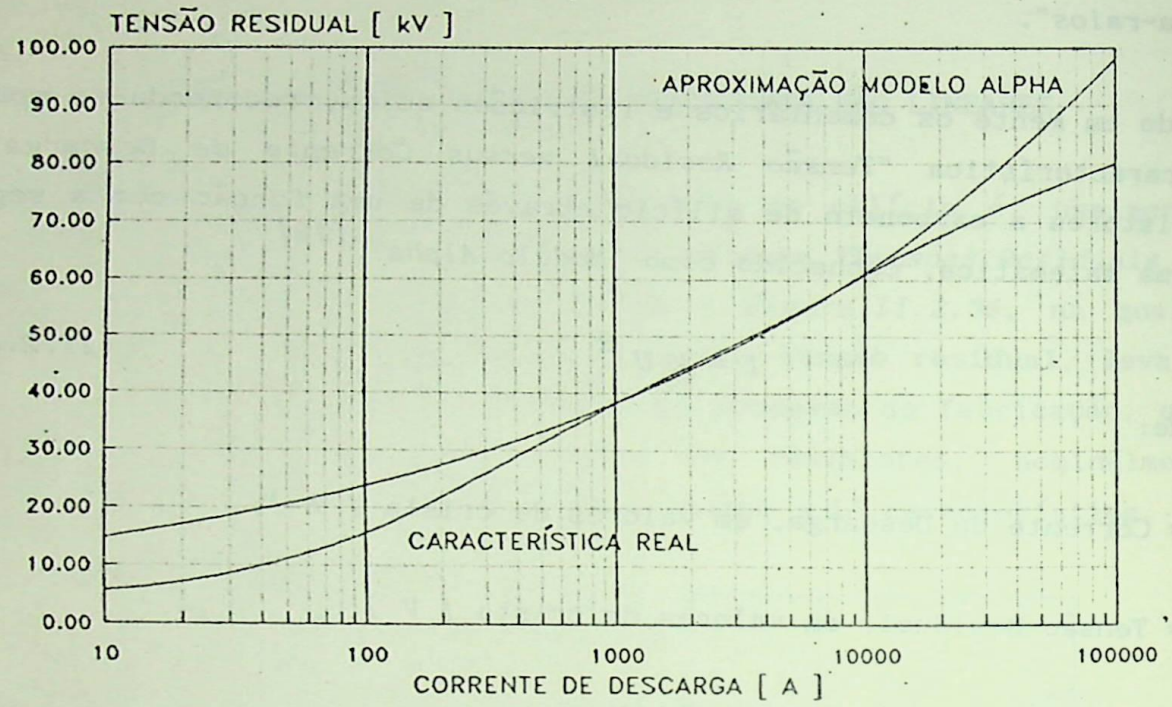


Figura II.2.37 - Modelo Matemático para a Característica Tensão Residual Corrente de Descarga[19]

É possível, porém, pouco utilizado, modelar a característica *"Tensão Residual versus Corrente de Descarga"* dos resistores a carboneto de silício através de uma função racional*. Este tipo de modelo, via de regra, possibilita uma representação mais elaborada que a anterior, permitindo com o auxílio de uma única função obter informações sobre as regiões de baixa, média e alta corrente mas, por outro lado, exige uma maior quantidade de dados obtidos de ensaio.

** Nota -*

→ *A representação por pares (Tensão, Corrente), em tese, trechos de reta só é utilizada em programas digitais para transitórios eletromagnéticos.*

A característica *"Tensão Residual versus Corrente de Descarga"* dos resistores não lineares a carboneto de silício é levantada em

laboratório para corrente com forma padronizada, ou seja, *8 x 20 μs* e *4 x 10 μs*, usualmente, ao redor da corrente nominal, fato que implica na necessidade de correção dos modelos, acima descritos, para correntes com forma diferente da padronizada.

Quando da modelagem para correntes com taxa de crescimento, distintas da padronizada, o acoplamento mútuo formado pelos resistores, ou seja, pára-raios e o equipamento protegido, pode ser modelado por uma indutância, retirada de dados de ensaio de tensão residual, ou pela incorporação às expressões que modelam a característica *"Tensão Residual versus Corrente de Descarga"* dos resistores de um fator de correção para taxas de crescimento de tensão superiores à padronizada. No entanto, convém ressaltar que a correção da *"Tensão Residual"* impede modelar a ausência de concordância entre os valores de crista das formas de tensão e da corrente.

Indutância Parasita:

Seja para tanto o oscilograma mostrado na Figura *II.2.38:*

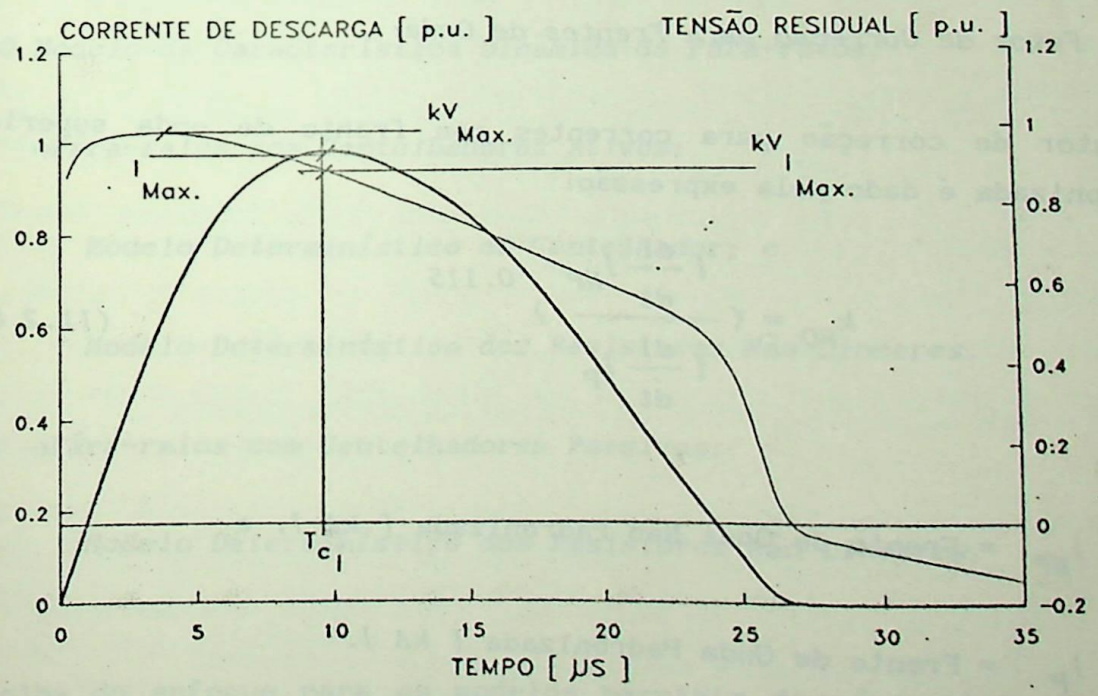


Figura II.2.38 - Oscilogramas de um Ensaio de Tensão Residual em um Pára-raios de 12 kV - 5 kA[19]

Considerando agora:

$\frac{dI}{dt}$ = Taxa de Crescimento da Corrente [$kA/\mu s$];

I_{Max} = Corrente Máxima [kA];

$kV_{I_{Max}}$ = Tensão Residual para Corrente Máxima [kV]; e

kV_{Max} = Tensão Residual Máxima [kV].

vem:

$$L_{PR} = \frac{kV_{Max} - kV_{I_{Max}}}{\frac{dI}{dt}} \qquad (II.2.8.1.10)$$

onde:

L_{PR} = Indutância Parasita do Pára-raios [μs].

Fator de Correção para Frentes de Onda:

O fator de correção para correntes com frente de onda superiores a padronizada é dado pela expressão:

$$k_{FO} = \left(\frac{\left[\frac{dI}{dt} \right]_{NP}}{\left[\frac{dI}{dt} \right]_{P}} \right)^{0.115} \qquad (II.2.8.1.11)$$

onde:

$\left[\frac{dI}{dt} \right]_{NP}$ = Frente de Onda Não Padronizada [kA]; e

$\left[\frac{dI}{dt} \right]_{P}$ = Frente de Onda Padronizada [kA].

Neste caso,

$$U_{R_F} = k_{FO}\, U_{R_P} \qquad (II.2.8.1.12)$$

onde:

U_{R_F} = Tensão Residual para Corrente com Frente não Padronizada; e

U_{R_P} = Tensão Residual para Corrente com Frente Padronizada;

II.2.8.3 - MODELO MATEMÁTICO COMPLETO

O modelo matemático completo da parte interna ativa, utilizada para fins de Estudos de Coordenação de Isolamento, de um pára-raios a carboneto de silício contempla, conforme abordado, duas etapas distintas:

O Modelo da Característica Estática do Pára-raios; e

→Modelo Estatístico da Característica Estática do Centelhador; ou

→Modelo Determinístico da Característica Estática do Centelhador

O Modelo da Característica Dinâmica do Pára-raios.

→Pára-raios com Centelhadores Ativos:

Modelo Determinístico do Centelhador; e

Modelo Determinístico dos Resistores Não Lineares.

→Pára-raios com Centelhadores Passivos:

Modelo Determinístico dos Resistores Não Lineares.

A escolha do enfoque para os modelos parciais do pára-raios, no caso, estatístico ou determinístico, esbarra em alguns pontos básicos que devem ser sempre relembrados, dentre os quais, entre outros,

destacam-se, a disponibilidade de dados em quantidade e qualidade, de modo, a perfeitamente, definir os parâmetros dos modelos parciais, bem como, qual o tipo de aplicação a que se destina o modelo completo do pára-raios.

Os modelos acima resultam nos circuitos elétricos mostrados na Figura *II.2.39*. Neste caso, os parâmetros, lineares ou não, devem ser representados segundo suas expressões equivalentes.

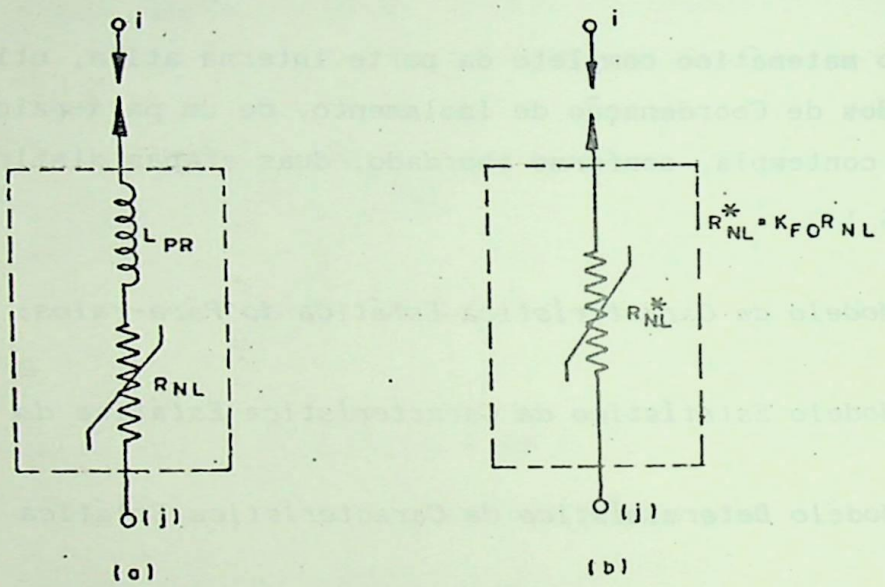


Figura II.2.39 - Circuitos Elétricos Equivalentes de um Pára-raios[19]

a) Indutância Parasita; e

b) Resistência Corrigida para Impulsos com Frente não Padronizada.

II.2.9 - AVALIAÇÃO DAS FALHAS EM PÁRA-RAIOS CONVENCIONAIS

Os pára-raios, principalmente, os da classe de distribuição, possuem uma reputação, nada recente, de apresentarem um comportamento duvidoso, bem como, de entrarem em modo de falha sem, para tanto, apresentarem razões que evidenciem os fenômenos envolvidos neste processo.

Dentro deste contexto as concessionárias de energia elétrica em várias

partes do mundo vem realizando experiências com pára-raios retirados de seus sistemas, nas mais distintas situações, visando, primeiramente detectar quais as causas das falhas que vem, sistematicamente, ocorrendo, e, finalmente definir um método preciso e confiável de inspeção de pára-raios instalados no campo. *[33-49→53]*

Dentre estes estudos, destacam-se os realizados entre *1984 - 1987* pela *Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL*, em pára-raios classe intermediária e classe estação para sistemas de média e alta tensão, tipicamente, para sistemas de *34.5 kV*, *69.0 kV* e *138.0 kV* e os realizados entre *1977 - 1978* pela *Ontario Hydro*, em pára-raios classe distribuição, tipicamente, para sistemas de *25 kV* e *27.6 kV*.

Apesar de realizados em sistemas, ocasiões e condições distintas, os resultados, obtidos em ambos casos, são concordantes e conclusivos, pelo menos, no que tange aos principais motivos que resultam em falhas em pára-raios.

Os pára-raios estudados pela *Companhia Paulista de Força e Luz*, em número de *63*, totalizando *105 unidades*, com tensão nominal entre *30 kV e 121 kV*, foram retirados do campo, inicialmente, sob alguma anomalia devido a termovisão e, durante etapas subseqüentes, de maneira aleatória, de modo, a cobrir a maioria dos tipos classes e projetos de pára-raios existentes em seu sistema.

As falhas com pára-raios classe intermediária e classe estação, no caso da *Companhia Paulista de Força e Luz*, chegaram a atingir a taxa de *7.34 %*, com uma média em um período de *7 anos* de *3.14 %* , é de interesse ressaltar ainda que a idade média dos pára-raios instalados no sistemma atinge a casa dos *20 anos*.

Já os pára-raios estudados pela *Ontario Hydro*, em número de *250 unidades*, com tensão nominal entre *18 kV* e *21 kV*, foram retirados de campo, devido a condição de falha, alguns fragmentados, outros intactos, conforme mostra a Figura *II.2.40*. O projeto demandou um tempo de pesquisa de campo, de aproximadamente *4 meses*, abrangendo períodos nos

quais a ocorrência de descargas atmosféricas e a presença de poluição superficial no invólucro, fatores normalmente responsáveis por falhas nos pára-raios, fossem predominantes.

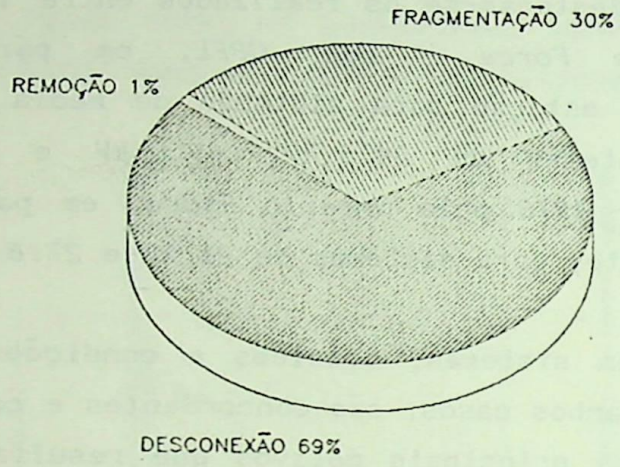


Figura II.2.40 - Modos de Falha de um Pára-raios[6]

Com respeito aos pára-raios para classe distribuição, de modo geral, existem evidências de que as falhas por ano são, aproximadamente, *1.00 %* da população total de pára-raios, outras evidências que demonstram ainda, estarem os pára-raios de tensão nominal elevada, por exemplo, superior a *18 kV*, mais sujeitos a falhas do que os pára-raios de tensão nominal inferior a este limite.

O modo de falha, na forma de fragmentos, da ordem de *30 %*, conforme mostra a Figura *II.2.40*, pode ser explicado pela instalação imprópria, no entanto, frequente, dos condutores dos desligadores automáticos. Em tese, os condutores utilizados, nestes casos, não apresentam a flexibilidade necessária para prover a correta desconexão do desligador automático, fato que permite a manutenção do curto fase - terra, interno ao pára-raios, responsável pela fragmentação do invólucro. A utilização de condutores com flexibilidade adequada, deve permitir a redução da porcentagem de pára-raios que falham na forma de fragmentos.

A Figura *II.2.41*, mostra as causas que conduziram os pára-raios da classe distribuição pesquisados pela *Ontario Hydro* a condição de falha, na qual pode-se observar, a exemplo dos pára-raios classe intermediária e classe estação, pesquizados pela *Companhia Paulista de Força e Luz*, que a maior taxa de falha em pára-raios, por volta de *86 %* e *72 %*, respectivamente, é oriunda da penetração de umidade no invólucro.

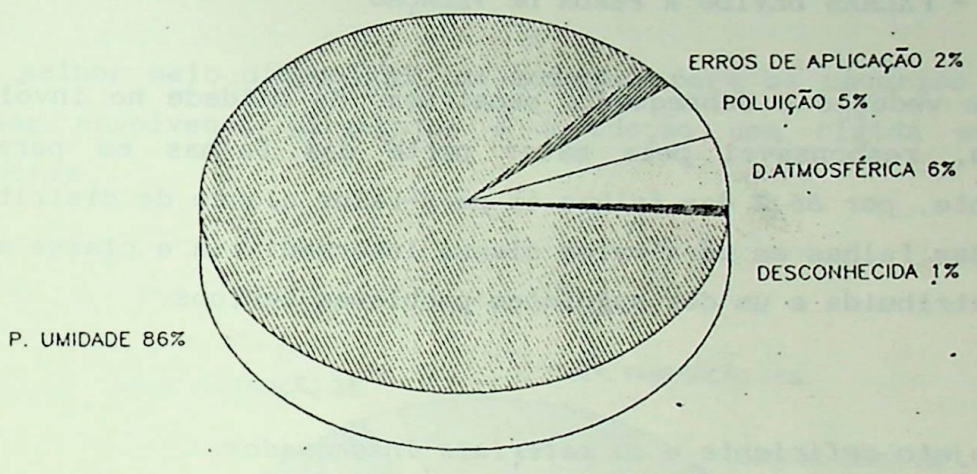


Figura II.2.41 - Principais Causas de Falhas em Pára-raios Classe Distribuição[6]

II.2.10 - COMENTÁRIOS SOBRE FALHAS EM PÁRA-RAIOS CONVENCIONAIS

Com respeito as principais causas de falhas em pára-raios convencionais verifica-se que a penetração de umidade no invólucro é a principal delas, algumas tentativas de solução para o problema, que visam, principalmente, a melhoria do controle de qualidade da vedação, durante as etapas de fabricação dos pára-raios, tem sido levadas a termo porém, os resultados, até o presente momento, se encontram abaixo das expectativas.

Alguns trabalhos tem sido realizados ressaltando a necessidade de se fabricar pára-raios capazes de suportar correntes de descarga mais elevadas, e neste sentido as Normas *ANSI - CSA*, já se movimentaram criando dentro da classe distribuição uma sub classe denominada *"Serviço Pesado"*, que por razões óbvia de custos deve ser utilizada somente quando estritamente necessário.

II.2.10.1 - FALHAS DEVIDO A PERDA DE VEDAÇÃO

A perda de vedação e subsequente penetração de umidade no invólucro do pára-raios, responsável pela maior parte das falhas em pára-raios, nominalmente, por *86 %* das falhas em pára-raios classe de distribuição e por *72 %* das falhas em pára-raios classe intermediária e classe estação, pode ser atribuida a um dos seguintes problemas básicos:

- *Projeto deficiente e ou materiais inadequados;*
- *Defeitos de fabricação e ou controle de qualidade;*
- *Deterioriazação do material das gaxetas;*
- *Danos durante a instalação do pára-raios; e*
- *Envelhecimento da vedação.*

A Figura *II.2.42*, mostra para os pára-raios classe distribuição, a importância relativa destes problemas; passíveis, em sua grande maioria, excetuando-se os casos relativos à danos durante a instalação, por exemplo, devido a aplicação de torque em excesso, quando da conexão dos terminais e abraçadeiras, de serem resolvidos sòmente pelos fabricantes dos mesmos. Isto se deve ao fato, de que a penetração de umidade necessita sòmente de uma pequena falha de vedação, que possibilite a comunicação contínua entre o interior do invólucro do pára-raios e o

meio ambiente, seguida de variações de temperatura que permitam o desenvolvimento do chamado *"Efeito Bombeamento"*. Pequenas quantidades de umidade no interior do invólucro de um pára-raios, via de regra, atuam no sentido de perturbar os esforços dielétricos internos aos centelhadores; fato, que pode resultar em sua disrupção e falha subseqüente. Deste modo, é comum que ocorram falhas devido a presença de umidade no interior de um pára-raios, por exemplo, durante religamentos, mesmo em dias de tempo bom pois o disparo dos centelhadores é oriundo da redistribuição de tensão devido a variações de temperatura.

Logo, o melhor meio disponível, de momento, para os usuários reduzirem as falhas envolvendo pára-raios é a adoção uma rígida seleção de fornecedores.

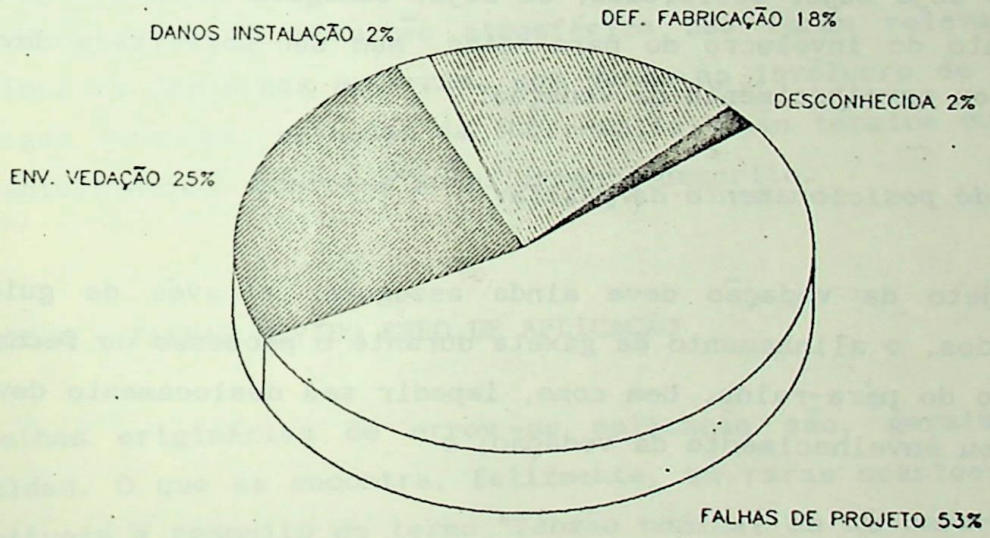


Figura II.2.42 - Principais Causas de Falha de Vedação em Pára-raios Classe Distribuição[6]

Os fabricantes podem controlar os problemas devido a vedação de várias

maneiras, dentre as quais, ressaltam-se:

- *Controle do estado da superfície onde são aplicadas as gaxetas:*

As superfícies, sobre as quais são aplicadas as gaxetas, principalmente, a da porcelana, deve receber um tratamento, normalmente na forma de retífica, de modo a torná-la o mais plana possível, evitando, deste modo, a existência de regiões preferenciais para a formação das falhas;

- *Controle da compressão da gaxeta:*

O projeto da vedação deve assegurar a aplicação à gaxeta de uma pressão adequada, normalmente da ordem de $2\ N/mm^2$ a $3\ N/mm^2$ de modo, que a mesma não seja super-solicitada, ou seja, esmagada durante o processo de fechamento do invólucro do pára-raios, nem sub-solicitada devido a acomodação ou envelhecimento da vedação;

- *Controle do posicionamento da gaxeta:*

O projeto da vedação deve ainda assegurar através de guias ou outros métodos, o alinhamento da gaxeta durante o processo de fechamento do invólucro do pára-raios, bem como, impedir seu deslocamento devido a acomodação ou envelhecimento da vedação; e

- *Material da gaxeta:*

O material da gaxeta deve ser resistente a ozônio, sendo assim, comum o uso de gaxetas a base de *"BUNA - N"*.

II.2.10.2 - FALHAS DEVIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Existe uma série de estudos, em específico, realizados pelo *EPRI*[54] que demonstram que os pára-raios classe distribuição estão sujeitos a

descargas de corrente mais severas que as existentes em Norma. O estudo realizado pela *Ontario Hydro* mostra que pelo menos *7 %* das falhas envolvendo pára-raios são oriundas de descargas de correntes de impulso atmosférico, neste caso, em específico, tem-se a relatar que um terço destas falhas foram ocasionadas por falha de operação dos desligadores automáticos, fato, provavelmente, comum no Brasil onde é usual e errado fazer-se concorrência em separado para pára-raios e desligadores automáticos. Outras falhas comuns foram descargas internas ao pára-raios, em seus resistores não lineares, e vaporização dos eletrodos, fatos também observados no estudo realizado pèla *Companhia Paulista de Força e Luz* em pára-raios classe intermediária e classe estação.

II.2.10.3 - FALHAS DEVIDO POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

As falhas devido a poluição atmosférica não foram relevantes e são divididas em descargas externas, com danos ao invólucro de porcelana e descargas internas, oriundas da sobre-solicitação térmica ou dielétrica dos centelhadores, conforme anteriormente descrito.

II.2.10.4 - FALHAS DEVIDO ERRO DE APLICAÇÃO

As falhas originárias de erros de aplicação são, geralmente, muito reduzidas. O que se encontra, felizmente, em raras ocasiões, são erros conceituais a respeito do termo *"Tensão nominal de um pára-raios"*. Este tipo de erro, normalmente conduz, por exemplo a utilização de um pára-raios de *9 kV* de tensão nominal em sistemas de *13.8 kV*, ao invés de pára-raios de *12 kV*, ou ainda, de pára-raios de *21 kV* de tensão nominal em sistemas de *34.5 kV*, ao invés de pára-raios de *27 kV*.

II.3 - PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO - ZnO

There are nine and sixty ways of constructing tribal lays
And every single one of them is right
(Rudyard Kipling, 1865 - 1936)

Os pára-raios a óxido metálico, são, tradicionalmente, constituídos por um ou mais resistores a Óxido Metálico, ou como comumente conhecidos, resistores a Óxido de Zinco - ZnO, também denominados de elementos válvula, conectados, geralmente, em série, sem a presença de centelhadores de espécie alguma. A ausência de centelhadores em pára-raios a óxido metálico, não se constitue, no entanto, em uma regra soberana de projeto, pois outras soluções, que compartilham centelhadores, no caso, série, paralelo ou coaxial, podem, e, usualmente, o são, adotadas, por motivos os mais variados possíveis, pelos fabricantes de pára-raios.

A resistência oferecida pelos resistores a óxido metálico, a exemplo da oferecida pelos resistores a carboneto de silício, varia com a tensão, porém, de um modo, proporcionalmente, muito maior. Ou seja, respeitando-se os limites de definição de coeficiente de não linearidade, determinados pelas correntes, os resistores a óxido metálico apresentam um coeficiente de não linearidade muito superior, da ordem de *50*, ao coeficiente de não linearidade dos resistores de carboneto de silício, da ordem de *4*. Esta variação extrema, conforme mostra a Figura *II.3.1* permite, de um ponto de vista geral, que os pára-raios a óxido metálico, sejam projetados de modo a conduzirem correntes de baixa amplitude, virtualmente, correntes de fuga, quando submetidos as condições normais do sistema, tensões fase terra ou sobretensões a freqüência industrial de pequena amplitude, sem contudo perderem a característica de escoarem correntes de elevada amplitude quando da ocorrência de sobretensões de manobra ou atmosférica.

De fato, a não linearidade dos resistores a óxido metálico é tão

pronunciada que os resistores que constituem o pára-raios podem atuar frente as solicitações normais de sistema e de sobretensões, atmosféricas ou não, como se fossem dotados de uma espécie de centelhador interno, ou seja, em outros termos, de um mecanismo interno de disparo, isto implica que, os pára-raios a óxido metálico podem, e geralmente o são, construídos sem centelhadores de espécie alguma. Este fato implica que o pára-raios a óxido metálico apresenta um comportamento ativo em relação ao sistema ao qual se encontra conectado, bem como, 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, limitado, em tese, pelo comportamento de seus centelhadores. E, deste modo, os pára-raios a óxido metálico, para sistemas de alta e extra alta tensão vem gradualmente substituindo os pára-raios equivalentes a carboneto de silício.

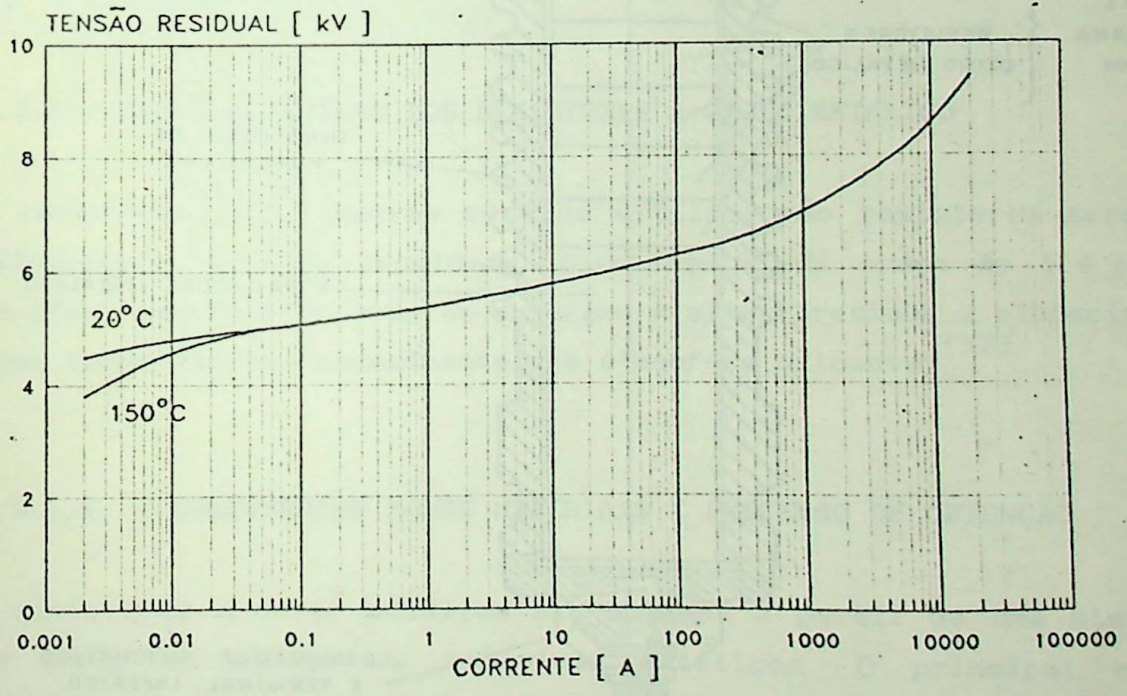


Figura II.3.1 - Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga de um Resistor a Óxido Metálico para Pára-raios de Distribuição[55]

Conforme mostra a Figura *II.3.2*, exceto pela ausência de centelhadores a

construção de um pára-raios a óxido metálico é extremamente similar a de um pára-raios de carboneto de silício. Haja vista, ainda, o fato dos resistores a óxido metálico apresentarem dimensões inferiores as apresentadas pelos correspondentes resistores a carboneto de silício é usual fazer-se uso de espaçadores metálicos, internos, de modo, a possibilitar a manutenção das distâncias externas de arco e de escoamento, determinadas pelos requisitos externos de isolamento.

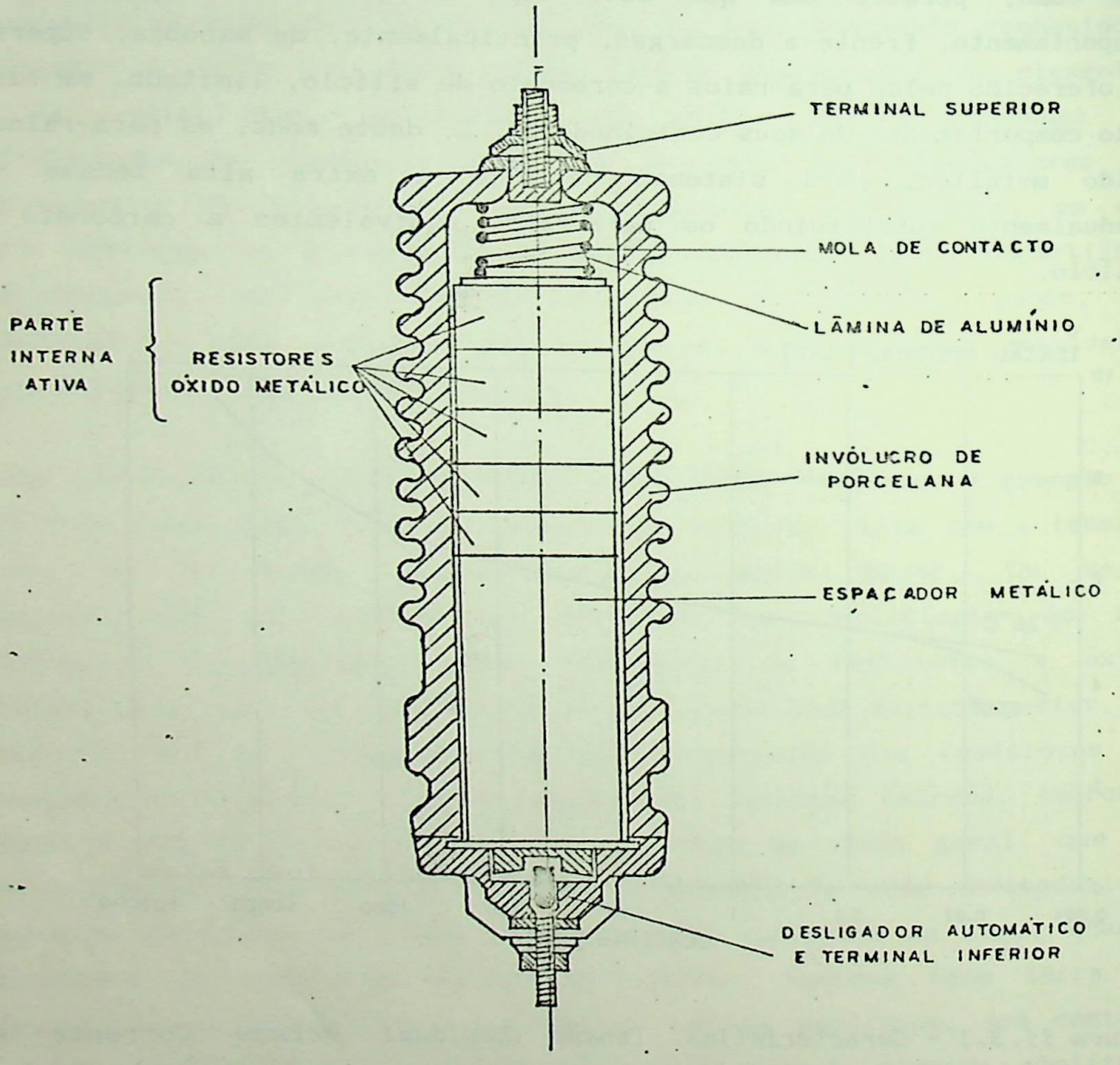


Figura II.3.2 - Vista em Corte de um Pára-raios para Sistemas de Distribuição (Permissão - 3M do Brasil Ltda.)

Os resistores a óxido metálico não são, em termos de proteção contra surtos, estruturas perfeitas pois, permitem o escoamento de uma pequena corrente de fuga, que ao circular pelos mesmos sob tensão em freqüência industrial resulta em perda de potência, que, devido ao mecanismo de condução de corrente, aumenta com a tensão aplicada e a temperatura de operação do pára-raios. De modo complementar, os primeiros projetos de resistores a óxido metálico, conhecidos como *"Resistores de 1ª Geração"*, ou seja, no momento, os produzidos com tecnologia local, apresentam uma forte tendência a aumentar a perda de potência com o tempo. [56]

Estes fatos, associados ainda a que aumentos de perda de potência resultam em aumentos de temperatura dos resistores a óxido metálico implicam que os pára-raios a óxido metálico, sem centelhadores série, são susceptíveis ao fenômeno de avalanche térmica, normalmente, conhecido como *"Thermal Runaway"*. Deste modo, o comportamento térmico destes pára-raios é um importante conceito de projeto e aplicação.

II.3.1 - CARACTERÍSTICAS DOS RESISTORES A ÓXIDO METÁLICO

Os resistores não lineares a óxido metálico são resistores cerâmicos, cilíndricos, de alta densidade, normalmente, da ordem de *5,4 g/cm*^{3} a *5,6 g/cm*^{3}, obtidos através da moldagem a altas pressões e sinterização a altas temperaturas, normalmente sob atmosfera oxidante. [57]

II.3.1.1. - COMENTÁRIOS SOBRE MATERIAIS E PROCESSO DE OBTENÇÃO

Os resistores a óxido metálico são obtidos a partir de uma mistura de uma série de óxidos de materiais metálicos. O principal elemento constituinte desta mistura é o óxido de zinco, na proporção, em peso, de *90 %* a *97 %*, podendo ser atribuído a este motivo, o fato dos *"Resistores a Óxido Metálico"* usualmente serem denominados *"Resistores não Lineares a Óxido de Zinco"*. Os restantes *10 %* a *3 %* da mistura, são constituídos por óxidos de outros metais, tais como, bismuto, antimônio, manganês, cobalto, cromo e alumínio, em pequena proporção percentual, a exemplo do

bismuto e do manganês, ou mesmo traços, em partes por milhão, a exemplo do alumínio. Estes óxidos são encontrados na forma de pó, com granulometria uniforme, porém, em alguns casos, não adequada ao processamento direto, fato que implica, principalmente, com respeito ao óxido de zinco, na necessidade de um tratamento térmico prévio para controle do crescimento dos grãos. [58-60]

Os óxidos de bismuto e antimônio são os elementos mais importantes desta mistura visto que, a fase líquida dos mesmos, durante o processo de sinterização é responsável pela formação das barreiras físicas e elétricas entre os grãos adjacentes de óxido de zinco, responsável pelas propriedades elétricas destes resistores.

O processo de manufatura dos resistores a óxido metálico é bastante elaborado, dotado de uma série de etapas que se inicia com o tratamento térmico de algumas de suas matérias primas. Após a adequação das matérias primas, processa-se uma pré-mistura, sinterizada em uma faixa de temperatura entre *700 °Celsius* e *900 °Celsius*, para que ocorra uma primeira difusão dos óxidos dentro da matriz formada pelos grãos de óxido de zinco. A pré-mistura assim formada é complementada, sofrendo um processo de mistura, moagem, via úmida, secagem e adição de plastificantes, idealmente com o auxílio de um ciclone ou atomizador, *"spray dry system"*, que além de processar diretamente as duas últimas etapas, evita os resultados, indesejáveis, do fenômeno de decantação que se manifesta devido a diferença de densidade entre os óxidos que constituem a mistura. O pó, assim obtido, é prensado, na forma cilindrica, idealmente, com o auxílio da técnica de dupla ação, por exemplo, utilizando-se uma prensa, equipada com mesa flutuante, a pressões da ordem de *3.5 kgf/cm*^{2} a *21.0 kgf/cm*^{2}. Após esta etapa, os resistores são sinterizados em um forno, idealmente, túnel, dotado de um perfil de temperatura precisamente controlado, por um período de *1 hora* a *2 horas*, a uma temperatura entre *1150 °Celsius* a *1250 °Celsius*, etapa na qual se desenvolve o processo de formação das camadas intergranulares, ao redor dos grãos de óxido de zinco. É interessante ressaltar que, a exemplo dos resistores a carboneto de silício, a uniformidade da microestrutura, desempenha um papel extremamente

importante no comportamento global dos resistores a óxido metálico frente as solicitações em freqüência industrial e de descargas de corrente, quer de manobra quer atmosférica.

A superfície lateral dos resistores a óxido metálico é revestida por um colar isolante com o objetivo principal de criar uma barreira que evite a migração de oxigênio, responsável pela aceleração do envelhecimento, bem como, prevenir a ocorrência de descargas laterais, oriundas de correntes de amplitude elevada. Já as superfícies planas são usinadas, geralmente, com o auxílio de uma politriz e, de modo, a assegurar uma boa distribuição de corrente, recebem um eletrodo metálico com espessura inferior a *0.1 mm*, geralmente em alumínio, projetado com o auxílio de um sistema para metalização a arco elétrico ou a plasma.

Finalmente, os resistores a óxido metálico acabados, via de regra, sofrem um novo tratamento térmico de modo a prover pequenas modificações em suas características, objetivando, principalmente, estabilizá-las.

II.3.1.2 - MECANISMO DE CONDUÇÃO DOS RESISTORES A ÓXIDO METÁLICO

A característica, tensão versus corrente de um resistor a óxido metálico é, basicamente, determinada pelo comportamento a nível eletrônico das regiões de contorno, ou seja, de fronteira entre os grãos de óxido de zinco, dotados de característica semi-condutora *Tipo N*, e a camada intergranular rica em bismuto e antimônio, que os envolve, dotada de característica semi-condutora *Tipo P*, conforme mostra a Figura *II.3.3*.

Como resultado, deste arranjo, as junções óxido de zinco - camada intergranular apresentam cargas fixas, constituindo-se em regiões de deplexão, fato que implica na formação, nos contornos dos grãos de óxido de zinco e na camada intergranular que os envolvem, de barreiras simétricas conhecidas como *"Barreiras de Schottky"*, em tese, responsáveis pelo comportamento não linear destas junções e, por conseguinte, dos resistores. Deste modo, é possível afirmar, simplificadamente, que cada conjunto *"camada intergranular - grão de*

óxido de zinco - camada intergranular", atua como um circuito ceifador, com tensão de corte em torno de *2.5 Volts* de crista.[57]

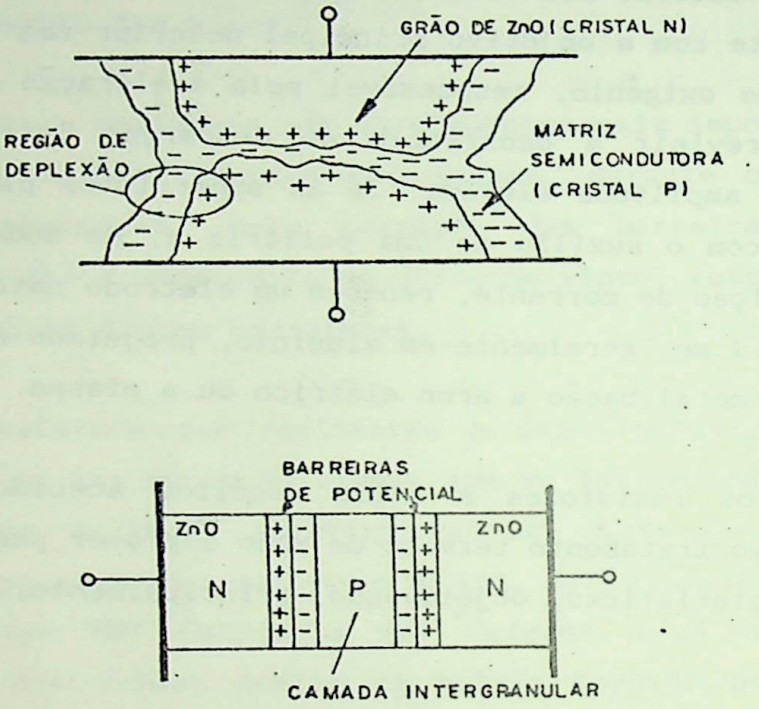


Figura II.3.3 - Corte Esquemático de um Conjunto Camada Intergranular, Grão de Óxido de Zinco, Camada Intergranular[64]

Supondo, conforme mostra a Figura *II.3.4*, que em termos macroscópicos, as características dos resistores a óxido metálico são definidas pela superposição das características microscópicas das junções "*camada intergranular - grãos de óxido de zinco*", que se encontram aos milhões, conectadas em série e em paralelo, ao considerar-se um tamanho médio para os grãos de óxido de zinco da ordem de *10 μm* a *20 μm*, obtém-se uma tensão nominal por milímetro de espessura destes resistores da ordem de *120 Volts* a *250 Volts* de crista.[57]

Estes fatos, resultam, simplificadamente, nas seguintes conclusões:

- A corrente no interior de um resistor a óxido metálico, circula

pelos caminhos que apresentam o menor número de junções. Caso a microestrutura for homogênea e o número de junções em série suficientemente grande, a corrente se distribui uniformemente por toda a seção transversal dos resistores; e

- Sob o ponto de vista microscópico, a perda de potência ocorre nas junções, pelas quais circula corrente, porém em termos macroscópicos, a perda de potência, somente é uniforme, caso a microestrutura e a densidade de corrente forem homogêneas.

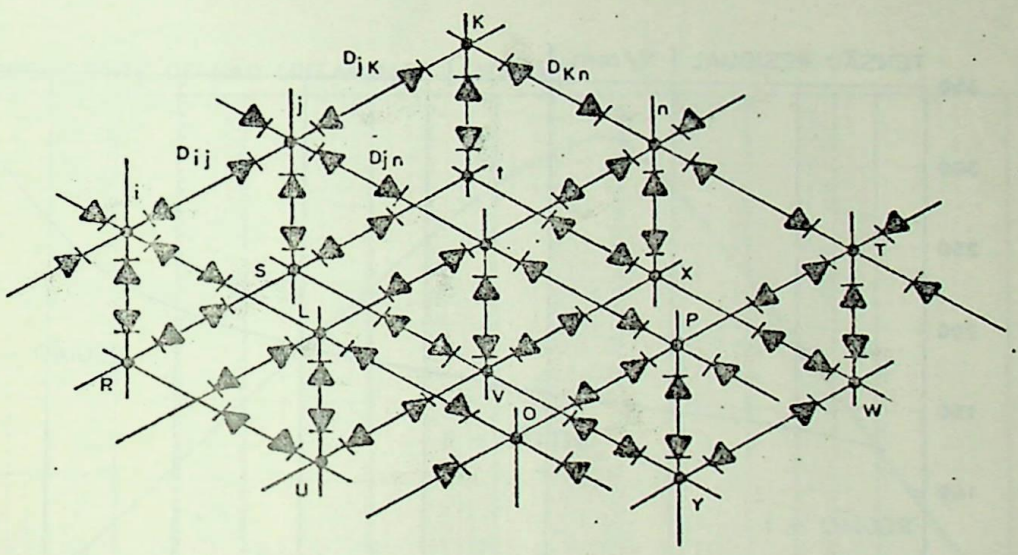


Figura II.3.4 - Corte e Circuito Elétrico Equivalente Esquemático Representativo de uma Região Microscópica de um Resistor a Óxido Metálico[64]

Segundo o modelo de *Schottky*, modificado para, levar em conta a possibilidade da concentração de carga interfacial, ser uma função da tensão aplicada, fato que reduz, à níveis confirmados por medidas em laboratório, a dependência da corrente com a temperatura, a aplicação a um resistor a óxido metálico de um campo elétrico externo, via, por exemplo, uma fonte de tensão, primeiramente, desloca a região de

deplexão com respeito à interface tornando-a assimétrica e, subseqüentemente, reduz a altura das barreiras de potencial, não tão rapidamente como se verificaria com o modelo tradicional de *Schottky*, que assume uma concentração de carga interfacial constante, sendo pois, responsável pelo comportamento não linear observado.[57]

A característica, tensão versus corrente de um resistor a óxido metálico conforme mostra a Figura *II.3.5-1*, apresenta 3 regiões distintas, uma região linear para baixas densidades de corrente, *"Região - I"*, uma região de transição, altamente não linear, *"Região - II"*, e uma região linear para altas densidades de corrente, *"Região - III"*.[57]

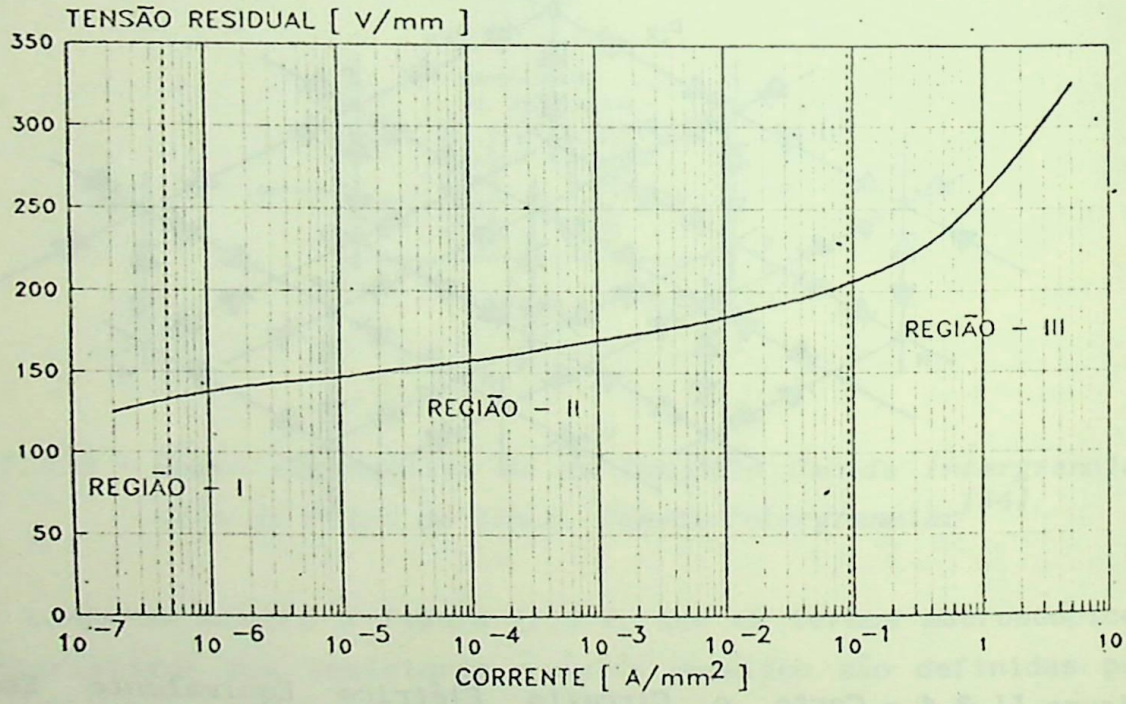


Figura II.3.5-1 - Regiões Condutoras da Característica Tensão versus Corrente de um Resistor a Óxido Metálico[65]

Este comportamento pode ser, simplificadamente, explicado pelo mecanismo de *Schottky*. Deste modo, na região de baixa densidade de corrente, ou seja, *"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 assim, o resistor a óxido metálico

apresenta o desempenho típico de um resistor, linear, de alto valor. Na região de média densidade de corrente, ou seja, *"Região - II"*, o aumento da tensão aplicada, e por conseguinte, do campo elétrico impõe, conforme descrito, uma redução à altura das barreiras de potencial, e deste modo, o resistor a óxido metálico passa a apresentar um desempenho, altamente, não linear, conforme mostra a Figura *II.3.5-2*. Existe, no entanto, um limite para a redução da altura das barreiras de potencial, e a partir deste limite o resistor a óxido metálico volta a apresentar o desempenho de um resistor, linear, de baixo valor, controlado pelo comportamento, obviamente, linear, dos cristais de óxido de zinco, neste caso, o resistor passa a trabalhar na região de alta densidade de corrente, ou seja, *"Região - III"*.[57]

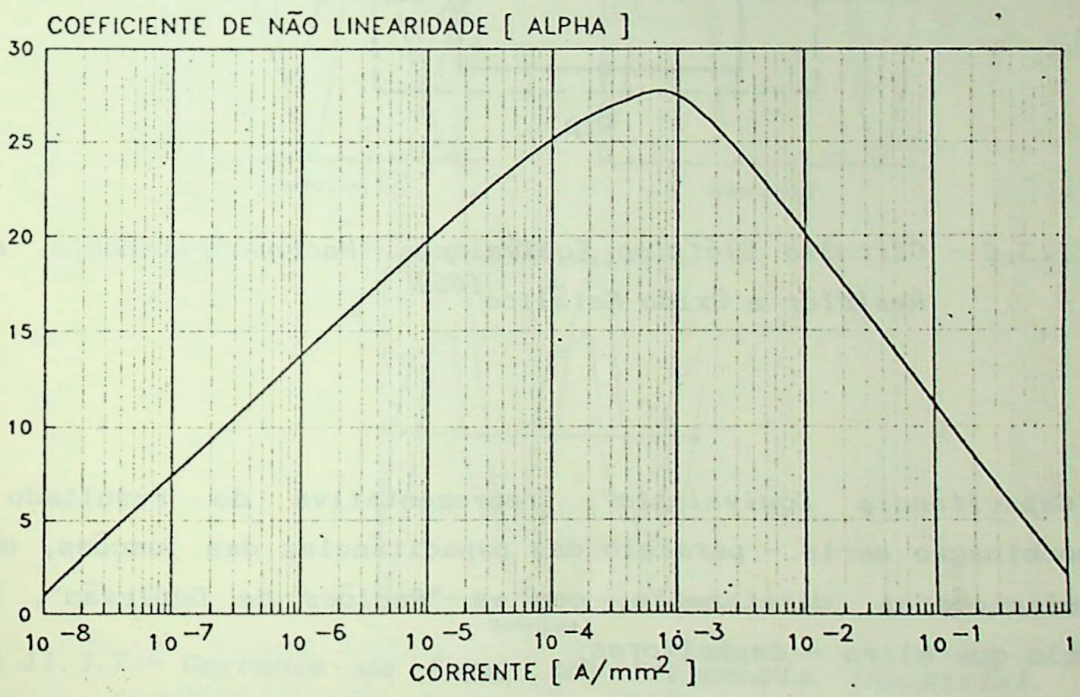


Figura II.3.5-2 - Coeficiente de não Linearidade versus Corrente de um Resistor a Óxido Metálico[65]

II.3.1.3 - CORRENTE DE FUGA E PERDA DE POTÊNCIA

O conjunto de circuitos ceifadores, utilizados na representação do comportamento microscópico das junções grãos de óxido de zinco - camada

intergranular, mostrados na Figura *II.3.4* e na Figura *II.3.5*, pode, macroscópicamente, ser substituído pelo circuito elétrico mostrado na Figura *II.3.6*.

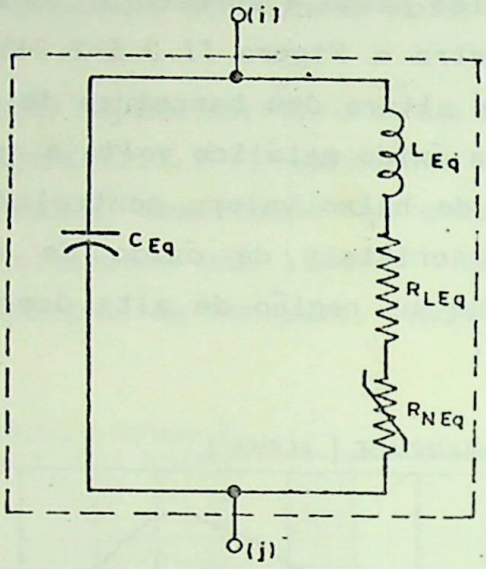


Figura II.3.6 - Circuito Elétrico Equivalente, Macroscópicamente, a um Resistor a Óxido Metálico[65]

onde:

$C_{Eq.}$ → *"Capacitância Equivalente"*, representativa do resultado da combinação série - paralelo das capacitâncias das junções, estas relacionadas, diretamente, com as *"Regiões de Deplexão"*, nada mais que micro - capacitores;

$R_{LEq.}$ → *"Resistência Linear Equivalente"*, representativa do comportamento linear apresentado pelos grãos de óxido de zinco e, em última análise, responsável pelo *"Up Turn"* da característica tensão versus corrente para grandes densidades de corrente, ou seja, *"Região - III"*;

$R_{NEq.}$ → *"Resistência Não Linear Equivalente"*, representativa do comportamento não linear oferecido pelas barreiras de potencial devido ao *"Efeito Schottky"*; e

$L_{Eq.}$ → *"Indutância Parasita"*, normalmente da ordem de *10 nH* a *20 nH*, portanto, perfeitamente, despresável frente a solicitações em freqüência industrial.

Devido ao elevado valor da resistência oferecida 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, virtualmente, de fuga, predominantemente capacitiva, ou seja, adiantada da tensão, conforme mostra a Figura *II.3.7.*

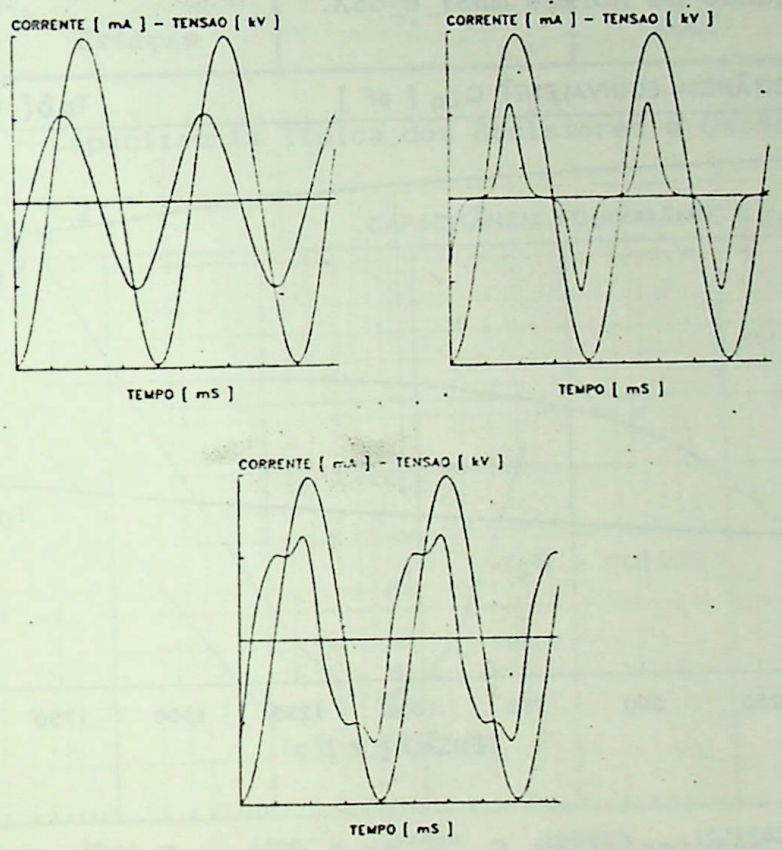


Figura II.3.7 - Corrente de Fuga, sob Freqüência Industrial, de um Resistor a Óxido Metálico[6]

a- Corrente Total sob Tensão de Operação Contínua - COV

b- Componente Resistiva de (a-)

c- Corrente Total sob 1.50 x COV

A Figura *II.3.7*, mostra que a componente resistiva da corrente não é senoidal, devido, obviamente a característica não linear destes resistores, bem como, o fato de que para níveis de tensão mais elevados a não linearidade se torna, a exemplo da Figura *II.3.5*, dentro de

limites, mais pronunciada. Estes fatos implicam, via de regra, 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-se para tanto obter o valor de corrente para o instante de tempo no qual a tensão é igual a zero.

A Tabela *II.19* mostra valores médios típicos de capacitância equivalente $C_{Eq.}$ dos resistores a óxido metálico, para as diversas classes de pára-raios, segundo as Normas *ANSI* e *CSA*.

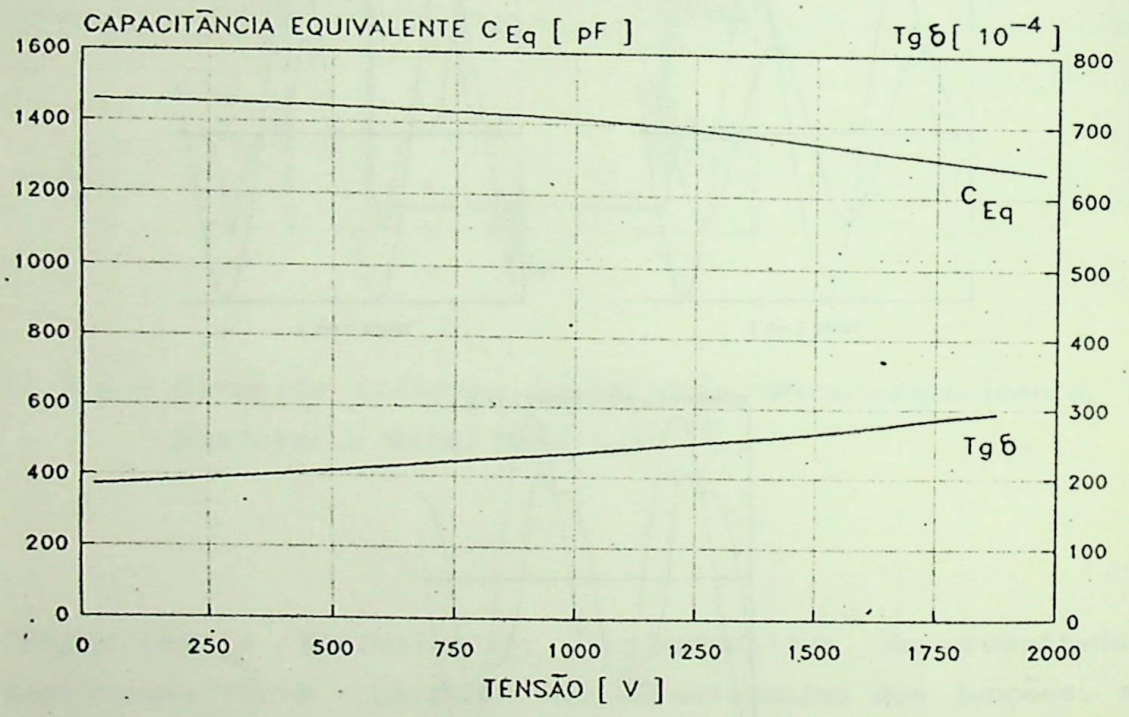


Figura II.3.8 - Característica $C_{Eq.}$, tg δ versus Tensão Aplicada de um Resistor a Óxido Metálico para Pára-raios Estação, Medida a 50 Hz[66]

A capacitância equivalente $C_{Eq.}$, bem como, a resistência não linear equivalente $R_{NEq.}$, que pode ser representada, por exemplo, pela *tg* δ, de um resistor a óxido metálico, devido a natureza dos fenômenos envolvidos no processo de condução não são fixas, mas sim, funções da tensão aplicada, da freqüência desta tensão e da temperatura ambiente, conforme mostram as Figuras *II.3.8* a *II.3.10*, respectivamente.

Classe do Pára-raios	Sub-Classe do Pára-raios	Capacitância [pF]
Distribuição	Normal	400
	Serviço Pesado	700
Intermediária	-.-	1200
Estação	-.-	2000

Tabela *II.19* - Capacitância Típica dos Resistores a Óxido Metálico

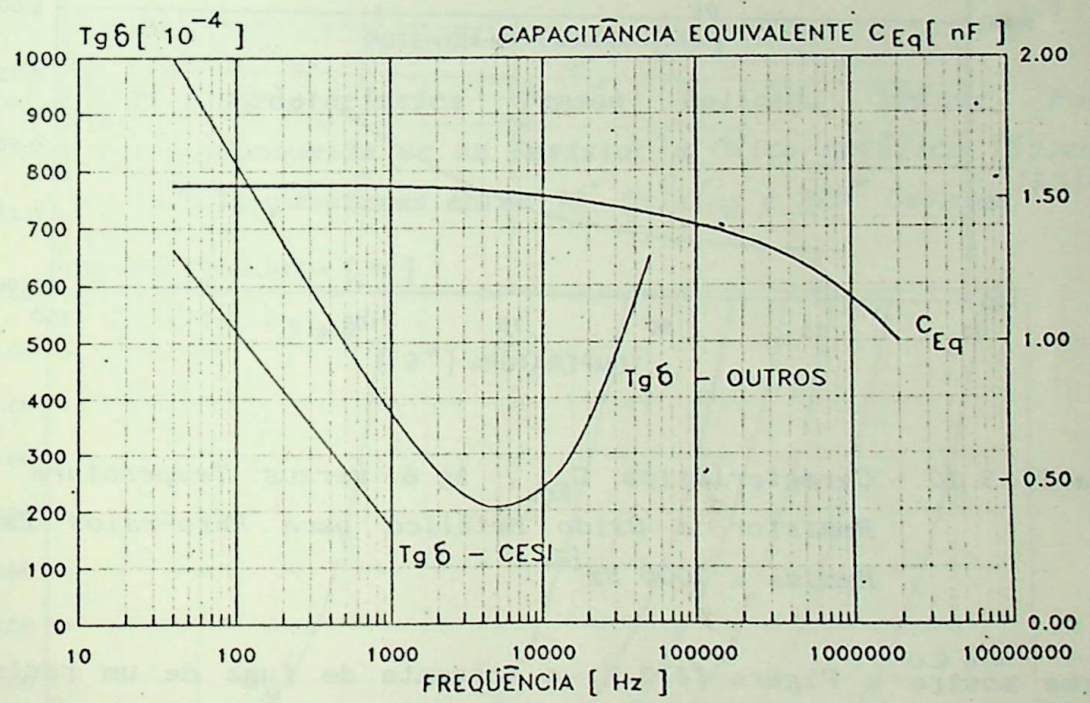


Figura II.3.9 - Característica $C_{Eq.}$, tg δ versus Freqüência de um Resistor a Óxido Metálico para Pára-raios Estação [66]

As variações na capacitância equivalente $C_{Eq.}$ e na *tg* δ, mostradas nas Figuras *II.3.8* a *II.3.10*, são facilmente explicáveis pelo modelo de *Schottky*, bastando para tanto contemplar que as modificações de tensão, freqüência e temperatura resultam em modificações na estrutura fisíca das barreiras de potencial. Destas influências a da temperatura, talvez seja a de mais fácil conceituação pois, conforme discorre a teoria

básica de semi - condutores, a elevação de temperatura causa o aumento no número de portadores de carga intrínsecos através da formação de pares *"elétron - lacuna"*, que modificam o número de cargas livres e por conseguinte, o valor da resistência não linear equivalente $R_{NEq.}$, bem como, da capacitância equivalente $C_{Eq.}$, através de modificações impostas a *"Região de Deplexão"* e, por conseguinte, a *tg δ*.

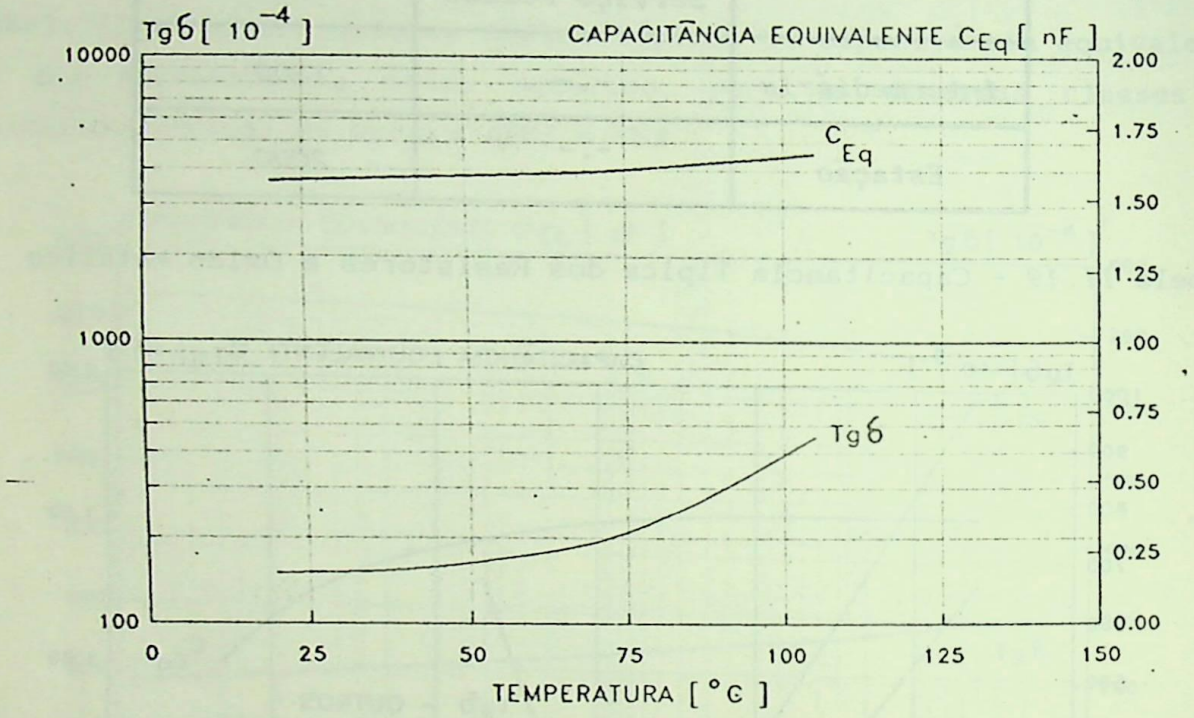


Figura II.3.10 - Característica $C_{Eq.}$, tg δ versus Temperatura de um Resistor a Óxido Metálico para Pára-raios Estação, Medida a 1000 Hz[66]

Conforme mostra a Figura *II.3.7*, a corrente de fuga de um resistor a óxido metálico pode ser decomposta em uma componente capacitiva e uma componenente resistiva, esta última, responsável pelo consumo de potência. Como a componente resistiva da corrente de fuga apresenta grandes variações com a tensão aplicada, isto implica que não existe uma relação constante entre tensão, corrente e potência consumida tal como existe para um resistor linear. Consequentemente, a característica que reflete o consumo de potência de um resistor a óxido metálico acaba por ser melhor definida através de um conjunto de curvas obtidas sob condições de freqüência industrial, conforme mostra a Figura *II.3.11*.

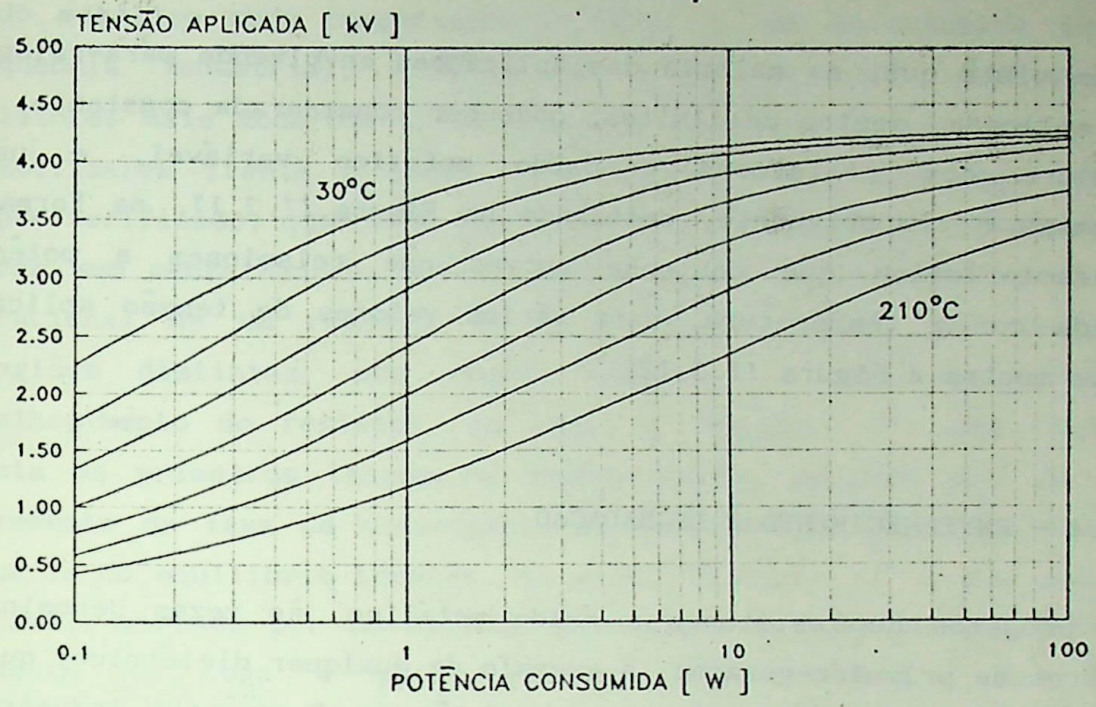


Figura II.3.11 - Característica Tensão Aplicada versus Potência Consumida de um Resistor a Óxido Metálico Típico para Temperaturas entre 30° Celsius e 220° Celsius[65]

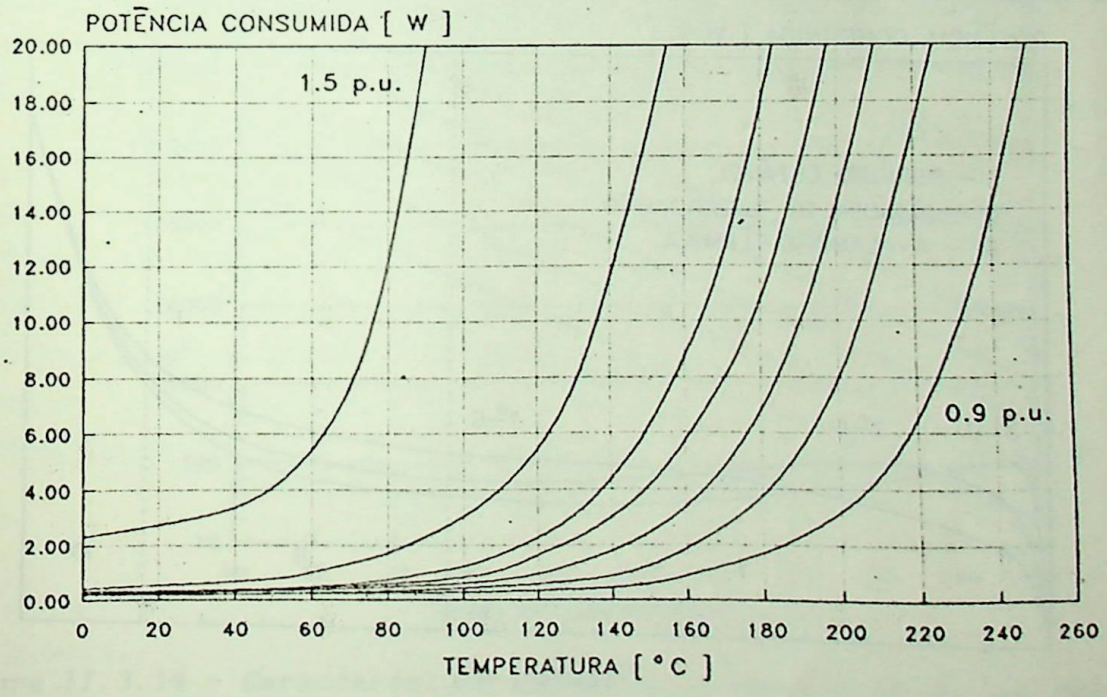


Figura II.3.12 - Característica Potencia Consumida versus Temperatura de um Resistor a Óxido Metálico Típico para uma Faixa de Tensão Aplicada entre 0.90 e 1.50 da Tensão de Operação[6]

Tendo em vista que, na maioria das aplicações envolvendo pára-raios, a tensão aplicada, dentro de limites, pode ser considerada constante, e a temperatura dos resistores a óxido metálico variável, é usual representar o comportamento, detalhado na Figura *II.3.11*, na forma de uma característica que contenha curvas que relacionem a potência consumida com a temperatura, para vários valores de tensão aplicada, conforme mostra a Figura *II.3.12*.

II.3.1.4 - ENVELHECIMENTO E DEGRADAÇÃO

Vários projetos de resistores a óxido metálico, às vezes denominados resistores de primeira geração, a exemplo de qualquer dielétrico, quando submetidos a sua tensão normal de operação em freqüência industrial, apresentam consumo de potência, intimamente relacionado com a componente resistiva da corrente de fuga, crescente, ao longo do tempo, fato este, característico de um processo de envelhecimento. [56-67→70]

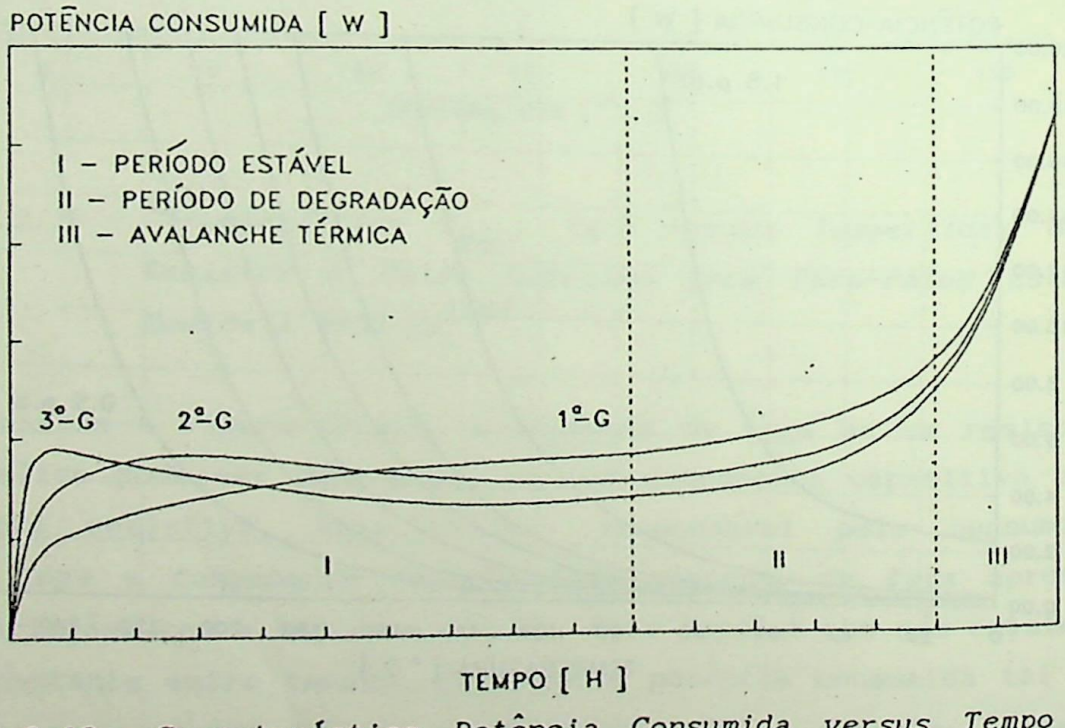


Figura II.3.13 - Característica Potência Consumida versus Tempo para Resistores a Óxido Metálico de Primeira, Segunda e Terceira Geração[56]

A rigor, existe, até o presente momento, 3 gerações de resistores a

óxido metálico cujo comportamento frente a uma determinada tensão em freqüência industrial, mostrado na Figura *II.3.13*, indica que os resistores mais modernos apresentam uma tendência intrínseca a se auto estabilizarem frente a estas solicitações, fato este que, deve ser sempre verificado, quando da aquisição de novos tipos de pára-raios, que operam sem centelhadores série. Ainda segundo a Figura *II.3.13* a vida operacional de um resistor a óxido metálico pode ser dividida em 3 regiões distintas, uma região estável, na qual se processa o envelhecimento do resistor, ou seja, a *"Região - I"*, uma região que denota os primeiros traços de instabilidade, marcada por um ligeiro incremento na taxa de crescimento da corrente de fuga com manutenção precária do equilibrio térmico, ou seja, *"Região - II"* e por uma região instável, marcada por um elevado incremento na taxa de crescimento da corrente de fuga e perda do equilíbrio térmico, ou seja, a *"Região - III"* onde se verifica a ocorrência do fenômeno de *"Thermal Runnaway"*.

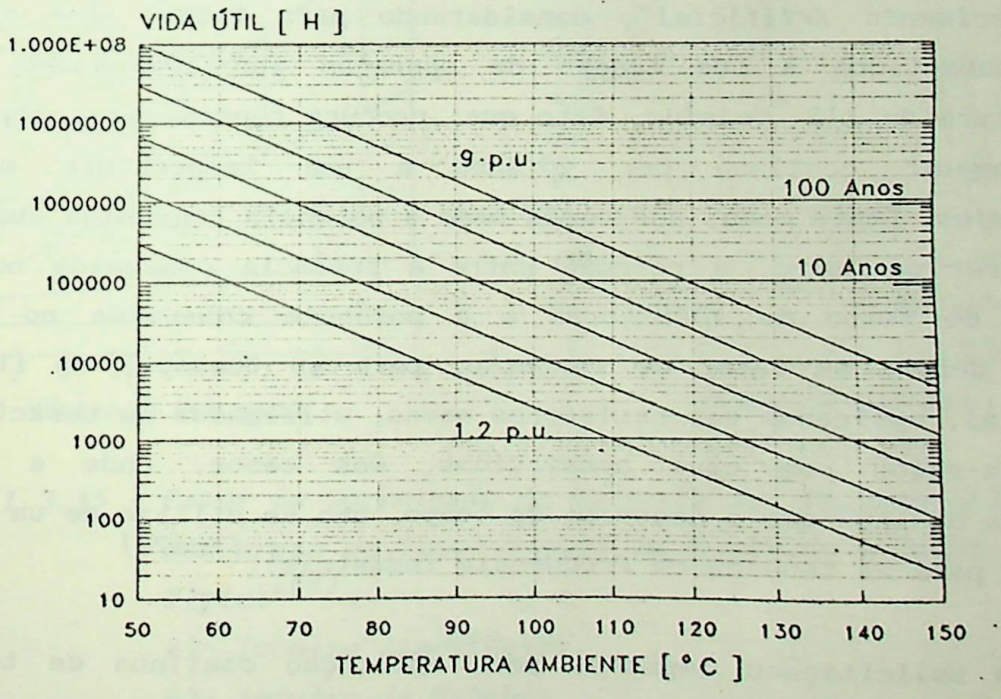


Figura II.3.14 - Característica Relativa a Vida Útil de um Resistor a Óxido Metálico de Primeira Geração Típico[63]

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 de Arrhenius - Dakin"*, ou seja, na idéia de *"Vida Útil"*. Deste modo, idealmente, conforme mostra a Figura *II.3.14*, deve ser levantada, para várias temperaturas, e, com os resistores submetidos a várias tensões aplicadas qual o tempo necessário para que, por exemplo, o consumo de potência seja duas vezes superior ao inicial. Convém ressaltar que, o parâmetro, que determina o fim da 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, fato que implica, que o conceito de dobrar o consumo de potência é meramente orientativo. *[63-74]*

Tendo em mente as várias alternativas possíveis, de modo a dirimir quaisquer dúvidas a respeito do desempenho ao longo do tempo dos pára-raios sem centelhadores série, os projetos de Norma, segundo *IEC - ABNT* e *ANSI - CSA*, propõem uma verificação no mecanismo de envelhecimento dos resistores a óxido metálico, ou seja, um *"Envelhecimento Artificial"*, considerando para tanto, que os mesmos sejam submetidos a sua tensão de operação por *1000 horas* sob uma temperatura de *115 °Celsius*, fato que, procura reproduzir a hipótese de funcionamento contínuo por *40 anos* a uma temperatura média de *40 °Celsius*. Deste modo, nos casos onde a potência consumida aumenta com o decorrer do tempo, a relação entre a potência consumida no fim do período de tempo de *1000 horas* e a potência consumida no instante inicial define um fator de correção, para as tensões, em freqüência industrial, aplicadas aos resistores novos, utilizados na caracterização dos pára-raios com eles construídos. Nos casos, onde a potência consumida diminue com o decorrer do tempo, não se utiliza de um fator de correção para as tensões em freqüência industrial. *[72→74]*

Além das solicitações impostas pela aplicação contínua de tensão em freqüência industrial, os resistores a óxido metálico utilizados em pára-raios sem centelhadores série, se encontram submetidos a esforços, e por conseguinte, envelhecimento oriundos das descargas aleatórias de surtos de corrente de origem atmosférica e de manobra.

O envelhecimento dos resistores a óxido metálico, frente a descargas de

surtos de corrente, conforme mostra a Figura *II.3.15*, é, basicamente, dependente dos seguintes fatores.[67]

- Forma do impulso;
- Densidade de corrente através do resistor;
- Temperatura do resistor;
- Polaridade dos surtos; e
- Número de descargas.

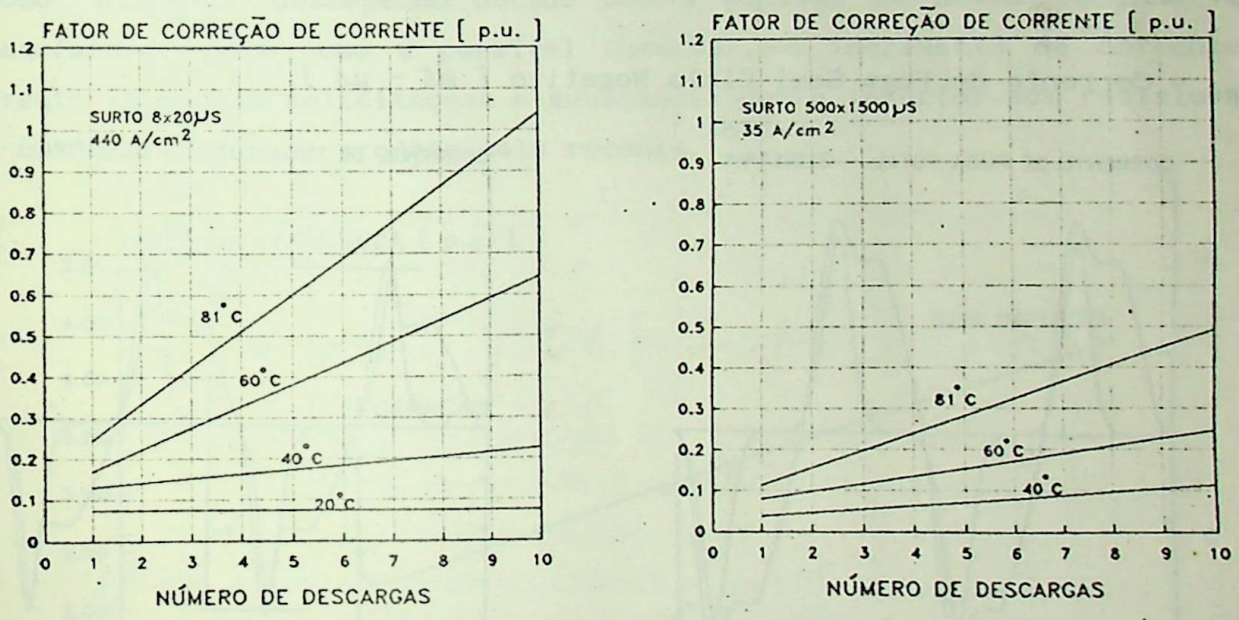


Figura II.3.15 - Fator de Correlação da Corrente de Fuga com o Número de Descargas de Impulso para um Resistor a Óxido Metálico Típico[67]

a)- Impulso Atmosférico;

b)- Impulso de Manobra.

Segundo a Figura *II.3.15*, quanto maior for a densidade de corrente imposta aos resistores a óxido metálico, fato, compatível com impulsos de origem atmosférica, maior é o incremento na corrente de fuga. Impulsos atmosféricos de grande amplitude, podem resultar em mudanças

nas barreiras de potencial, de magnitude tal, que os resistores passem a apresentar uma direção preferencial de condução, ou seja, *"polarização"*, conforme mostra a Figura *II.3.16.* No caso de polarização é usual calcular-se a corrente de fuga através dos resistores a óxido metálico conforme a seguir:

$$I_F = \frac{I_{F+} + I_{F-}}{2} \qquad (II.3.1.4.1)$$

onde:

I_F = Corrente de Fuga Efetiva [mA - μA];

I_{F+} = Corrente de Fuga Semi-Ciclo Positivo [mA - μA]; e

I_{F-} = Corrente de Fuga Semi Ciclo Negativo [mA - μA].

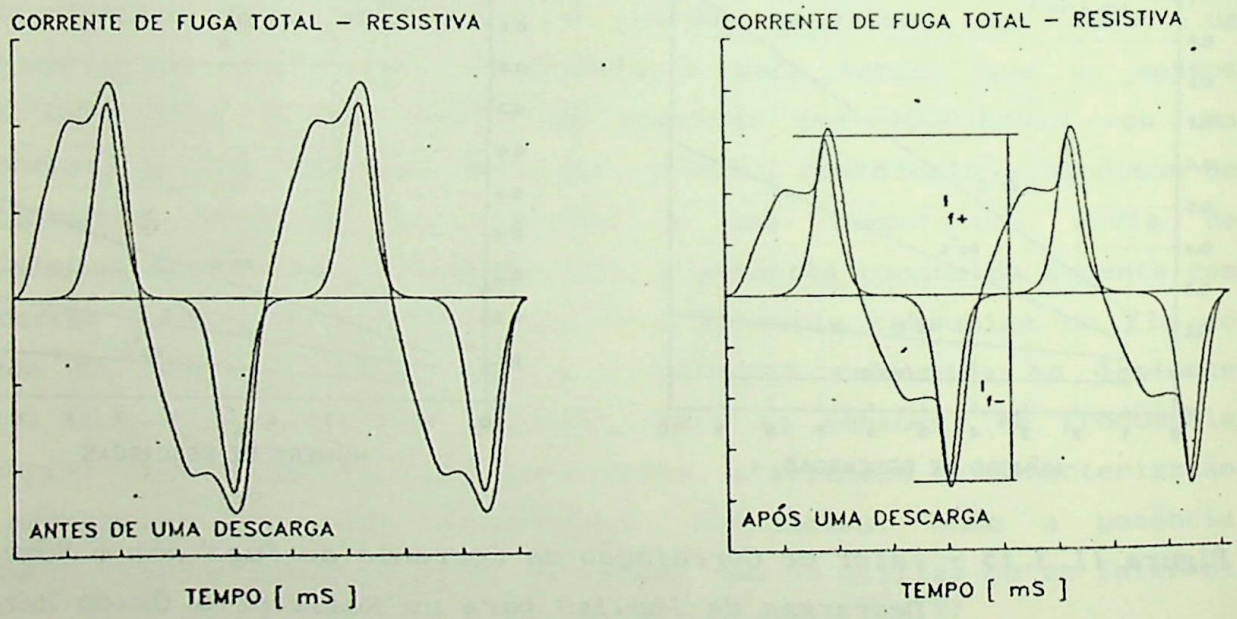


Figura II.3.16 - Efeito da Polarização da Corrente de Fuga em um Resistor a Óxido Metálico Típico[64]

O fenômeno da polarização pode ser temporário ou permanente, bem como, apresentar maior ou menor relevância, no entanto, os projetos de Norma para 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 da aplicação de tensão de operação, em freqüência industrial, durante ou imediatamente após, a descarga dos impulsos, deste modo, caso ocorram mudanças nas características dos resistores devido a polarização, mesmo em carácter temporário, as mesmas sejam, de pronto, 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, por conseguinte, do consumo de potência. A Figura *II.3.17* mostra o efeito da descarga de um impulso de corrente em resistores de primeira e segunda geração, bem como, o melhor desempenho obtido com o auxílio de novas técnicas de manufatura, pois como é possível observar, o incremento de corrente, frente as mesmas solicitações é substancialmente inferior nos resistores a óxido metálico de projeto mais recente. [67]

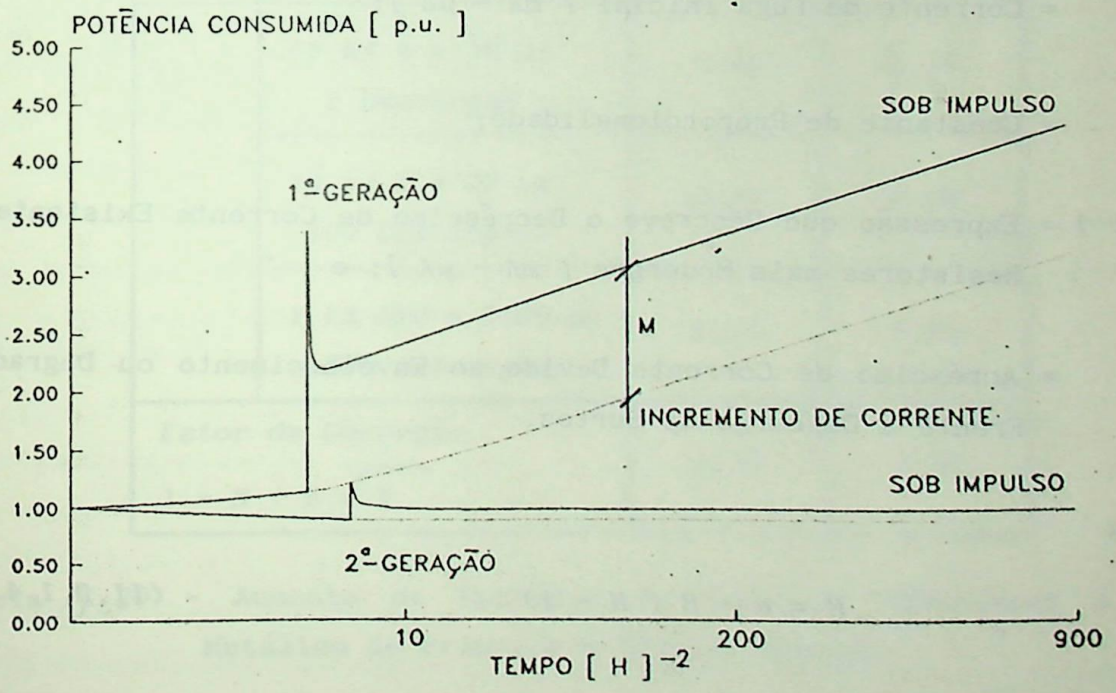


Figura II.3.17 - Efeito da Descarga de um Impulso de Corrente na Corrente de Fuga de Resistores a Óxido Metálico de Primeira e de Segunda Geração [67]

De modo geral, a evolução da corrente de fuga de um resistor a óxido metálico utilizado na construção de pára-raios sem centelhadores, ou seja, seu envelhecimento, pode ser dividida na evolução da corrente de fuga devido a aplicação, contínua, de tensão em freqüência industrial e na evolução de corrente de fuga devido as descargas de surtos, quer atmosféricos, em tese, os mais importantes, quer de manobra.

Em termos matemáticos, a evolução da corrente de fuga de um resistor a óxido metálico é fornecida pela seguinte expressão:[67]

$$I_F(t) = I_{F_0}\left(1 + H\sqrt{t}\right) + I_a(t) + M\,I_{F_0} \qquad (II.3.1.4.2)$$

onde:

$I_F(t)$ = Corrente de Fuga para um Instante de Tempo (t) [$mA - \mu A$];

I_{F_0} = Corrente de Fuga Inicial [$mA - \mu A$];

H = Constante de Proporcionalidade;

$I_a(t)$ = Expressão que Descreve o Decréscimo de Corrente Existente nos Resistores mais Modernos [$mA - \mu A$]; e

M = Acréscimo de Corrente Devido ao Envelhecimento ou Degradação Frente a Descarga de Surtos.

sendo:

$$M = \alpha + \beta\,(N - 1) \qquad (II.3.1.4.3)$$

onde:

α = Acréscimo de Corrente Devido a Descarga do Primeiro Surto; e

β = Acréscimo de Corrente Devido a Descarga dos Surtos Subsequentes.

Normalmente; $\alpha > \beta$

Uma primeira avaliação, portanto, superficial, do envelhecimento de um resistor a óxido metálico pode ser obtida com o auxílio da expressão a seguir, retirada de *(II.3.1.4.2)*.

$$I_F(t) = I_{F_0} \left(1 + M + H\sqrt{t} \right) \qquad (II.3.1.4.4)$$

onde:

$$M = \alpha \text{ (Maior Surto)} + \sum_{i=1}^{k} \beta \text{ (Demais Surtos)}$$

A Tabela *II.20* mostra qual o aumento esperado para a corrente de fuga para resistores a óxido metálico de primeira e segunda geração 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*	*~ 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 *II.20* - Aumento de Corrente de Fuga em Resistores a Óxido Metálico de Primeira e Segunda Geração

Nota :-

** - O envelhecimento de um resistor a óxido metálico de segunda geração é muito pequeno para ser determinado experimentalmente.*

Comparando o envelhecimento total, previsto para as duas gerações de

resistores a óxido metálico, é possível retirar as seguintes conclusões:

- Os resistores de segunda geração e subsequentes são mais estáveis, em todos os níveis, que os de primeira geração; e

- Enquanto que a vida útil de um resistor de primeira geração é, praticamente, determinada pelo envelhecimento frente a solicitações em freqüência industrial, nos resistores de segunda geração e subsequentes ela é determinada pelo envelhecimento frente a solicitações oriundas de descargas de surtos.

II.3.2 - CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS E A ESTABILIDADE TÉRMICA DOS PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

Os resistores a óxido metálico utilizados em pára-raios sem centelhadores ou com centelhadores paralelo, usualmente denominados *"gap's shunt"*, ao contrário dos pára-raios com centelhadores série, são os elementos responsáveis pelo controle da corrente de fuga através do pára-raios e, deste modo, devido a natureza semi condutora destes resistores é necessário que exista equilíbrio entre o consumo e a dissipação de potência, este fato, implica na necessidade de se conhecer e determinar as características térmicas do sistema formado pelos resistores, invólucro e meio ambiente, fatores responsáveis pelo comportamento térmico dos pára-raios assim construídos. *[55-62-65-75→78]*

II.3.2.1 - ESTABILIDADE TÉRMICA

Durante a operação normal do sistema, ao qual se encontram conectados, os pára-raios a óxido metálico sofrem um processo de aquecimento devido a potência consumida sob freqüência industrial, bem como, devido a presença de radiação solar. Devido a característica semi-condutora dos resistores a óxido metálico, qualquer elevação na temperatura de operação dos pára-raios, resultam em uma elevação na corrente de fuga, e, por conseguinte, na potência consumida, fato que, a princípio,

resulta em um fenômeno cíclico, com tendência à instabilidade. Conforme mostra a Figura *II.3.18*, uma das mais importantes características relativas ao projeto de um pára-raios sem centelhadores ou com centelhadores paralelos pois, define suas regiões operativas, o consumo, bem como, a dissipação de potência, para uma tensão aplicada fixa, aumenta com a temperatura.

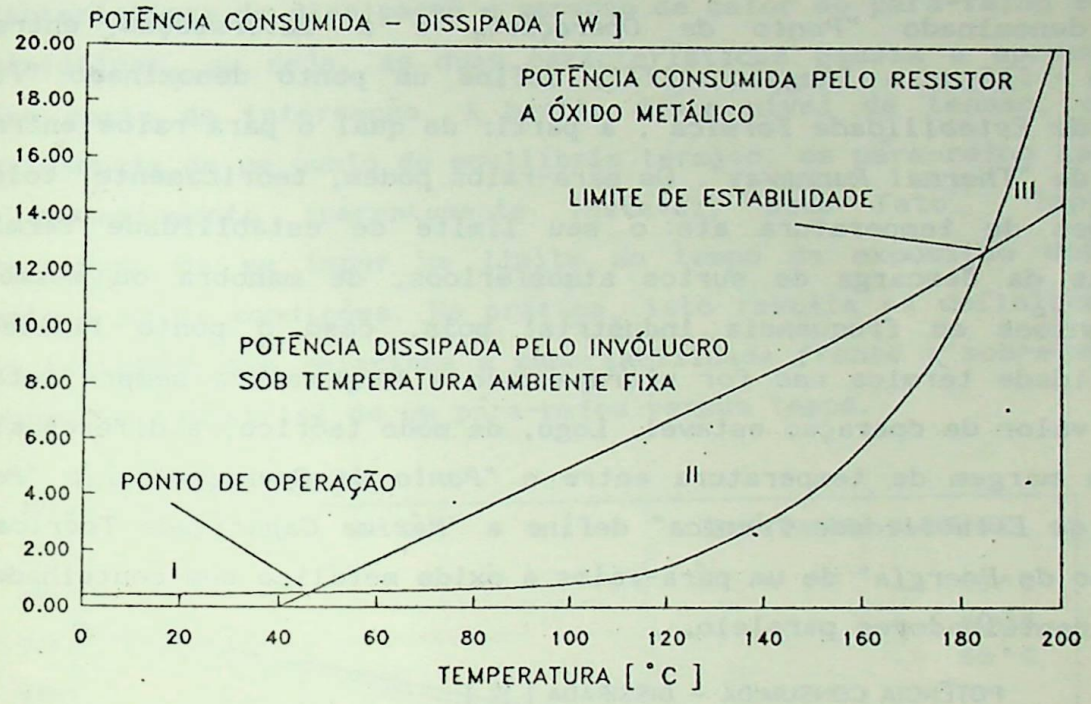


Figura II.3.18 - Características Potência Consumida por um Resistor a Óxido Metálico, Potência Dissipada por um Invólucro, Típicos, versus Temperatura[75]

Na Figura *II.3.18*, existem *3* regiões de operação distintas, delimitadas pelas duas interseções entre a característica potência consumida pelos resistores a óxido metálico, que define a capacidade de geração de calor do pára-raios, e a característica potência dissipada pelo invólucro, que, por sua vez, define a capacidade de dissipação de calor do pára-raios. Na *"Região - II"*, a capacidade de dissipação é superior a capacidade de geração de calor do pára-raios e, deste modo, o mesmo, apresenta uma tendência intrínseca a reduzir sua temperatura de operação e, consequentemente, retornar a um ponto de equilíbrio estável. Já na *"Região - III"* a capacidade de dissipação de calor é inferior a capacidade de geração de calor do pára-raios e, deste modo, o mesmo,

devido a natureza semi-condutora dos resistores a óxido metálico, apresenta uma tendência intrínseca a aumentar, rapidamente, sua temperatura de operação, fato que caracteriza um fenômeno denominado *"Thermal Runnaway"*.

Logo, a intersecção entre a *"Região - I"* e a *"Região - II"*, define um ponto denominado *"Ponto de Operação"*, e a intersecção entre a *"Região - II"* e a *"Região - III"*, define um ponto denominado *"Ponto Limite de Estabilidade Térmica"*, a partir do qual o pára-raios entra no regime de *"Thermal Runnaway"*. Os pára-raios podem, teoricamente, tolerar variações de temperatura até o seu limite de estabilidade térmica, oriundas da descarga de surtos atmosféricos, de manobra ou mesmo de sobretensões em freqüência industrial pois, caso o ponto limite de estabilidade térmica não for ultrapassado a temperatura sempre retorna para o valor de operação estável. Logo, de modo teórico, 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 centelhadores ou com centelhadores paralelo.

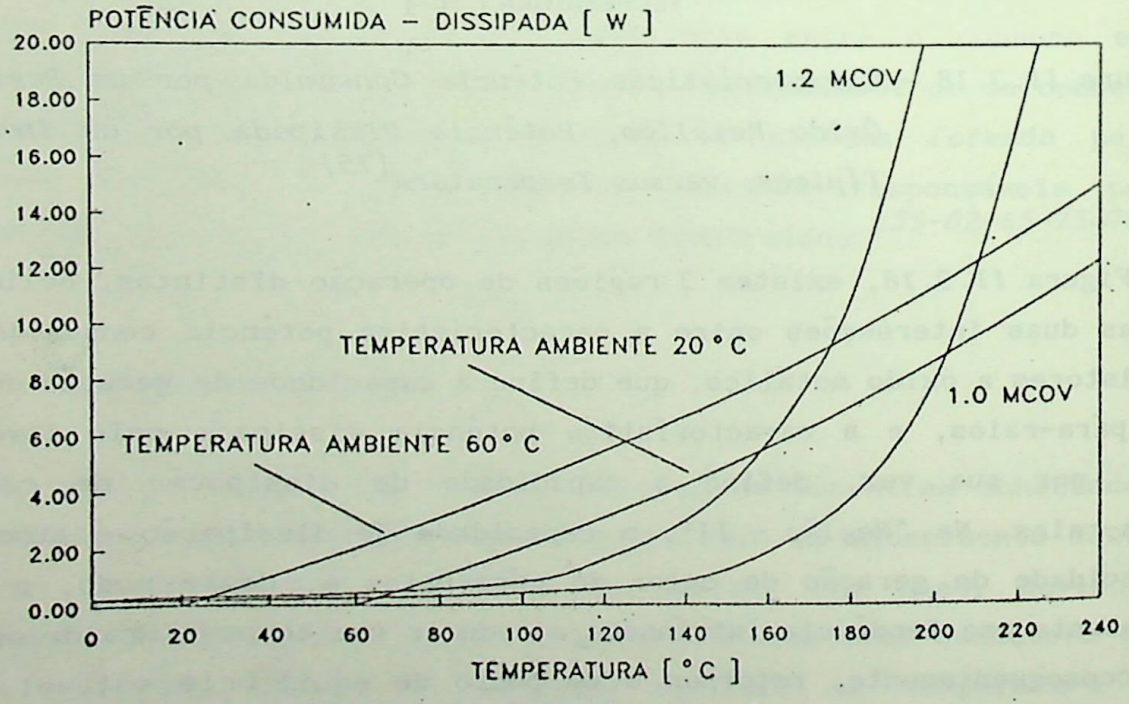


Figura II.3.19 - Efeito das Variações de Tensão e Temperatura na Característica Potência versus Temperatura de um Pára-raios a Óxido Metálico[65]

A Figura *II.3.19* mostra como o *"Ponto de Operação"* e o *"Ponto Limite de Estabilidade Térmica"* são afetados pelas variações da tensão aplicada ao pára-raios e a temperatura. O aumento na temperatura ambiente ou da tensão aplicada, reduz a margem de elevação de temperatura e, por conseguinte, a capacidade de absorção de energia do 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. A partir deste nível de tensão, devido a inexistência de um ponto de equilíbrio térmico, os pára-raios apresentam um comportamento inerentemente instável, este fato implica na necessidade de se impor um limite ao 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 freqüência industrial de um pára-raios versus tempo.

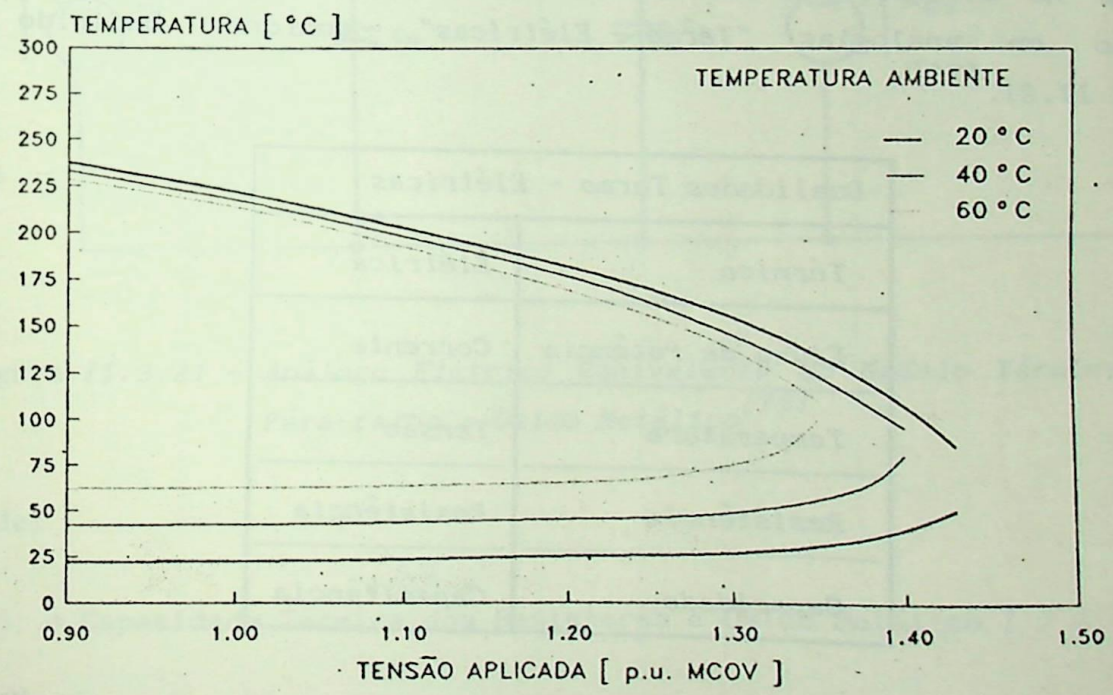


Figura II.3.20 - Dependência da Temperatura de Operação e Limite de Estabilidade com Tensão Aplicada e a Temperatura Ambiente[65]

A Figura *II.3.20*, 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"* com a tensão aplicada e a temperatura ambiente, onde é possível observar que, enquanto a *"Temperatura Limite de Estabilidade"* é, virtualmente, independente da temperatura ambiente, a *"Temperatura de Operação"* guarda uma certa proporcionalidade com a mesma.

II.3.2.2 - MODELO TÉRMICO DE UM PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

O comportamento, ou seja, modelo, térmico de um pára-raios a óxido metálico apresentado e discutido até o presente momento, por ser baseado em características estáticas, é adequado unicamente a condições de regime permanente. Logo, o estudo de condições dinâmicas, que envolvam transitórios de aquecimento, ou de resfriamento, de longa duração, implica na definição de um modelo bem mais elaborado, por exemplo, baseado em analogias *"Termo - Elétricas"*, conforme definido na Tabela *II.21*.[76]

Dualidades Termo - Elétricas	
Térmica	*Elétrica*
Fluxo de Potência	*Corrente*
Temperatura	*Tensão*
Resistência	*Resistência*
Capacidade	*Capacitância*

Tabela *II.21* - Dualidades Termo - Elétricas Utilizadas em um Modelo Térmico de um Pára-raios a Óxido Metálico.

Considerando as dualidades listadas na Tabela *II.21*, conforme mostra a Figura *II.3.21*, é possível construir um circuito elétrico equivalente ao modelo térmico de um pára-raios a óxido metálico, adequado para representar, simultaneamente, condições de operação, transitórias e de regime permanente. Em específico, com relação a representação de

condições de operação em regime permanente, é necessário atentar ao fato de que as temperaturas dos resistores e do invólucro do pára-raios se encontram em uma condição estável, deste modo, o efeito da componente capacitiva das correntes não necessita ser considerado, o que, resulta na redução do circuito a sua parte resistiva, que, em última análise, significa modelar as características mostradas na Figura *II.3.18* e na Figura *II.3.19*.

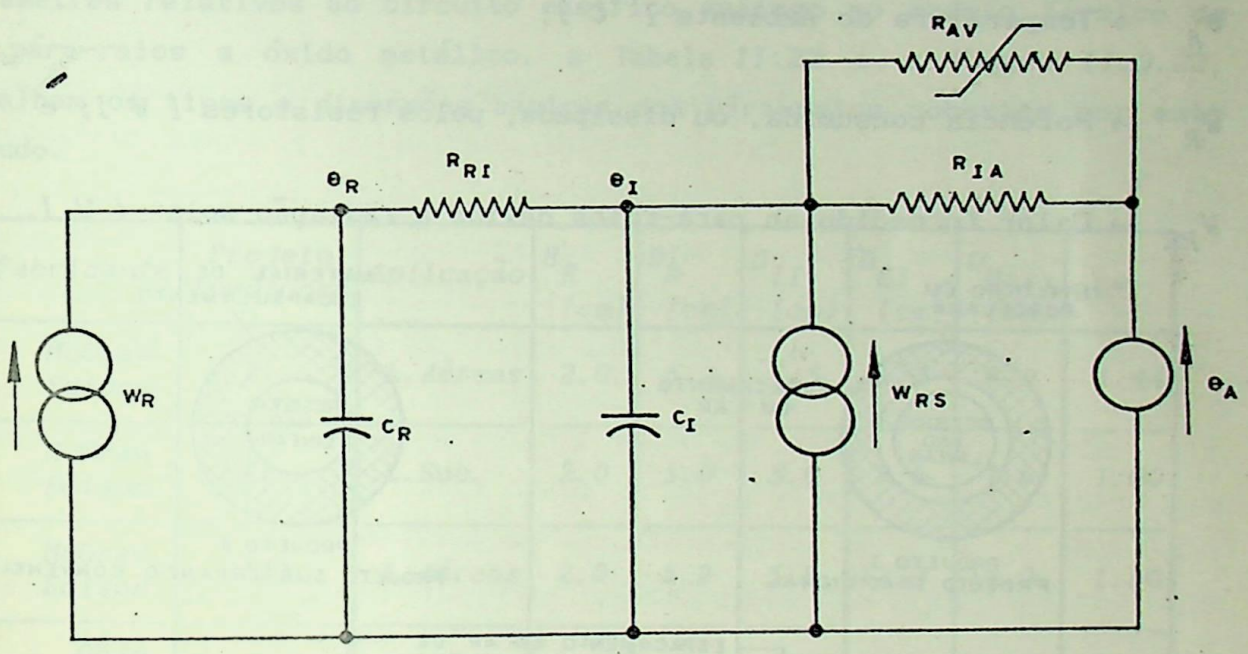


Figura II.3.21 - Análogo Elétrico Equivalente ao Modelo Térmico de um Pára-raios a Óxido Metálico[75]

onde:

C_R → Capacidade Térmica dos Resistores a Óxido Metálico [J / °C];

C_I → Capacidade Térmica do Invólucro do Pára-raios [J / °C];

R_{RI} → Resistência Térmica entre os Resistores a Óxido Metálico e a Superfície Externa do Invólucro [°C / W];

R_{IA} → Resistência Térmica entre a Superfície Externa do Invólucro e o Ambiente [°C / W];

R_{AV} → Resistência Térmica Adicional entre a Superfície Externa do Invólucro e o Ambiente, Devido a Existência de Vento [$^{\circ}C$ / W];

θ_R → Temperatura dos Resistores a Óxido Metálico [$^{\circ}C$];

θ_I → Temperatura da Superfície Externa do Invólucro [$^{\circ}C$];

θ_A → Temperatura do Ambiente [$^{\circ}C$];

W_R → Potência consumida, ou dissipada, pelos resistores [W]; e

W_{RS} → Calor fornecido ao pára-raios devido a radiação solar [W].

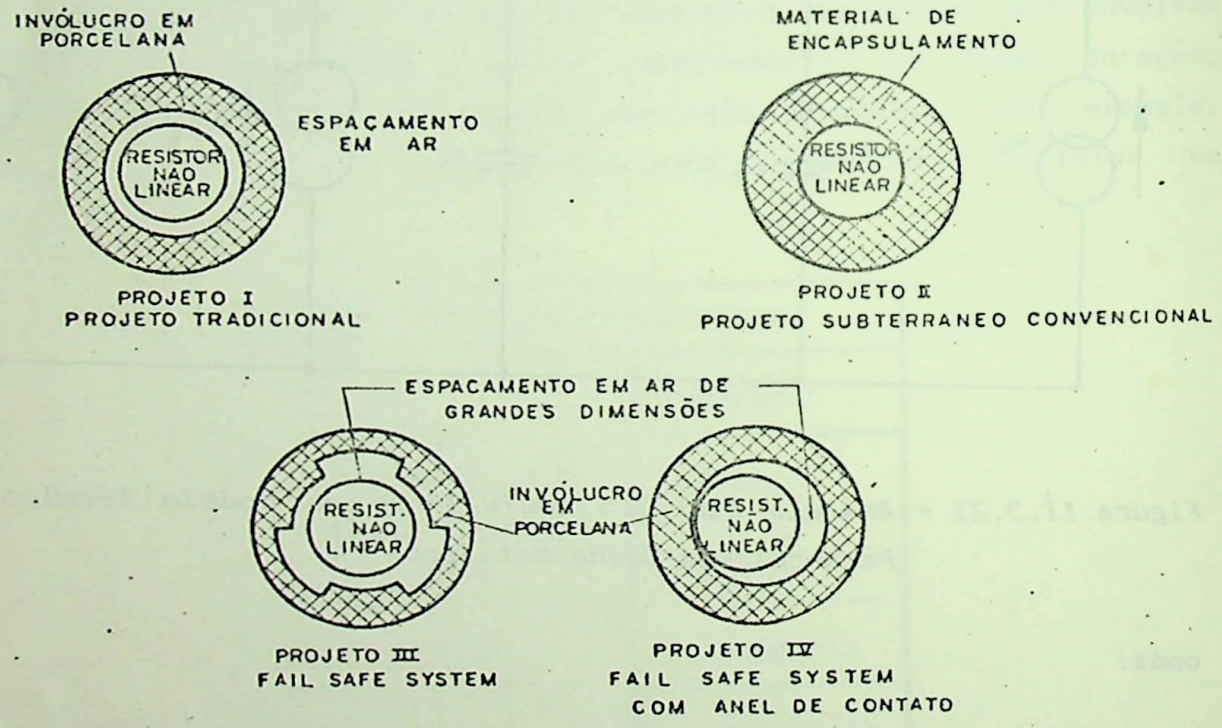


Figura II.3.22 - Projetos de Invólucros para Pára-raios a Óxido Metálico, Segundo Ontário Hydro[75]

Tendo em mente, que o projeto térmico se constitue em um dos pontos de maior relevância de qualquer projeto de pára-raios sem centelhadores ou com centelhadores paralelos, é algo mais ou menos óbvio que a maioria dos dados relativos a este projeto acabam por se constituir em um dos pontos de maior sigilo por parte dos fabricantes. Com respeito aos pára-raios produzidos no mercado nacional, esta ausência é ainda,

fortemente acentuada devido a razões oriundas dos problemas de propriedade industrial, Logo a maioria dos dados disponíveis se referem, basicamente, a estudos realizados no exterior, e dentre estes dados, com respeito a pára-raios classe distribuição, destacam-se os obtidos pela *Ontario Hydro*, que vem realizando, dentro do âmbito, dos pára-raios produzidos e comercializados no mercado norte-americano e canadense, uma série de exaustivos estudos, com o objetivo de determinar vários dos parâmetros relativos ao circuito elétrico análogo ao modelo térmico de um pára-raios a óxido metálico, a Tabela *II.22* e a Figura *II.3.22*, detalham os tipos e dimensões básicas dos pára-raios cobertos por este estudo.

Fabricante	Projeto Invólucro	Aplicação	H_R [cm]	D_R [cm]	D_{II} [cm]	D_{EI} [cm]	D_{Max} [cm]	φ
McGraw Edison	I	L.Aéreas	2.0	5.2	5.5	8.3	8.9	1.44
McGraw Edison	II	L.Sub.	2.0	5.0	5.0	7.6	7.6	1.00
McGraw Edison	III	L.Aéreas	2.0	5.2	5.8	12.3	14.0	1.80
Ohio Brass	I	L.Aéreas	2.3	5.3	5.4	8.1	8.9	1.61
General Electric	IV	L.Aéreas	2.3	6.1	8.0	12.0	13.0	1.45
RTE	II	L.Sub.	3.2	3.4	5.5	5.5	5.5	1.00
* Hitachi	I	L.Aéreas	.	.	.	.	.	.
* Delmar	I	L.Aéreas	.	.	.	.	.	.

Tabela *II.22* - Dados de Invólucros de Pára-raios.

Nota -

* - *Pára-raios a óxido metálico fabricados e comercializados no mercado nacional.*

onde:

H_R → Altura do Resistor a Óxido Metálico;

D_R → Diâmetro do Resistor a Óxido Metálico;

D_{II} → Diâmetro Interno Médio do Invólucro;

D_{EI} → Diâmetro Externo Médio do Invólucro;

D_{Max} → Diâmetro Máximo do Invólucro;

$$\varphi = \frac{\text{Comprimento do Contorno da Saia do Invólucro}}{\text{Distância Entre as Saias do Invólucro}}$$

A transferência de calor em um pára-raios a óxido metálico se processa por meio de radiação e condução e, deste modo, através da análise destes fenômenos é possível determinar os parâmetros relativos ao circuito elétrico análogo ao modelo térmico do pára-raios.

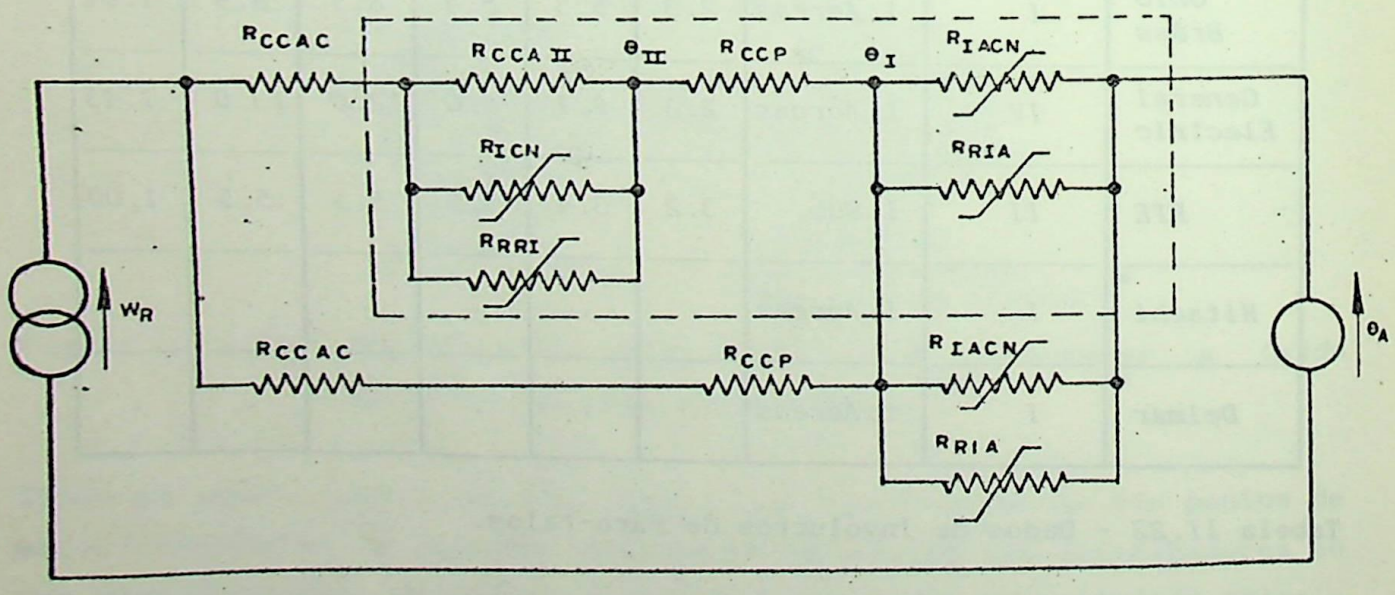


Figura II.3.23 - Análogo Elétrico Equivalente Completo em Regime Permanente ao Modelo Térmico de um Pára-raios a Óxido Metálico[75]

Com respeito aos invólucros mostrados na Figura *II.3.22*, convém ressaltar que o *"Tipo - IV"* é o projeto mais complexo pois, incorpora um anel de contato localizado, de modo a facilitar a transferência de calor por condução dos resistores a óxido metálico para o invólucro. Neste caso, é usual assumir a existência de dois caminhos independentes para o fluxo de calor, ou seja, um associado ao setor circular relativo ao anel de contato e o outro relativo ao espaçamento em ar do sistema de alívio de sobrepressão interna.

Tendo em mente estas considerações, sob condições de regime permanente, é possível obter o circuito elétrico análogo ao modelo térmico do pára-raios mostrado na Figura *II.3.23*. A partir dos parâmetros deste modelo são obtidos os parâmetros, na forma de resistências térmicas, do modelo mostrado na Figura *II.3.21*, para todos os tipos de invólucros mostrados na Figura *II.3.22*, sendo que, para os invólucros *"Tipo - I"*, *"Tipo - II"* e *"Tipo - III"* são necessários somente os parâmetros da área sombreada na Figura *II.3.23*.

II.3.2.2.I - DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DAS RESISTÊNCIAS TÉRMICAS

O procedimento analítico utilizado na determinação das resistências térmicas relativas ao circuito elétrico análogo ao modelo térmico de um pára-raios, contempla o equacionamento dos mecanismos de transferência de calor por condução, radiação e conveção, natural e forçada, fenômenos de fácil equacionamento, conforme mostrado a seguir.[75]

→ *Calor Transferido por Radiação:*

Em um pára-raios a transferência de calor por radiação ocorre entre os resistores a óxido metálico e o invólucro, bem como, entre a superfície externa do invólucro e o meio ambiente.

Os mecanismos relativos a transferência de calor por radiação são, normalmente, equacionados através da lei de *"Stefan-Boltzman"*, logo vem:

a) - R_{RRI} → *Resistência Térmica Devido a Radiação entre os Resistores a Óxido Metálico e o Invólucro.*

$$R_{RRI} = \frac{\theta_R - \theta_{II}}{\varepsilon_{RI}\ K\ (\ \theta_R^4 - \theta_{II}^4\ )\ \pi\ D_R\ H} \qquad (II.3.2.2.1.1)$$

onde:

K = Constante de Boltzman → 5.72×10^{-12} - [$W / cm^2\ °K^4$];

θ_{II} = Temperatura da superfície interna do invólucro [$°K$];

ε_{RI} = Emissividade equivalente entre os resistores e o invólucro, calculada segundo a expressão.

$$\varepsilon_{RI} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_I} + \frac{1}{\varepsilon_R} - 1}$$

sendo:

ε_I = Emissividade do material do invólucro → $\varepsilon_I = 0.95$;

ε_R = Emissividade do material dos resistores → $\varepsilon_R = 0.90$.

b) - R_{RIA} → *Resistência Térmica Devido a Radiação entre o Invólucro e o Meio Ambiente.*

$$R_{RIA} = \frac{\theta_I - \theta_A}{\varepsilon_I\ K\ (\ \theta_I^4 - \theta_A^4\ )\ \pi\ D_{Max}\ H} \qquad (II.3.2.2.1.2)$$

→ *Tranferência de Calor por Condução:*

Em um pára-raios a transferência de calor por condução, fenômeno,

intimamente relacionado com a condutividade térmica dos materiais utilizados na sua construção, ocorre entre os resistores a óxido metálico e a superfície interna invólucro, através do anel de contato e através do invólucro.

Em um pára-raios, a determinação dos mecanismos de transferência de calor por condução deve contemplar o equacionamento do fluxo de calor através de seções uniformes, relativas ao comportamento do anel de contacto e ao espaçamento em ar no interior do invólucro, bem como, o equacionamento do fluxo de calor através de seções não uniformes, relativas, por exemplo, ao invólucro. Para este fim, é usual, fazer uso do equacionamento proposto e desenvolvido com o objetivo básico de estudar o fluxo de calor em transformadores, logo vem:

a) - R_{CCAII} → *Resistência Térmica Devido a Condução de Calor Através da Camada de Ar no Interior do Invólucro do Pára-raios.*

$$R_{CCAII} = \frac{D_{II} - D_R}{\lambda_A \, \Pi \, (D_{II} + D_R) \, H} \qquad (II.3.2.2.1.3)$$

b) - R_{CCAC} → *Resistência Térmica Devido a Condução de Calor Através do Anel de Contato.*

$$R_{CCAC} = \frac{E_{AC}}{\lambda_S \, \Pi \, (D_R + E_{AC}) \, H} \qquad (II.3.2.2.1.4)$$

onde:

E_{AC} = Espessura do anel de contato em borracha de silicone [cm].

Nota -

A resistência térmica R_{CCAC} é pertinente somente ao Projeto "Tipo - IV", para os demais projetos, R_{CCAC}= 0.00.

c) - R_{CCP} → *Resistência Térmica Devido a Condução de Calor Através da Porcelana.*

$$R_{CCP} = \frac{Ln\left(\frac{D_{EI}}{D_{II}}\right)}{2\,\pi\,\lambda_I\,H} \qquad (II.3.2.2.1.5)$$

A condutividade térmica do ar e dos diversos tipos de materiais, comumente, utilizados na construção dos invólucros de pára-raios é mostrada na Tabela *II.23*.

Simbologia	*Material*	*Condutividade Térmica a 20°Celsius [W cm / °K]*
λ_A	*Ar*	*0.00026*
λ_P	*Porcelana*	*0.01*
λ_{EPR}	*EPR*	*0.00267*
λ_S	*B. Silicone*	*0.0025*
λ_{ES}	*Epoxy - Silica*	*0.0074*
λ_{EA}	*Epoxy - Alumina*	*0.014*

Tabela *II.23* - Condutividade Térmica de Materiais Utilizados na Construção de Pára-raios

→ *Transferência de Calor por Convecção Natural:*

A transferência de calor, por meio de convecção natural, é um fenômeno razoavelmente complexo que depende grandemente dos parâmetros do meio de

transporte, no caso específico dos pára-raios - ar.

No caso do estudo da transferência de calor por convecção em pára-raios que ocorre entre os resistores e o invólucro e entre o invólucro e o ambiente, é usual assumir-se certas simplificações que acabam por resultar na tradicional fórmula de fluxo de calor por convecção, ou seja:

$$Q_{CV} = 2.3 \times 10^{-4} \, (\Delta\theta) \, ^{.25} \qquad (II.3.2.2.1.6)$$

onde:

Q_{CV} = Fluxo de calor por convecção [$W / {}^{\circ}C \, cm^2$];

$\Delta\theta$ = Gradiente de Temperatura [$^{\circ}K$].

Logo, vem:

a) - R_{RICN} → *Resistência Térmica por Convecção Natural entre os Resistores e a Superfície Interna da Porcelana*

$$R_{RICN} = \frac{1}{2.34 \times 10^{4} \, (\theta_R - \theta_{II}) \, ^{.25} \, \pi \, D_R \, H} \qquad (II.3.2.2.1.7)$$

b) - R_{IACN} → *Resistência Térmica por Convecção Natural entre a Superfície Externa da Porcelana e o Meio Ambiente*

$$R_{IACN} = \frac{1}{2.34 \times 10^{4} \, (\theta_I - \theta_A) \, ^{.25} \, \pi \, D_{EI} \, H \, \varphi} \qquad (II.3.2.2.1.8)$$

→ *Transferência de Calor por Convecção Forçada:*

A transferência de calor, por meio de convecção forçada, resultante da

circulação de vento pela superfície do invólucro se constitue fator extremamente importante no desempenho de campo, de um pára-raios.

O fluxo de calor por convecção forçada em uma superfície depende do *"Número de Reinold ($\mathcal{R}_e$)"*, que por sua vez depende da velocidade do vento, ou seja:

$$\mathcal{R}_e = 14.6\ D_{EI}\ V_V \qquad (II.3.2.2.1.9)$$

onde:

V_V = Velocidade do vento (*km / h*).

Deste modo, vem:

- R_{IACF} → *Resistência Térmica por Convecção Forçada entre a Superfície Externa da Porcelana e o Meio Ambiente*

$$R_{IACF} = \frac{1}{\lambda_A\ C\ \mathcal{R}_e^{\,P}\ \Pi\ D_{EI}\ H\ \varphi} \qquad (II.3.2.2.1.10)$$

Sendo as constantes empíricas "C" e "P", desenvolvidas para cilindros verticais de paredes lisas.

→ $100 < \mathcal{R}_e < 5000$ $\qquad C = 0.55 \qquad P = 0.485$

→ $5000 < \mathcal{R}_e < 50000$ $\qquad C = 0.13 \qquad P = 0.65$

→ *Cálculo das Resistências Térmicas de Invólucros Tipo - IV:*

Os invólucros do *"Tipo - IV"*, normalmente, utilizados pela *General Electric*, apresentam um mecanismo de transferência de calor formado por dois caminhos, independentes, para o fluxo de calor e, deste modo, necessitam de um tratamento complementar. Nestes casos, é usual

calcular-se as resistências térmicas, conforme as expressões, *(II.3.2.2.1.1)* à *(II.3.2.2.1.10)* e considerar as resistências dos caminhos independentes como proporcionais as superfícies livre, imersa em ar, e do anel de contato, conforme calculado a seguir.

$$\psi = 1 - \frac{L_c}{\pi D_R} \qquad (II.3.2.2.1.11)$$

onde:

ψ = Fator de proporcionalidade entre a superfície interna do invólucro imersa em ar e sob o anel de contato; e

L_c = Comprimento da parte do anel de contato localizada entre a superfície dos resistores e a superfície interna do invólucro *[cm]*.

Deste modo, obtém-se:

$$R_T = \frac{R_{T_{Calculado}}}{\psi} \qquad (II.3.2.2.1.12)$$

e;

$$R_T' = \frac{R_{T_{Calculado}}}{1 - \psi} \qquad (II.3.2.2.1.13)$$

onde:

R_T = Resistência térmica através da superfície livre em ar;

R_T' = Resistência térmica através da superfície do anel de contato; e

$R_{T_{Calculado}}$ = Resistência térmica calculada por *(II.3.2.2.1.1 - 10)*.

→ *Cálculo das Resistências Térmicas Totais:*

Com respeito aos invólucros do *"Tipo - I"*, *"Tipo - II"* e *"Tipo - III"*, as resistências térmicas totais, ou seja, entre resistores e invólucro

e, entre invólucro e ambiente, podem ser obtidas átravés das técnicas tradicionais de resolução de circuitos resistivos. No entanto, a solução pode ser ligeiramente dificultada pelo fato das resistências térmicas, devido a radiação e convecção, serem dependentes da temperatura.

Fabricante	Projeto Invólucro	R_{RI} [°C]	R_{IA} [°C]
McGraw Edison	I	10.4	10.5
McGraw Edison	II	4.0	12.6
McGraw Edison	III	16.0	6.5
Ohio Brass	I	6.1	8.2
General Electric	IV	8.6	5.5
RTE	II	9.3	10.9
* Hitachi	I	.	.
* Delmar	I	.	.

Tabela II.24 - Resistência Térmica dos Projetos de Pára-raios Detalhados na Tabela II.22.

Nota -

* - *Pára-raios a óxido metálico fabricados e comercializados no mercado nacional.*

Um possível método de solução para este problema é resolver, iterativamente, as expressões *(II.3.2.2.1.1)* à *(II.3.2.2.1.10)* para uma condição fixa de potência consumida pelos resistores a óxido metálico, no entanto, este tipo de solução resulta em resistências dependentes da temperatura. De modo a contornar este fato, é mais simples e usual

assumir uma determinada distribuição de temperatura interna ao pára-raios e, a experiência tem demonstrado que através de uma escolha adequada de temperaturas é possível obter-se resultados muito próximos aos obtidos através de ensaios.

Assumindo uma distribuição de temperatura conforme a seguir,

$$\theta_R = 200\ ^\circ C;\ \theta_{II} = 130\ ^\circ C;\ \theta_I = 110\ ^\circ C \text{ e } \theta_A = 60\ ^\circ C$$

obtém-se, para os pára-raios listados na Tabela *II.22*, as resistências térmicas mostradas na Tabela *II.24*.

II.3.2.2.2 - DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DAS CAPACIDADES TÉRMICAS

De modo a complementar o circuito elétrico equivalente ao modelo térmico de um pára-raios é necessário conhecer os valores das capacidades térmicas, ou seja, da capacidade de armazenamento de calor, dos componentes do pára-raios, normalmente resistores a óxido metálico e invólucro.[75]

A capacidade térmica é uma propriedade física particular a cada material, relacionada com o seu calor específico que, por sua vez, é determinado, experimentalmente, com o auxílio de um calorímetro.

- C_T → *Capacidade Térmica dos Componentes de um Pára-raios a Óxido Metálico.*

$$C_T = V_C\ (\ C_0 + \alpha_C\ \theta\ ) \qquad (II.3.2.2.2.1)$$

onde:

V_C = Volume do componente do pára-raios [cm^3]; e

θ = Temperatura do componente [$^\circ C$].

A Tabela *II.25* mostra os dados relativos ao calor específico dos principais materiais utilizados na construção de um pára-raios a óxido metálico.

Material	*Calor Específico* c_0 [J / cm^3 °C]	*Coeficiente Temperatura* α_C [J / cm^3 °C^2]
Resistor - ZnO	*2.59*	*0.0044*
Porcelana	*1.58*	*0.0027*
Epoxy - Sílica	*1.21*	*0.0049*
EPR - Cor Cinza	*1.32*	*0.0020*
EPR - Cor Preta	*1.55*	*0.0037*

Tabela *II.25* - Capacidade Térmica de Materiais Utilizados na Construção de Pára-raios

A Tabela *II.26* mostra os valores da capacidade térmica, para várias temperaturas, para os resistores a óxido metálico e os invólucros dos para-raios listados na Tabela *II.22*, determinados a partir de suas dimensões básicas.

II.3.2.2.3 - COMENTÁRIOS COMPLEMENTARES

O método e expressões desenvolvidos para a análise de pára-raios a óxido metálico classe distribuição podem ser utilizados na análise de pára-raios classe intermediária e classe estação, sendo que a principal diferença esperada fica por conta da capacidade térmica dos invólucros que deve ser substancialmente superior, fato, que implica em transitórios de resfriamento mais lentos. Com respeito aos pára-raios dotados de invólucros de material polimérico são esperados resultados bastante similares, Já com respeito a pára-raios classe distribuição

imersos em óleo mineral, internos aos transformadores, os resultados devem ser substancialmente diferentes devido a influência dos mecanismos de convecção do óleo isolante.

Fabricante	Projeto Invólucro	Resistores [J/°C]			Invólucro [J/°C]		
		20°C	75°C	150°C	20°C	75°C	150°C
McGraw Edison	I	114	124	138	99	108	120
McGraw Edison	II	105	115	128	64	78	96
McGraw Edison	III	114	124	138	344	375	417
Ohio Brass	I	136	148	165	110	120	134
General Electric	IV	180	196	218	221	241	268
RTE	II	78	85	94	68	75	80
Hitachi *	I	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-
Delmar *	I	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-

Tabela *II.26* - Capacidade Térmica dos Projetos de Pára-raios Detalhados na Tabela *II.22*.

Nota -

* - *Pára-raios a óxido metálico fabricados e comercializados no mercado nacional.*

II.3.2.3 - MODELO ELETRO-TÉRMICO DE UM PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

Considerando a combinação de um modelo para a característica tensão versus corrente, fato que, em última análise, descreve consumo de potência dos resistores a óxido metálico, com o modelo que descreve o

comportamento térmico de todo o pára-raios, é possível obter uma ferramenta bastante útil na previsão do comportamento dos pára-raios frente a solicitações oriundas da descarga de impulsos de corrente de qualquer natureza, bem como, frente a sobretensões em freqüência industrial. A potencialidade deste tipo de ferramenta pode ser apreciada através da Figura *II.3.24* que mostra uma comparação entre os reultados previstos por um modelo conjunto e os obtidos em um ensaio de ciclo de operação típico.

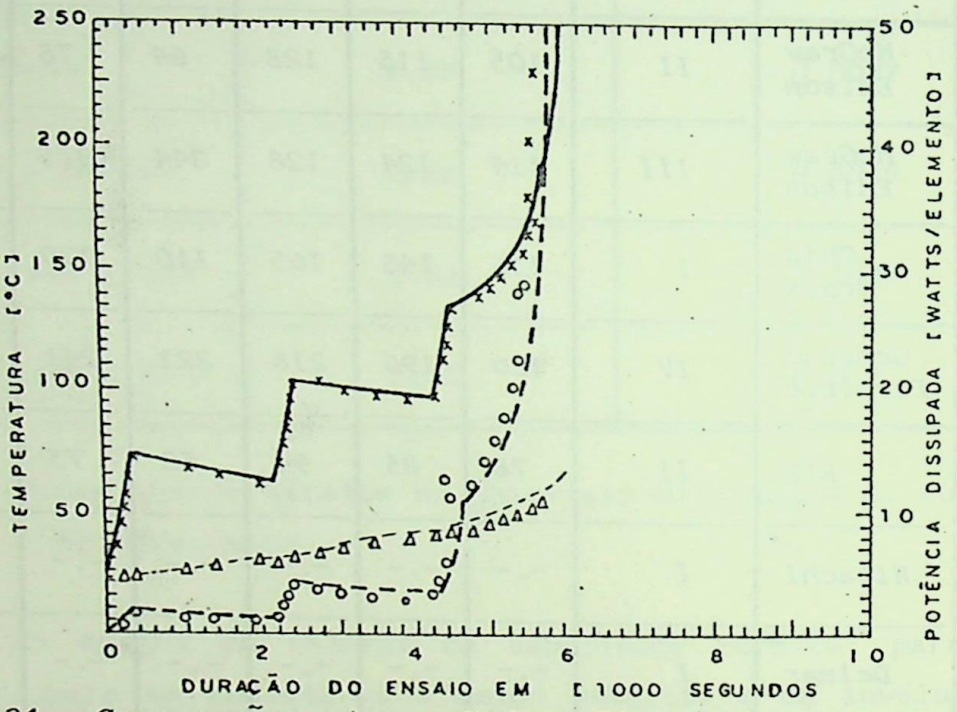


Figura II.3.24 - Comparação entre o Modelo Eletro-Térmico e Resultados de um Ensaio de Ciclo de Operação[65]

II.3.3 - CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DE UM PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

O problema de absorção de energia por um pára-raios a óxido metálico vem sendo, principalmente nos últimos anos, exaustivamente analisado, pois observa-se, nos estudos de *"TNA"* e *"EMTP"*, normalmente realizados para sistemas de alta e extra alta tensão, a existência de vários modos distintos de absorção de energia, alguns dos quais, não retém, pelo menos, a primeira vista, nenhuma semelhança com os resultados, tradicionalmente obtidos quando da utilização de pára-raios a carboneto

de silício. Isto se deve, obviamente, a ausência, na maioria dos casos de centelhadores de qualquer espécie neste pára-raios fato que permite com que os mesmos façam parte ativa do processo de limitação das sobretensões.

II.3.3.1. - MODOS DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DE UM PÁRA RAIOS A ÓXIDO METÁLICO SEM CENTELHADORES

A análise dos oscilogramas, Energia Absorvida por um pára-raios a óxido metálico versus tempo, mostra a existência de vários modos distintos de absorção de energia, modos estes que podem ser agrupados em 3 grandes classes.[78-79]

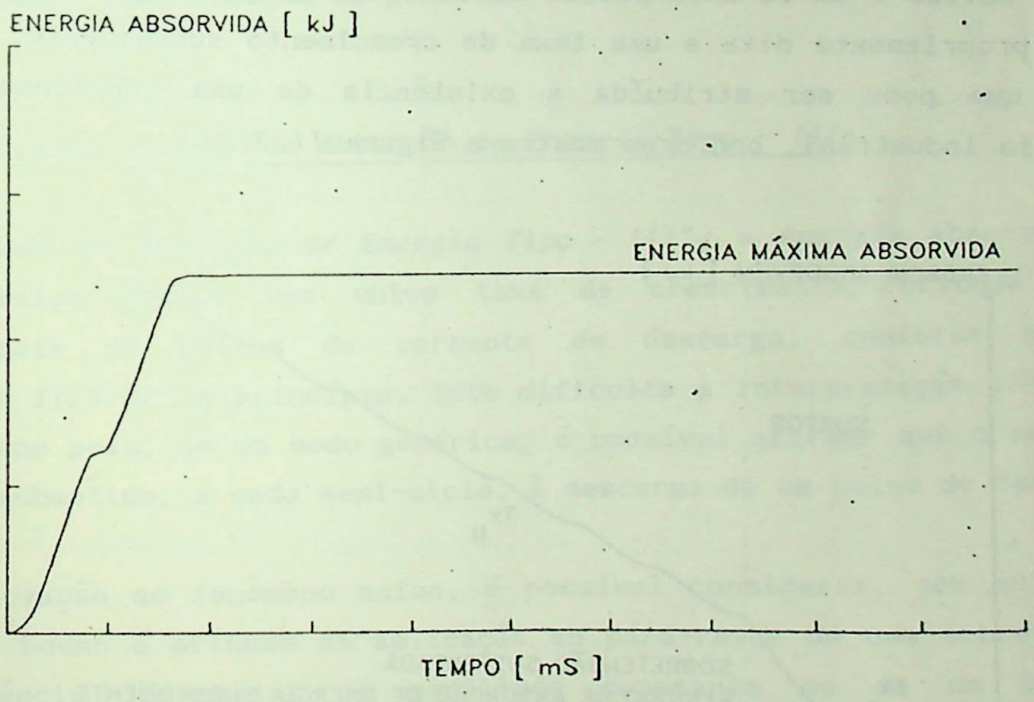


Figura II.3.25 - Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo - I[79]

→ *1. Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo - I:*

No *"Modo de Absorção de Energia Tipo - I"*, a energia absorvida pelo pára-raios possui, praticamente, uma única taxa de crescimento e

apresenta um valor bem definido pois, conforme mostra a Figura *II.3.25*, somente alguns pulsos de corrente de descarga circulam pelo pára-raios. Este modo de absorção de energia pode ser atribuído a um surto de manobra como tradicionalmente concebido, não apresentando, a princípio, um problema de grandes proporções, haja vista que, em última análise, neste caso não existe uma dependência entre o valor de energia absorvida pelo pára-raios e uma posterior operação da proteção do sistema.

→ 2. *Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo - II:*

No *"Modo de Absorção de Energia Tipo - II"*, a energia absorvida pelo pára-raios possui duas taxas de crescimento distintas, a inicial, mais íngrime, devido a um ou mais pulsos de corrente de descarga, ou seja, a manobra propriamente dita e uma taxa de crescimento subsequente, menos íngrime que pode ser atribuída a existência de uma sobretensão em freqüência industrial, conforme mostra a Figura *II.3.26*.

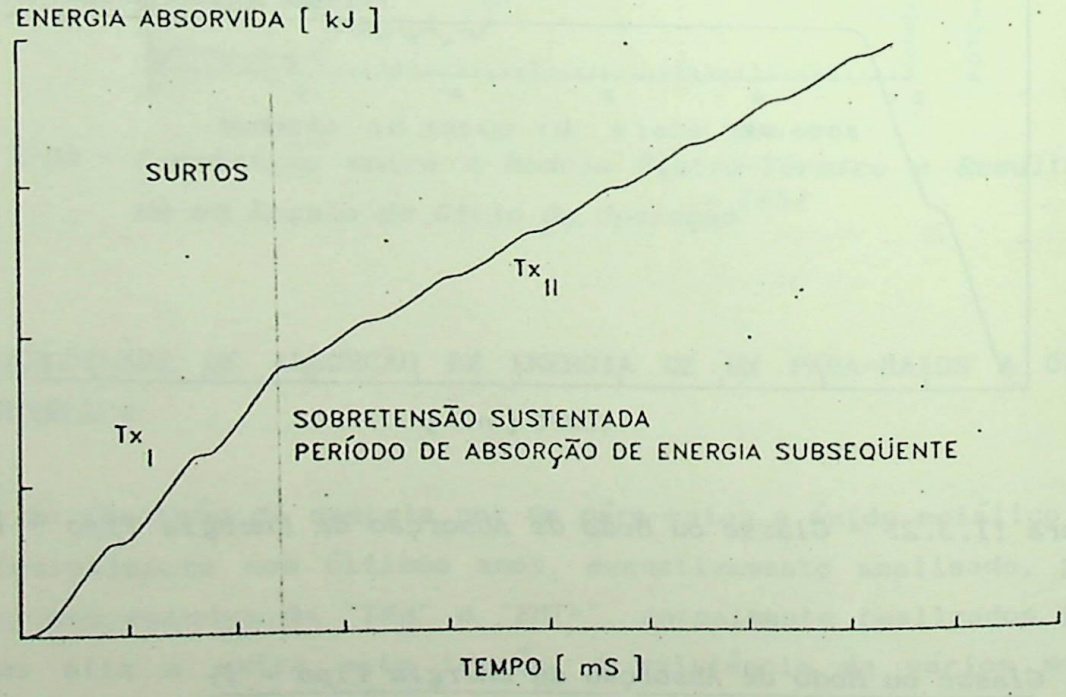


Figura II.3.26 - Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo - II [79]

O problema acima, a princípio, pode ser dividido em duas partes independentes:

a)- A aplicação do surto de manobra propriamente dito; e

b)- A aplicação de uma sobretensão em freqüência industrial de amplitude constante ou de um perfil de sobretensão em freqüência industrial pré-determinado.

O ponto importante no caso, é quantificar e distinguir bem as partes acima em termos de tensão, corrente e tempo, bem como, identificar qual a influência de uma posterior operação da proteção do sistema no valor final da energia a ser absorvida pelo pára-raios, de modo, a se obter uma melhor conceituação do problema sob análise.

→ *3. Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo - III:*

No *"Modo de Absorção de Energia Tipo - III"*, a energia absorvida pelo pára-raios possui uma única taxa de crescimento, oriunda de uma seqüência de pulsos de corrente de descarga, conforme mostra a Figura *II.3.27*. A princípio, isto dificulta a interpretação clássica do fenômeno pois, de um modo genérico, é possível afirmar que o pára-raios está submetido, a cada semi-ciclo, à descarga de um pulso de corrente.

Com relação ao fenômeno acima, é possível considerar, sem muito erro, que o mesmo é oriundo da aplicação ao pára-raios de uma sobretensão em freqüência industrial de amplitude constante ou de um perfil de sobretensão em freqüência industrial pré-determinado, sendo que 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.

Neste caso, é de suma importância identificar a influência de uma posterior operação da proteção do sistema, pois 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.

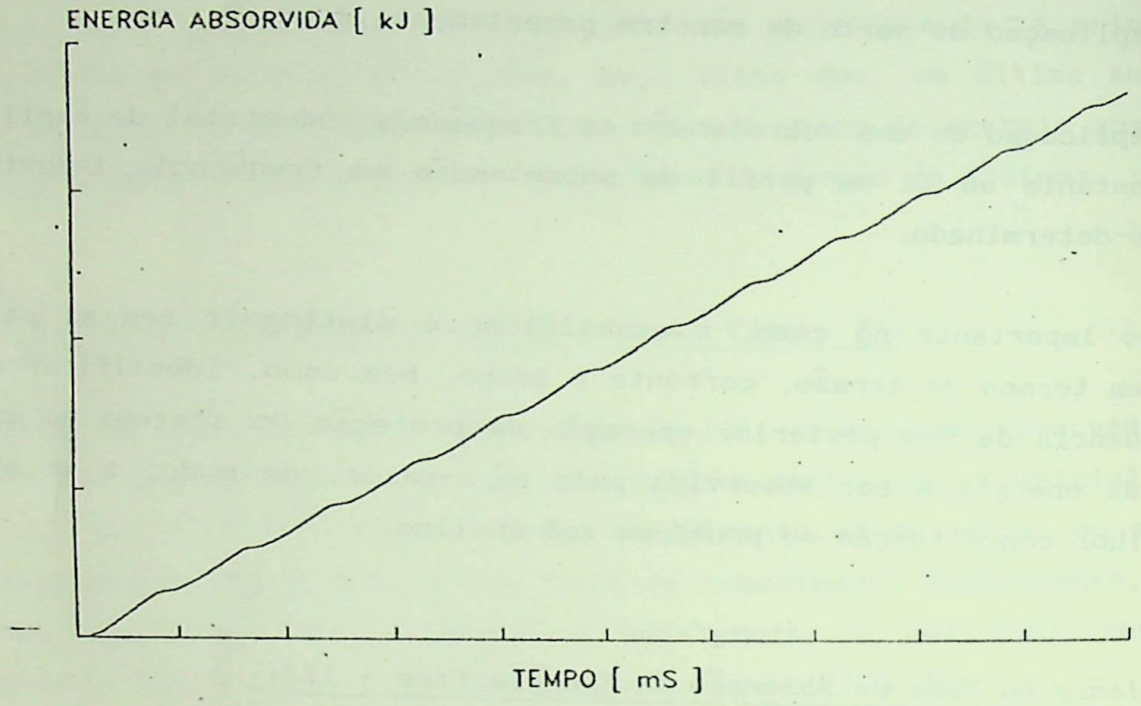


Figura II.3.27 - Classe ou Modo de Absorção de Energia Tipo - III [79]

II.3.3.2. - CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DE UM PÁRA RAIOS A ÓXIDO METÁLICO SEM CENTELHADORES

De modo geral, devido a ausência de centelhadores de qualquer espécie, que impõem severas limitações nos valores de corrente de descarga, os pára-raios a óxido metálico possuem capacidade de absorção de energia superior a um pára-raios a carboneto de silício.

Considerando que, nos projetos de pára-raios a óxido metálico, os resistores são conectados em série, formando colunas, ou em casos muito especiais, quando é necessário uma elevada capacidade de absorção de energia, que estas colunas podem ser conectadas em paralelo, individualmente, ou no interior de um invólucro único, a capacidade de absorção de energia de um pára-raios pode ser determinada através da expressão. [6]

$$C_{AE} = C_{AER}\ N_{RS}\ N_{CP}\ F_{RC} \qquad (II.3.3.2.1)$$

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 ($0.80 < F_{RC} < 0.90$).

Classe do Pára-raios	*Energia Específica [kJ / kV]* *
Distribuição	*1.0 - 1.9*
Intermediária	*2.7 - 3.4*
Estação	*5.0 - 15.0*

Tabela II.27 - Energia Específica das Diversas Classes de Pára-raios.

Nota -

** - Valores, normalmente, usualmente conservativos, pois contemplam tolerâncias de fabricação, critérios de envelhecimento, limites térmicos impostos por elementos orgânicos, entre outros*

Conforme mostra a Tabela *II.27*, usualmente, os fabricantes indicam a capacidade de absorção de energia de um projeto de pára-raios a óxido metálico através de um parâmetro denominado "*Energia Específica*" que relaciona a capacidade de absorção de energia do projeto com sua tensão

nominal em *[kJ / kV]*. Nestes casos, para calcular a capacidade de absorção de energia de um pára-raios é suficiente substituir na expressão *(II.3.3.2.1)* o valor de C_{AER} pela correspondente *"Energia Específica"* e o valor de N_{RS} pela *"Tensão Nominal"* do pára-raios.

Em teoria, os limites impostos à capacidade de absorção de energia de um pára-raios a óxido metálico são, praticamente, definidos por dois parâmetros relacionados com o desempenho térmico por unidade de volume de seus resistores, nominalmente:

- E_{MLET} → Energia máxima absorvida devido a existência de um limite de estabilidade térmica *[J / cm³]*; e

- E_{MCT} → Energia máxima absorvida devido a existência de choque térmico *[J / cm³]*.

Deste modo, o valor preciso da capacidade de absorção de energia de um resistor a óxido metálico C_{AER} pode ser determinado pelo produto entre seu volume e um seus parâmetros, ou seja, E_{MLET} ou E_{MCT}, escolhidos conforme a seguir.

II.3.3.2.1 - CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DEVIDO AO LIMITE DE ESTABILIDADE TÉRMICA

A capacidade de absorção de energia baseada 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, onde 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 pois a formação de gradientes térmicos no interior dos mesmos.

Considerando as características mostradas na Figura *II.3.20*, relativas a um resistor a óxido metálico utilizado na construção de um pára-raios

classe distribuição, para serviço pesado, é possível calcular a energia máxima absorvida devido a existência de uma temperatura limite para a operação estável - E_{MLET} em [J / cm^3], conforme a seguir.[6]

$$E_{MLET} = 2.59 \left(\theta_{LMT} - \theta_{OP} \right) + 0.0022 \left(\theta_{LMT}^2 - \theta_{OP}^2 \right) \quad (II.3.3.2.1.1)$$

onde:

θ_{OP} = Temperatura de operação [$^{\circ}C$];

θ_{LMT} = Temperatura limite de operação [$^{\circ}C$].

É conveniente ressaltar que a expressão acima é valida somente para um determinado projeto de resistor a óxido metálico, no entanto, através da mesma é obtida a característica mostrada na Figura *II.3.28*, cujos resultados já foram discutidos em parte, e na qual, é extremamente fácil observar a dependência entre a capacidade de absorção de energia, devido a existência de uma série de temperaturas limite de operação, a temperatura ambiente e a tensão aplicada ao pára-raios.

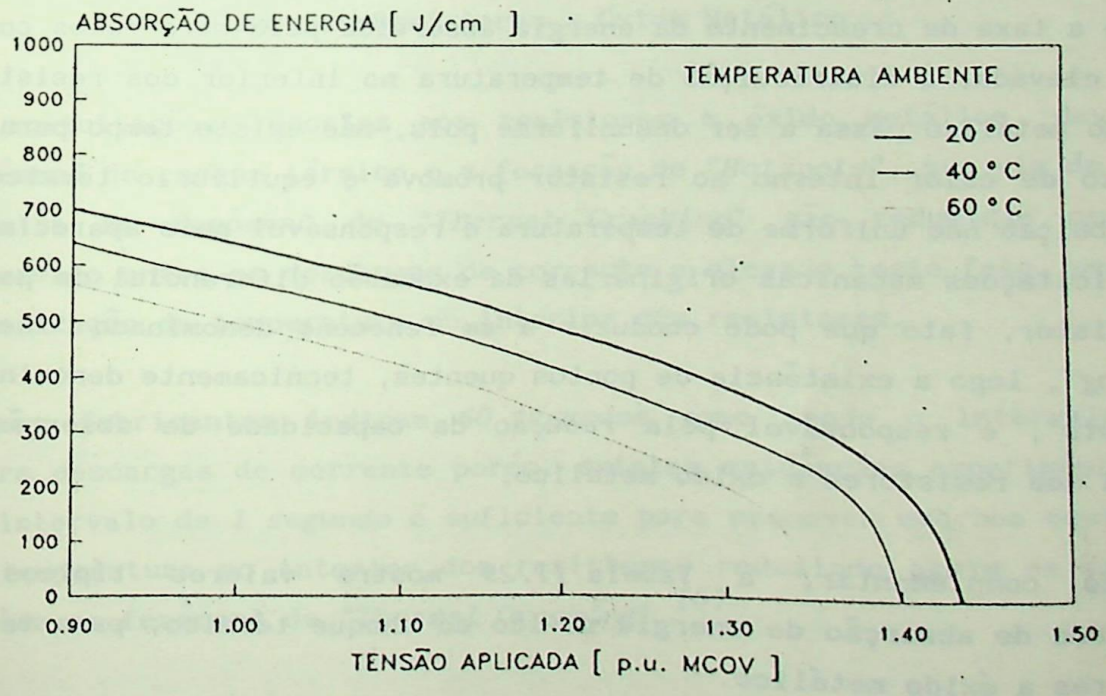


Figura II.3.28 - Dependência entre Capacidade de Absorção de Energia, Temperatura Ambiente e Tensão Aplicada ao Pára-raios[65]

Classe do Pára-raios	E_{MLET} [J / cm^3]
Distribuição	*600 - 700*
Intermediária	*500 - 600*
Estação	*400 - 500*

Tabela II.28 - Energia Máxima Absorvida Devido Limite de Estabilidade Térmica para Diversas Classes de Pára-raios.

De modo complementar, a Tabela *II.28* mostra valores típicos de capacidade de absorção de energia devido ao limite térmico, sob tensão de operação contínua, para outros tipos de projeto de pára-raios.

II.3.3.2.2 - CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DEVIDO A CHOQUE TÉRMICO

Quando a taxa de crescimento da energia absorvida pelo pára-raios começa a ser elevada, a distribuição de temperatura no interior dos resistores a óxido metálico passa a ser desuniforme pois, não existe tempo para que o fluxo de calor interno ao resistor promova o equilíbrio térmico. A distribuição não uniforme de temperatura é responsável pelo aparecimento de solicitações mecânicas originárias da expansão diferencial de partes do resistor, fato que pode conduzir a um fenômeno denominado *"Thermal Cracking"*, logo a existência de pontos quentes, tecnicamente denominados *"Hotspots"*, é responsável pela redução da capacidade de absorção de energia dos resistores a óxido metálico.

De modo complementar, a Tabela *II.29* mostra valores típicos da capacidade de absorção de energia devido ao choque térmico, para vários resistores a óxido metálico.

Conforme mostram a Tabela *II.28* e a Tabela *II.29*, os valores para a energia máxima absorvida considerando o fenômeno de choque térmico, via

de regra, são em torno, da metade dos valores para a energia máxima absorvida quando se considera a existência do limite de estabilidade térmica, este fato, implica que o limite de absorção de energia por parte de um pára-raios a óxido metálico sem centelhador é determinado pela energia máxima absorvido sob condições de choque térmico. [80-81]

Classe do Pára-raios	E_{MCT} [J / cm^3]
Hitachi	*300*
Westinghouse	*225*
McGraw-Edison	*205*
Meidensha	*203*
General Electric	*136*

Tabela II.29 - Energia Máxima Absorvida Devido ao Choque Térmico para Diversos Resistores a Óxido Metálico.

As solicitações impostas aos resistores a óxido metálico, devido ao fenômeno de choque térmico e a formação de *"Hotspots"*, que via de regra, resulta no fenômeno de *"Thermal Cracking"* são reduzidas quando o intervalo entre as descargas de corrente é elevado, este fato, permite a equalização da temperatura no interior dos resistores.

Alguns fabricantes indicam *60 segundos* como sendo o intervalo ideal entre descargas de corrente porém, existem evidências experimentais que um intervalo de *1 segundo* é suficiente para promover uma boa equalização de temperatura no interior dos resistores reduzindo assim os problemas devido ao fenômeno de *"Thermal Cracking"*. [6]

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, quando se tem em mente

o processo físico que resulta na formação dos *"Hotspots"*, deste modo, os valores lançados na Tabela *II.29* devem ser encarados com reservas, principalmente, quando a forma da corrente de descarga difere das formas padronizadas, como por exemplo quando da descarga de bancos de capacitores.

Em tese, com a melhoria dos processos de fabricação são esperadas melhorias no grau de uniformidade dos resistores a óxido metálico, responsáveis pela formação dos *"Hotspots"*, deste modo, é possível que no futuro, o limite de absorção de energia de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores seja imposto pelo limite de estabilidade térmica.

II.3.3.3 - ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA POR UM PÁRA-RAIOS

O método, tradicionalmente, utilizado na determinação da capacidade de absorção de energia de um pára-raios é o *"Ensaio de Descarga de Linhas de Transmissão"*, desenvolvido a partir de solicitações e problemas operativos encontrados em linhas de transmissão de extra alta tensão, ou seja, *Un > 230 kV*.[79]

Com base nos resultados de sua aplicação continuada, os critérios de especificação dos pára-raios, no caso específico a carboneto de silício, recomendados até o presente, passaram a prever o seguinte:[46]

a)- O pára-raios deve atuar no máximo em dois semi-ciclos consecutivos;

b)- A tensão nominal do pára-raios é determinada pela expressão:

$$U_{n_{PR}} = \frac{U_{Max}}{2} \qquad (II.3.3.3.1)$$

onde:

$U_{n_{PR}}$ = Tensão nominal do pára-raios *[p.u.]*;

U_{Max} = Máxima tensão de manobra *[p.u.]*;

** Nota -*

→ *Este fato não impede que existam pára-raios, mesmo a carboneto de silício, que atuem em mais de dois semi-ciclos consecutivos.*

Estes critérios podem ser claramente identificados quando da análise das Normas *ANSI - CSA*, no entanto, ficam um pouco obscuros quando da análise das Normas *IEC - ABNT*.

O ensaio de descarga de linhas de transmissão, conforme previsto nas normas, procura simular com um certo grau de aproximação o fenômeno que ocorre, durante as principais manobras de uma linha real. Durante os anos, ocorreram várias discussões a respeito da representatividade deste ensaio, porém sem resultar em grandes modificações em seu conteúdo e, deste modo, o ensaio, tal como previsto, inicialmente vem sendo executado há anos com resultados plenamente satisfatórios, pois a experiência operativa dos pára-raios assim ensaiados tem sido razoavelmente adequada.

II.3.3.4. - CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS E OS LIMITES DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DE UM PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

Tendo em mente que 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, é possível e, muitas vezes, extremamente útil, traçar um paralelo entre os modos e os limites de absorção de energia,

bem como, definir quais são os ensaios aplicáveis a cada caso.

→ *1. O 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, frente ao *"Modo de Absorção de Energia Tipo - I"*, quando de correntes de descarga inferiores a *1.5 - 2.0 kA*, 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 limite acima, usualmente exigem a realização de um *"Ensaio Complementar"*, normalmente, não normalizado, através de um circuito de ensaio, a parâmetros concentrados denominado *"Circuito Complementar"*. [82-83]

Com relação ao ensaio de descarga de linhas de transmissão, as Normas *ANSI - CSA* e *IEC - ABNT*, pouco diferem entre si quando da construção do modelo reduzido da linha de transmissão, as vezes, denominado, gerador de corrente de longa duração, ou seja, em última análise, tipo de solicitação, para qual, o pára-raios é projetado.

A escolha dos parâmetros do gerador de corrente de longa duração, no caso das Normas *ANSI - CSA*, implica na utilização de parâmetros das linhas, físicos, ou seja, dimensionais, e elétricos, estes últimos, normalmente de seqüência positiva. Já no caso das Normas *IEC - ABNT* esta escolha implica na determinação de uma *"Classe de Descarga de Linhas"*, obtida com base das características típicas dos geradores e dos pára-raios.

No entanto, em ambos 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.*

Segundo proposta *IEC - ABNT*, as características que devem ser utilizadas na escolha da *"Classe de Descarga de Linhas"* são as seguintes:

"Característica 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]".*

De um modo geral, um estudo de sobretensões 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, ou seja, em [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 *II.3.29*, deve ser submetido as solicitações relativas a *"Classe de Descarga de Linhas - LT_J"*.

Como regra, nestes casos, a *"Energia Específica" - [kJ/kV]$_J$*, é,

normalmente, superior a exigida pelo caso real.

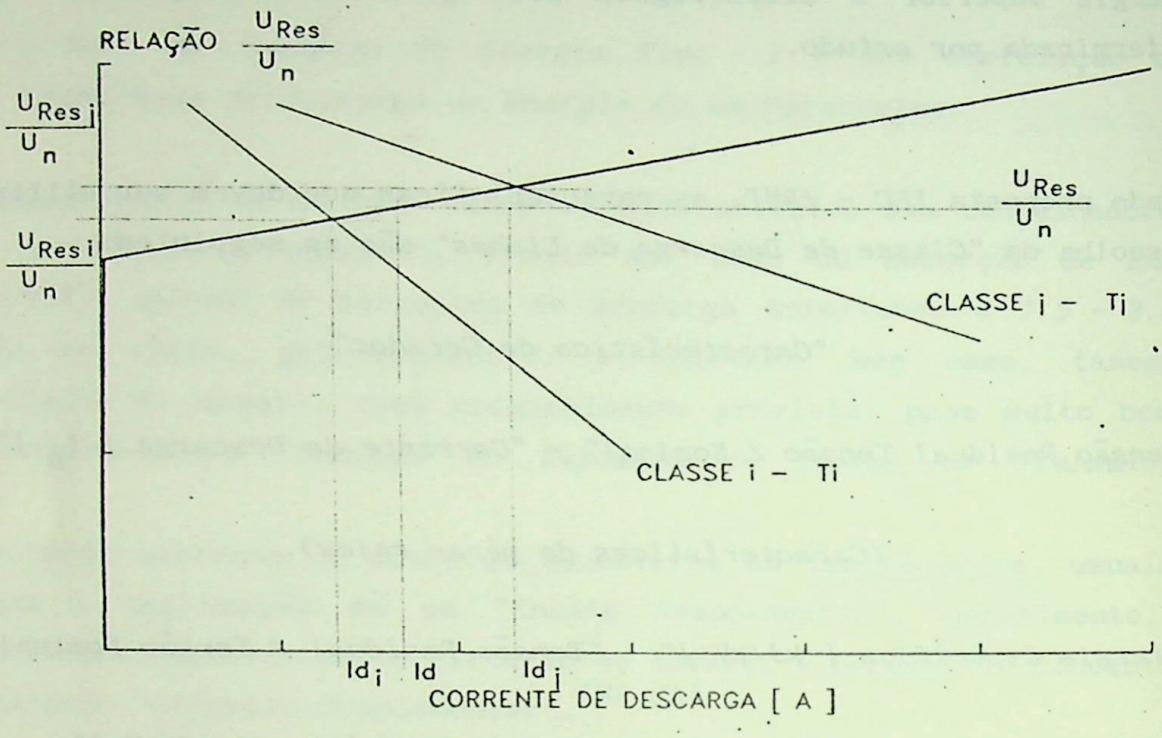


Figura II.3.29 - Característica Tensão Residual [$U_{Res.}$] versus Corrente de Descarga [I_D] de Linhas de Transmissão[79]

O fato é que a única característica prevista nas normas, relaciona a *"Energia específica [kJ/kV]"* com o quociente *"Tensão residual - Tensão nominal [U_{Res}/U_n]"*, conforme mostra a Figura *II.3.30*, e, deste modo, não fornece informação a respeito dos valores da corrente de descarga, usualmente, encontrados na característica *"Corrente de descarga [I_D]"* versus *"Tensão residual - Tensão nominal [U_{Res}/U_n]"*, conforme mostra a Figura *II.3.31*.

A utilização das características mostradas na Figura *II.3.30* e na Figura *II.3.31* admite, para qualquer corrente de descarga, uma relação *"Tensão residual - Tensão nominal"* constante. Um rápido exame na característica mostrada na Figura *II.3.29* mostra que isto não é verdade porém, devido ao elevado grau de não linearidade dos resistores a óxido metálico, na região de correntes de descarga de manobra, esta relação

pode ser, sem muito erro, assumida como constante.

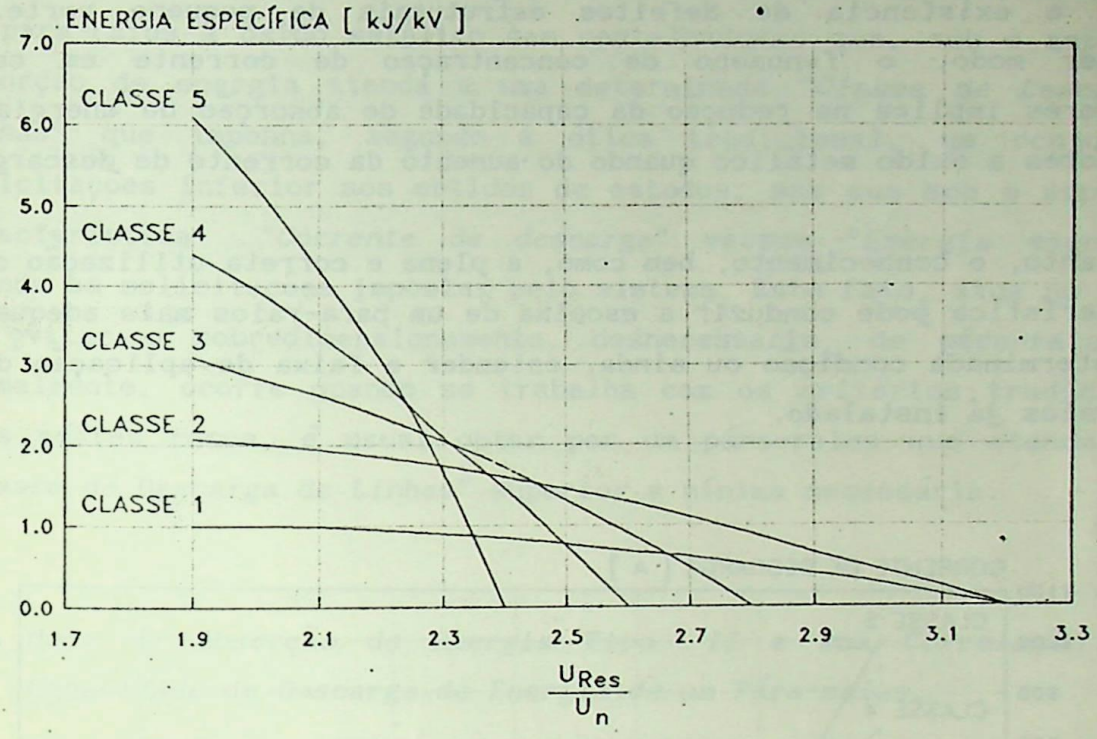


Figura II.3.30 - Característica Energia Específica [kJ/kV] Quociente Tensão Residual por Tensão Nominal [U_{Res}/U_n] [79]

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 kA - 2.0 kA*, pode ser obtida com o auxílio da Figura *II.3.37*, representativa de um fenômeno típico dos resistores a óxido metálico, ou seja, o fato da *"Energia específica"* ser uma função da *"Forma"* e da *"Amplitude"* da *"Corrente de descarga"*, ou através do *"Método do Fator de Utilização"*.

A Figura *II.3.37* retrata, macroscópicamente, o fenômeno oriundo da concentração de corrente em canais condutores distribuídos ao longo dos resistores, fato este, oriundo dos mesmos não serem estruturas perfeitamente uniformes. A concentração de corrente nestes canais pode conduzir a falhas por perfuração, tecnicamente, *"Puncturing"*,

normalmente, devido a existência de defeitos estruturais de grande porte, ou por fragmentação, tecnicamente *"Thermal Cracking"*, usualmente, devido a existência de defeitos estruturais de pequeno porte. De qualquer modo, o fenômeno de concentração de corrente em canais condutores implica na redução da capacidade de absorção de energia dos resistores a óxido metálico quando do aumento da corrente de descarga.

No entanto, o conhecimento, bem 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.

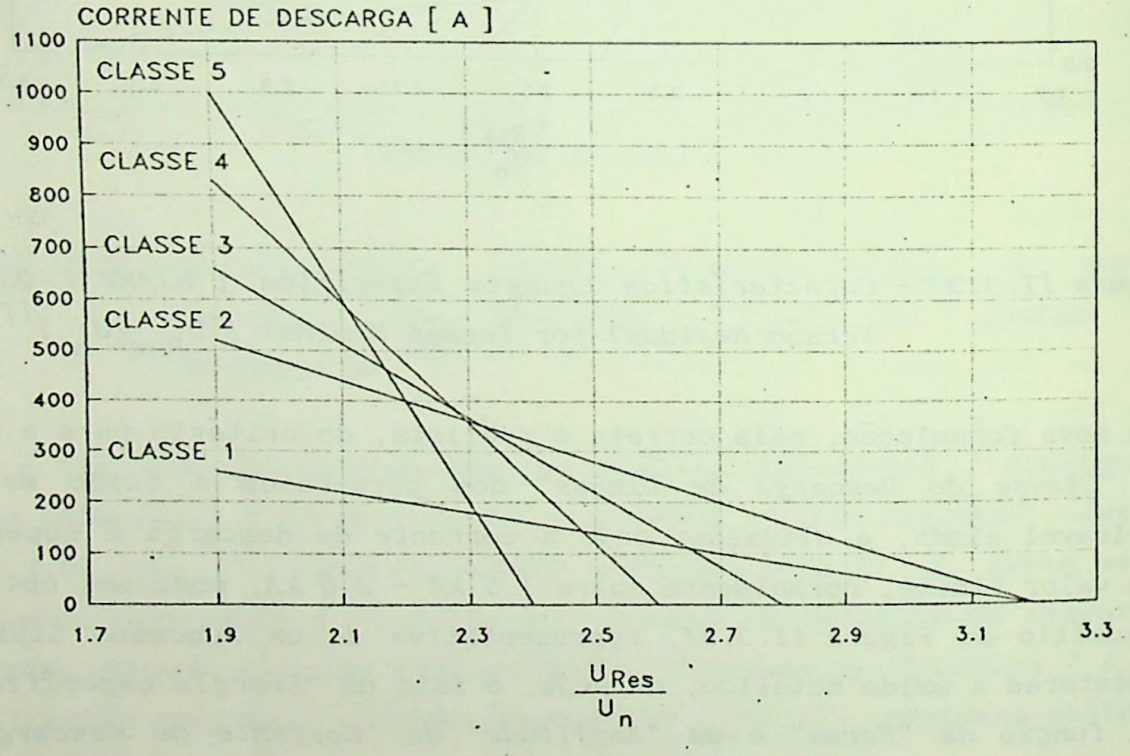


Figura II.3.31 - Característica Corrente de Descarga [I_D] Quociente Tensão Residual por Tensão Nominal [U_{Res}/U_n] [79]

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 condições de suportabilidade dos mesmos frente as solicitações obtidas dos estudos de sobretensões. Logo, sob este enfoque, é possível escolher um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores que, sob o aspecto de absorção de energia atenda a uma determinada *"Classe de Descarga de Linhas"* que imponha, segundo a ótica tradicional, um conjunto de solicitações inferior aos obtidos de estudos, mas que sob o aspecto da característica *"Corrente de descarga"* versus *"Energia específica"* atenda as solicitações impostas pelo sistema. Este fato, atua no sentido de evitar o sobredimensionamento, desnecessário, do pára-raios que, normalmente, ocorre quando se trabalha com os critérios tradicionais, pois nestes casos, é usual optar por 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 um problema de maior envergadura, pois não existe a primeira vista uma correlação direta entre o mesmo e os métodos de ensaio existentes nas normas.

A princípio, o desempenho de um pára-raios frente a este tipo de solicitação exige a aplicação de uma *"Sobretensão em freqüência industrial"*, ou de um *"Perfil de sobretensão pré-determinado"* em seqüência imediata a descarga de corrente, esta, normalmente, oriunda de uma manobra, ou seja, passível de ser representada por um *"Ensaio de Descarga de Linhas"* ou por um *"Ensaio Complementar"*. O principal problema no caso, é o intervalo de tempo existente entre as duas partes do ensaio, que na grande maioria dos casos é incompatível com os intervalos de tempo do fenômeno real, obtido de estudos.

Dentro deste contexto, dentre os vários aspectos a serem levados em consideração, o mais importante é a definição do tipo de solicitação, a

qual o pára-raios está submetido, ou seja, principalmente, como se processa a eliminação das condições de sobretensão em freqüência industrial.

De modo geral, existem três possibilidades distintas para a que as condições de sobretensão em freqüência industrial sejam eliminadas:

a) - Eliminação rápida da sobretensão em freqüência industrial;

b) - Eliminação lenta da sobretensão em freqüência industrial; e

c) - Eliminação muito lenta da sobretensão em freqüência industrial.

As três condições acima diferem substancialmente no que tange, principalmente, ao valor da energia fornecida ao pára-raios durante o período de *"Absorção de energia subseqüente"*, conforme mostra a Figura *II.3.26* e, por conseguinte, no valor da *"Energia total absorvida"*. Logo, sob este enfoque, o quociente entre o valor da *"Energia subseqüente"* e o da *"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 em Frequência Industrial:*

Considerando que a sobretensão em freqüência industrial é eliminada em poucos ciclos, ou seja, em algumas dezenas de milisegundos, é virtualmente impossível utilizar uma *"Fonte Auxiliar de Tensão em Frequência Industrial"*, em paralelo com o pára-raios, conforme mostra a Figura *II.3.32* para tentar comprovar o seu desempenho frente a esta solicitação.

Nestes casos, o fenômeno de absorção de energia do pára-raios, de uma maneira prática, normalmente, acaba por ser considerado como similar ao *"Modo de Absorção de Energia Tipo - I"*, fato que o torna passível, a

princípio, função do valor da corrente de descarga, de ser representado pelo *"Ensaio de Descarga de Linhas"*.

A adequabilidade desta solução é baseada no fato que o *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, como tradicionalmente concebido, representa uma solicitação mais rigorosa que a real, pois toda a energia absorvida pelo pára-raios é fornecida por um único impulso de corrente, fato que vem a dificultar a homogeinização do temperatura interna dos resistores que compõem o pára-raios.

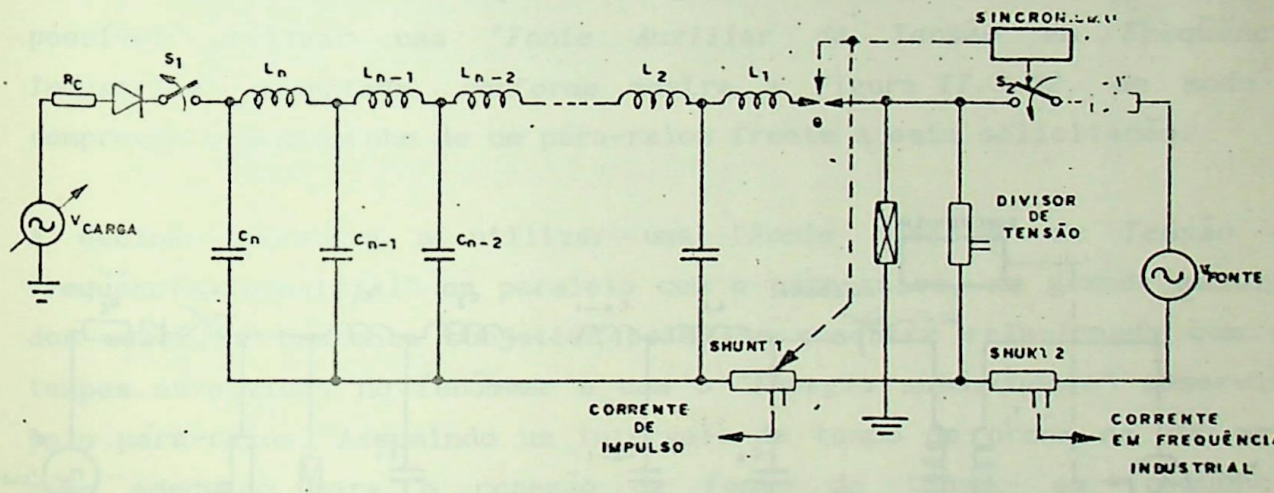


Figura II.3.32 - Circuito de Ensaio para a Análise do Desempenho de um Pára-raios a Óxido Metálico frente ao Modo de Absorção de Energia Tipo - II[79]

Devido ao fato do modelo de linha, ou seja, o gerador de corrente de longa duração, ser uniformemente carregado, fato que não ocorre nas linhas de transmissão, o *"Ensaio de Descarga de Linhas"* impõe ao modelo de pára-raios uma solicitação, em torno de *0.20 p.u.* superior a imposta

pelo fenômeno real. Logo, é possível, sem muito erro, considerar este valor como adequado para o quociente entre o valor de *"Energia subseqüente"* pelo valor da *"Energia total absorvida"*.

Na grande maioria dos casos, as considerações 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 freqüência industrial.

Alternativamente, pode ser utilizado, nestes casos, a representação desenvolvida para avaliar o desempenho de pára-raios a carboneto de silício frente a condições de descarga de linhas, seguida um perfil de sobretensão em freqüencia industrial, conforme mostra a *Figura II.3.33*.

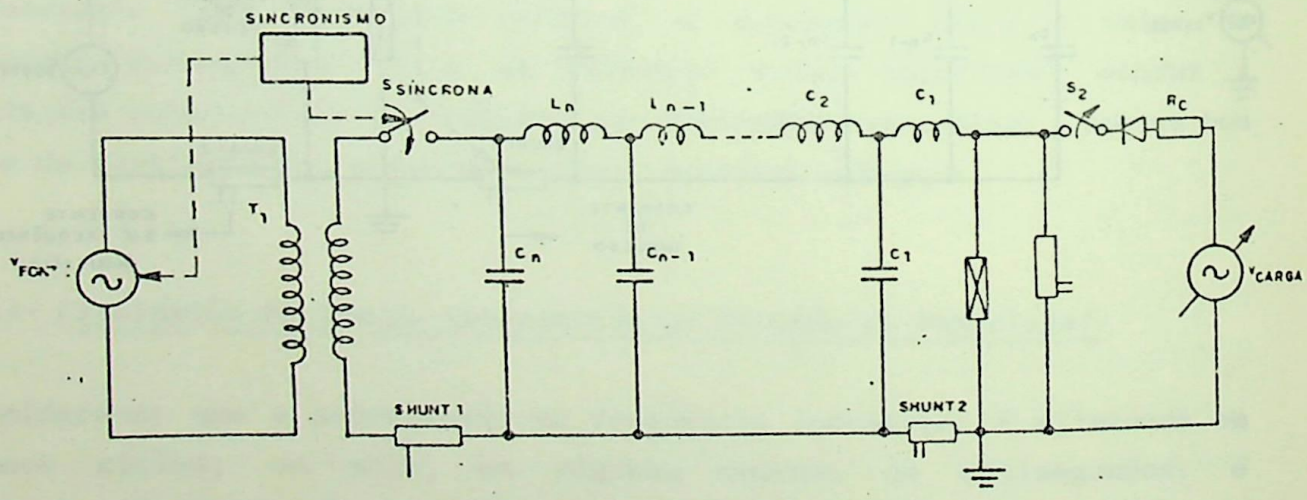


Figura II.3.33 - Circuito de Ensaio Alternativo para a Análise do Desempenho de um Pára-raios a Óxido Metálico frente ao Modo de Absorção de Energia Tipo - II[84]

A concepção do circuito da Figura *II.3.33*, 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 fonte em freqüência industrial e linha, fato que torna possível reproduzir, com razoável grau de precisão qualquer forma de tensão originárias de estudos de transitórios, principalmente em *"TNA"*, ou de medições de campo.

→ *b)- Eliminação Lenta da Sobretensão em Frequência Industrial:*

Quando a sobretensão em freqüência industrial é eliminada em algumas dezenas de ciclos, ou seja, em algumas centenas de milisegundos, é possível utilizar uma *"Fonte Auxiliar de Tensão em Freqüência Industrial"* conectada, conforme mostra a Figura *II.3.32*, de modo a comprovar o desempenho de um pára-raios frente a esta solicitação.

A decisão relativa a utilizar uma *"Fonte Auxiliar de Tensão em Freqüência Industrial"* em paralelo com o pára-raios, na grande maioria dos casos, é bastante subjetiva pois, se encontra 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 mseg* como adequado para a conexão da fonte de tensão em freqüência industrial; dependendo, do *"Tempo total de observação do fenômeno"*, bem como,do valor de *"Energia subsequente"*, intimamente relacionado com a corrente descarregada pelo pára-raios, durante o período de *"Absorção de energia subsequente"*, conforme mostra a Figura *II.3.26*, pode ser mais conveniente e adequado, considerar o fenômeno como semelhante ao *"Modo de Absorção de Energia Tipo - I"*.

De acordo com a Figura *II.3.34* o desempenho de um pára-raios frente ao *"Modo de Absorção de Energia Tipo - II"* pode ser dividido em duas etapas:

→ Desempenho frente ao *"Ensaio de Descarga de Linhas"* ou *"Complementar"*,

como, tradicionalmente, concebidos;

→ Aplicação de tensão em freqüência industrial.

Neste caso, o valor de energia a ser utilizado como referência na execução do *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, ou *"Complementar"*, ou seja, $E_{Ref.}$ -, conforme mostra a Figura *II.3.34* 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 mseg.* até a conexão efetiva da fonte de tensão em freqüência industrial.

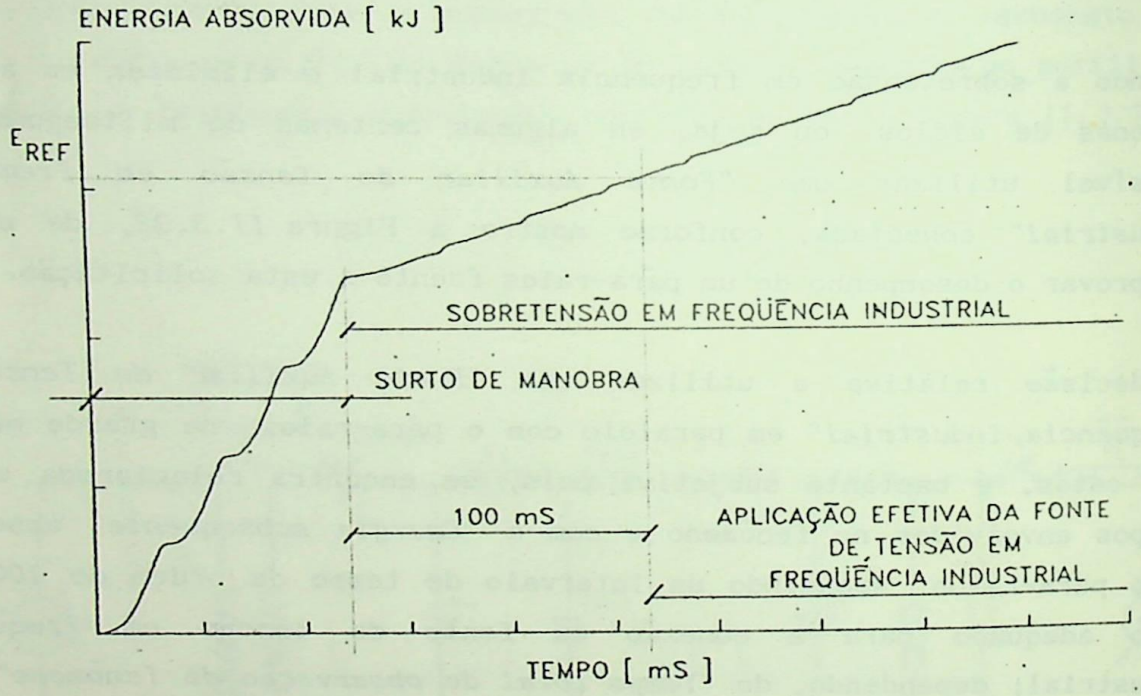


Figura II.3.34 - Detalhamento do Modo de Absorção de Energia Tipo - II[79]

Um dos problemas remanescentes neste procedimento é o relativo a correta compatilização entre os valores de energia e corrente de descarga, que pode ser realizada através do *"Método do Fator de Utilização"*,[79] baseado na característica *"Corrente de descarga*$_{[\ ID\ ]}$*"* - *"Tempo"*, conforme mostra a Figura *II.3.35*, obtida através de ensaios destrutivos, e utilizada como base para o desenvolvimento da característica *"Corrente de descarga*$_{[\ ID\ ]}$*"* - *"Energia específica [kJ/kV]"*, onde o valor de

corrente limite, está ligado ao comportamento térmico do pára-raios.

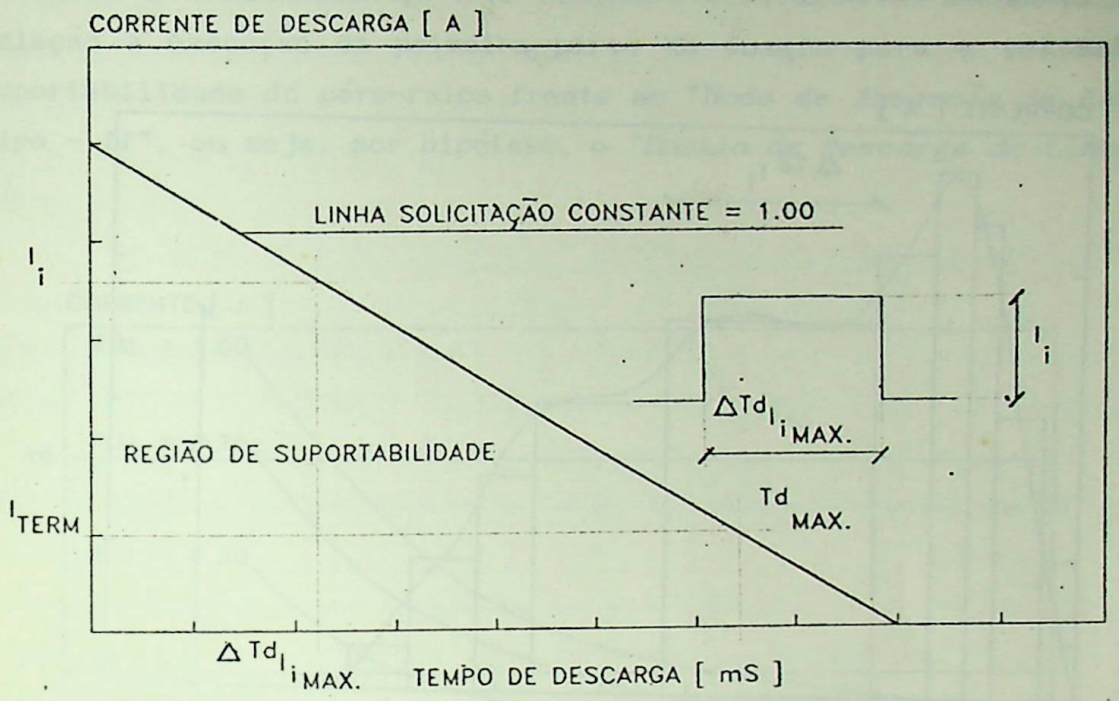


Figura II.3.35 - Característica Corrente de Descarga [Id] - Tempo[79]

O *"Método do Fator de Utilização"* tem como fundamento o fato que qualquer forma, ou mesmo trem de pulsos, de corrente pode vir a ser discretizado em termos de pulsos retangulares, conforme mostra a Figura *II.3.36.*[80]

Uma vez obtida a discretização do pulso aleatório o *"Fator de Utilização - [F.U.]"* passa a ser definido segundo a expressão:

$$F.U. = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta T_{d_{Ii}}}{\Delta T_{d_{Ii\,(Max.)}}} \qquad (II.3.3.4.1)$$

onde:

n = Número de pulsos utilizados para discretizar o impulso;

$\Delta T_{d_{Ii}}$ = Tempo de descarga da corrente I_i; e

$\Delta T_{d_{Ii}}$ = Tempo de descarga máximo da corrente I_i.
$_{(Max.)}$

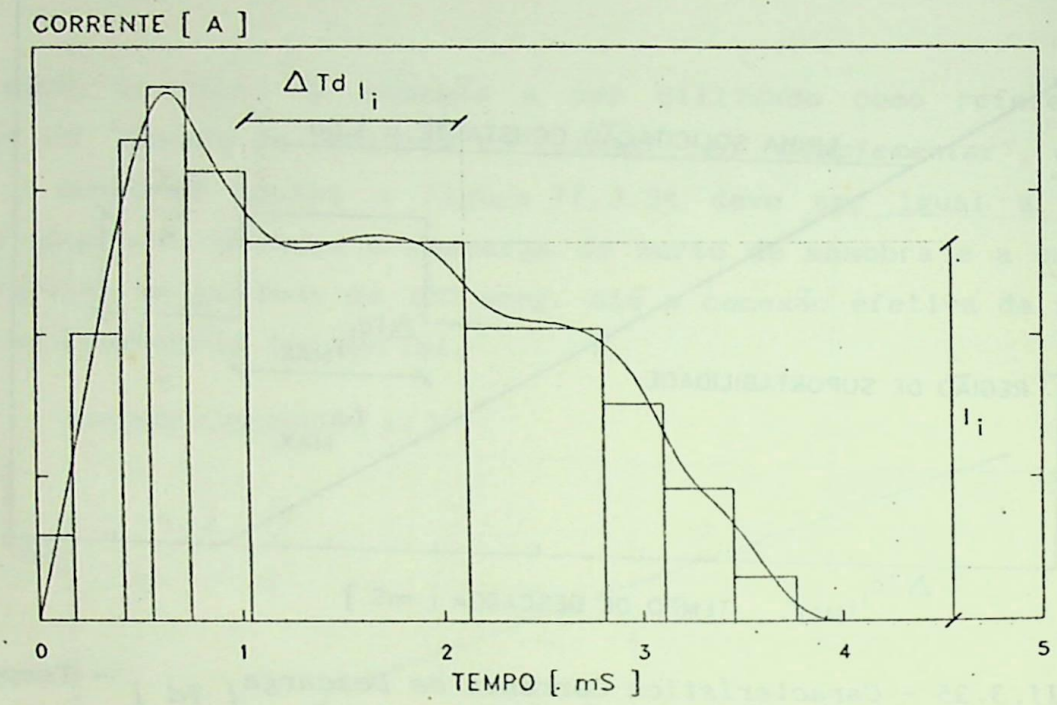


Figura II.3.36 - Discretização de uma Forma Aleatória [79-80]

Com relação a um pulso ou a um trem de pulsos semi-senoidais, conforme mostra a Figura *II.3.34* é usual e, suficiente, transformá-lo em um pulso ou trem de pulsos retangulares e a seguir aplicar a definição do *"Fator de Utilização - [F.U.]"*.

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 determinado pela expressão:

$$T_{DR} = \frac{2}{\Pi} T_{DS} \qquad (II.3.3.4.2)$$

onde:

T_{DS} = Tempo de descarga do pulso semi-senoidal *[mseg - μseg]*; e

T_{DR} = Tempo de descarga do pulso retangular equivalente *[mseg - μseg]*.

Uma vez definido o *"Fator de Utilização [F.U.]"* relacionado com o valor

de *"Energia de referência"*, com base na Figura *II.3.37*, é possível delinear a existência de três caminhos distintos a serem tomados com relação a execução da primeira parte do ensaio para a verificação da suportabilidade do pára-raios frente ao *"Modo de Absorção de Energia do Tipo - II"*, ou seja, por hipótese, o *"Ensaio de Descarga de Linhas"*:

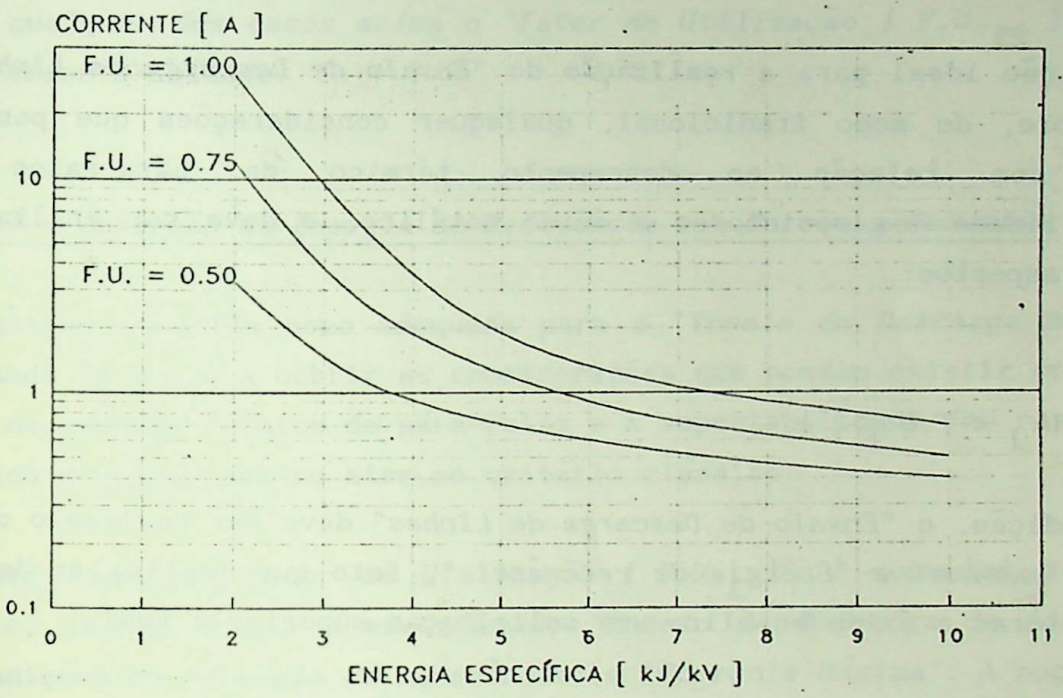


Figura II.3.37 - Característica "Corrente de Descarga [Id]" - "Energia Específica [kJ/kV] Completa[79]

Deste modo, considerando;

$I_{E.}$ → *Corrente de Descarga Máxima [A - kA];*

$E_{Ref.}$ → *Energia de Referência [kJ];*

$F.U._{I}$ → *Fator de Utilização relativo a Corrente de Descarga Total;*

$F.U._{E}$ → *Fator de Utilização relativo a Energia de Referência, sob Corrente de Descarga Máxima;*

$F.U._E$ → *Fator de Utilização relativo as Condições de Ensaio; e*

$E_{Lim.}$ → *Máxima Energia Absorvida, por limite térmico.*

vem:

→ *I - Absorção da Energia de Referência sob Corrente Máxima:*

É a condição ideal para a realização do *"Ensaio de Descarga de Linhas"* pois, cobre, de modo tradicional, quaisquer considerações que possam existir com relação ao desempenho térmico do pára-raios e suportabilidade dos resistores a óxido metálico, e deve ser analizada sob dois aspectos:

I.a) - $F.U._I < F.U._E$; *e*

Nesta condição, o *"Ensaio de Descarga de Linhas"* deve ser realizado com, *"Corrente máxima"* e *"Energia de referência"*, fato que implica em impor aos resistores a óxido metálico uma solicitação superior a real.

I.b) - $F.U_I > F.U._E$.

Sob este enfoque, o *"Ensaio de Descarga de Linhas"* pode ser realizado com:

→ *"Corrente superior a máxima"* e *"Energia de referência"*:

Neste caso, a manutenção da solicitação imposta aos resistores a óxido metálico é garantida através da escolha de uma corrente que resulte em um *"Fator de Utilização [$F.U._{ES}$]"* no mínimo, igual a $F.U_I$.

→ *"Corrente máxima"* e *"Energia superior a de referência"*:

Neste caso, deve ocorrer uma redução correspondente no tempo de aplicação do perfil de tensão em freqüência industrial, segunda parte

do ensaio para a verificação da suportabilidade de um pára-raios frente ao *"Modo Absorção de Energia do Tipo - II"* sem modificar a solicitação imposta aos resistores a óxido metálico, segundo condições acima discutidas*.

** Nota -*

Em qualquer dos casos acima o "Fator de Utilização [$F.U._{ES}$] deve ser inferior a unidade.

→ *II - Absorção da Energia de Referência sob Corrente Reduzida:*

Condição assumida como adequada para o *"Ensaio de Descarga de Linhas"* quando se procura cobrir as considerações que possam existir com relação ao desempenho térmico do pára-raios e a suportabilidade dos resistores a óxido metálico sem se ater ao critério clássico.

Neste caso, o *"Fator de Utilização [$F.U._{E}$]"* é superior a unidade, isto, impossibilita a execução do *"Ensaio de Descarga de Linhas"* sob condições de *"Energia de referência"* e *"Corrente Máxima"*. A opção lógica passa ser executar o ensaio com um valor reduzido de corrente, o mais próximo do valor de corrente máxima, em outras palavras, que resulte em um *"Fator de Utilização [$F.U._{ES}$]"* unitário.

É possível realizar o ensaio como outros valores de corrente porém é necessário atentar para que o *"Fator de Utilização [$F.U._{ES}$]"* seja no mínimo igual ao *"Fator de Utilização [$F.U._{I}$]"*.

→ *III - Absorção de Energia Reduzida sob Corrente Máxima:*

Condição que pode ser considerada como adequada para o *"Ensaio de Descarga de Linhas"* quando é necessário cobrir, principalmente, as considerações que possam existir com relação a suportabilidade dos resistores a óxido metálico, em detrimento, inicial, ao desempenho

térmico do pára-raios e, sem se ater ao critério clássico.

A opção lógica passa a ser executar o ensaio com um nível de energia reduzido, porém próximo ao nível de *"Energia de referência"* em outras palavras que resulte num *"Fator de Utilização [$F.U._{ES}$]"* unitário. É possível realizar o ensaio com outros valores de energia porém, nestes casos é necessário que o *"Fator de Utilização [$F.U._{ES}$]"* seja superior ao *"Fator de Utilização [$F.U._{I}$]"*.

De modo a cobrir as solicitações que possam comprometer o desempenho térmico do pára-raios é admissível aumentar o tempo de aplicação da tensão em freqüência industrial, segunda parte do ensaio para a verificação da suportabilidade do pára-raios frente ao *"Modo Absorção de Energia do Tipo - II"*

→ *c)- Eliminação muito Lenta da Sobretensão em Freqüência Industrial:*

Quando a sobretensão em freqüência industrial é 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 para a verificação da suportabilidade de um pára-raios frente ao *"Modo Absorção de Energia do Tipo - II"* pode ser determinada por qualquer um dos métodos anteriormente abordados, no entanto, é imprescindível durante a segunda parte deste ensaio fazer uso de uma *"Fonte Auxiliar de Tensão em Freqüência Industrial"* conectada, conforme mostrado na Figura *II.3.32.*

→ *3. Modo de Absorção de Energia Tipo III e a sua Correlação com a Capacidade de Descarga de Energia de um Pára-raios.*

Tendo em mente que o *"Modo de Absorção de Energia Tipo - III"* é oriundo de uma sobretensão em freqüência industrial, de amplitude constante, ou de um perfil de sobretensão em freqüência industrial 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"* conectada conforme mostrado na Figura *II.3.38.*

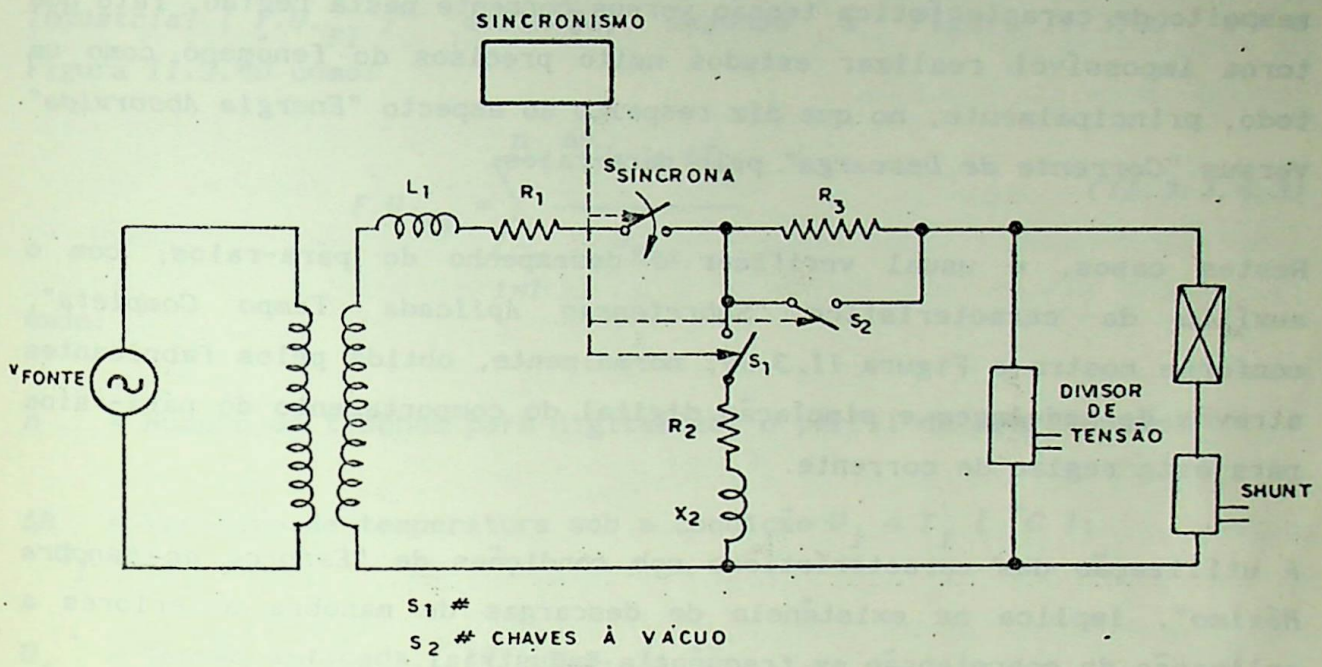


Figura II.2.38 - Circuito de Ensaio para a Análise do Desempenho de um Pára-raios a Óxido Metálico frente ao Modo de Absorção de Energia Tipo - III[84]

A concepção do circuito da Figura *II.3.38*, na forma de um divisor de tensão de potência indutivo, permite através do ajuste do tempo de manobra da chave a vácuo, e por conseguinte, das impedâncias do circuito, aplicar ao pára-raios um perfil de sobretensão a dois patamares, fato compatível com alguns resultados de estudos de transitórios em *"TNA"* ou *"EMPT"*.

Com relação a amplitude da sobretensão e, por conseguinte, a amplitude da corrente de descarga pelo pára-raios, duas situações distintas devem ser analisadas:

a) - *Sobretensões de baixa amplitude:*

Entende-se por sobretensões de baixa amplitude as sobretensões

prospectivas próximas a tensão nominal do pára-raios, ou seja, inferiores a *1.2 p.u.*. Convém ressaltar que, normalmente, não é usual dispor de informações, a menos de ensaios específicos, detalhadas a respeito da característica tensão versus corrente nesta região, fato que torna impossível realizar estudos muito precisos do fenômeno como um todo, principalmente, no que diz respeito ao aspecto *"Energia Absorvida"* versus *"Corrente de Descarga"* pelo pára-raios.

Nestes casos, é usual verificar o desempenho do pára-raios, com o auxílio da característica *"Sobretensão Aplicada - Tempo Completa"*, conforme mostra a Figura *II.3.39*, normalmente, obtida pelos fabricantes através de modelagem e simulação digital do comportamento do pára-raios para esta região de corrente.

A utilização das características sob condições de *"Esforço de Manobra Máximo"*, implica na existência de descargas de manobra anteriores a aplicação da sobretensão em freqüência industrial.

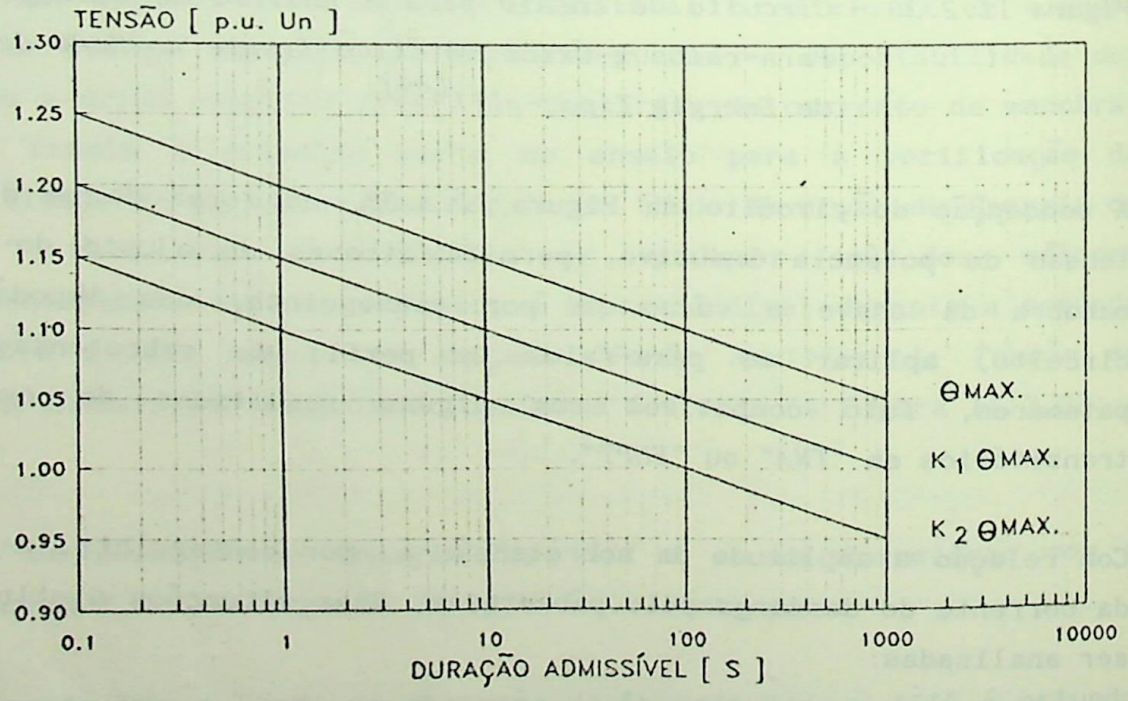


Figura II.3.39 - Característica Sobretensão em Freqüência Industrial Tempo Completa de um Pára-raios a Óxido Metálico [79]

Quando for aplicado ao pára-raios um perfil de sobretensão pré-determinado, uma das soluções para verificar o seu desempenho é trabalhar com o conceito de *"Fator de Utilização em Freqüência Industrial [$F.U._{FI}$]"* definido, segundo a Figura *II.3.39* e a Figura *II.3.40* como:

$$F.U._{FI} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta\theta_{U_i \rightarrow \Delta T_i}}{\theta_{Max.}} \qquad (II.3.3.4.3)$$

onde:

n = Número de trechos para digitalizar o perfil de sobretensão;

$\Delta\theta_{U_i \rightarrow T_i}$ = Variação de temperatura sob a condição $U_i \rightarrow T_i$ [$^{\circ}C$];

U_i = Tensão aplicada [*kV - p.u.*];

ΔT_i = Intervalo de tempo de aplicação de U_i [*Segundos*]; e

θ_{Max} = Temperatura limite de estabilidade [$^{\circ}C$].

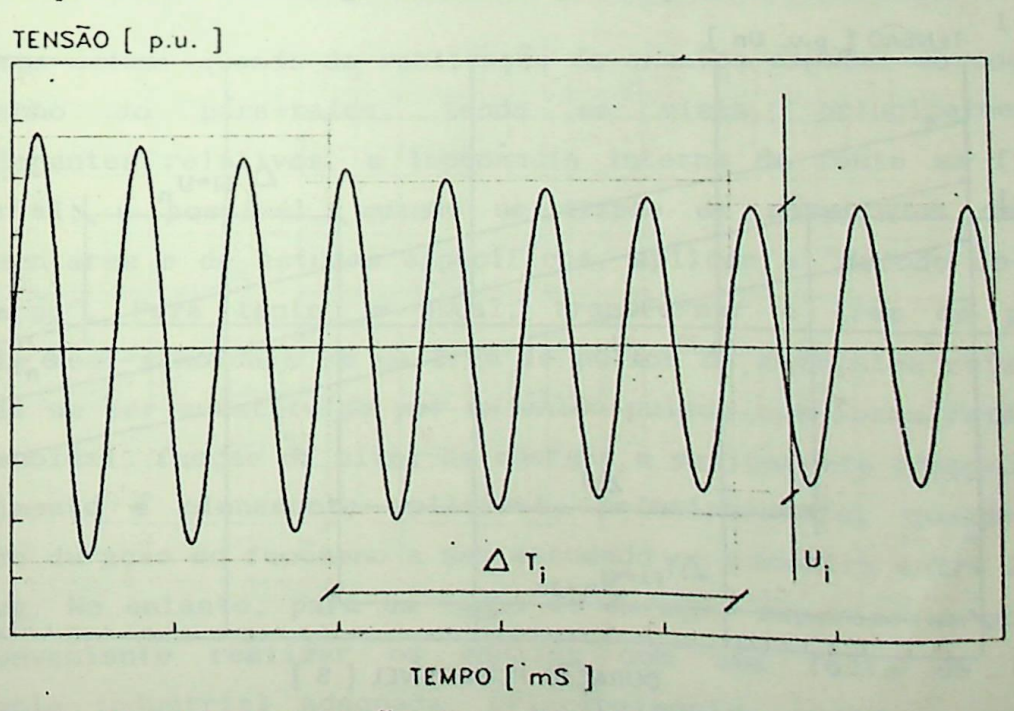


Figura II.3.40 - Discretização de um Perfil de Sobretensão Aplicado a um Pára-raios a Óxido Metálico[79]

Considera-se conveniente, ressaltar que, de um modo geral, discretizar o perfil de sobretensão em freqüência industrial, aplicado a um pára-raios, tem como principal objetivo, proporcionar, através do perfeito entendimento do fenômeno como um todo, o melhor aproveitamento da capacidade que estes pára-raios possuem em operar frente a estas condições de sobretensão.

Caso seja necessário, ou mesmo conveniente, é possível adotar, complementarmente, como definição para o *"Fator de Utilização em Freqüência Industrial [$F.U._{FI}$]"* a seguinte expressão:

$$F.U._{FI} = \frac{\Delta T_{FI \rightarrow U_n} + \Delta T_{FI \rightarrow U_{n-1}}}{\Delta T_{FI \rightarrow U_{n_{Max.}}}} \qquad (II.3.3.4.4)$$

onde:

$\Delta T_{FI \rightarrow U_n}$ = Intervalo de tempo de aplicação de U_n *[Segundos]*;

$\Delta T_{FI \rightarrow U_{n_{Max}}}$ = Máximo intervalo de tempo de aplicação de U_n *[Segundos]*; e

$\Delta T_{FI \rightarrow U_{n-1}}$ = Intervalo de tempo complementar Figura *II.3.41 [Segundos]*.

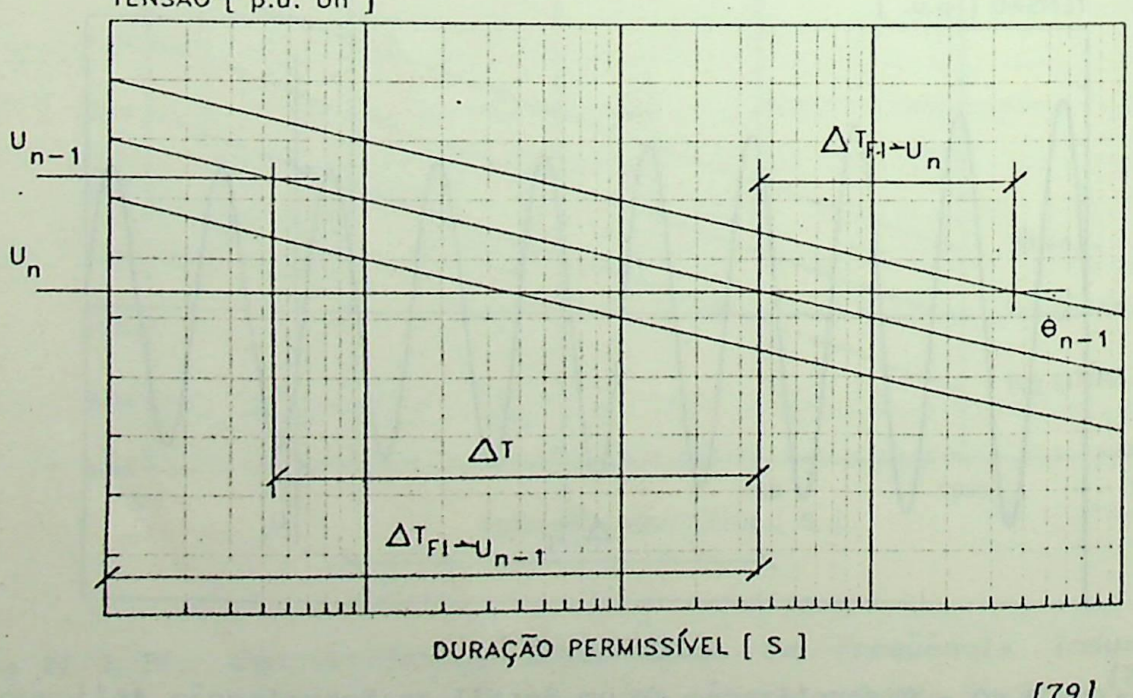


Figura II.3.41 - Definição do Intervalo de Tempo Complementar [79]

É óbvio que as expressões *(II.3.3.4.3)* e *(II.3.3.4.4)* partem do pressuposto que o fenômeno de absorção de energia é adiabático, fato que não é correto, mas que no entanto, implica em um resultado dotado de uma razoável margem de segurança.

b) - Sobretensões de média - alta amplitude:

Entende-se por sobretensões de média - alta amplitude, sobretensões prospectivas, medianamente superiores a tensão nominal do pára-raios, algo em torno de *1.2 p.u.* a *1.5 p.u.*.

Logo, em quaisquer estudos, tais como, ensaios ou simulações, é usual e necessário considerar, além do perfil das sobretensões prospectivas, o valor da impedância da fonte, responsável, em grande parte, pelos resultados obtidos. Deste modo, realizar ensaios, por implicar em utilizar uma fonte de tensão em freqüência industrial de baixa impedância interna, ou seja, elevada potência de curto circuito, se constitue em uma operação de custo, normalmente elevado, fato que, torna plenamente justificável o desenvolvimento e aplicação de modelos computacionais.

Nos casos acima, quando da realização de ensaios capazes de comprovar o desempenho do pára-raios, tendo em vista, principalmente, os condicionantes relativos, a impedância interna da fonte em freqüência industrial, é possível, quando se dispõe de resultados de ensaios complementares e de estudos específicos, aplicar o *"Método do Fator de Utilização"*. Para tanto, é usual, transformar o trem de pulsos de corrente semi-senoidais em um 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 equipamento disponível. Este procedimento é plenamente aplicável, principalmente, quando o tempo total de duração do fenômeno a ser estudado se encontra entre *200 mseg* e *500 mseg*. No entanto, para um tempo de duração superior ao acima, pode ser conveniente realizar os ensaios com uma fonte de tensão em freqüência industrial adequada, principalmente, quando os valores de

"Energia Absorvida" forem muito elevados.

Nota -

* - *Os valores suportáveis, por um pára-raios a óxido metálico em termos de sobretensão em freqüência industrial, podem ser ainda, apresentados, em por unidade da Máxima Tensão de Operação Contínua e, nestes casos, os limites definidos para sobretensões de baixa, média e alta amplitude são, normalmente, superiores aos acima discutidos.*

** - *Os limites de suportabilidade, em termos de sobretensões em freqüência industrial, de um pára-raios a óxido metálico, se encontram diretamente relacionados com a classe, a qual o mesmo pertence e, dentro desta classe, com o seu projeto térmico, bem como, com o projeto de seus resistores.*

→ *4. Comentários e Conclusões.*

Com respeito a correlação entre os modos e os limites de absorção de energia de um pára-raios a óxido metálico, os aspectos discutidos conduzem aos seguintes comentários e observações:

a]→ O Ensaio de Descarga de Linhas como tradicionalmente concebido, apesar de cobrir a maior parcela da faixa dos fenômenos que envolvem a *"Absorção de Energia"* por um pára-raios a óxido metálico possui limitações, principalmente no que tange a corrente de descarga, cujo valor máximo, conforme mostra a Figura *II.3.29*, atinge aproximadamente *1.5 kA*.

b]→ Devido a dissociação do fenômeno de descarga de linhas com os resultados observados nos estudos de sistemas em *"TNA"* ou *"EMTP"*, a execução de um ensaio denominado, *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, embora representativo do processo como um todo, se constitue em uma

idéia, principalmente para os leigos, aparentemente, vaga. Deste modo, considera-se adequado adotar, nestes casos, uma denominação alternativa para este ensaio, tal como, *"Ensaio para Verificação da Capacidade de Absorção de Energia - Padrão"*.

c]→ Existe ainda, uma razoável gama de solicitações que não são cobertas pelo *"Ensaio para Verificação da Capacidade de Absorção de Energia - Padrão"*, ou seja, *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, como fenômenos onde a corrente de descarga atinge valores superiores a *1.5 kA*, fato típico, por exemplo, de descargas de bancos de capacitores. Nestes casos, o procedimento adequado é realizar qualquer ensaio capaz de comprovar o desempenho do pára-raios frente a absorção de energia com o auxílio de um circuito a parâmetros concentrados e aplicar o *"Método do Fator de Utilização"*. Em termos das Normas *IEC - ABNT* e *ANSI - CSA*, isto implica em criar um novo ensaio e metodologia, denominado, a princípio, *"Ensaio para Verificação da Capacidade de Energia - Complementar"*.

d]→ Aplicar o *"Método do Fator de Utilização"* implica em utilizar as características, *"Corrente de descarga [I_D] - Tempo"*, mostrada na Figura *II.3.35* e *"Energia específica [kJ/kV] - Corrente de descarga [I_D]"*, mostrada na Figura *II.3.31* que devem, a princípio, ser obtidas junto aos fabricantes, sendo ainda, de suma importância, conseguir junto aos mesmos, subsídios, sobre qual foi o procedimento utilizado no seu levantamento.

e]→ De um modo geral, é possível afirmar que o *"Ensaio para Verificação da Capacidade de Energia - Complementar"*, ou seja, o *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, conforme tradicionalmente previsto, é plenamente dispensável, ao se determinar qual a *"Capacidade de Absorção de Energia"* de um pára-raios a óxido metálico. Os pontos que devem ser sempre verificados nestes casos são a *"Máxima Capacidade de Absorção de Energia"* e a *"Característica Corrente de Descarga [I_D] - Tempo"*. No entanto, a adoção plena desta posição, seguramente, deve criar muito mais confusão que o desejado, principalmente, no que tange ao problema da *"Energia Máxima*

Absorvida" por um pára-raios a óxido metálico e a equivalência entre os mesmos, bastando para tanto se reportar a Figura *II.3.30.*

O acompanhamento cuidadoso destes fatos implica que, de um modo geral,o *"Fenômeno de Absorção de Energia"* por um pára-raios a óxido metálico pode ser resumido em uma única e simples frase, usualmente, um dos pontos chaves da estratégia de todos os fabricantes de pára-raios.

"O ponto mais importante com respeito a Capacidade de Absorção de Energia por um pára-raios a óxido metálico é o Valor Máximo da mesma".

No entanto, considera-se fundamental o acréscimo do seguinte adendo:

", desde que, o Fator de Utilização de Corrente seja sempre inferior a unidade".

II.3.4 - CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DE UM PÁRA-RAIOS E A SUPORTABILIDADE FRENTE A SOBRETENSÕES EM FREQÜÊNCIA INDUSTRIAL

Uma das diferenças fundamentais entre os pára-raios com centelhadores série* e os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores é o fato dos resistores a óxido metálico utilizados na construção destes pára-raios, ao contrário dos utilizados na construção dos primeiros, geralmente, resistores a carboneto de silício, se encontrarem permanentemente energizados sob tensão fase terra do sistema.

** Nota -*

→ *Nos pára-raios com centelhadores série, praticamente, todo o espectro de tensão em freqüência industrial se encontra aplicado aos centelhadores e, deste modo, virtualmente, nenhuma, solicitação de*

origem térmica, ou mesmo, dielétrica é aplicada aos resistores principais do pára-raios.

Devido a este fato, é necessário que os resistores a óxido metálico, utilizados na construção de pára-raios sem centelhadores, sejam projetados tendo em vista toda a gama de tensões de serviço que possa vir a ocorrer nos sistemas aos quais estes pára-raios, se destinam.

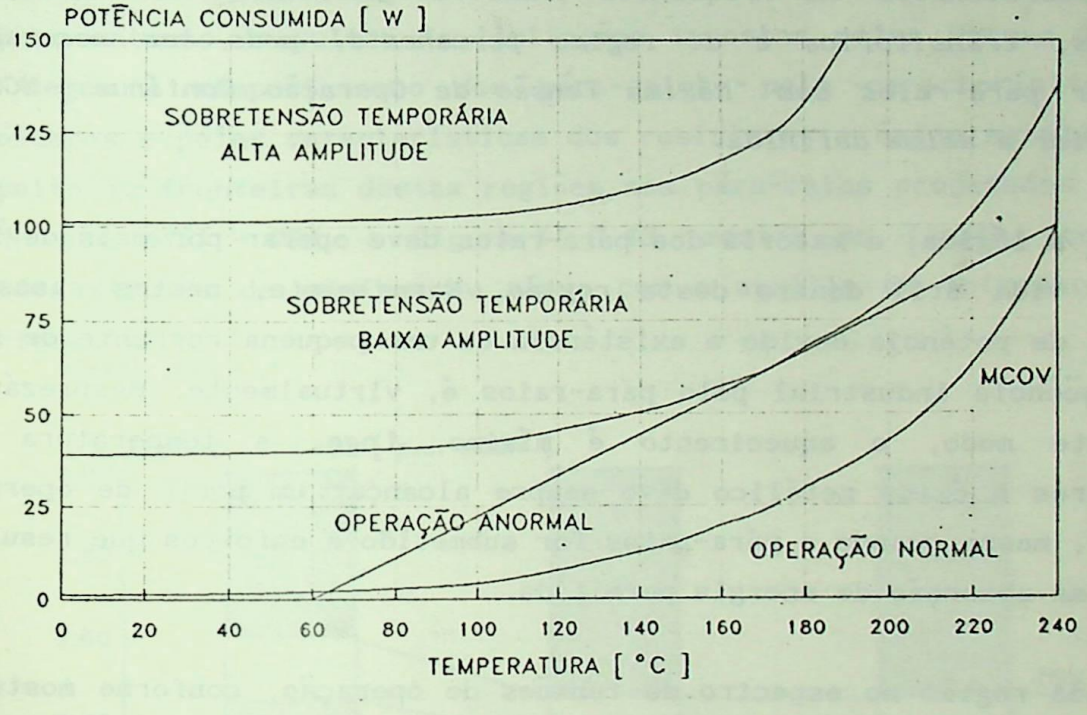


Figura II.3.42 - Espectro de Tensões de Operação de um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores[6]

II.3.4.1 - REGIÕES DE OPERAÇÃO TERMICAMENTE ESTÁVEIS

Conforme mostra a Figura *II.3.42* a gama de tensões de serviço aplicado a um pára-raios a óxido metálico resulta, para os mesmos, em 4 possíveis regiões de operação. A primeira área inclue todas as tensões de operação normais sendo limitada pela *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* do pára-raios. E, neste caso, para que os pára-raios venham a operar de

modo correto, 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 *.

** Nota -*

→ *Em sistemas fracamente aterrados ou isolados, devido ao elevado valor das sobretensões em freqüência industrial oriundas de faltas, em termos, transitórios e de regime permanente, pode ser necessário adotar pára-raios com "Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV", superior a acima definida.*

Segundo a lógica, a maioria dos pára-raios deve operar por mais de 99 % de sua vida útil dentro desta região. Normalmente, nestes casos, o consumo de potência devido a existência de uma pequena corrente de fuga em freqüência industrial pelo pára-raios é, virtualmente, desprezável, e, deste modo, o aquecimento é mínimo. Logo, 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 resultem na máxima absorção de energia permitida.

A segunda região no espectro de tensões de operação, conforme mostra a Figura *II.3.42*, inclue tensões de operação, consideradas 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 onde a operação é termicamente estável mas, nestes casos, a capacidade de absorção de energia do pára-raios é reduzida, e, de fato, na condição limite de tensão, usualmente, denominada de *"Tensão Limite de Estabilidade"*, é virtualmente nula.

** Nota -*

→ *É conveniente ressaltar que as curvas de potência consumida pelos*

resistores a óxido metálico para várias condições de tensão de operação são, virtualmente, paralelas.

Apesar da operação dentro desta região não resultar no fenômeno de avalanche térmica, ou seja, *"Thermal runaway"* a operação prolongada sob estas condições, não apresenta garantia nenhuma, haja vista o fato da capacidade de absorção de energia ser fortemente reduzida.

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, pela características dos invólucros e pelas características dos resistores a óxido metálico. Com respeito as fronteiras destas regiões nos pára-raios projetados segundo as Normas *ANSI - CSA*, a Figura *II.3.43*, mostra os limites comumente obtidos através de ensaios ou mesmo com o auxílio de informações dos fabricantes.

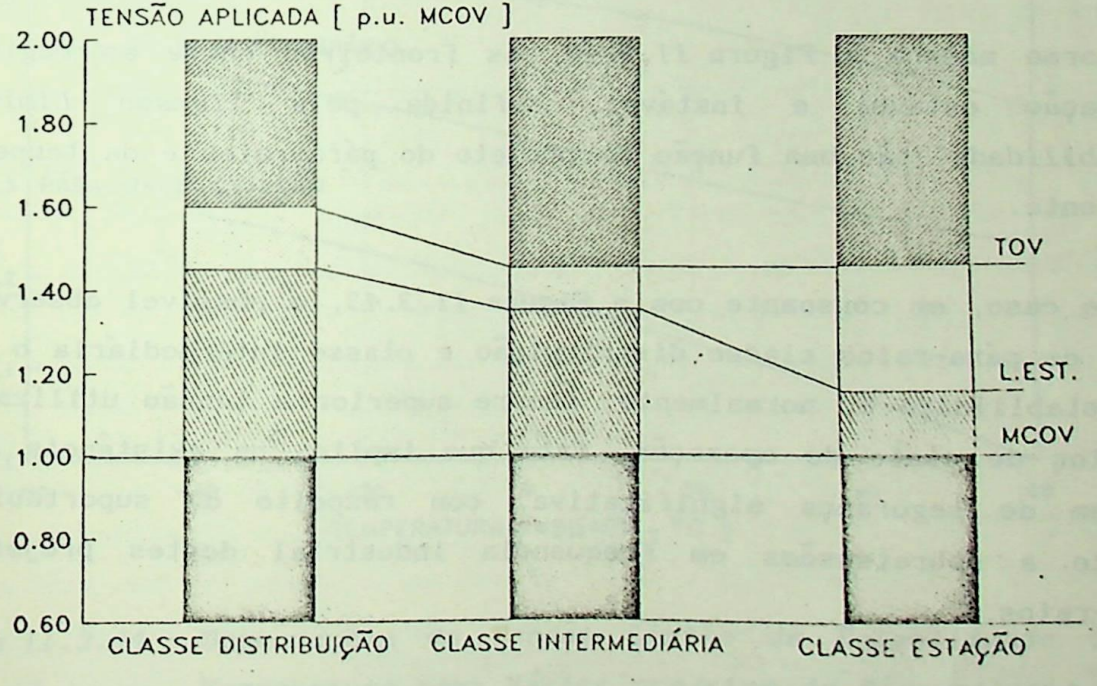


Figura II.3.43 - Relações entre as Quatro Regiões de Tensão de Operação para Vários projetos de Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores[6]

Conforme mostra a Figura *II.3.43*, os pára-raios projetados * para a classe de distribuição apresentam capacidade de suportar sobretensões em freqüência industrial superior a quaisquer pára-raios equivalentes pertencentes as demais classes, isto ressalta um ponto extremamente importante, pois, ao contrário da grande maioria dos casos, envolvendo pára-raios com centelhadores série, .nos sistemas de distribuição em média tensão, a substituição de um pára-raios classe distribuição por pára-raios classe estação, dotado de desempenho global, sem sombra de dúvida, superior, pode resultar em uma falha por especificação errada.

** Nota -*

→ *De modo geral, aumentar a suportabilidade de pára-raios a óxido metálico frente a sobretensões em freqüência industrial, significa, aumentar o número de resistores utilizados em sua construção, e, este fato, pode justificar, por exemplo, a existência de pára-raios a óxido metálico com centelhadores série.*

Conforme mostra a Figura *II.3.44*, as fronteiras entre as regiões de operação estável e instável, definida pela *"Tensão Limite de Estabilidade"* são uma função do projeto do pára-raios e da temperatura ambiente.

Neste caso, em consoante com a Figura *II.3.43*, é possível observar que para os pára-raios classe distribuição e classe intermediária o limite de estabilidade é, normalmente, sempre superior a tensão utilizada nos ensaios de ciclo de operação, fato que implica na existência de uma margem de segurança significativa, com respeito da suportabilidade frente a sobretensões em freqüência industrial destes projetos de pára-raios.

II.3.4.2 - REGIÕES DE OPERAÇÃO TERMICAMENTE INSTÁVEIS

A aplicação de quaisquer valores de tensão situados acima da *"Região de Tensão de Operação Anormal"*, ou seja, nas *."Regiões de Sobretensões*

Temporárias ou Sustentadas - TOV", resulta em um consumo de potência por parte dos resistores a óxido metálico superior a capacidade de dissipação total do pára-raios. Como o valor da potência consumida pelos resistores a óxido metálico é fortemente influenciado pela temperatura dos mesmos, o excesso de consumo de potência resulta no estabelecimento de um fenômeno cíclico, no qual, a temperatura cresce até valores, virtualmente, ilimitados, fato que efetivamente denota a existência de um processo de avalanche térmica, normalmente denominado, *"Thermal Runaway"*. Isto implica que, nestes casos, 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 durante todo este período seja, no máximo, igual a *"Temperatura Limite de Estabilidade"*.

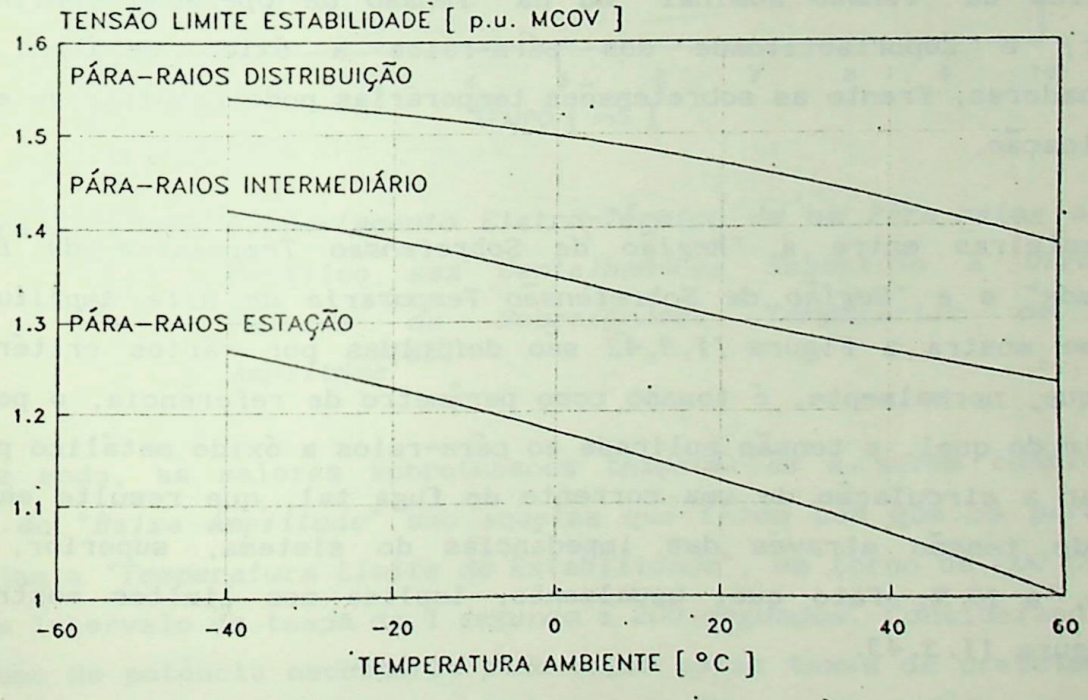


Figura II.3.44 - Dependência da Tensão Limite de Estabilidade com a Temperatura para Vários projetos de Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores[6]

Conforme mostra a Figura *II.3.41* a *"Região de Sobretensões Temporárias ou Sustentadas"*, para a maioria das classes de pára-raios, exceto para

os pára-raios classe estação, é superior a tensão utilizada nos ensios de ciclo de operação. Com respeito as condições que podem resultar, de modo não muito usual, na exposição dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores a estas sobretensões, as mais comuns são as descargas devido ao efeito da poluição em pára-raios multi-unidades, os contatos acidentais com condutores de tensão superior e a perda de terra sob condições de falta, acontecimentos raros na prática e que, no caso das falhas envolvendo pára-raios, adequadamente especificados, resultam em taxas de risco plenamente aceitáveis. Este fato, normalmente implica na idéia, usualmente, aceita de que em sistemas de distribuição em média tensão, a suportabilidade dos pára-raios frente as sobretensões temporárias não se constitui em um problema de maior magnitude. Em tese, esta afirmativa é, na grande maioria dos casos, razoável, porém, dependendo do tipo de aterramento do sistema e do critério adotado para a escolha da *"Tensão Nominal"* ou da *"Tensão de Operação Contínua"*, ignorar, a suportabilidade dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, frente as sobretensões temporárias pode resultar em erros de aplicação.

As fronteiras entre a *"Região de Sobretensão Temporária de Baixa Amplitude"* e a *"Região de Sobretensão Temporária de Alta Amplitude"*, conforme mostra a Figura *II.3.42* são definidas por vários critérios, sendo que, normalmente, é tomado como parâmetro de referência, o ponto, a partir do qual, a tensão aplicada ao pára-raios a óxido metálico passa a forçar a circulação de uma corrente de fuga tal, que resulte em uma queda de tensão através das impedâncias do sistema, superior, por exemplo, a *10 %*, fato que, usualmente, implica nos limites mostrados pela Figura *II.3.43*.

→ *Sobretensões Temporárias de Baixa Amplitude:*

Assumindo que, para a grande maioria dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, a *"Temperatura Limite de Estabilidade"*, fica em torno de *200°Celsius*, são consideradas *"Sobretensões Temporárias de Baixa Amplitude"* as sobretensões em freqüência industrial que resultam em um

aumento na temperatura de seus resistores a razão de taxas de crescimento situadas entre *200°C/s* e *1°C/s*.

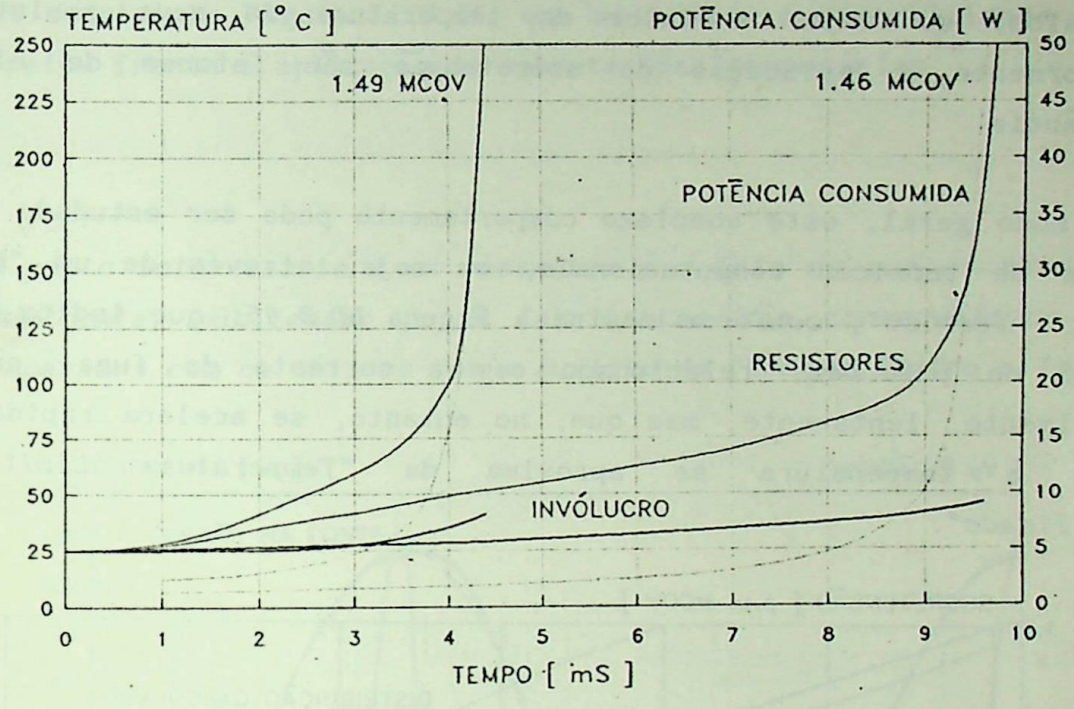


Figura II.3.45 - Comportamento Eletro-Térmico de um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores Submetido a Diferentes Valores de Sobretensões Temporárias de Baixa Amplitude[65]

Deste modo, 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°Celsius*, em um intervalo de tempo de *1 segundo* a *200 segundos*. Considerando que o consumo de potência necessário para impor estas taxas de crescimento de temperatura não é elevado, a corrente de fuga, sob estas condições, apresenta baixa amplitude, normalmente inferior a *1 Ampére* de crista, logo, as possíveis interações entre os pára-raios e os sistemas podem ser consideradas como desprezáveis, pois é, razoavelmente, óbvio que correntes desta magnitude não impõem quedas de tensão apreciáveis através das impedâncias em freqüência industrial do sistema. Nestes casos, o comportamento detalhado dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores se constitui em um fenômeno extremamente complexo, pois,

resulta da interação *"Eletro - Térmica"* de todos os componentes que constituem os mesmos, onde, ainda, a temperatura ambiente, bem como, a amplitude e forma de quaisquer impulsos de corrente descarregados pelo pára-raios, ou seja, o valor da temperatura de seus resistores, anteriormente a aplicação da sobretensão são fatores de elevada importância.

De um modo geral, este complexo comportamento pode ser estudado com o auxílio de técnicas computacionais, ou seja, através de um *"Modelo Eletro - Térmico"*, conforme mostra a Figura *II.3.45*, que indica que o consumo de potência, relacionado com a corrente de fuga, cresce, inicialmente, lentamente, mas que, no entanto, se acelera rapidamente quando a temperatura se aproxima da *"Temperatura Limite de Estabilidade"*.

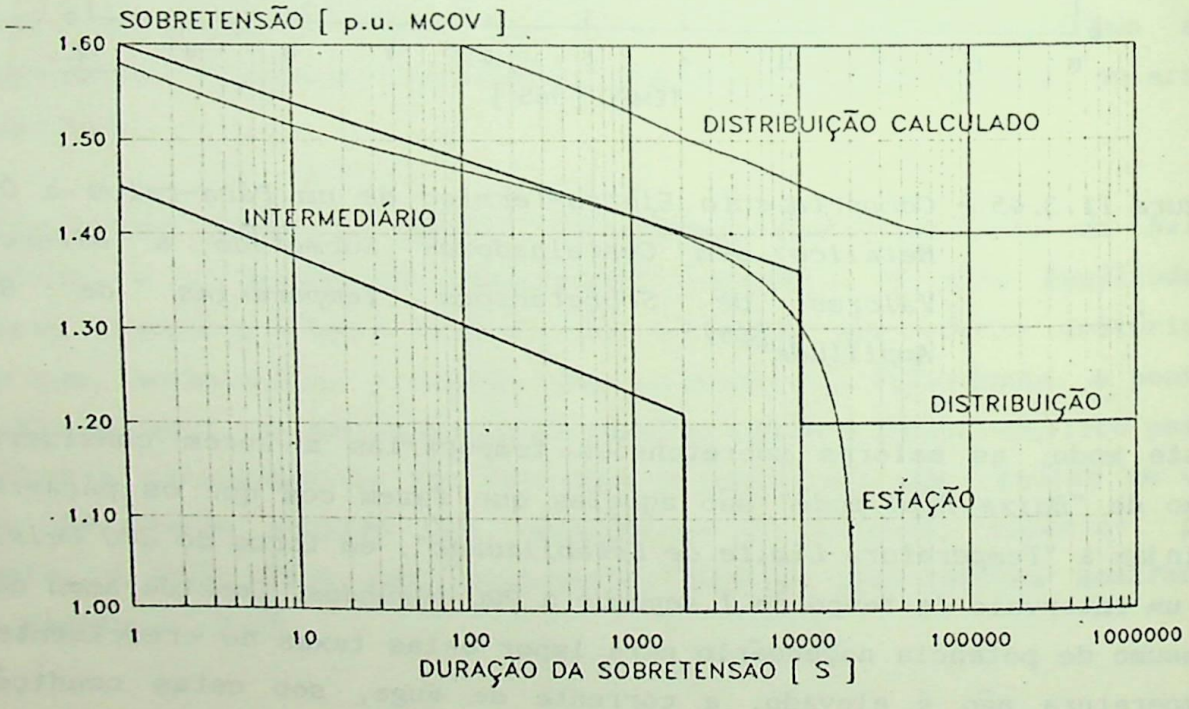


Figura II.3.46 - Suportabilidade Típica Frente a Sobretensões Temporárias de Baixa Amplitude dos um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores sob Temperatura Ambiente de 60°Celsius[6]

O comportamento dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores,

quando submetidos a sobretensões temporárias de baixa amplitude não é objeto de nenhuma das normas vigentes mas, normalmente, a maioria dos fabricantes publicam estas informações na forma de curvas, semelhantes as que constam da Figura *II.3.46*, que mostram a suportabilidade de seus pára-raios frente a aplicação de sobretensões temporárias *.

Nota -

*- *Um ponto interessante a se ressaltar é o fato de que os resultados, usualmente, publicados pelos fabricantes são conservativos quando comparados com os obtidos com o auxílio do "Modelo Eletro - Térmico".*

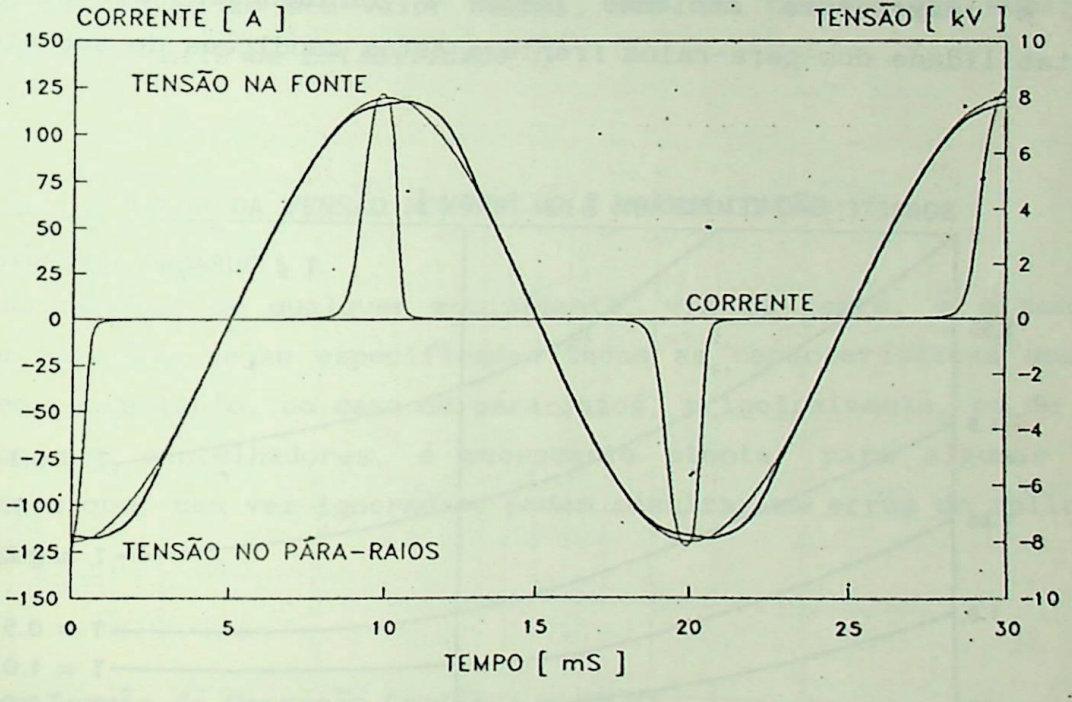


Figura II.3.47 - Formas de Corrente e Tensão Aplicada a um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores Submetido a uma Sobretensão Temporária de Amplitude Elevada[85]

→ *Sobretensões Temporárias de Amplitude Elevada:*

São consideradas *"Sobretensões Temporárias de Amplitude Elevada"* as sobretensões em freqüência industrial que resultam em uma corrente de

fuga, superior a *1 Ampére* de crista pois, normalmente, a partir deste ponto, a tensão aplicada ao pára-raios começa a sofrer distorções oriundas das quedas nas impedâncias do sistema e, devido a interação entre o pára-raios e o sistema, não é possível generalizar a suportabilidade dos pára-raios frente a estas sobretensões, deste modo, cada caso, necessita ser estudado individualmente, com o auxílio de programas digitais para a solução de transistórios eletromagnéticos.

A Figura *II.3.47* mostra as formas típicas de corrente, e correspondentes tensões da fonte e aplicada aos pára-raios, normalmente obtidas nestes estudos de transitórios eletromagnéticos. Nestes casos, a temperatura dos resistores a óxido metálico cresce sob taxas muito elevadas e, deste modo, a temperatura ambiente passa a influenciar muito pouco a suportabilidade dos pára-raios frente a estas condições de sobretensões.

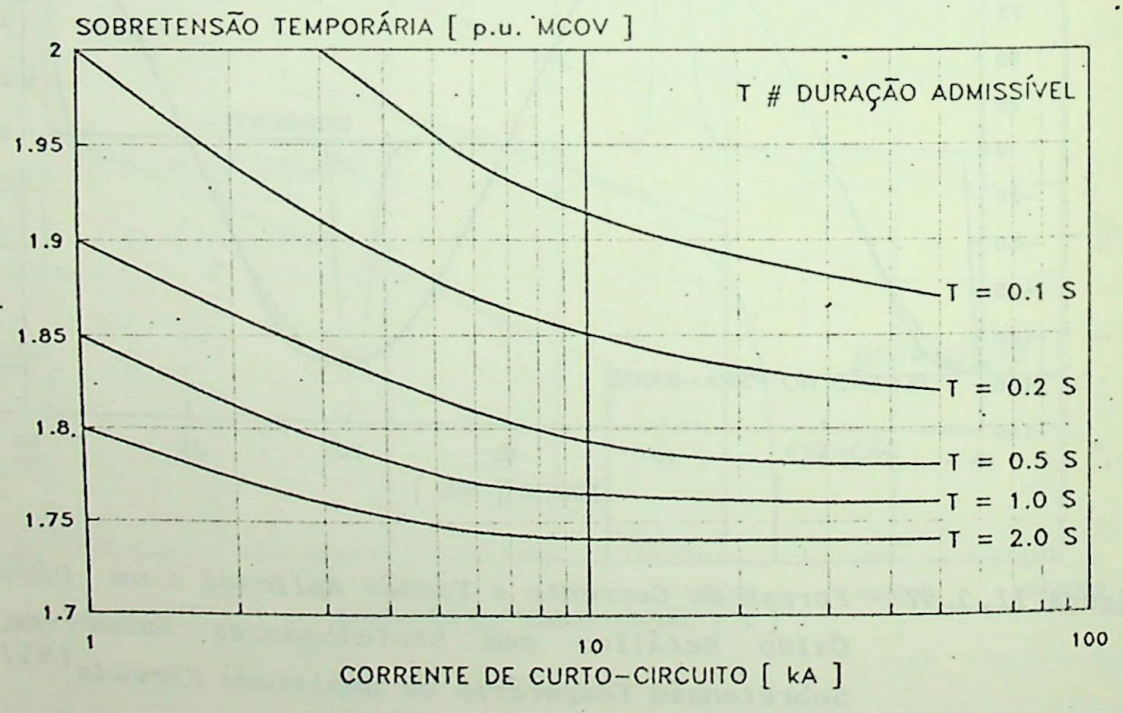


Figura II.3.48 - Máximo Intervalo de Aplicação das Sobretensões Temporárias de Amplitude Elevada a um Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores em Função da Tensão e da Impedância de Curto Circuito do Sistema [85]

Logo, 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.

A Figura *II.3.48* mostra a suportabilidade de um projeto típico de pára-raios classe estação, frente a *"Sobretensões Temporárias de Amplitude Elevada"*, em função da corrente de curto circuito do sistema. É interessante notar que, nestes casos, os modos de falha podem ser iniciados por choque térmico, ou seja, *"Thermal Cracking"*, ou por elevação de temperatura, tal que, o pára-raios venha a operar, após o retorno da tensão ao seu valor normal, sob uma temperatura superior a *"Temperatura Limite de Estabilidade"*.

II.3.4.3 - O VALOR DA TENSÃO NOMINAL E A NORMALIZAÇÃO

A tensão nominal de qualquer equipamento, via de regra, é o ponto de partida para que sejam especificadas todas as características nominais do mesmo, no entanto, no caso de pára-raios, principalmente, os de óxido metálico sem centelhadores, é necessário atentar para algumas sutis diferenças que, uma vez ignoradas, podem resultar em erros de aplicação, assim seja:

→ *Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV:*

A *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores é o maior valor de tensão em freqüência industrial que, aplicado ao pára-raios, resulta em comportamento termicamente estável, após um ensaio de ciclo de serviço padrão*.

* *Nota -*

→ *A "Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV" de um pára-raios a óxido*

metálico sem centelhadores é uma grandeza inerente ao seu projeto, e não deve ser confundida com a "Máxima Tensão de Operação Contínua do Sistema - SMCOV".

Na definição da *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores se encontra embutido o conceito de que estes equipamentos podem operar sob tensão igual ou inferior a este limite por um período de tempo indeterminado. Por outro lado, nesta definição, também se encontra implícito o fato de que estes pára-raios não são capazes de operar, de forma contínua, sob tensões superiores a *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, observação que deve ser encarada com reservas pois, conforme evidenciam a Tabela *II.30*, obtida de estudos realizados pela *Ontario Hydro*, e a Figura *II.3.44*, alguns projetos de pára-raios podem operar, sem danos, na faixa de tensão em freqüência industrial localizada entre a *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* e a *"Tensão Limite de Estabilidade"*. Em contrapartida, nestes casos, a capacidade de absorção de energia dos pára-raios apresenta limites inferiores aos nominais, fato, que os tornam mais susceptíveis a danos resultantes da descarga de correntes de origem atmosféricas ou de manobra.[6]

Portanto, de um modo geral, os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores podem operar sob tensões superiores a sua *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, desde que, esta operação não apresente carácter permanente. Isto implica que o valor definido pela *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* de um pára-raios a óxido metálico se encontra diretamente relacionado com as características de seu projeto ao invés de se constituir em um limite rígido de tensão suportável, fato que não ocorre, na maioria dos casos, com o valor definido pela *"Tensão Nominal"* de um pára-raios a carboneto de silício.

De modo geral, isto implica que o conceito de *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, é utilizado com o propósito de margens de segurança para tolerâncias de fabricação, envelhecimento, contingências de sistema e fatores ambientais extremos que, normalmente, não são sempre necessárias. Logo, os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores são,

usualmente, especificados com base no fato de que sua *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* é sempre superior a *"Máxima Tensão de Operação Contínua do Sistema - SMCOV"*, deste modo, as condições especiais que podem resultar que um número limitado destes pára-raios venham a operar sob condições de tensão ligeiramente superiores a *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, usualmente, não são consideradas, devido a presença de margens tão conservativas.*

** Nota -*

→ *Em sistemas efetivamente aterrados este tipo de consideração pode resultar em erros de aplicação, pois é necessário levar em conta a elevação de tensão devido a faltas.*

Definição do Projeto *	*Descrição do Projeto do Pára-raios*	*20°C Limite de Estabilidade [p.u.] MCOV* **	*40°C Limite de Estabilidade [p.u.] MCOV* **	*20°C Limite de Estabilidade [p.u.]* $V_{\Phi-T}$***
Projeto Real (Média)	*Estação*	1.12	1.08	1.19
	Distribuição	1.48	1.44	1.57
	Encapsulado	1.45	1.41	1.54
Projeto Segundo ANSI C62.11 1987	*Estação*	1.12	1.08	1.19
	Distribuição	1.37	1.34	1.45
	Encapsulado	1.28	1.25	1.36
Projeto Segundo IEC DRAFT 1987	*Estação*	1.12	1.08	1.19
	Distribuição	1.08	1.05	1.14
	Encapsulado	1.12	1.11	1.19

Tabela II.30 - Comparação entre as Margens de Projeto Previstas pelas Normas ANSI - CSA e IEC - ABNT

Notas -

**- "Projeto Segundo", significa "Modelo Computacional";*

***- Os pára-raios podem suportar esta tensão por um intervalo de tempo indeterminado desde que não seja solicitado por descarga prévia de corrente;*

****- Baseado em MCOV = 1.06* $U_{\phi-T}$

*****- Pára-raios Encapsulado - Borracha de Silicone ou EPDM*

→ *Tensão Nominal de Ciclo de Operação -* U_n :

A *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação -* U_n*"* de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores é um valor de tensão em freqüência industrial, determinado por norma, usualmente, superior a *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, que aplicado ao pára-raios, resulta, por um período de tempo determinado, em um comportamento considerado satisfatório.

Os ensaios de ciclo de operação, em pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, envolvem a aplicação de descargas de corrente de impulso, com os mesmos energizados por uma sobretensão em freqüência industrial, deste modo, estes ensaios, apresentam um elevado significado prático pois, asseguram o desempenho, satisfatório, dos pára-raios na presença de sobretensões resultantes de faltas fase - terra, de longe, a fonte mais comum de sobretensões em sistemas de distribuição em média tensão.

Embora exista uma correlação entre a *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação -* U_n*"* e a *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, variável, conforme o projeto de pára-raios, as Normas *ANSI - CSA* e *IEC - ABNT*, com respeito ao primeiro valor de tensão, apresentam definições e conceitos ligeiramente distintos.

As Normas *ANSI - CSA*, para pára-raios a óxido metálico, partem do pressuposto que a maioria dos sistemas de distribuição em média tensão são multi-aterrados, o que ocorre em, praticamente, quase todo o mercado norte - americano. Considerando que nestes sistemas as sobretensões em

freqüência industrial resultantes das faltas fase - terra, apresentam características mais consistentes que, em sistemas providos de outro tipo de aterramento, estas normas prevêem uma relação fixa, em torno de *1.17 p.u.*, entre a *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* e a *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* obtida, com base em uma série de resultados acumulados ao longo dos anos, em sistemas de distribuição que, uma vez, combinados com as tensões de sistema padronizadas por estas normas, resultaram nos valores mostrados na Tabela *II.31.**

* *Nota -*

→ *A estrutura de Tensões Nominais de Ciclo de Operação - U_n, conforme posto nas Normas ANSI - CSA, procura ainda facilitar, na maioria dos casos, a substituição direta dos pára-raios a carboneto de silício por seus equivalentes a óxido metálico.*

Considerando que a *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* e a *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* se encontram relacionadas por um coeficiente constante, normalmente, resultado do projeto adotado para o pára-raios, o ensaio , usualmente, denominado *"Ensaio de Ciclo Crítico"*, utilizado para determinar, por exemplo, o menor valor de uma destas tensões, automaticamente determina o menor valor da outra, mesmo que esta última, em particular, não seja utilizada como parâmetro.

No caso das Normas *ANSI - CSA* o *"Ensaio de Ciclo Crítico"* é o *"Ensaio de Ciclo de Operação"*, responsável pela definição dos valores mínimos da *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* e da *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, embora o valor da *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* não se constitua em um dos parâmetros utilizados no ensaio.

Segundo ainda este ponto de vista, no caso das Normas *IEC - ABNT*, o *"Ensaio de Cíclo Crítico"* é o *"Ensaio de Ciclo de Operação Combinado"* que, por sua vez, submete os pára-raios a *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* e a *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*.

Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n [kV]	Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV [kV]
3.00	2.55
6.00	5.10
9.00	7.65
10.00	8.40
12.00	10.20
15.00	12.70
18.00	15.30
21.00	17.00
24.00	19.50
27.00	22.00
30.00	24.40
36.00	29.00
39.00	31.50

Tabela II.31 - Estrutura Tensão Nominal - Máxima Tensão de Operação Contínua Segundo as Normas ANSI - CSA para Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores para Média Tensão.

As Normas *IEC - ABNT*, assumem a possibilidade de que não se utilize, nos sistemas da distribuição em média tensão, a prática de multi-aterramento. Deste modo, conforme mostra a Tabela *II.32* a estrutura de *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* adotada nestas normas, difere da adotada pelas Normas *ANSI - IEC*. Além disto, as Normas *IEC - ABNT* não prevêem, de modo formal, a existência de uma relação, normalizada, entre os valores da *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* e da *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* que, no entanto, acaba por ser definida pelo conjunto de ensaios e requisitos de

desempenho mínimos exigidos.

Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n		
Segundo - IEC	Faixa de Tensão [kV]	Degraus de Tensão [kV]
	3.00 → 30.00	1.00
	30.00 → 54.00	3.00
Segundo - ABNT	Faixa de Tensão [kV]	Degraus de Tensão [kV]
	3.00 → 12.00	1.50
	12.00 → 54.00	3.00

Tabela II.32 - Estrutura Tensão Nominal Segundo as Normas IEC - ABNT para Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores para Média Tensão.

De modo complementar, existem ainda duas diferenças apreciáveis entre as normas *ANSI - CSA* e *IEC - ABNT*. A primeira delas, diz respeito a *"Capacidade de Absorção de Energia, Frente a Descarga de Impulsos Atmosféricos"* e, segundo as Normas *ANSI - CSA* os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores devem permanecer energizados sob sua *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* durante os *20* minutos previstos para a realização da seqüência do *"Ensaio de Ciclo de Operação"*, que não possui paralelo no rol de ensaios previstos pelas Normas *IEC - ABNT*. Por sua vez, estas normas verificam a estabilidade térmica dos pára-raios, projetados segundo suas recomendações, através da aplicação da *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* por *10* segundos seguida pela aplicação da *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, imediatamente após a execução do *"Ensaio de Alta Corrente de Curta Duração"*, aparentemente, um procedimento mais próximo do que ocorre no campo.

Conforme mostra a Tabela *II.30* os pára-raios a óxido metálico sem

Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n [kV]	Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV [kV]
3.00	2.55
6.00	5.10
9.00	7.65
10.00	8.40
12.00	10.20
15.00	12.70
18.00	15.30
21.00	17.00
24.00	19.50
27.00	22.00
30.00	24.40
36.00	29.00
39.00	31.50

Tabela II.31 - Estrutura Tensão Nominal - Máxima Tensão de Operação Contínua Segundo as Normas ANSI - CSA para Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores para Média Tensão.

As Normas *IEC - ABNT*, assumem a possibilidade de que não se utilize, nos sistemas da distribuição em média tensão, a prática de multi-aterramento. Deste modo, conforme mostra a Tabela *II.32* a estrutura de *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* adotada nestas normas, difere da adotada pelas Normas *ANSI - IEC*. Além disto, as Normas *IEC - ABNT* não prevêem, de modo formal, a existência de uma relação, normalizada, entre os valores da *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* e da *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* que, no entanto, acaba por ser definida pelo conjunto de ensaios e requisitos de

desempenho mínimos exigidos.

Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n		
Segundo - IEC	Faixa de Tensão [kV]	Degraus de Tensão [kV]
	3.00 → 30.00	1.00
	30.00 → 54.00	3.00
Segundo - ABNT	Faixa de Tensão [kV]	Degraus de Tensão [kV]
	3.00 → 12.00	1.50
	12.00 → 54.00	3.00

Tabela II.32 - Estrutura Tensão Nominal Segundo as Normas IEC - ABNT para Pára-raios a Óxido Metálico sem Centelhadores para Média Tensão.

De modo complementar, existem ainda duas diferenças apreciáveis entre as normas *ANSI - CSA* e *IEC - ABNT*. A primeira delas, diz respeito a *"Capacidade de Absorção de Energia, Frente a Descarga de Impulsos Atmosféricos"* e, segundo as Normas *ANSI - CSA* os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores devem permanecer energizados sob sua *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* durante os *20* minutos previstos para a realização da seqüência do *"Ensaio de Ciclo de Operação"*, que não possui paralelo no rol de ensaios previstos pelas Normas *IEC - ABNT*. Por sua vez, estas normas verificam a estabilidade térmica dos pára-raios, projetados segundo suas recomendações, através da aplicação da *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"* por *10* segundos seguida pela aplicação da *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, imediatamente após a execução do *"Ensaio de Alta Corrente de Curta Duração"*, aparentemente, um procedimento mais próximo do que ocorre no campo.

Conforme mostra a Tabela *II.30* os pára-raios a óxido metálico sem

centelhadores, projetados segundo os requisitos de estabilidade térmica* propostos nas Normas *IEC - ABNT*, apresentam margens de segurança,** frente a solicitações a freqüência industrial, inferiores, as obtidas quando se adotam os mesmos requisitos propostos nas Normas *ANSI - CSA*.

Notas -

* *De um modo geral, os requisitos para o projeto de pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, segundo as Normas ANSI - CSA são distintos dos requisitos, segundo as Normas IEC - ABNT pois, são baseados em práticas, no caso, virtualmente, continentais, ou seja, América do Norte versus Europa e demais Continentes, originárias de experiências obtidas em mercados e situações totalmente diversas que, terminam por se refletir no perfil de solicitações impostos aos pára-raios. A adoção de qualquer destas práticas, ou seja, norma deve refletir, principalmente, o perfil de mercado e nível de exigência dos consumidores locais e, deste modo, discorrer sobre as vantagens ou desvantagens de qualquer dos procedimentos, sem se ater a características particulares de cada situação, pode se constituir em uma tarefa além de estéril, virtualmente, inócua.*

** *Alguns estudos, realizados com o auxílio de modelos computacionais, realizados pela Ontario Hydro tem demonstrado que as Normas ANSI - CSA resultam em projetos de pára-raios a óxido metálico sem centelhadores dotados de margens operacionais, em específico frente a sobretensões em freqüência industrial, mais conservativas do que os baseados nas Normas IEC - ABNT, deste modo, é esperado que, em campo, ao longo do tempo, os pára-raios projetados segundo as Normas IEC - ABNT venham a apresentar uma taxa de falhas, superior a apresentada pelos projetados segundo as Normas ANSI - CSA.*

A segunda diferença apreciável entre as Normas *ANSI - CSA* e *IEC - ABNT* se refere, a exemplo, do que se verifica com as normas para pára-raios a carboneto de silício, aos sistemas de classificação e seqüência de descargas de correntes utilizadas nos ensaios prescritos nas mesmas que

não são compatíveis, mesmo quando de projetos equivalentes, fato que, dependendo do caso, pode resultar problemas relativos a aplicação de pára-raios suspostamente semelhantes.

II.3.5 - CARACTERÍSTICAS DE PROTEÇÃO

Considerando que, normalmente, as principais solicitações incidentes sobre os pára-raios para sistemas em média tensão são de origem atmosférica, é possível determinar os níveis de proteção fornecidos por um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, através da resposta de seus resistores frente a descargas de correntes de amplitude elevada, ou seja, em última análise, pelo comportamento da tensão residual, definida, similarmente, aos pára-raios a carboneto de silício, conforme a seguir:

- *Tensão Residual:-* Tensão nos terminais do pára-raios, em resposta à correntes de descarga. A tensão residual é medida sob impulsos de corrente representativos de solicitações de origem atmosférica em todas as classes de pára-raios, e, sob correntes representativas de solicitações de manobra nos pára-raios classe intermediária e classe e estação*, objetivando, principalmente, o levantamento de dados de tensão para estudos relativos a capacidade de absorção de energia.

* *Nota -*

→ *De modo a manter a correlação, aparente, entre os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores e os pára-raios a carboneto de silício, optou-se por manter a divisão em classes de pára-raios segundo a proposta das Normas ANSI - IEC. Reconhece-se, no entanto que, no caso específico de pára-raios a óxido metálico sem centelhadores que as Normas IEC - ABNT são, aparentemente, superiores, no entanto, é conveniente ressaltar que esta tendência só poderá ser comprovada após*

o exaustivo estudo do desempenho a longo prazo dos pára-raios projetados segundo as diferentes normas.

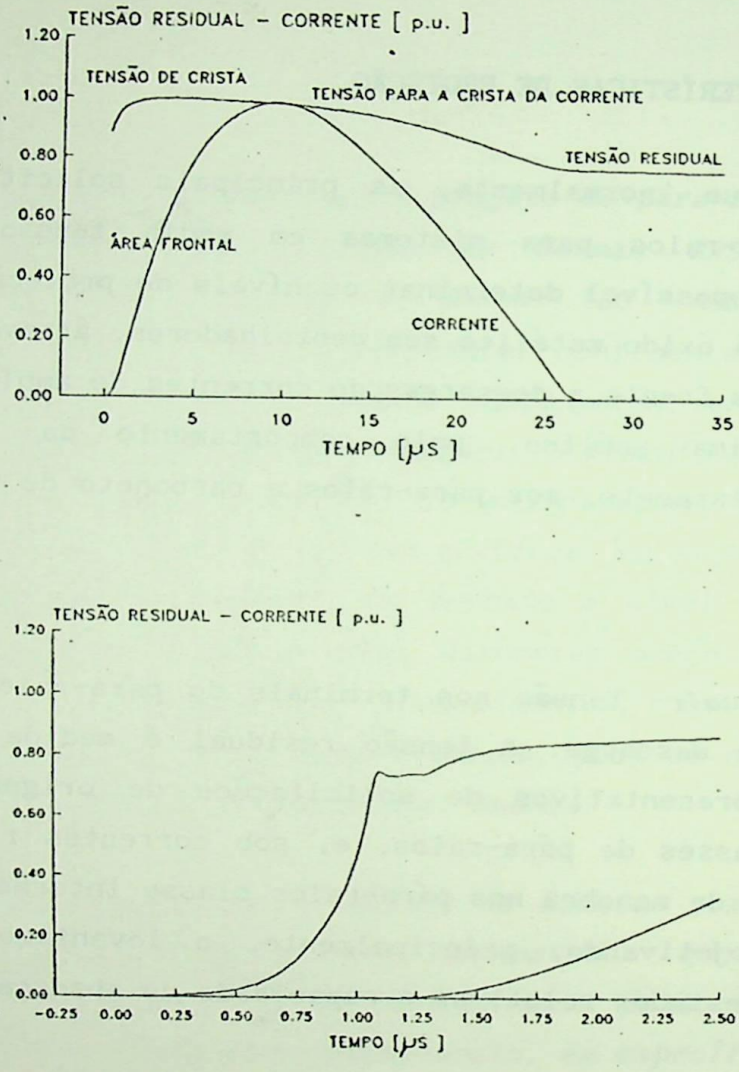


Figura II.3.49 - Resposta Típica de um Resistor a Óxido Metálico frente a uma Descarga de Corrente de Amplitude Elevada[86]
a)- Resposta Total; e
b)- Base de Tempo para Contemplar a Resposta Inicial.

Conforme mostra a Figura *II.3.49*, a resposta típica de um resistor a óxido metálico frente a uma descarga de corrente de amplitude elevada

apresenta 3 características bastante significativas, ou seja:

→ O *"Tempo Inicial de Crescimento da Tensão"*, ou seja, a *"Resposta para a Frente do Impulso"*;

→ O *"Maior Valor de Crista da Tensão"*, ou seja, a *"Tensão Residual"* como, técnicamente, conhecida; e

→ O *"Valor Instantâneo da Tensão para o Tempo de Crista da Corrente"*

Da análise destas características, é possível concluir que um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores para sistemas de distribuição em média tensão apresenta 2 níveis de proteção frente a descargas de corrente de amplitude elevada, obtidos com auxílio de ensaios específicos, conforme a seguir:

→ *Nível de Proteção na Frente do Impulso:*- Indicativo do desempenho do pára-raios, antes ou imediatamente após o início da descarga de corrente; e

→ *Tensão Residual Máxima:*- Indicativo do maior valor de tensão apresentado pelo pára-raios em resposta a descarga de corrente.

II.3.5.1 - ENSAIOS DE TENSÃO RESIDUAL

Os ensaios de tensão residual são realizados, de modo, a determinar a característica tensão residual versus corrente de descarga de um pára-raios e, normalmente, podem ser realizados no pára-raios completo ou em uma seção proporcional representativa. No caso de se fazer uso de uma seção proporcional representativa, a tensão residual do pára-raios é obtida multiplicando-se os resultados obtidos no ensaio, que, em específico, é realizado em um modelo reduzido, pelo fator de proporcionalidade, que, neste caso, é definido pelo quociente entre a

*"Tensão de Referência - U_{Ref}"** do pára-raios completo e da seção proporcional, e que deve ser obtido junto ao fabricante.

* *Nota -*

→ *A Tensão de Referência - U_{Ref} é o valor de tensão que, uma vez aplicado ao pára-raios resulta na Corrente de Referência - I_{Ref} que, por sua vez, é o valor de crista de corrente em freqüência industrial a partir do qual, o efeito capacitivo dos resistores a óxido metálico passa a ser desprezável. Dependendo da classe do pára-raios e de sua tensão nominal a Corrente de Referência - I_{Ref} fica entre 1 mA e 20 mA para pára-raios de uma coluna.*

A *"Corrente de Referência - I_{Ref}"* e, por conseguinte, a *"Tensão de Referência - U_{Ref}"* por se constituirem em parâmetros e definirem uma filosofia de projeto, são valores de difícil obtenção junto aos fabricantes de pára-raios.

Com respeito aos pára-raios utilizados nos sistemas de distribuição em média tensão, o ensaio tensão residual mais significativo é o que determina a resposta destes pára-raios, frente a correntes de impulso de origem atmosférica. Já os ensaios de tensão residual frente a correntes de impulso de manobra possuem, virtualmente, pouco significado prático, pois se destinam, normalmente, ao levantamento de dados relativos ao desempenho dos pára-raios frente a fenômenos que envolvam absorção de energia, que neste nível de tensão são extremamente raros.

II.3.5.1.1 - TENSÃO RESIDUAL SOB IMPULSO ATMOSFÉRICO NORMALIZADO

Neste ensaio, são aplicados impulsos de corrente, com forma normalizada, normalmente, *8 x 20 μs*, e polaridade negativa, haja vista, que a maioria das descargas atmosféricas possuem esta polaridade.

As Normas *IEC - ABNT*, estabelecem que o pára-raios deve ser submetido a

impulsos de corrente com amplitude de *0.50 p.u.*, *1.0 p.u.* e *2.0 p.u.* da corrente de descarga nominal, sendo que o valor de tensão residual, relativo à corrente de descarga nominal, não deve vir a ser superior ao máximo especificado.

Já a Norma *ANSI*, estabelece que o pára-raios deve ser submetido a impulsos de corrente com amplitude de *1.5 kA*, *3 kA*, *5 kA*, *10 kA* e *20 kA*. Por sua vez, a Norma *CSA*, especifica as mesmas amplitudes de corrente para os pára-raios classe de distribuição, porém, para os pára-raios classe estação e intermediária, passa a especificar *5 kA*, *10 kA*, *20 kA* e *40 kA*. As tensões residuais obtidas, em ambos os casos, devem ser publicadas e objeto de garantia por parte dos fabricantes.

Uma vez adotadas as tradicionais técnicas de medidas em alta tensão, o valor de crista da tensão obtida de um *"Ensaio de Tensão Residual"*, leva em conta o efeito resistivo, que se deseja medir, bem como, o efeito de qualquer ramo indutivo, inclusive o relativo aos próprios resistores, que, inadvertidamente, possa ser incluído no circuito de ensaio. Haja vista, que nos circuitos usualmente utilizados para a realização deste ensaio, o efeito da indutância parasita é dificilmente eliminado, se incorre em uma série de erros de medida, que dependendo do enfoque podem ser considerados como benéficos pois, não é usual computar nos *"Estudos de Transitórios"* os efeitos das indutâncias parasitas existentes entre os pára-raios e o equipamento protegido, que acaba por resultar em uma tensão residual superior a tensão que os resistores a óxido metálico realmente apresentam nesta região de corrente de descarga, fato que, em tese, pode contribuir para a utilização conservativa dos pára-raios.*

* *Nota -*

→ *No caso de ensaios ou de estudos onde se faz uso de correntes de descarga com tempo até a crista superior a 8 μs, o efeito relativo a queda de tensão nas indutâncias parasistas do circuito de ensaio e medição é, usualmente, considerada como desprezável. Por outro lado, quando se faz uso de correntes de descarga com tempos até a crista*

situados entre 1 μs a 8 μs, existem razoáveis evidências que demonstram que as quedas de tensão na indutância parasita dos resistores a óxido metálico, não são tão significativas quanto o são para resistores a carboneto de silício. Nestes casos, é recomendado e, usual, considerar como adequado para a "Tensão Residual Máxima" de um pára-raios, os valores de tensão residual para correntes com forma padronizada 8 x 20 μs publicados pelos fabricantes, bastando para tanto, adotar o valor da tensão residual correspondente ao nível de corrente imediatamente superior a corrente de descarga prevista, ou alternativamente, o resultado de uma interpolação linear entre as tensões residuais para valores corrente de descarga imediatamente inferior e superior a prevista.

II.3.5.1.2 - TENSÃO RESIDUAL PARA IMPULSOS COM FRENTE ÍNGRIME

Considerando que a queda de tensão resultante da descarga de correntes, representativas de impulsos atmosféricos, através das indutâncias parasitas dos resistores a óxido metálico e do circuito de ensaio, bem como, a tensão induzida no ramo de medição, estas duas últimas, fontes de erro,* na determinação do valor da tensão residual, são fortemente dependentes da taxa de crescimento da corrente, as normas recomendam realizar um ensaio para determinar o valor da tensão residual sob correntes de impulso íngrimes, ou seja, em última análise, o *"Nível de Proteção na Frente do Impulso"*. [15-86]

* *Nota -*

→ *Considera-se, novamente, adequado ressaltar que, eliminar sumariamente os erros de medida assim introduzidos, sem adotar providências complementares durante a execução de Estudos de Transitórios pode resultar na obtenção de tensões residuais, inferiores as reais. Deste modo, considera-se conveniente manter os arranjos em termos de circuitos de ensaio e sistemas de medida conforme descritos nas normas atuais.*

O ensaio utilizado para determinar a resposta dos resistores a óxido metálico frente a impulsos de corrente íngrimes, ou seja, impulsos de corrente com tempo até a crista inferior a *8 μs*, segundo as Normas *IEC - ABNT*, consta da aplicação de *1* impulso de corrente com polaridade negativa, haja vista, que a maioria das descargas atmosféricas possuem esta polaridade, tempo até a crista entre *0.90 μs* e *1.10 μs*, e tempo até o meio valor, na cauda, não superior a *20 μs* em *3* resistores ou seções proporcionais representativas.

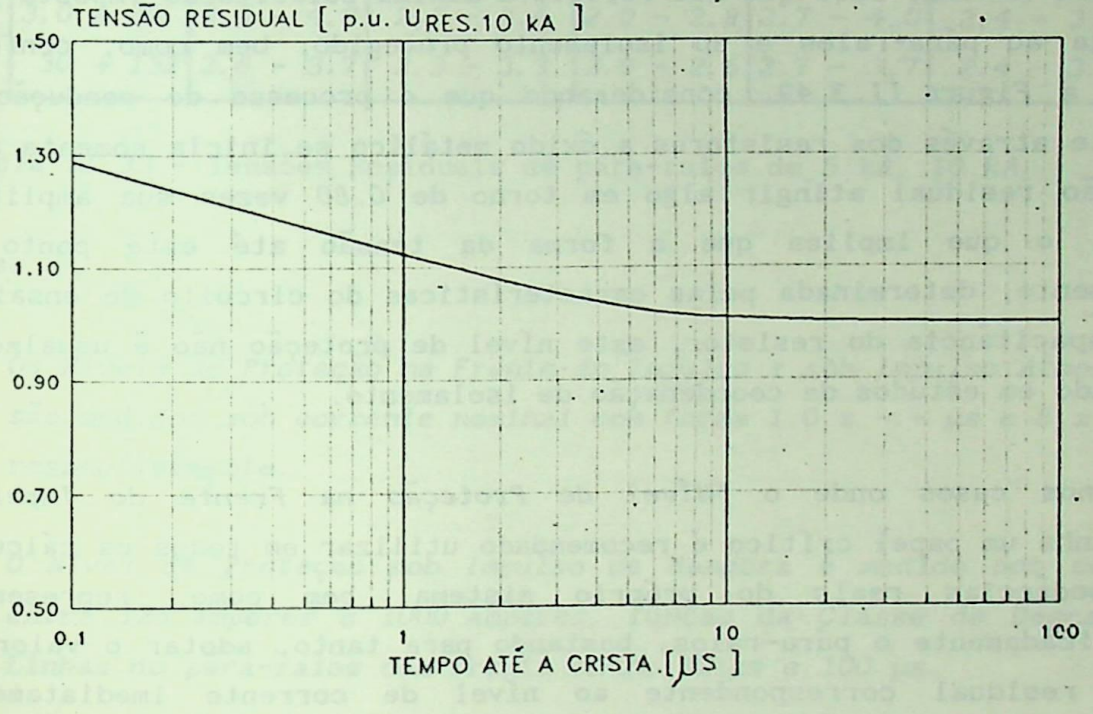


Figura II.3.50 - Resposta Típica de um Resistor a Óxido Metálico frente a Descargas de Corrente de Amplitude Constante e Taxa de Crescimento Variável [64]

Segundo as Normas *ANSI - CSA* o ensaio para determinar, a resposta dos resistores a óxido metálico frente a impulsos de corrente íngrimes, consta da aplicação de *3* impulsos de corrente de mesma amplitude, tempo até a crista de *1 μs*, *2 μs* e *8 μs* e, polaridade negativa. Os pares tensão residual, tempo até a crista da corrente são, lançados, usualmente, em papel mono-log, e o conjunto de pontos, assim obtidos, formam a *"Característica Tensão Residual versus Tempo de Crista da Corrente"*, conforme mostra a Figura *II.3.50*, que é extrapolada até o tempo de crista de *0.50 μs*, fato que vem a definir o *"Nível de Proteção*

na Frente do Impulso", normalmente, publicado pelos a fabricantes.

No entanto, considerando que o tempo de crista da corrente de descarga é tomado como sendo igual a *1.25* vezes o tempo necessário para a corrente variar de *0.10* a *0.90* vezes a sua amplitude máxima, fato que implica, em assumir como representativo o valor médio entre a alta taxa de crescimento de corrente existente entre *0.10* e *0.80* vezes a amplitude máxima e baixa taxa de crescimento existente entre *0.80* e *0.90* vezes a amplitude máxima, fato que não reflete a máxima solicitação imposta pela descarga ao pára-raios e ao isolamento protegido, bem como, conforme mostra a Figura *II.3.49*, considerando que o processo de condução de corrente através dos resistores a óxido metálico se inicia somente após a tensão residual atingir algo em torno de *0.80* vezes sua amplitude máxima, o que implica que a forma da tensão até este ponto é, basicamente, determinada pelas características do circuito de ensaio e pela capacitância do resistor, este nível de proteção não é usualmente utilizado em estudos de coordenação de isolamento.

Logo, nos casos onde o *"Nível de Proteção na Frente do Impulso"* desempenha um papel crítico é recomendado utilizar em todos os cálculos as impedâncias reais do próprio sistema, bem como, representar simplificadamente o pára-raios, bastando para tanto, adotar o valor da tensão residual correspondente ao nível de corrente imediatamente superior a corrente de descarga prevista, ou alternativamente, o resultado de uma interpolação linear entre as tensões residuais para valores de corrente de descarga imediatamente inferior e superior a prevista. Quanto a taxa de crescimento da tensão residual é usual adotar, como representativa, a maior taxa de crescimento prevista, e neste caso é considerada a possibilidade de que ocorram descargas diretas e indiretas.

II.3.5.2 - CARACTERÍSTICAS PROTETIVAS PUBLICADAS

Com respeito as características protetivas, publicadas, o tratamento expresso em Normas é bastante conflitante. No caso específico do Brasil,

a Norma *ABNT*, segue a filosofia expressa na Norma *IEC*, deste modo, os níveis de proteção publicados, com raríssimas excessões, são os valores padronizados, para tensão residual, mostrados na Tabela *II.33*.

Característica Protetiva (kV - Pico em p.u. Un) *,**					
U_n *** (k V)	*Pára-raios 10 kA*			*Pára-raios 5 kA*	
	Frente do Impulso	*Atmosférico*	*Manobra*	*Frente do Impulso*	*Atmosférico*
→ 3.0	*-.-*	*-.-*	*-.-*	*2.7 - 4.0*	*2.4 - 3.6*
3.0 → 30	*2.6 - 4.0*	*2.3 - 3.6*	*2.0 - 2.9*	*2.7 - 4.0*	*2.4 - 3.6*
30 → 132	*2.6 - 3.7*	*2.3 - 3.3*	*2.0 - 2.6*	*2.7 - 3.7*	*2.4 - 3.3*

Tabela II.33 - Tensões Residuais de pára-raios de *5 kA, 10 kA*

Notas -

* *Os Níveis de Proteção na Frente do Impulso e sob Impulso Atmosférico são medidos sob corrente nominal com forma 1.0 x -.- µs e 8 x 20 µs, respectivamente.*

** *O Nível de Proteção sob Impulso de Manobra é medido sob corrente entre 125 ampéres e 1000 ampéres, função da Classe de Descarga de Linhas do pára-raios com frente entre 30 µs e 100 µs.*

*** *A tensão nominal máxima dos pára-raios para corrente de descarga de 5 kA é de 39 kV.*

Já as Normas *ANSI - CSA*, optam por realizar, periodicamente, uma exaustiva pesquisa no universo dos pára-raios produzidos, e do conjunto de dados coletados, é possível obter uma série de tabelas, relativas aos níveis de proteção máximo e mínimo, encontrados nos pára-raios produzidos no mercado. De modo geral, os valores máximos publicados, são utilizados de modo a estabelecer qual a real possibilidade de se utilizar um pára-raios de uma determinada tensão nominal, e os valores mínimos devem ser interpretados como os valores, mais otimistas possíveis, para as margens de proteção.

Característica Protetiva (kV - Pico)						
U_n (kV)	Resposta na Frente do Impulso	Tensão Residual Corrente 8 x 20 µs				
	Crista** 0.50 µs	1.5 kA	3.0 kA	5.0 kA	10.0 kA	20.0 kA
3.0	10.6-11.2*	8.3- 9.2*	8.7	9.2-10.2*	9.9-11.0*	11.1-12.7*
6.0	21.2-22.3*	16.6-18.5*	17.4	18.4-20.3*	19.8-22.0*	22.2-25.3*
9.0	31.8-33.6*	24.9-27.7*	26.1	27.6-30.5*	29.7-33.0*	33.3-38.0*
12.0	42.4-44.7*	33.2-39.0	34.8	36.8-43.0	39.6-49.5	44.4-54.0
15.0	53.0-55.8*	41.5-46.1*	43.5	46.0-50.7*	49.5-58.0	55.5-63.5
18.0	63.6-71.7	49.8-58.5	52.2	55.2-64.6	59.4-71.3	66.6-86.2
21.0	74.2-83.9*	58.1-66.0	60.9	64.4-71.0*	69.3-82.5	77.7-1020
24.0	84.8-89.2*	66.4-76.0	69.6	73.6-82.5	79.2-96.0	88.8-105
27.0	95.9-110	74.7-90.0	78.3	82.8-99.7	89.1-110	99.9-133
30.0	111.2*	91.0-92.9	-.-	97.0-101.5*	110-113	125-126*

Tabela II.34 - Característica Protetiva dos Pára-raios Distribuição

Notas -

* Dados relativos a pára-raios a óxido metálico sem centelhadores produzidos e comercializados no Brasil pela Delmar;

** A Resposta na Frente do Impulso é a máxima tensão residual para um impulso de corrente nominal que provoca a crista de tensão em 0.50 µs.

Seguindo os preceitos das Normas *ANSI - IEC* os dados mostrados nas Tabelas *II.34* a *II.38*, relativos as características de proteção mínima e máxima dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, foram retirados de *Catálogos Técnicos* publicados por seus fabricantes em específico, *Delmar, Joslyn, McGraw Edison, Ohio Brass, General Electric, ASEA, Hitachi*, portanto, são representativos dos resultados passíveis de serem obtidos no caso dos pára-raios classe distribuição e classe

estação comercializados no mercado brasileiro, norte - americano e canadense, respectivamente.

Característica Protetiva (kV - Pico)						
U_n (kV)	Resposta na Frente do Impulso	Tensão Residual Corrente 8 x 20 µs				
	Crista 0.50 µs	1.5 kA	3.0 kA	5.0 kA	10.0 kA	20.0 kA
3.0	13.5- 14.0	9.7-10.0	10.5	10.9-11.0	12.0	13.7-14.0
6.0	25.0- 25.5	18.2-19.0	19.5-20.0	20.5-21.0	22.0-22.5	25.7-26.5
9.0	33.5- 39.0	24.0-28.0	25.5-30.0	27.0-32.0	29.5-35.0	34.5-38.0
12.0	45.0- 54.0	32.0-39.0	34.0-43.0	36.0-46.0	39.5-49.5	46.0-54.0
15.0	56.0- 64.0	40.4-46.0	43.0-50.0	45.5-54.0	50.0-58.0	57.0-63.5
18.0	66.5- 72.0	48.0-52.0	51.0-57.0	54.0-61.0	59.0-66.0	68.5-72.5
21.0	74.5- 90.0	53.0-66.0	57.0-71.0	60.0-77.0	65.0-82.5	76.0-91.0
24.0	86.0-100.0	62.0-72.0	65.5-79.0	69.5-85.0	76.0-91.0	88.5-99.0
27.0	97.0-109.0	70.0-79.0	74.0-85.0	78.5-92.0	86.0-99.0	100-109
30.0	107.5-124.0	77.0-91.0	82.0-99.0	87.0-105	95.0-113	106-125
36.0	127.5-145.0	92.0-104	97.5-114	103-122	113-132	131-145

Tabela II.35 - Característica Protetiva dos Pára-raios Distribuição Serviço Pesado

Característica Protetiva (kV - Pico)						
U_n (kV)	Resposta na Frente do Impulso	Tensão Residual Corrente 8 x 20 µs				
	Crista 0.50 µs	1.5 kA	3.0 kA	5.0 kA	10.0 kA	20.0 kA
9.0	27.0-27.6	20.4-21.2	21.9	22.4-22.8	24.0	26.6-27.0
12.0	36.0	28.3	29.3	30.4	32.0	35.5
15.0	45.0	35.4	36.6	38.0	40.0	44.3
18.0	54.0- 55.1	40.7-42.5	43.9	44.7-45.6	47.8-48.0	53.2-53.7
21.0	63.0	49.6	51.2	53.2	56.0	62.0
24.0	72.0	56.7	58.5	60.8	64.0	70.9
27.0	81.0-83.5	61.4-63.7	65.8	67.4-68.4	72.0	79.8-80.9

Tabela I.2.36 - Característica Protetiva dos Pára-raios Distribuição Tipo *"Riser Pole"*

Os pára-raios distribuição tipo *"Riser Poles"* são pára-raios especialmente desenvolvidos para proteger as junções linha aérea - cabos de potência e, de modo a cumprirem esta tarefa, apresentam níveis de proteção inferiores aos pára-raios classe distribuição padrão, bem como, são capazes de suportar as solicitações impostas pelas manobras que envolvam os cabos subterrâneos. Estes pára-raios também são fabricados em carboneto de silício porém, os a óxido metálico sem centelhadores apresentam um comportamento superior, principalmente quando lances de cabos de elevado comprimento se encontram envolvidos. Uma solução alternativa é utilizar nestes casos, pára-raios classe intermediária ou classe estação, porém o custo desta solução é, via de regra, superior.

Característica Protetiva (kV - Pico) *						
U_n (kV)	Resposta na Frente do Impulso	Tensão Residual · Corrente 8 x 20 µs				
	Crista 0.50 µs	1.5 kA	5.0 kA	10.0 kA	20.0 kA	1000 A **
12.0	48.0	34.1	37.5	41.2	45.3	32.7
15.0	58.0	41.0	45.0	49.5	54.5	39.4
18.0	63.0	45.2	49.7	54.6	60.1	43.4
21.0	86.0	61.5	67.6	74.3	81.7	59.0
24.0	96.0	68.3	75.1	82.5	90.8	65.6
27.0	100.0	71.7	78.1	85.8	94.4	68.3
30.0	109.0	77.5	85.2	93.6	103.0	74.4
33.0	124.0	88.5	97.2	106.8	117.5	85.6
36.0	134.0	95.3	104.7	115.0	126.5	91.5
39.0	153.0	109.3	120.1	132.0	145.2	104.9

Tabela II.37 - Característica Protetiva dos Pára-raios Classe Intermediária

Notas -

** Característica relativa aos Pára-raios Tipo AZF - McGraw Edison;*

*** Obtida com 1000 Ampéres com forma 150 x 300 µs.*

Os valores de *"Tensão Residual"* mostrados nas Tabelas *II.34* a *II.38*,

permitem a construção de características protetivas mínima e máxima de cunho tipicamente orientativo, úteis na execução de estudos preliminares. Quando de estudos definitivos é recomendado que sejam adotadas as características dos pára-raios que se pretende instalar no sistema, que, obviamente, devem ser fornecidas por seus fabricantes.

Convém ressaltar que, algumas tabelas, principalmente, a Tabela *II.37*, se encontram, em parte, incompletas pois, dentro dos *"Catálogos"* analizados não foram encontrados dados em quantidade suficiente. Com respeito a Tabela *II.34* foram utilizados dados de pára-raios para instalação direta em cubículos tipo *"Pad - Mount"*, típicos de instalações subterrâneas, extremamente, comuns nos Estados Unidos e Canadá.

Característica Protetiva (kV - Pico)						
U_n (kV)	*Resposta na Frente do Impulso*	*Tensão Residual* *Corrente 8 x 20 μs*				
	Crista 0.50 μs	*1.5 kA*	*5.0 kA*	*10.0 kA*	*20.0 kA*	*1000 A* *
3.0	9.1- 9.5	6.5- 6.9	7.0- 7.5	7.5- 8.5	8.5- 9.5	6.3- 6.5
6.0	17.9-18.5	13.0-13.6	14.0-15.0	15.0-17.0	17.0-19.0	12.4-13.0
9.0	26.6-28.0	19.5-20.2	21.0-22.6	23.0-25.0	25.0-29.0	18.4-19.0
12.0	35.5-37.0	26.0-26.9	28.0-30.1	30.0-33.0	33.0-38.0	24.6-25.5
15.0	44.2-46.5	32.5-33.5	34.0-37.6	37.0-42.0	42.0-48.0	30.6-32.0
18.0	53.3-56.0	39.0-40.4	41.0-45.1	45.0-50.0	50.2-57.0	36.8-38.0
21.0	59.1-65.0	42.5-44.8	48.0-51.6	52.0-58.0	58.0-66.0	40.9-44.5
24.0	67.8-74.0	51.4-52.0	55.0-60.2	59.0-66.0	66.0-76.0	46.9-51.0
27.0	76.5-83.0	58.0-58.5	61.0-67.7	67.0-75.0	75.0-85.0	52.9-57.0
30.0	84.9-93.0	64.3-65.0	68.0-75.2	74.0-83.0	83.0-95.0	58.7-64.0
36.0	101-110	76.4-78.0	82.0-90.0	89.0-99.0	99.0-113	69.7-76.0
39.0	110-118	81.0-83.0	89.0-97.5	96.0-108	108-123	75.8-82.0

Tabela II.38 - Característica Protetiva dos Pára-raios Classe Estação

* *Nota -*

→ *Obtida com 1000 Ampéres com forma 150 x 300 μs.*

Um outro ponto de extrema importância, que deve ser relembrado, é o fato de que, com exceção da Tabela *II.33*, oriunda das Normas *IEC - ABNT*, as demais necessitam pelo menos de uma revisão periódica pois refletem uma condição momentânea de um mercado altamente evolutivo.

II.3.6 - DESEMPENHO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O principal objetivo da instalação de pára-raios em sistemas de distribuição é controlar as solicitações de tensão, nos equipamentos, no caso típico, transformadores, e linhas, causadas pelas descargas atmosféricas. Devido a forte interação com as impedâncias dos sistemas de distribuição, a amplitude e a forma das correntes de descarga que atingem os pára-raios apresentam uma enorme variação quando confrontadas com o ponto onde ocorreu a descarga. Deste modo, haja vista, o grau de dispersão estatístico das solicitações impostas aos pára-raios, projetá-los, de modo que, os mesmos, sejam capazes de suportar todo o espectro possível para as correntes de descarga se constitue numa prática razoavelmente antieconômica.

Logo, as Normas que regem a verificação do desempenho dos pára-raios tem sido desenvolvidas, com o auxílio de práticas de campo, sob a premissa de assegurar uma taxa de falha aceitável, fato, passível de confirmação, com o auxílio de ensaios e verificações periódicas em pára-raios retirados de operação, sob condições normais e de falha.

Com respeito a experiência de campo acumulada em pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, a mesma se encontra ainda em fase inicial, mas conforme discutido a experiência obtida com pára-raios a carboneto de silício, tem indicado que, pelo menos, até o momento, as taxas de falha se encontram dentro de limites razoáveis. Deste modo, a Norma *ANSI - CSA* para pára-raios a óxido metálico é bastante similar à relativa a pára-raios a carboneto de silício. Já a Norma *IEC - ABNT* para pára-raios a óxido metálico, reflete uma realidade distinta pois a última revisão da norma relativa a pára-raios a carboneto de silício, anterior aos primeiros documentos sobre pára-raios a óxido metálico data

de pelo menos *20* anos.

II.3.6.1 - CORRENTES DE IMPULSO PADRONIZADAS

De modo classificatório, as Normas padronizam valores de corrente sob, os quais, são definidos os níveis de proteção fornecidos pelos resistores não lineares dos pára-raios, bem como, valores de correntes; necessários para, determinar a sua suportabilidade frente a solicitações consideradas severas.

Haja vista o 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, capazes de verificar seu comportamento frente as solicitações oriundas de descargas de correntes, os mesmos são realizados em seções proporcionais, representativas do pára-raios completo, e que, dependendo do ensaio, devem ainda representar o comportamento térmico de sua pior seção, e deste modo, apresentam suas extremidades isoladas termicamente forçando que o fluxo de calor seja radial.

As correntes representativas dos impulsos atmosféricos em amplitude e forma, são as mesmas utilizadas nos ensaios dos pára-raios a carboneto de silício, a exemplo destes casos, solicitam os resistores não lineares a óxido metálico de modo, praticamente, uniforme, pois a duração da corrente não é elevada, fato que impede sua concentração em canais condutores, ou seja, formação do fenômeno conhecido como *"tunneling"*, mas que, pode, dependendo do caso, 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 determinadas pelo Ensaio de Ciclo de Operação Combinado.

Já as Normas *ANSI - CSA*, devido a semelhança que, deliberadamente, mantém com as normas relativa a pára-raios a carboneto de silício

verificam as solicitações impostas aos pára-raios a óxido metálico através dos seguintes ensaios, que, apresentam ligeiras variações, quando comparados com os, originalmente, desenvolvidos para pára-raios a carboneto de silício:

- *Ensaio de Ciclo de Operação;*

- *Ensaio de Suportabilidade Frente a Correntes de Amplitude Elevada; e*

- *Ensaio de Suportabilidade Frente a Correntes de Longa Duração.*

Os pára-raios a óxido metálico comercializados no Brasil tem sido tradicionalmente ensaiados sob as Normas *IEC - ABNT* porém, de modo informativo a Norma *ANSI - C62.11*, também é contemplada pelo texto a seguir.

II.3.6.2 - CICLO DE OPERAÇÃO

O objetivo do ensaio de ciclo de operação é determinar, e, em alguns casos, verificar, a tensão nominal, em freqüência industrial, de um projeto de pára-raios, através da demonstração de sua capacidade em suportar uma série de impulsos com forma e amplitude, conforme Tabela - *II.39.*

Classe do Pára-raios	*Corrente [kA]*
Distribuição - Serviço Normal	*5*
Distribuição - Serviço Pesado *	*10*
Intermediário *	*5*
Estação **	*10*

Tabela *II.39* - Amplitude das Correntes de Descarga para os Ensaios de Ciclo de Operação

Notas -

** - Classes 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.*

O circuito, sintético, utilizado neste ensaio, devido a ausência de corrente subseqüente, não necessita reproduzir, fielmente o sistema, ao qual, o pára-raios deve ser conectado, por seu *Equivalente de Thévènin* 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 da tensão em freqüência industrial.*,**

Notas -

**- O intervalo de tempo entre o zero da tensão em freqüência 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 algum dos resistores a óxido metálico que compõem a seção representativa ou o pára-raios completo.*

***- Ao contrário das normas relativas a pára-raios a carboneto de sílicio, as relativas a pára-raios a óxido de zinco, devido a ausência de corrente subseqüente, assumem um tempo de disparo fixo.*

De modo a demonstrar a existência de estabilidade térmica, após a série de impulsos preliminares, sob freqüência industrial, a seção

proporcional representativa, ou o pára-raios completo é aquecido até a temperatura de *60°Celsius*, submetido a impulsos de corrente complementares, com a mesma amplitude anterior, exceto quando do caso dos pára-raios classe distribuição serviço pesado, aos quais devem ser aplicados impulsos com amplitude de *40 kA*, ao invés de *10 kA* e, em seqüência, energizado sob a sua *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*.

Dentro deste conceito as Normas *ANSI - CSA* consideram que os pára-raios a óxido metálico devem ser capazes de operar, seqüencialmente, sob corrente nominal e condições extremamente severas de sobretensão em freqüência industrial e, portanto, o ensaio de ciclo de operação se constitue no ensaio crucial na determinação das dimensões dos resistores a óxido metálico e no projeto térmico do pára-raios.

As Normas *IEC - ABNT* não prevêm um ensaio de ciclo de operação frente a impulsos atmosféricos, pois trabalham com o conceito de *"Ciclo de Operação Combinada"*, onde as várias solicitações impostas aos pára-raios ao longo de sua vida útil são aplicadas em um curto espaço de tempo e, dentro deste conceito, 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 freqüência industrial entre os grupos de descargas.

II.3.6.3 - 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.

Segundo as Normas *ANSI - CSA* um primeiro impulso de corrente com amplitude conforme Tabela *II.40* deve ser aplicado a uma seção proporcional representativa, ou ao pára-raios completo que deve retornar a temperatura ambiente. Logo após, um segundo impulso é então aplicado

e, em seqüência, a seção proporcional representativa, ou o pára-raios completo é energizado sob a sua *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, de modo a demonstrar estabilidade térmica.

Classe do Pára-raios	*Corrente [kA]*
Distribuição - Serviço Normal	*65*
Distribuição - Serviço Pesado	*100*
Intermediário *	*65*
Estação *	*65*

Tabela *II.40* - 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.*

O circuito, sintético, que deve possuir baixa indutância, utilizado neste ensaio, não necessita reproduzir o sistema, ao qual, o pára-raios deve ser conectado por seu *Equivalente de Thévènin*, pois, a ocorrência de uma descarga com amplitude, conforme Tabela *II.40*, normalmente, resulta em uma descarga disruptiva ao longo do isolamento de algum ponto do sistema, fato que implica, na pior das hipóteses, na redução, via de regra, a nível desprezável, da tensão, em freqüência industrial, imposta ao pára-raios.

Segundo as Normas *IEC - ABNT* este ensaio é parte integrante do *"Ensaio de Ciclo de Operação Combinado"*, discutido a seguir, no Item *II.3.6.5.*

Um ponto, a seu modo, relevante, no âmbito da normalização sobre pára-raios para sistemas de potência adotada no Brasil, versa sobre a real necessidade, e, mesmo eficácia, do ensaio de alta corrente de curta duração. O argumento, normalmente, utilizado pelos defensores da

ineficácia deste ensaio, baseia-se no fato, real, de ser, a tensão residual, desenvolvida pelo pára-raios, durante uma descarga de corrente de amplitude elevada, 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 não é objetivo deste ensaio, verificar a *"Coordenação de Isolamento"*, pára-raios versus sistema, mas tão somente, sua suportabilidade, frente a descargas diretas, fato em tese razoável, haja vista, as reduzidas dimensões, principalmente em termos de altura de isolamento, oferecidas pelos resisotres a óxido metálico.

II.3.6.4 - 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 uma descarga de corrente de baixa amplitude, representativas da cauda da corrente, associada a uma descarga atmosférica representada por uma corrente com forma e amplitude conforme Tabela *II.41*

Classe do Pára-raios	*Corrente [A]*	*Duração [μs]*
Distribuição - Serviço Normal	*75*	*2000* *
Distribuição - Serviço Pesado	*250*	*2000*

Tabela *II.41* - Amplitude e Forma das Correntes de Descarga para os Ensaios de Baixa Corrente de Longa Duração

Nota -

** - Segundo IEC 37 - WG 4, 1000 μs.*

As correntes de longa duração, usualmente, solicitam de modo extremamente severo os resistores a óxido metálico, pois, seu tempo de duração, suficientemente longo, da ordem de, pelo menos, *20* vezes, o de uma descarga de curta duração, permite o aquecimento localizado de regiões dos resistores, mecanismo conhecido como *"tunneling"* que, pode

resultar em uma elevação local de temperatura, superior, a *1500°Celsius*, responsável pela vaporização, virtualmente, instantânea do material, cerâmico, do canal condutor.

Deste modo, uma série de precauções durante as etapas de fabricação dos resistores a óxido metálico necessitam ser tomadas e, as principais delas, objetivam basicamente garantir a homogeneidade da mistura entre os óxidos que compõem a mistura padrão dos resistores. Caso estas medidas não sejam suficientemente eficientes a densidade de corrente nos resistores não é uniforme e, por conseguinte, os gradientes de temperatura também o são não uniformes, fato que pode conduzir ao fenômeno de *"tunneling"*, conforme mostra a Figura *II.3.53*.

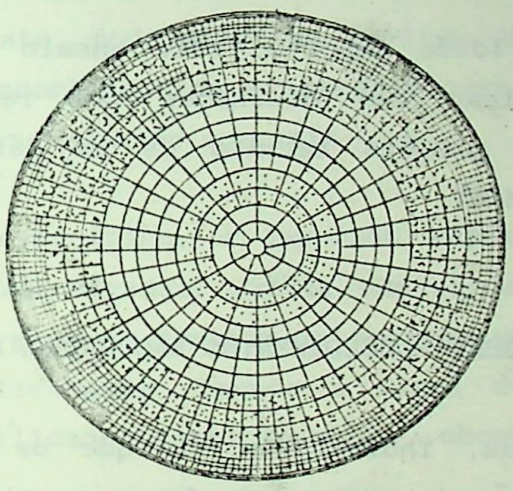


Figura II.3.51 - Mapa de Densidade de Corrente e Temperatura de um Resistor a Óxido Metálico Típico[87]

II.3.6.5 - CICLO DE OPERAÇÃO COMBINADO

As Normas *IEC - ABNT* verificam o desempenho dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores frente as diversas condições operativas possíveis de acontecer no campo através do *"Ensaio de Ciclo de Operação Combinado"*, que tem como base, a idéia de aplicar, em um curto intervalo

de tempo, à seção proporcional representativa ou ao pára-raios completo uma série de impulsos, seguida ou não da aplicação tensão em freqüência fundamental.

Basicamente, todos os ensaios previstos nas Normas *ANSI - IEC*, exceto o severo *"Ensaio de Ciclo de Operação"*, e o *"Ensaio de Corrente de Longa Duração"* são cobertos por este ensaio que, no caso dos pára-raios para sistemas em média tensão impõe um ciclo de operação semelhante ao imposto pelo *"Ensaio de Alta Corrente e Curta Duração"*, acrescido de um pré-condicionamento sob impulsos de corrente nominal, aplicados com a seção proporcional representativa ou o pára-raios completo energizado frente a uma sobretensão sustentada com amplitude de *1.20* vezes a *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*.

Devido ao grau de severidade imposto, este ensaio é, virtualmente o responsável pela definição das dimensões dos resistores a óxido metálico, bem como, do projeto térmico de um pára-raios projetado segundo as Normas *IEC - ABNT*.

II.3.6.6 - COMENTÁRIOS SOBRE PROCEDIMENTOS NÃO PADRONIZADOS

Existem fortes evidências, indicativas, de que os ensaios, conforme usualmente realizados, não determinam de forma completa a durabilidade relativa dos diferentes tipos e projetos de pára-raios. Isto se deve, principalmente, ao fato dos mesmos preverem, e neste caso, via de regra, não existe outro modo, pelo menos, exequível em termos econômicos, a realização de ensaios em seções proporcionais, representativas dos pára-raios completos.

Ensaios, realizados em pára-raios a carboneto de silício produzidos nos Estados Unidos e Canadá, indicam que um pára-raios, completo, pode falhar devido aos arcos formados nos pontos de contacto entre resistores adjacentes. Uma vez confinados pelo invólucro, os gases ionizados, formados por estes arcos, podem resultar em descargas internas que, por sua vez, podem resultar na falha do pára-raios. É óbvio que, este modo

de falha, não é determinado por ensaios realizados em seções proporcionais, por exemplo, com tensão nominal de *3 kV*, composta, basicamente, por um único resistor.

Por outro lado, o elevado grau de sofisticação do tratamento aplicado as superfícies planas dos resistores a óxido metálico, responsável, em boa parte, pela distribuição uniforme das correntes pelos resistores, atua no sentido de reduzir a probabilidade de que descargas internas, devido a existência de gases ionizados, ocorram nos pára-raios a óxido metálico. No entanto, uma série de novos estudos, englobando seções proporcionais e pára-raios completos, devem ser realizados, antes de se emitir uma conclusão final pois, é conveniente relembrar que a altura, responsável pela suportabilidade dielétrica dos resistores a óxido metálico, por sua vez, é inferior a dos resistores a carboneto de silício, e, este fato, pode atuar no sentido de invalidar o comentário sobre a reduzida importância da existência níveis de ionização elevados após uma ou mais descargas de corrente.

Com respeito, em específico, a impulsos representativos de descargas atmosféricas não padronizadas, existe uma razoável série de evidências experimentais, que atua no sentido de indicar que os resistores a óxido metálico são, praticamente, imunes a forma do impulso desde que os limites de estabilidade térmica e de choque térmico* não sejam ultrapassados.

* *Nota -*

→ *Com respeito a impulsos representativos de descargas de manobra, no entanto, existe uma série de estudos que comprovam indubitávelmente, que os limites de choque térmico são dependentes da amplitude e da forma do impulso aplicado aos resistores a óxido metálico.*

II.3.7 - DESEMPENHO FRENTE A DESCARGAS DE MANOBRA

As correntes relacionadas com as descargas de manobra são 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.

Devido ao mecanismo de condução dos resitores a óxido metálico, a homogeneidade, a nível microscópico, bem como, os mecanismos de troca de calor entre os caminhos condutores de corrente são extremamente importantes.

Os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores para sistemas de média tensão, geralmente, pára-raios, classe distribuição, uma vez corretamente especificados, raramente são submetidos a correntes de descarga de manobra, pois, normalmente, são projetados de modo a não operarem frente a estas formas de impulso, ou seja, apresentam nível de proteção frente a impulsos de manobra, em por unidade da sua tensão nominal, muito elevado, fato que, impede que os mesmos venham a atuar frente a estas solicitações, e, deste modo, sob o enfoque das Normas *ANSI - CSA* são, via de regra, projetados, somente, frente a solicitações relativas a descargas atmosféricas. Por outro lado, os pára-raios, classe intermediária e classe estação, adequados, na maioria dos casos, para sistemas em alta e extra alta tensão, apresentam nível de proteção frente a impulsos de manobra, em por unidade da sua tensão nominal, razoavelmente reduzido, fato que, implica que os mesmos devem ser projetados para atuar frente a estas solicitações.

Como comentário adicional, é conveniente ressaltar que o projeto de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, e, deste modo, a solicitação imposta ao mesmo, se encontra, obviamente, ligado ao binômio *"Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, *"Suportabilidade frente a Sobretensões em Freqüência Industrial"*, e, por conseguinte, ao nível básico de isolamento dos equipamentos do sistema. Logo, o projeto deste tipo de pára-raios, acaba por se constituir em uma solução de compromisso que contempla o sistema, as solicitações impostas ao mesmo, na forma de descargas atmosféricas, e pelo mesmo, na forma de tensão contínua em freqüência industrial as descargas de manobra, estas em

menor escala, os materiais utilizados e a engenharia de produto, em termos técnicos e econômicos.

Classes de Descarga de Linhas Segundo IEC			
Classe	Impedância de Surto Z_0 (Ohms)	Duração Virtual da Crista [μs]	Tensão de Carga U_C [kV C.C.]
1	$3.3\ U_n^{*} - 4.9\ U_n^{**}$	2000	$3.0\ U_n^{*} - 3.2\ U_n^{**}$
2	$1.8\ U_n^{*} - 2.4\ U_n^{**}$	2000	$2.6\ U_n^{*} - 3.2\ U_n^{**}$
3	$1.2\ U_n^{*} - 1.3\ U_n^{**}$	2400	$2.6\ U_n^{*} - 2.8\ U_n^{**}$
4	$0.8\ U_n^{*} - 0.8\ U_n^{**}$	2800	$2.4\ U_n^{*} - 2.8\ U_n^{**}$
5	$0.5\ U_n^{*} - 0.5\ U_n^{**}$	3200	$2.2\ U_n^{*} - 2.4\ U_n^{**}$

Tabela *II.42 - Classes de Descarga de Linhas Segundo as Normas IEC*

Notas -

**- Valores segundo IEC 99.1*

***- Valores segundo IEC 37 - WG 4*

II.3.7 1 - DESCARGAS DE MANOBRA PADRONIZADAS

A suportabilidade padrão dos pára-raios, no caso, classe intermediária e classe estação, frente a descargas de manobra é determinada pelo desempenho que o mesmo apresenta frente a descarga, no caso, das Normas *ANSI - CSA*, de uma série de modelos de linhas, na forma de impedância de surto, capacitância de seqüência positiva, comprimento e máxima sobretensão de manobra, em por unidade, consideradas como representativas, com respeito a realidade norte-americana, fato que, de certo modo, cria uma identidade sistema - ensaio, e que, segundo a filosofia de preservar a similaridade entre as normas foram mantidas. Já

as Normas *IEC - ABNT*, padronizam classes de descarga de linha, em número de *5*, em termos de impedância de surto, tempo de descarga e máxima sobretensão de manobra, que no caso, específico, dos pára-raios a óxido metálico diferem das classes de descarga de linha dos pára-raios a carboneto de silício, conforme mostra a Tabela *II.42*.

Convém ressaltar que não existe nenhuma equivalência, pelo menos, aparente, entre as classes de descarga de linha das normas *ANSI - CSA* e *IEC - ABNT*. O fato das Normas *IEC - ABNT* admitirem tempos de descarga, relacionados com a capacitância ou com o comprimento da linha, ou mesmo ambos, superiores aos admitidos pelas Normas *ANSI - CSA* implica, na possibilidade, das primeiras, levarem em conta os efeitos das capacitâncias de seqüência zero do sistema.

O circuito, sintético, utilizado neste ensaio é o mesmo utilizado no de baixa corrente de longa duração. No entanto, considera-se conveniente, ressaltar que, os métodos de verificação dos parâmetros dos circuitos, ou seja, indutâncias, capacitâncias e resistências, utilizados, em ambos ensaios, divergem ligeiramente.

Segundo as Normas *ANSI - CSA*, os parâmetros de linha, utilizados nos ensaios de descarga de linhas em pára-raios de classe intermediária e estação, com tensões nominais compatíveis com os sistemas de média tensão são mostrados na Tabela *II.43*.

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)	$3.68\ U_{60\ Hz\ Max.}$

Tabela *II.43* - Parâmetros para o Circuito de Ensaio de Descarga de Linhas

O circuito, tradicionalmente utilizado no *"Ensaio de Descarga de Linhas"*, nada mais que um modelo reduzido de uma linha de transmissão, submetida a um religamento, via de regra sob falta, produz um impulso de corrente com amplitude igual a:

$$I_D = \frac{U_c - U_{Res}}{Z_1} = \frac{3.68\ U_{60\ Hz\ Max.} - U_{Res}}{Z_1} \qquad (II.3.7.1.1)$$

e;

$$U_{60\ Hz_{Max.}} = K_T\ U_{\phi T} \qquad (II.3.7.1.2)$$

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 $K_T = 1.06$

Ao se utilizar das expressões *(II.3.7.1.1.-2)* é usual linearizar a *"Característica Tensão Residual [U_{Res}] Corrente de Descarga [I_d]"*, e deste modo vem:

$$U_{Res} = \sqrt{2}\ U_n + K_\alpha\ I_D \qquad (II.3.7.1.4)$$

onde:

$$K_\alpha = \frac{U_{R_{500-1000}} - \sqrt{2}\ U_n}{I_{d_{500-1000}}} \qquad (II.3.7.1.5)$$

onde:

$U_{R_{500-1000}}$ = Tensão Residual para Corrente de Descarga *500-1000 Ampéres*;

$I_{d_{500-1000}}$ = Corrente de Descarga para $U_{R_{500-1000}}$

A duração da corrente de descarga é obtida com auxílio de:

$$T_D = 2\ Z_1\ C_1\ D_1 \qquad (II.3.7.1.6)$$

onde:

T_D = Duração da Corrente de Descarga

Substituindo os parâmetros constantes da Tabela *II.43* vem:

$$T_D = 1620\ \mu s\ (\ Pára\text{-}raios\ Classe\ Estação\ )$$

$$T_D = 1080\ \mu s\ (\ Pára\text{-}raios\ Classe\ Intermediária\ )$$

A energia absorvida pelo pára-raios é resultado do produto da tensão residual do pára-raios, da corrente de descarga e do tempo de duração da mesma, conforme a seguir:

$$E_{PR} = U_{Res} I_D\ T_D = 2\ U_{Res} I_D\ Z_1\ D_1\ C_1 \qquad (II.3.7.1.7)$$

A capacidade de absorção de energia dos pára-raios aumenta com a sua tensão nominal. Como, os pára-raios são construídos, de modo, modular, fato que, propicia a intercambiabilidade de componentes entre diferentes grupos de pára-raios, os fabricantes, usualmente, ensaiam os componentes frente as solicitações impostas pela classe de pára-raios mais solicitada, na qual eles devem ser utilizados, e isto, obviamente, resulta em margens conservativas de projeto.

No caso das 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 descarga de linhas de transmissão de pára-raios com tensão nominal de *108 kV* a *144 kV*, e, neste caso, considerando que as características do sistema são fixas, o pára-raios mais solicitado é o pára-raios de *108 kV* pois, é possível escrever que:

$$E_{PR} = \frac{2Z_1 C_1 D_1}{(Z_1+K_\alpha)^2}\{K_\alpha^2 K_\phi^2 K_T^2 U_{\phi T}^2 + \sqrt{2}\,U_n K_\phi K_T U_{\phi T}(Z_1-K_\alpha) - 2U_n^2 Z_1\} \quad (II.3.7.1.8)$$

onde:

K_ϕ = Fator de Sobretensão *[p.u.]*

Simplificando, ou seja, assumindo que K_α é igual a zero, correspondendo a um pára-raios ideal, vem:

$$\frac{E_{PR}}{U_n} = 2\,C_1\,D_1\,\{\sqrt{2}\,K_\phi\,K_T\,U_{\phi T} - 2\,U_n\} \quad (II.3.7.1.9)$$

Com relação as Normas *IEC - ABNT*, as *"Classes de Descarga de Linhas"* podem ser determinadas com o auxílio da seguinte expressão, para a *"Energia específica [kJ/kV]"*.

$$\frac{E_{PR}}{U_n} = \frac{T_D}{Z_1}\left[\frac{U_c\,U_{Res}}{U_n} - \frac{U_{Res}^2}{U_n}\right] \quad (II.3.7.1.10)$$

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 correspondente, mostrada na Figura *II.3.52* e, tradicionalmente, é escolhido um pára-raios capaz de atender a *"Classe de Descarga de Linhas"* imediatamente superior a intersecção entre estes valores.

As fórmulas para cálculo da *"Energia específica [kJ/kV]*, relacionam os modelos de linha com a *"Característica Tensão Residual [U_{Res}] Corrente*

de Descarga [I_d]", de modo simplificado e, normalmente, apresentam resultados superiores, algo em torno de *0.20 p.u.*, ao encontrado em simulações ou ensaios de campo, pois nestes casos a linha é considerada uniformemente carregada, fato que não ocorre no modelo real.

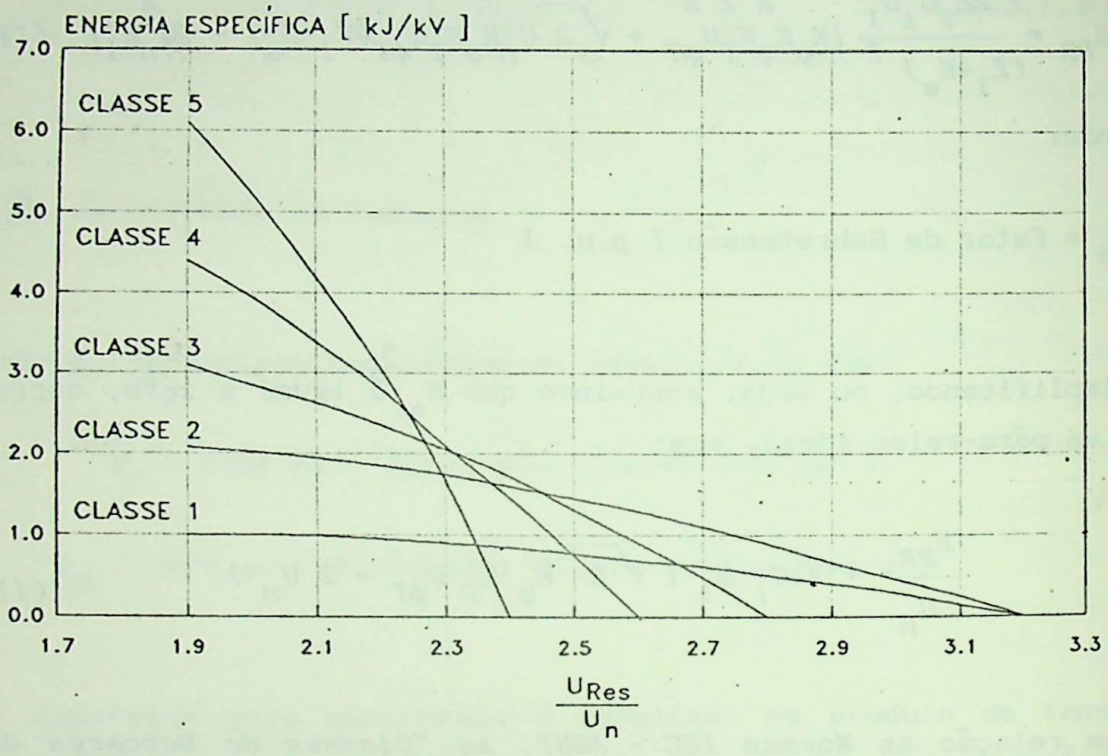


Figura II.3.52 - Característica Energia Específica [kJ/kV] versus Quociente Tensão Residual - Tensão Nominal [U_{Res}/U_n], Segundo IEC 37 - WG 4[4]

II.3.7 2 - COMENTÁRIOS SOBRE PROCEDIMENTOS NÃO PADRONIZADOS

Segundo estudos recentes, a habilidade de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores em absorver energia, ou seja, suportar descargas de manobra, ao contrário do usualmente propalado, depende da forma e da duração do impulso.

Obviamente, a ausência de centelhadores atua no sentido de tornar os pára-raios a óxido metálico bem mais insensíveis às variações na forma e duração dos impulsos que os pára-raios a carboneto de silício, no entanto, o mecanismo de condução de corrente, bem como, as pequenas

falhas na microestrutura dos resistores, permitem a concentração de corrente em uma infinidade de canais condutores fato que pode, dependendo da amplitude, forma e duração do impulso, resultar em aquecimento diferencial e, por conseguinte, na dilatação, por aquecimento, do núcleo de alguns canais condutores que, ao se expandirem, comprimem, de modo rápido e violento, o anel cerâmico, pouco aquecido, que os envolvem resultando no aparecimento de microfissuras, que podem resultar na falha dos resistores por fragmentação, tecnicamente conhecida como *"Thermal Cracking"*.

A existência do fenômeno de *"Thermal Cracking"* implica na redução da capacidade de absorção de energia, ou seja, na suportabilidade frente a surtos de manobra, detectada por estudos publicados pela *General Electric* e sob estudo pela *CIGRÉ - BRASIL* através do *CEPEL*, cujos resultados preliminares se encontram mostrados na Figura - *II.3.53.*[88-90]

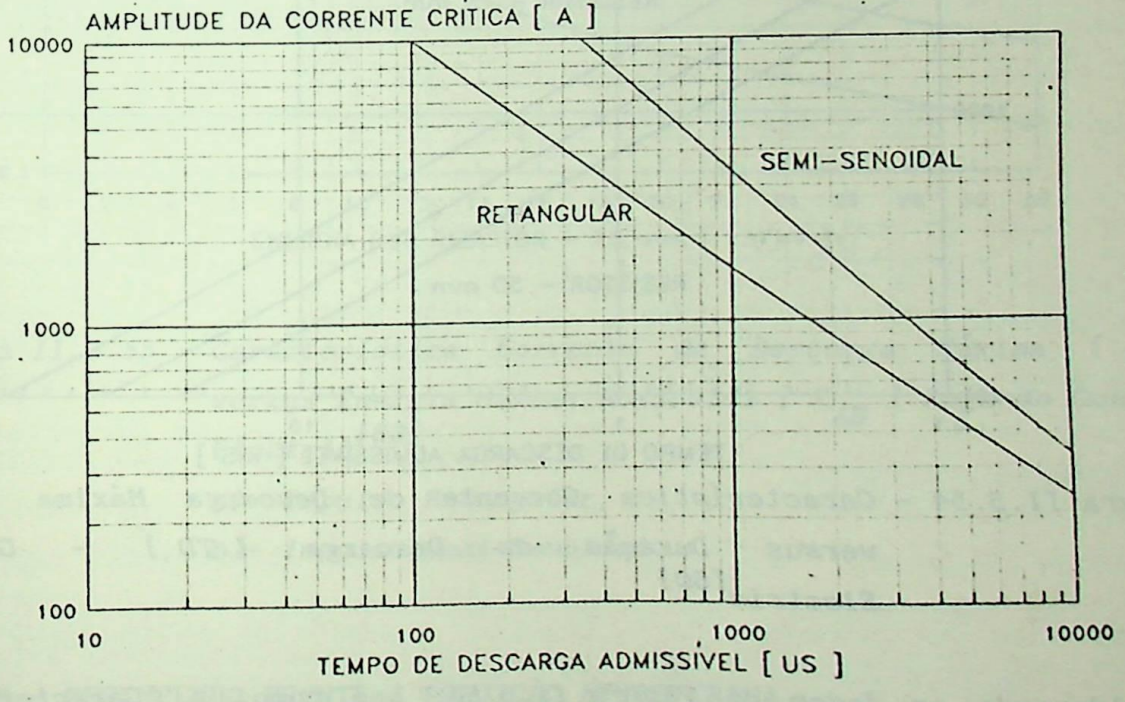


Figura II.3.53 - Característica Corrente de Descarga [Id] versus Duração da Descarga [TD] CIGRÉ - BRASIL, CEPEL.
a)- Corrente Retangular;
b)- Corrente Semi-Senoidal.

Com respeito ao estudo *CIGRÉ - BRASIL, CEPEL*, conforme mostra a Figura *II.3.53*, a *"Corrente crítica - $Id_{50\%}$"*, ou seja, a corrente de descarga que, uma vez aplicada a um resistor de óxido metálico resulta em uma probabilidade de falha de *50 %*, apresenta um comportamento matemático semelhante ao, tradicionalmente, divulgado pela *General Electric*, para a *"Corrente máxima suportável - $Id_{0\%}$"*, conforme Figura *II.3.54*. Um ponto digno de nota, obtido nestes estudos, foi a confirmação da grande dependência do *"Desvio padrão para a corrente crítica - σ_I"*, em tese, obtido de modo preliminar, por um método, em parte inadequado, com a amplitude e duração do impulso de corrente. Nestes casos, como é de se esperar, caso as falhas sejam ocasionadas por fragmentação, *"Thermal Cracking"*, o *"Desvio padrão para a corrente crítica - σ_I"* aumenta para impulsos de grande amplitude e curta duração.

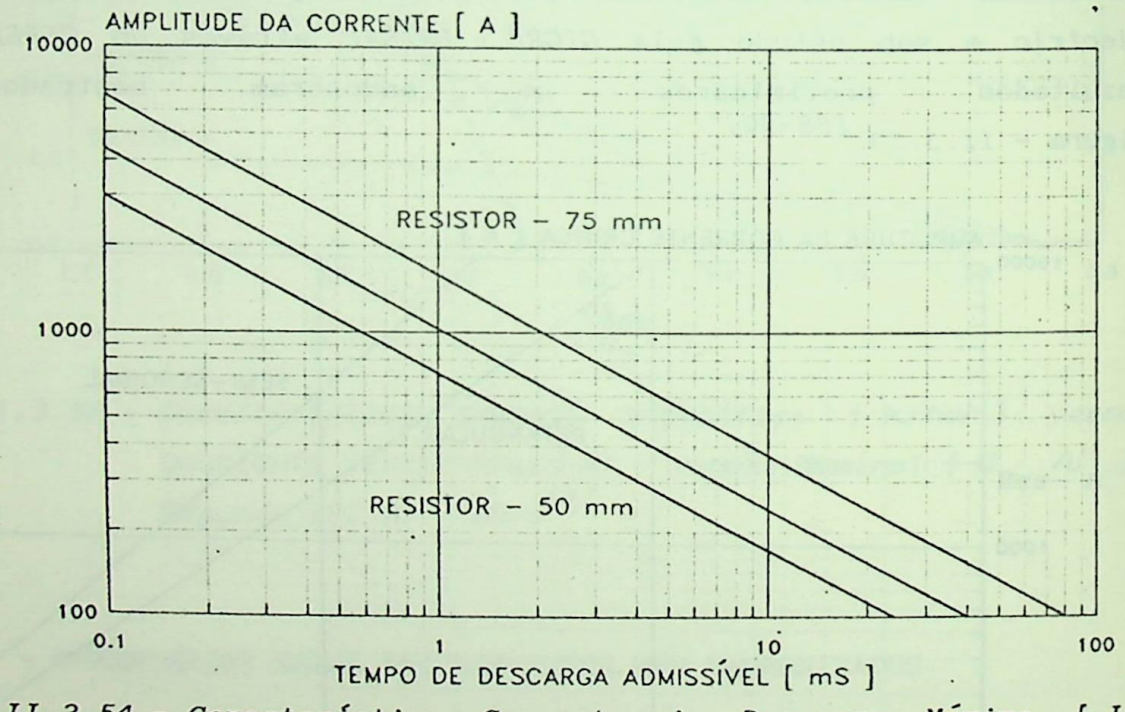


Figura II.3.54 - Característica Corrente de Descarga Máxima [Id] versus Duração da Descarga [TD] - General Electric[80]

Considerando os dados da Figura *II.3.54*, bem como, a *"Característica Tensão Residual [U_{Res}] Corrente de Descarga [I_d]"* é possível construir uma característica que relacione a *"Energia Absorvida [E_{AB}]"* pelos resistores com a *"Amplitude e Forma"* da corrente de impulso descarregada pelos mesmos, conforme mostra a Figura *II.3.55*. Nenhuma das

normas técnicas vigentes no momento, prevêem o levantamento desta característica e, deste modo, quaisquer informações pertinentes a suportabilidade frente a impulsos de manobra não padronizados devem ser obtidas junto aos fabricantes dos pára-raios.

No entanto, este tipo de informações, quando relacionadas com os pára-raios classe distribuição, exceto quando da proteção de bancos de capacitores, possuem menor importância.

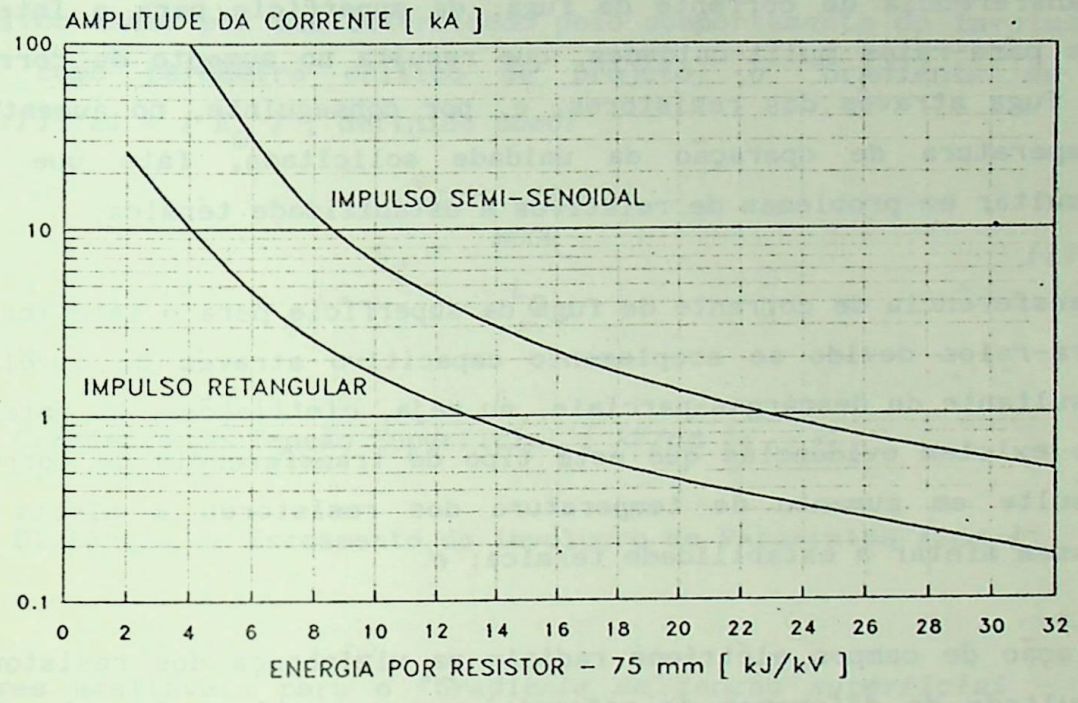


Figura II.3.55 - Característica Corrente de Descarga Máxima [Id] versus Energia Máxima Absorvida [E_{AB}] Segundo General Electric[80]

a)- Impulso Retangular;

b)- Impulso Semi-Senoidal.

II.3.8 - DESEMPENHO FRENTE A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Segundo trabalhos recentes, os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, a exemplo dos a carboneto de silício podem entrar em condição de falha devido a ação da poluição atmosférica depositada sobre

seus invólucros.

A contaminação, ou seja, a poluição superficial do invólucro dos pára-raios a óxido metálico pode influenciar seu desempenho de campo de 4 maneiras distintas:

a) - Descarga externa ao invólucro;

b) - Transferência de corrente de fuga, da superfície para o interior dos pára-raios multi-unidades, que resulta no aumento da corrente de fuga através dos resistores, e, por conseguinte, no aumento da temperatura de operação da unidade solicitada, fato que pode resultar em problemas de relativos a estabilidade térmica;

c) - Transferência de corrente de fuga da superfície para o interior dos pára-raios devido ao acoplamento capacitivo através do invólucro resultante de descargas parciais, ou seja, *cintilações*. No entanto, não existem evidências que este tipo de transferência de corrente resulte em aumento de temperatura dos resistores a níveis que possam afetar a estabilidade térmica; e

d) - Criação de campos elétricos radiais na vizinhança dos resistores, resultado da diferença de potencial entre a coluna formada pelos resistores e a distribuição de potencial oriunda da presença da camada externa de poluentes, sendo este fenômeno, no momento, considerado como o maior responsável pelas falhas de pára-raios em ambientes poluídos.

Os fenômenos relacionados com a poluição atmosférica podem apresentar carácter, *"Transitório ou Permanente"*, sendo que, em ambos casos, todo o mecanismo de ação dos poluentes se encontra relacionado com a presença um eletrólito, formado pela solução dos sais que compõem o poluente em água. *[91-92]*

Nos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores o fenômeno,

relacionado com a *"Poluição em Caráter Permanente"*, típico de pára-raios multi-unidade não se constitui em um fator determinante no desempenho dos mesmos pois, virtualmente, todos os pára-raios classe distribuição em média tensão são construídos com um invólucro em corpo único. Logo, a falha do pára-raios envolve a imposição de danos à superfície do invólucro, terminais, superior e inferior, e abraçadeiras, fato que, implica, obrigatoriamente na substituição do conjunto.

Nestes casos, o desempenho frente a poluição dos pára-raios a óxido metálico acaba por ser determinado pelo comportamento do invólucro, que tem, como parâmetro crítico de projeto, o *"Gradiente de tensão superficial - [E_C]"*, definido como:

$$E_C = \frac{MCOV}{L_C} \qquad [II.3.8.1]$$

onde:

E_C = Gradiente de Tensão Superficial *[kV/cm]*;

L_C = Distância de Escoamento do Invólucro do Pára-raios *[cm]*

Valores aceitáveis para o *"Gradiente de tensão superficial - [E_C]"* dependem, obviamente, das condições ambientais de serviço dos pára-raios e podem ser baseados em dados tais como os mostrados na Figura *II.3.56*.

Normalmente, não é comum encontrar nas normas técnicas, referências relativas a *"Distância de Escoamento"* do invólucro dos pára-raios, porém as Normas *CSA* especificam que, para uso geral, o *"Gradiente de tensão superficial"* deve ser de, aproximadamente, *0.40 kV/cm*. Assumindo condições ambientais mais severas, tais como as existentes em regiões costeiras, ou mesmo, na proximidade de grandes áreas industriais ou de tráfego intenso é necessário que seja adotado um *"Gradiente de tensão superficial"* inferior ao acima recomendado e, neste caso específico, algumas concessionárias canadenses adotam, como padrão para regiões costeiras com severas condições de salinidade, *0.15 kV/cm* como

"Gradiente de tensão superficial".

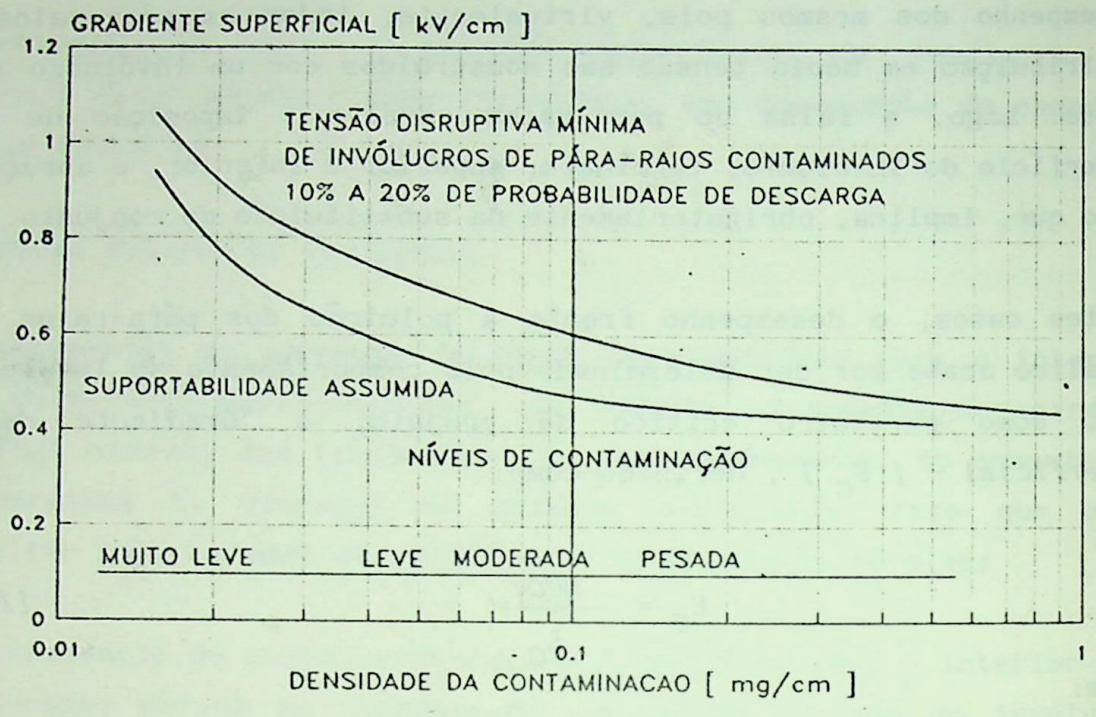


Figura II.3.56 - Gradiente de Tensão Superficial do Invólucro de um Pára-raios para Várias Condições de Contaminação Superficial[93]

O fenômeno relacionado com a *"Poluição em Regime Transitório"*, se encontra relacionado com o processo de umedecimento da camada de poluentes sólidos, normalmente, interligado a ocorrência de chuvas leves, ou mesmo, neblina, e, deste modo, o eletrólito resultante, é responsável pela formação de regiões condutoras, ou seja, dotadas de baixa impedância que, devido a circulação de corrente podem se transformar em regiões secas localizadas, dotadas de alta impedância, usualmente conhecidas como *"dry bands"*. Uma vez que, os perfis dos invólucros dos pára-raios são bastante irregulares, a seção condutora, bem como, a densidade de corrente, apresentam variações substanciais e, tendo em vista que, as regiões secas se encontram, de algum modo, relacionadas com as maiores densidades de corrente, as mesmas são formadas, aleatoriamente, nas regiões de menor diâmetro, ou seja, nas regiões sob as saias o que acaba por implicar na formação de regiões isoladas condutoras ou não sob a superfície dos invólucros, acopladas as

partes internas ativas dos pára-raios, através da capacitância transversal da porcelana.

Dependendo da queda de tensão impressa às regiões secas, ocorrem, sobre a superfície dos invólucros, descargas parciais, conhecidas como, *cintilações*, que transferem, através do acoplamento, de carácter, capacitivo entre a superfície externa e os resistores, valores de corrente, fato que, pelo menos em tese, resulta no aquecimento localizado dos resistores; no entanto, devido ao elevado grau de aleatoriedade deste fenômeno, o mesmo apresenta pouca ou mesmo nenhuma relevância aparente.

Segundo estudos recentes, o fenômeno mais importante relacionado com a presença de poluentes, inclusive chuva, sobre a superfície do invólucro de um pára-raios a óxido metálico é o relativo, a formação de campos elétricos radiais na vizinhança dos resistores, resultado da diferença de potencial entre a coluna de resistores e a distribuição de potencial oriunda da presença da camada externa de poluentes.

As geometrias típicas no interior dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores em atmosfera de nitrogênio ou ar suportam uma diferença de potencial, normalmente, da ordem de $40\ kV_{RMS}$ e, caso a presença do campo elétrico radial, oriundo da interação entre a distribuição de tensão superficial do pára-raios, associada as correntes através da camada de poluentes e subseqüente formação de regiões secas, ou seja, *"dry bands"* e distribuição de tensão ao longo da coluna de resistores, resulte em uma diferença de potencial superior a este limite é iniciado um processo de ruptura dielétrica no interior do invólucro que, segundo recentes pesquisas, motivadas por uma razoável taxa de falhas em pára-raios classe estação, principalmente, na Europa, apresenta os seguintes resultados: *[94-95]*

a) - Danos físicos ao colar dos resistores conduzindo ao aumento gradativo da condutividade superficial e a falha prematura; e

b) - Resíduos da decomposição da atmosfera, pelas descargas,

normalmente, na forma de óxidos de nitrogênio' NO_x, que afetam a condutividade superficial dos resistores.*

** Nota -*

→ *Nestes casos, a formação dos óxidos de nitrogênio implica na migração de átomos de oxigênio da região superficial dos resistores e das paredes do invólucro, bem como, na redução do nível de oxigênio no interior dos pára-raios. A migração dos átomos de oxigênio das regiões próximas a superfície dos resistores resulta no aumento da condutividade superficial e, conseqüentemente, em uma maior taxa de envelhecimento. De modo complementar, a atividade elétrica no interior dos pára-raios também possibilita a formação de uma série de subprodutos, quimicamente, altamente reativos, normalmente, na forma de sais que, por exemplo, quando submetidos a umidade que em tese, não deve existir no interior dos pára-raios, tornam-se altamente condutores, fato que implica em um curto circuito virtual dos resistores, resultando na falha do pára-raios.*

Controlar a atividade corona, no interior dos invólucros dos pára-raios, responsável pela decomposição da atmosfera que envolve os resistores, implica em elaborar um projeto que permita minimizar a formação de campos eletromagnéticos radiais, ou seja, trabalhar com gradientes de potencial no interior do pára-raios, mesmo sob condições de poluição severa, inferiores a *3.0 kV/mm*. A técnica empregada nestes casos para se obter gradientes de potencial compatíveis com o mínimo desejado, ao invés de invólucros dotados de dimensões superiores as usuais, solução esta, normalmente, de alto custo, utiliza resistores com superfícies tratadas através de um composto de alta resistividade.

Os estudos relativos a este efeito particular da poluição e da presença de chuva sobre os invólucros dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores é bastante recente e uma série de novos dados necessitam ser colhidos antes de se emitir uma conclusão final. Convém ressaltar que uma idéia razoável a respeito da atividade elétrica no interior dos

pára-raios pode ser obtida com o auxílio de medições de descargas parciais, porém o ponto em questão é a definição de limites para as mesmas.

II.3.9 - MODELOS MATEMÁTICOS PARA PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

Devido às suas características construtivas peculiares, modelar matematicamente um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores significa elaborar um modelo matemático para os resistores não lineares principais.

O comportamento dos resistores a óxido metálico, que de forma completa possui um razoável grau de complexidade, conforme mostra a Figura *II.3.47* é, usualmente, modelado por um circuito elétrico simplificado que, no entanto, apresenta como principais dificuldades, a representação dos elementos equivalentes, principalmente, resistência e capacitância.

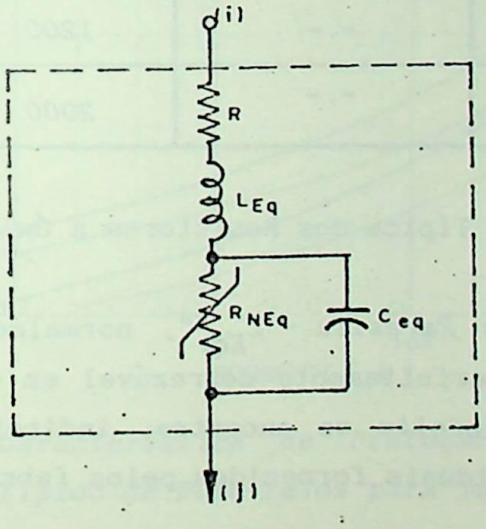


Figura II.3.57 - Circuito Elétrico Simplificado Utilizado para Modelar um Resistor a Óxido Metálico[64]

Apesar do efeito relativo a *"Capacitância Equivalente - $C_{Eq.}$"* ser

variável com a tensão e a freqüência, na grande maioria de estudos de transitórios a mesma sequer é representada, pois na região dos estudos usuais de sobretensões esta capacitância se encontra curto circuitada pela *"Resistência Não Linear Equivalente - $R_{NEq.}$"*. Nos casos, onde se representa a *"Capacitância Equivalente - $C_{Eq.}$"*, é usual assumir que a mesma é constante e oriunda da associação série, ou série paralelo, função do tipo de construção interna adotado para o pára-raios, das *"Capacitâncias padrão"*, medidas em freqüência fundamental.

A Tabela *II.44* mostra valores típicos de *"Capacitância Equivalente - $C_{Eq.}$"* de resistores a óxido metálico dotados com *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"* de *2.55 kV*.

Classe do Pára-raios	*Sub-Classe do Pára-raios*	*Capacitância [pF]*
Distribuição	*Normal*	*400*
	Serviço Pesado	*700*
Intermediária	-.-	*1200*
Estação	-.-	*2000*

Tabela *II.44* - Capacitância Típica dos Resistores a Óxido Metálico

Com respeito a *"Indutância Parasita - $L_{Eq.}$"*, normalmente da ordem de *10 nH* a *20 nH*, a mesma é perfeitamente deprezável em quaisquer estudos de sobretensões, pois seu efeito se encontra, indiretamente, incluído nos valores das tensões residuais fornecidos pelos fabricantes.

Existe uma série razoável de modelos para a *"Resistência Não Linear Equivalente - $R_{NEq.}$"* dos resistores a óxido metálico, alguns extremamente elaborados, porém devido a constância imposta na fabricação dos resistores pelo rigoroso processo de controle de qualidade adotado, mesmo os modelos mais simplificados, por não trabalharem com fenômenos de natureza aleatória como, por exemplo, os mecanismos relativos ao

desenvolvimento de descargas em ar e do comportamento do arco elétrico, fenômeno típico dos centelhadores, são bastante representativos do comportamento dos pára-raios.

Nos casos envolvendo pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, a exemplo dos envolvendo pára-raios a carboneto de silício com centelhadores ativos, típicos de sistemas de extra alta tensão, os estudos de transitórios eletromagnéticos são realizados com dois objetivos principais, ou seja:

→ *Determinar as solicitações impostas aos isolamentos; e*

→ *Determinar as solicitações impostas pelo sistema ao pára-raios.*

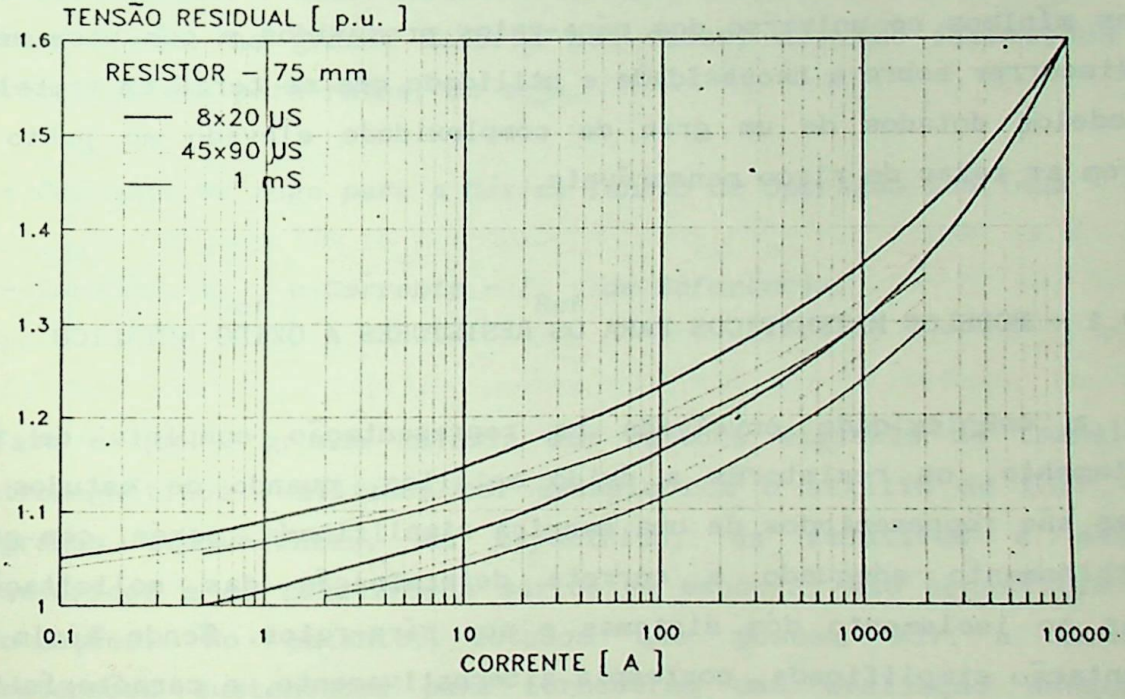


Figura II.3.58 - Característica de Proteção Completa de um Projeto Típico de Pára-raios para Impulsos de Manobra[80]

Devido ao grau de complexidade envolvido na representação completa da *"Característica de Proteção"* dos resistores a óxido metálico, conforme mostra para a região de impulsos de manobra a Figura *II.3.48*, no caso das solicitações impostas aos isolamentos dos equipamentos, de modo determinístico, os estudos usualmente adotam as *"Máximas Características*

de Proteção" fornecidas pelos fabricantes. Nestes casos, é óbvio que se incorre em sobredimensionamentos, porém, dado o carácter não auto regenerativo dos isolamentos, principalmente, dos transformadores de potência, este sobredimensionamento é considerado como adequado, fato, em parte, comprovado pelo desempenho de campo dos esquemas atuais de proteção, que atuam no sentido de comprovar o grau de acerto do presente método.

Já com respeito as solicitações impostas pelo sistema ao pára-raios, a adoção de um método determinístico, principalmente em grandes subestações pode parecer a primeira vista como inadequada. Realizar estudos adotando as *"Mínimas Características de Proteção"* fornecidas pelos fabricantes, sem dúvida resulta nas piores solicitações impostas aos pára-raios; resta portanto saber qual a real incidência destes valores mínimos no universo dos pára-raios produzidos e com base neste dado discorrer sobre a necessidade e utilidade que se teria em trabalhar com modelos dotados de um grau de complexidade elevado ao ponto de tornarem as taxas de risco mensuráveis.

II.3.9.1 - MODELOS MATEMÁTICOS PARA OS RESISTORES A ÓXIDO METÁLICO

Devido a complexidade envolvida na representação completa de seu comportamento, os resistores a óxido metálico, quando de estudos de sistemas são representados de uma maneira simplificada, porém, com grau de detalhamento adequado a correta determinação das solicitações impostas ao isolamento dos sistemas e aos pára-raios. Sendo assim, a representação simplificada, contempla alternativamente, a característica *"Tensão Residual versus Corrente de Descarga Máxima"*, quando dos estudos de *"Coordenação de Isolamento"* e a característica *"Tensão Residual versus Corrente de Descarga Mínima"*, quando dos estudos de *"Absorção de Energia pelo Pára-raios"* em tese, características *"estáticas"*.*

** Nota -*

→ Os demais efeitos, necessários somente para estudos detalhados do

desempenho dos pára-raios se encontram relacionados com a "Capacitância Equivelente - $C_{Eq.}$"

Modelagem da Característica Estática de um Resistor a Óxido Metálico

As características estáticas de um resistor a óxido metálico, definidas por curvas que relacionam *"Tensão Residual (Máxima e Mínima) com a Corrente de Descarga"*, conforme mostra a Figura *II.3.99*, são, usualmente modeladas de modo determinístico.

A definição dos modelos matemáticos dos resistores a óxido metálico implica, via de regra, na determinação de alguns parâmetros para as características *"Tensão Residual (Máxima e Mínima) versus Corrente de Descarga"* que, na grande maioria dos casos, não são fornecidos pelos fabricantes dos pára-raios, ou seja:

a) - Corrente de fuga para a Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV;

b) - Tensão - U_{Ref} e Corrente - I_{Ref} de Referência.

O fato é que a grande maioria dos estudos digitais de transitórios eletromagnéticos realizados por exemplo com o auxílio do *EMTP*, ou de programas equivalentes, em específico, os relativos a descargas atmosféricas e os relativos a surtos de manobra, não necessitam destas informações. No entanto, estudos que possam vir a contemplar sobretensões sustentadas para fornecerem uma avaliação adequada da solicitação imposta ao pára-raios necessitam destes dados.*

** Nota -*

→ O adequado no caso de Sobretensões Sustentadas é fazer uso das características "Sobretensão Sustentada versus Tempo".

A *"Corrente de Fuga - I_F"* para a *"Máxima Tensão de Operação*

Contínua - MCOV" * pode ser obtida nos relatórios de recebimento dos pára-raios e, na falta dos dados destes relatórios, uma boa estimativa é considerar valores entre *30 μA* e *60 μA* de crista.**

Notas -

* - *Os dados devem ser computados em valores de crista bastando, para tanto, assumir, com um certo erro, pois a corrente apresenta componentes harmônicos, corrente e tensão como senoidais.*

** - *Estudos que procuram trabalhar com estes valores de corrente tem por objetivo definir solicitações normalmente relacionadas com sobretensões em freqüência industrial e, deste modo, com dados estimados devem ser encarados como orientativos, pois definem somente uma ordem de grandeza, a menos, é óbvio, que as estimativas reflitam, por acaso, os valores corretos do pára-raios.*

A *"Tensão de Referência - U_{Ref}"* e a *"Corrente de Referência - I_{Ref}"* por se constituirem em pontos chaves de qualquer projeto de pára-raios a óxido metálico sem centelhadores e, deste modo, definirem toda a lógica e grau de engenharia embutida no mesmo, dificilmente são fornecidas pelos fabricantes. Nestes casos é usual assumir, com um certo erro,* a *"Tensão de Referência - U_{Ref}"* como o valor de crista da *"Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n"*, que por sua vez se encontra diretamente relacionada com a *"Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV"*, segundo as Normas *ANSI - CSA*, por um fator em torno de *1.17 p.u..*** Com respeito a *"Corrente de Referência - I_{Ref}"* é usual assumir para a mesma um valor entre *1 mA* e *5 mA*, função da classe do pára-raios, e de sua capacidade de absorção de energia.

Notas -

* - *A hipótese apresentada, em alguns casos é correta, mas somente informações dos fabricantes podem confirmá-la. Incorre-se, obviamente, em erros ao se assumir tal aproximação mas esta é uma*

das maneiras usuais de se validar alguns estudos de transitórios em regiões de sobretensões em freqüência industrial;

** - Segundo alguns fabricantes, o fator que relaciona a "Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n" com a "Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV" fica em torno de 1.25 p.u.; e

*** - Segundo Normas a "Corrente de Referência - I_{Ref}" de um páa-raios a óxido metálico sem centelhadores fica entre 1 mA e 20 mA, no entanto, considera-se o valor superior, para a grande maioria dos casos práticos extremamente elevado.

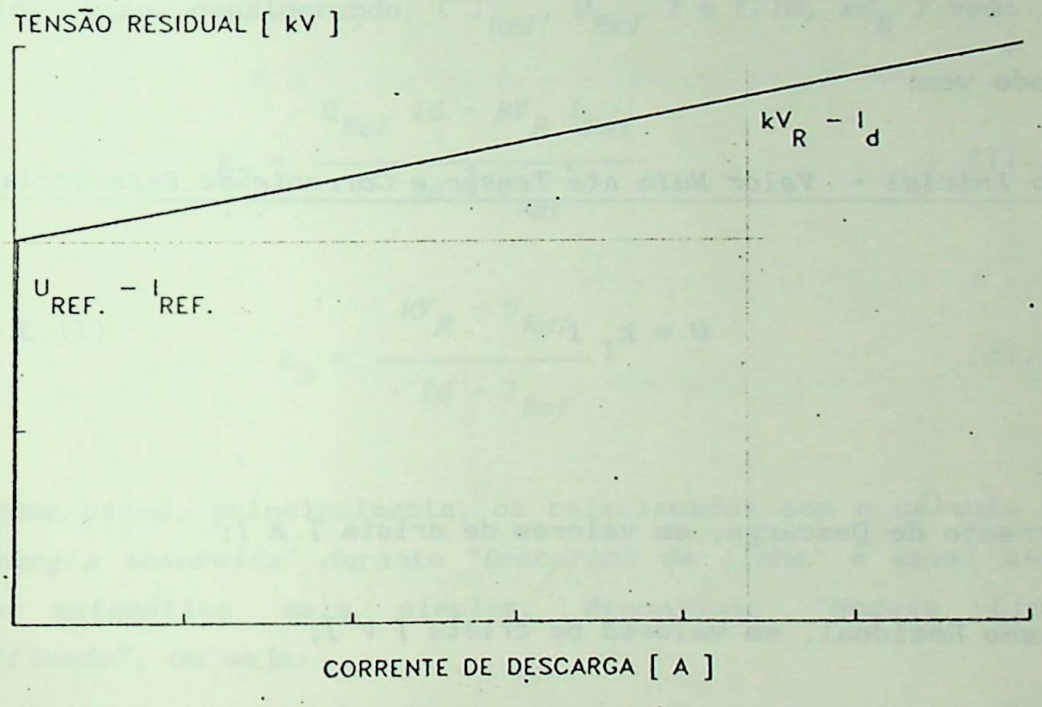


Figura I.3.59 - Aproximação Simplificada Utilizada na Representação da Característica "Tensão Residual versus Corrente de Descarga"de um Pára-raios a Óxido Metálico[79]

A primeira aproximação utilizada para se modelar matematicamente a característica "Tensão Residual versus Corrente de Descarga" dos resistores a óxido metálico, conforme mostra a Figura I.3.49, parte da

hipótese, para alguns estudos, extremamente adequada,* que a característica, de modo global, pode ser aproximada por 2 trechos de reta, denominado *"Modelo Linearizado"*, conforme a seguir.**

Notas -

** - Caso específico dos Estudos de Descargas de Linhas; e*

*** - Os programas digitais para estudos de transitórios eletromagnéticos permitem trabalhar com um maior número de trechos de reta, fato que permite uma melhor definição da característica "Tensão Residual versus Corrente de Descarga".*

Deste modo vem:

→ *Trecho Inicial - Valor Nulo até Tensão e Corrente de Referência:-*

$$U = k_1 \, I \qquad (II.3.9.1.1)$$

onde:

I = Corrente de Descarga, em valores de crista [A];

U = Tensão Residual, em valores de crista [V];

k_1 = Constante de Proporcionalidade.

O modelo acima necessita de *"um par tensão versus corrente"* para ser definido. Logo, considerando, (I_{Ref}, U_{Ref}) vem:

$$k_1 = \frac{U_{Ref}}{I_{Ref}} \qquad (II.3.9.1.2)$$

→ *Trecho Final - Tensão e Corrente de Referência até Limites Máximos:-*

$$U = k_2 + k_3 I \qquad (II.3.9.1.3)$$

onde:

k_2 = Tensão de *"Disparo"*;

k_3 = Constante de Proporcionalidade.

O modelo acima necessita de *"dois pares tensão versus corrente"* para ser definido. Logo, considerando, (I_{Ref}, U_{Ref}) e (Id, kV_R) vem:

$$k_2 = \frac{U_{Ref}\ Id - kV_R\ I_{Ref}}{Id - I_{Ref}} \qquad (II.3.9.1.4)$$

e;

$$k_3 = \frac{kV_R - U_{Ref}}{Id - I_{Ref}} \qquad (II.3.9.1.5)$$

Em alguns casos, principalmente, os relacionados com o cálculo expedito da *"Energia absorvida"* durante *"Descargas de linha"* é usual assumir um modelo matemático mais simples, denominado *"Modelo Linearizado Simplificado"*, ou seja:

$$U = U_{Ref} + k_4 I \qquad (II.3.9.1.6)$$

onde:

k_4 = Constante de Proporcionalidade.

O modelo acima necessita de *"dois pares tensão versus corrente"* para ser

definido. Logo, considerando, (*Zero*, U_{Ref}) e (*Id*, kV_R) vem:

$$k_4 = \frac{kV_R - U_{Ref}}{Id} \qquad (II.3.9.1.7)$$

Em alguns casos é usual, fazer uso do modelo tradicional desenvolvido para os resistores a carboneto de silício, também conhecido como *"Modelo Alpha"*, ou seja:

$$I = (k\,U)^{\alpha} \qquad (II.3.8.1.8)$$

onde:

I = Corrente de Descarga, em valores de crista [*A*];

U = Tensão Residual, em valores de crista [*V*];

k = Constante de Proporcionalidade;

α = Coeficiente de Não Linearidade.

O modelo acima necessita de *"dois pares tensão versus corrente"* para ser definido. Logo, considerando-se, (I_1, kV_1) e (I_2, kV_2) vem:

$$\alpha = \frac{Log\ I_1 - Log\ I_2}{Log\ kV_1 - Log\ kV_2} \qquad (II.3.8.1.9)$$

e;

$$k = \frac{I_1^{\left(\frac{Log\ kV_1 - Log\ kV_2}{Log\ I_1 - Log\ I_2}\right)}}{kV_1} \qquad (II.3.8.1.10)$$

O *"Modelo Alpha"* deve ser utilizado, com cuidado, dentro de limites

definidos, bem como, a exemplo dos anteriores não deve ser utilizado em situações que exijam precisão.

Ao contrário do que ocorre com os resistores a carboneto de silício, os *"dois pares tensão versus corrente"* não necessitam, na maioria das vezes, se encontrar na mesma década de uma representação logarítmica; no entanto, isto implica que quaisquer extrapolações devem ser cuidadosamente realizadas, recomendando-se não estendê-las por mais de uma década, conforme mostra a Figura *II.3.60* pois, os erros, via de regra, são contra a definição das *"Margens de Segurança"*.

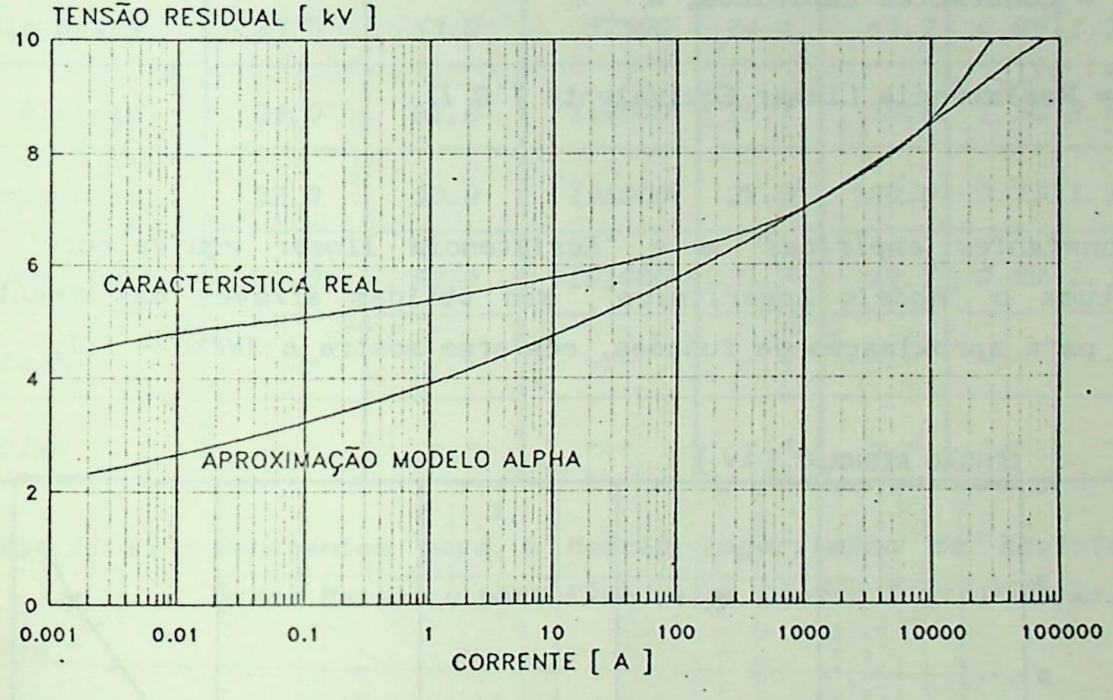


Figura II.3.60 - Modelo Matemático para a Característica Tensão Residual Corrente de Descarga[61]

É possível porém, pouco utilizado, modelar a característica *"Tensão Residual versus Corrente de Descarga"* dos resistores a óxido metálico através de uma função racional. Este tipo de modelo, via de regra, possibilita uma representação mais elaborada que a anterior, permitindo com o auxílio de uma única função obter informações sobre as regiões de baixa, média e alta corrente, mas, por outro lado, exige uma maior

quantidade de dados, obtidos de ensaio, perde em simplicidade para o *"Modelo Logarítimico"* desenvolvido com base nos princípios físicos que regem os mecanismos de condução de corrente nestes resistores, conforme a seguir:

$$U = \frac{k_1}{k_2 - Ln\ (\ I\ )} + R_{LEq.}\ I \qquad (II.3.9.1.11)$$

onde:

k_1, k_2 = Constantes Empíricas; e

$R_{LEq.}$ = Resistência Linear Equivalente [Ω].

As *"Constantes empíricas"* e a *"Resistência linear equivalente"* que constituem o *"Modelo Logarítmico"*, são obtidas através das técnicas padrão para aproximação de funções, conforme mostra o *ANEXO - III.*

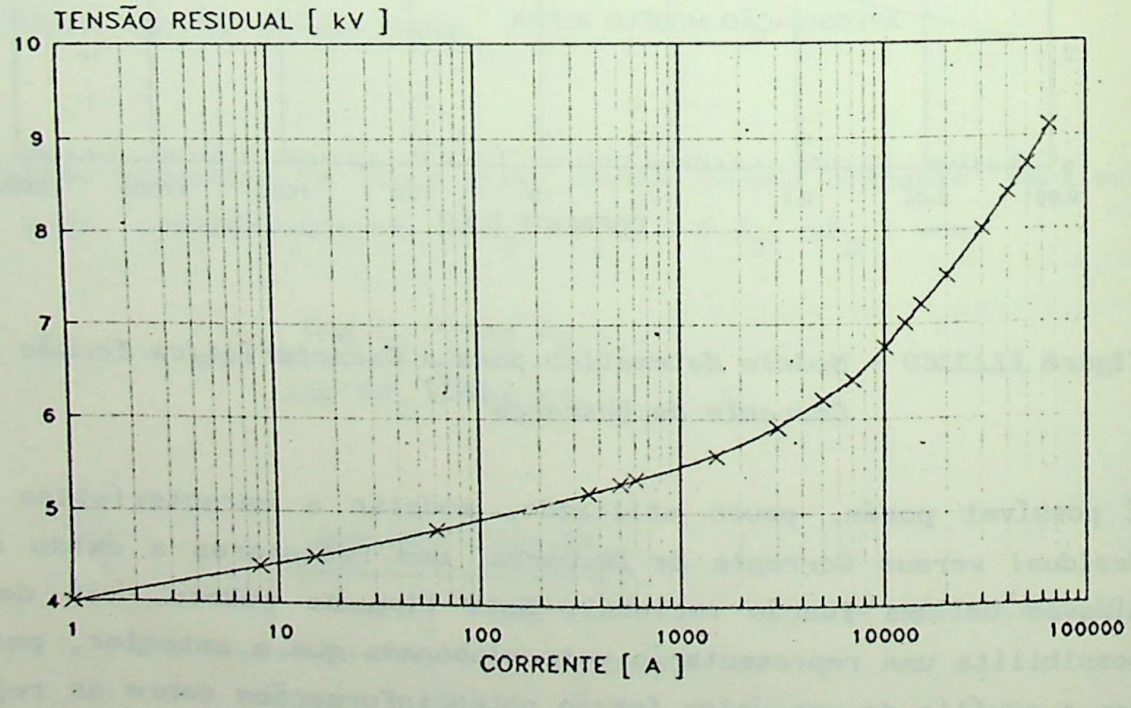


Figura II.3.61 - Comparação entre Dados Experimentais de Tensão e Corrente e o Modelo Logarítimico[65]

Conforme mostra a Figura *II.3.61* a correlação entre os pares *"Tensão residual, Corrente de descarga"*, pode ser considerada como extremamente adequada, fato plenamente confirmado pela Tabela *II.45* que reporta, com respeito aos principais fabricantes e fornecedores de resistores a óxido metálico para pára-raios para sistemas de média tensão, erros máximos da ordem de *3.0 %*.

* Fabricante	Dimensões [mm]		Constantes do Modelo			Erros [%]	
	Altura	Diâmetro	k_1[V]	k_2	R [mΩ]	σ	Máximo
McGraw Edison	20.0	52.0	105000	26.7	55.6	1.10	1.9,-3.7
Ohio Brass	23.0	53.0	97500	24.4	41.7	0.99	1.7,-2.0
G. Eletric	24.0	62.0	119000	29.7	58.0	1.50	2.6,-2.4
Panasonic	32.0	30.0	198000	27.3	180.0	0.71	1.7,-1.2
Meidensha	23.0	63.0	161000	31.7	19.7	0.80	1.3,-2.2
Hitachi	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-
Joslyn	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-	-.-

Tabela II.45 - Constantes para o Modelo Logarítmico de Resistores a Óxido Metálico para Pára-raios Classe Distribuição.

** Nota -*

→ Dados obtidos para impulsos normalizados 8 x 20 μs.

A característica *"Tensão Residual versus Corrente de Descarga"* dos resistores a óxido metálico é levantada em laboratório para corrente com forma padronizada, ou seja, *8 x 20 μs* e *4 x 10 μs*, usualmente, ao redor da corrente nominal, fato que implica na necessidade de correção dos modelos, acima descritos, para correntes com forma diferente da padronizada.

Deste modo, de forma complementar, é necessário, em muitos casos,

realizar uma modelagem adicional, também determinística, que leve em conta o efeito da variação da *"Tensão Residual"* com o *"Tempo até a Crista da Corrente"*.

A modelagem determinística da característica *"Tensão Residual versus Tempo até a Crista da Corrente"*, normalmente, apresenta grande dificuldade, pois, na maioria dos casos, os resultados entre fabricantes são conflitantes, fato que, dificulta a obtenção de uma característica unificada, a exemplo da que existe para a característica *"Tensão Disruptiva Máxima versus Tempo"* dos centelhadores. Em tese, os conflitos são originários de erros de medida, mas até que se determine um sistema de medidas com aceitação universal, considera-se adequado adotar como dados base, os fornecidos e, principalmente, garantidos pelos fabricantes de pára-raios.

Por razões de semelhança a característica *"Tensão Residual versus Tempo até a Crista da Corrente"*, obtida dos resultados do conjunto de ensaios de tensão residual frente a impulsos atmosférico e de manobra é, usualmente, corrigida pelo fator k_{FO}, definido conforme a seguir:

$$k_{FO} = \left(\frac{\left[\frac{dI}{dt} \right]_{NP}}{\left[\frac{dI}{dt} \right]_{P}} \right)^{0.055} \qquad (II.3.9.1.12)$$

onde:

$\left[\frac{dI}{dt} \right]_{NP}$ = Frente de Onda Não Padronizada [kA]; e

$\left[\frac{dI}{dt} \right]_{P}$ = Frente de Onda Padronizada [kA].

Neste caso,

$$U_{R_F} = k_{FO}\, U_{R_P} \qquad (II.3.9.1.13)$$

onde:

U_{R_F} = Tensão Residual para Corrente com Frente não Padronizada; e

U_{R_P} = Tensão Residual para Corrente com Frente Padronizada;

Devido ao carácter empírico de *(II.3.9.1.12)*, restrito a um pequeno conjunto de fabricantes, é recomendável que se verifique o seu grau de representatividade, quando da modelagem da característica de um pára-raios de procedência genérica.

II.3.9.2 - DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA PARASITA

Quando da modelagem para correntes com taxa de crescimento, distintas da padronizada, o acoplamento mútuo formado pelos resistores, ou seja, pára-raios e o equipamento protegido, pode ser modelado por uma indutância, retirada de dados de ensaio de tensão residual, ou pela incorporação às expressões que modelam a característica *"Tensão Residual versus Corrente de Descarga"* dos resistores de um fator de correção para taxas de crescimento de tensão superiores à padronizada.*

* *Nota -*

→ *Corrigir a Tensão residual implica despresar o fato das formas de tensão e corrente residuais não estarem em fase. Em termos de estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência, esta atitude é, aparentemente, correta, no entanto em termos de análise do comportamento do pára-raios conduz a erros, principalmente, em termos de forma, haja vista, o fato da indutância parasita ser de pequena monta.*

Considerando agora:

$\frac{dI}{dt}$ = Taxa de Crescimento da Corrente *[kA/μs]*;

I_{Max} = Corrente Máxima *[kA]*;

$kV_{I_{Max}}$ = Tensão Residual para Corrente Máxima *[kV]*; e

kV_{Max} = Tensão Residual Máxima [kV].

vem:

$$L_{PR} = \frac{kV_{Max} - kV_{I_{Max}}}{\frac{dI}{dt}} \qquad (II.3.9.2.1)$$

onde:

L_{PR} = Indutância Parasita do Pára-raios [μs].

II.3.9.3 - MODELO MATEMÁTICO COMPLETO

O modelo matemático completo da parte interna ativa, utilizada para fins de *"Estudos de Coordenação de Isolamento"*, de um pára-raios a óxido metálico contempla, em tese, duas possibilidades distintas:

a) - O Modelo da Característica Resistiva do Pára-raios; e

b) - Inclusão das Características Indutiva e Capacitiva ao Modelo da Característica Resistiva.

A escolha de uma das possibilidades acima se encontra relacionada, basicamente, com qual o tipo e grau de detalhamento dos estudos que se pretende realizar. Estudos genéricos de transitórios eletromagnéticos, normalmente, não necessitam de modelos para os pára-raios com nível de detalhamento elevado ao ponto de envolver a indutância parasita e a capacitância a freqüência industrial. Por outro lado, estudos específicos, relativos ao desempenho do pára-raios, por exemplo, frente a sobretensões em freqüência industrial, necessitam de um modelo extremamente detalhado que aborde, além da parte interna ativa, o desempenho térmico do conjunto resistores e invólucro.

Entre estes extremos se encontram alguns estudos relativos ao desempenho

dos pára-raios frente a impulsos atmosféricos, conforme mostra a Figura *II.3.62.*

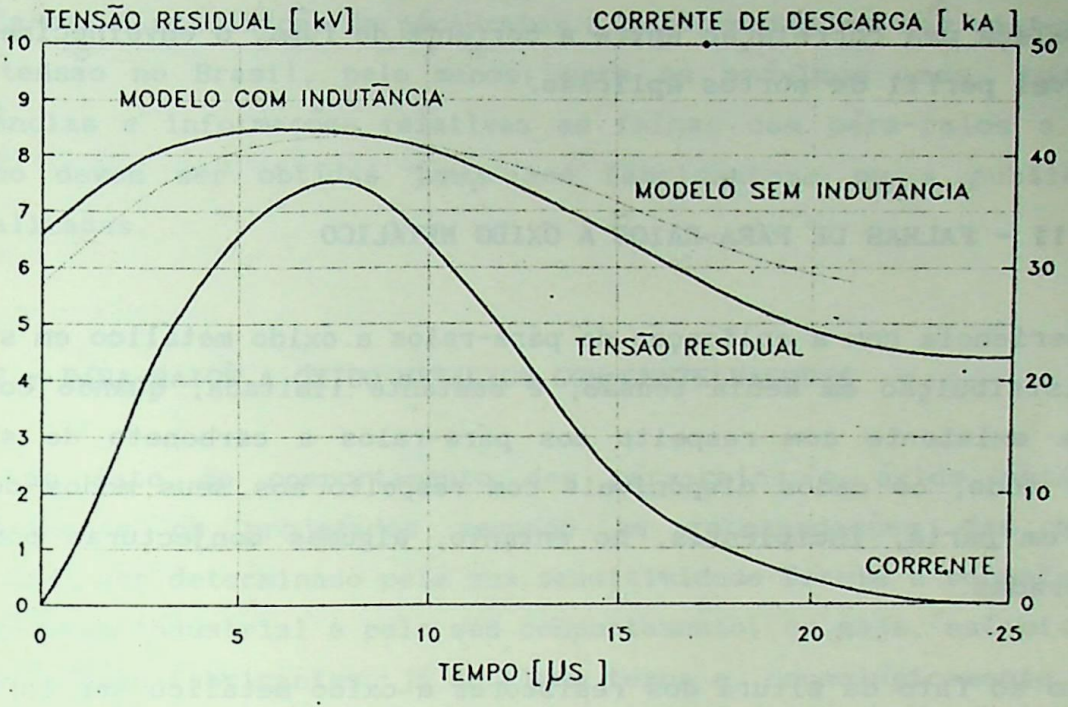


Figura II.3.62 - Forma da Tensão Residual de um Pára-raios a Óxido Metálico Segundo Modelo Logarítimico, com e sem o Efeito da Indutância Parasita[6]

II.3.10 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

Ao contrário dos pára-raios a carboneto de silício com uma folha de serviço de mais de meio século, os pára-raios a óxido metálico pouco tempo tem de serviço, e a experiência básica com os mesmos se encontra, praticamente, concentrada em sistemas de alta e extra alta tensão.

Os principais problemas de campo, relatados até o momento, se encontram relacionados com o desempenho frente a contaminação ambiental, inclusive sob chuva que, por sua vez, impõe um forte desequilíbrio no perfil de distribuição de tensão sobre a superfície do pára-raios, fato que, implica na aplicação de campos elétricos radiais ao espaço em ar ou nitrogênio entre a superfície da coluna de resistores e o do invólucro.

Com respeito ao desempenho frente a surtos atmosféricos e de manobra,

poucos estudos foram realizados, mas existem fortes indícios que através da monitoração da corrente de fuga do pára-raios é possível que se estabeleça uma correlação entre a corrente de fuga, o envelhecimento e o provável perfil de surtos aplicado.

II.3.11 - FALHAS DE PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

A experiência com a aplicação de pára-raios a óxido metálico em sistemas de distribuição em média tensão, é bastante limitada, quando comparada com a existente com respeito aos pára-raios a carboneto de silício; deste modo, os dados disponíveis com respeito aos seus modos de falha são, em parte, incipientes, no entanto, algumas conjecturas podem ser elaboradas.

Devido ao fato da altura dos resistores a óxido metálico ser inferior a dos resistores a carboneto de silício, as distâncias de escoamento internas a um pára-raios a óxido metálico são bastante reduzidas; praticamente, idênticas as existentes nos pára-raios a carboneto de silício. Deste modo, é de se supor que os pára-raios a óxido metálico devem apresentar problemas de trilhamento, devido a penetração de umidade semelhantes aos que ocorrem nos pára-raios a carboneto de silício. Estes problemas podem ser agravados pela presença de subprodutos da atividade elétrica interna, oriunda da presença de poluição ou mesmo chuva, que na forma de sais, quando expostos a umidade formam películas altamente condutoras que, virtualmente curto circuitam os resistores. Um outro ponto ainda não levantado é o que diz respeito a real influência destes subprodutos, no caso, quando da ausência de umidade sobre a suportabilidade dos resistores a óxido metálico.

De modo geral, é interessante notar que, os métodos de vedação dos pára-raios, virtualmente, independem do fato dos mesmos serem a óxido metálico ou a carboneto de silício e, considerando que, segundo os dados disponíveis no momento, os mecanismos de falha a curto e médio prazos envolvem a presença de umidade os pára-raios a óxido metálico, pelo menos, com respeito a este aspecto, devem apresentar o mesmo grau de

confiabilidade que seus equivalentes a carboneto de silício.

Devido a baixa utilização de pára-raios a óxido metálico nos sistemas em média tensão no Brasil, pelo menos, para os próximos anos, todas as experiências e informações relativas as falhas com pára-raios a óxido metálico devem ser obtidas junto aos fabricantes, ou a publicações especializadas.

II.3.12 - PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO COM CENTELHADORES

Devido ao fato do comportamento dos pára-raios a óxido metálico, principalmente os projetados segundo as recomendações das Normas *ANSI - CSA*, ser determinado pela sua sensitividade frente a sobretensões em freqüência industrial e pelo seu comportamento, ou seja, estabilidade térmica, alguns fabricantes, já de algum tempo e, cronológicamente, para sistemas em média tensão, inicialmente no Brasil reconheceram as vantagens de se isolar eletricamente parte ou mesmo* todo o pára-raios sobre várias condições operativas com o auxílio de centelhadores.

** Nota -*

→ *Este é, basicamente, o conceito implícito na definição de centelhadores paralelo "Shunt" série, respectivamente. Convém ressaltar que no caso de centelhadores série com equalização de potencial os resistores a óxido metálico são parcialmente isolados.*

Considerando as características extremamente favoráveis apresentadas pelos resistores a óxido metálico, projetar pára-raios com centelhadores equipados com estes resistores se constitui em uma tarefa bem menos crítica que a normalmente enfrentada quando se projeta pára-raios com resistores a carboneto de silício.

De fato, o elevado grau de não linearidade dos resistores a óxido metálico permite projetar pára-raios que, apesar de apresentarem baixo

nível de proteção, frente a impulso atmosféricó, também apresentam corrente subsequente bastante reduzida, via de regra, inferior a *1 Ampére* e, deste modo, as principais preocupações embutidas no projeto da parte ativa dos pára-raios passam a ser:

a) - Definir um centelhador dotado de nível de proteção compatível com os reduzidos valores de tensão residual; e

b) - Perda de característica, devido a erosão dos eletrodos devido a descarga de surtos de manobra de grande amplitude.

Um dos pontos que sempre suscinta polêmicas é a razão dos custos relativos aos centelhadores, e, com respeito a este ponto específico, caso sejam consideradas estruturas de custo e fabricação tipicamente européias ou mesmo norte - americanas, os centelhadores, via de regra, oneram, em muito, o custo final do pára-raios; por outro lado, no caso das estruturas de custo e de fabricação existentes no Brasil, pelo menos no presente momento, observa-se um comportamento contrário ao anteriormente exposto* e, deste modo, comentários obtidos a este respeito, junto a literatura internacional devem ser encarados com a devida parcimônia.

** Nota -*

→ *Um ponto interessante que deve ser relembrado é o relativo a filosofia de projeto, pelo menos como originalmente proposta, adotada no Brasil, que prevê uma corrente subseqüente superior ao limite de 1 Ampére implícito nas normas, fato que atua no sentido de reduzir a dimensão da coluna de resistores a óxido metálico que compõe a parte interna ativa do pára-raios.*

Já os pontos relativos à complexidade do projeto e confiabilidade, notar, que existem mais elementos em série, são, sem sombra de dúvida, incontestáveis, porém resta sempre saber qual o real impacto destes

fatos no desempenho global dos pára-raios.

Existem, conforme mostra a Figura *II.3.63*, tres tipos distintos de projetos de pára-raios a óxido metálico com centelhadores, sendo que, somente um deles, isola totalmente a coluna de resistores, mas que, no entanto, devido a razões de custo, principalmente, em sistemas de distribuição em média tensão deve ser o preferencialmente utilizado.

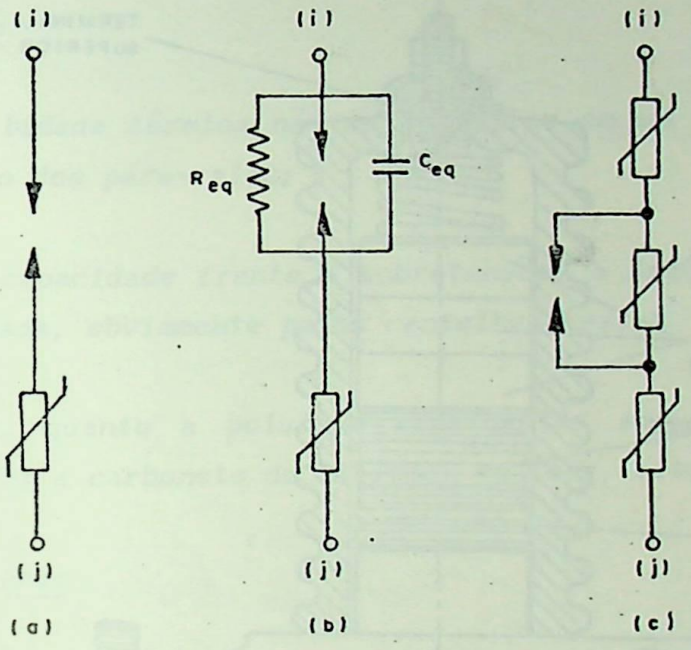


Figura II.3.63 - Projetos Usuais de Pára-raios a Óxido Metálico com Centelhadores[6-17-18-20]

a)- Centelhador Série;

c)- Centelhador Série com Equalização de Potencial; e

b)- Centelhador Shunt.

II.3.12.1 - PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO COM CENTELHADORES SÉRIE

Os centelhadores série se constituem no arranjo mais simples e, por conseguinte, mais barato que pode ser utilizado em um pára-raios a óxido metálico com centelhadores, que a exemplo do que se verifica nos pára-raios a carboneto de silício atua no sentido de isolar

completamente os resistores.

Os centelhadores série podem ser internos, como na maioria dos projetos de pára-raios, ou externos, a um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, como exigido por alguns sindicatos de trabalhadores em redes elétricas em alguns estados dos *Estados Unidos da América.*

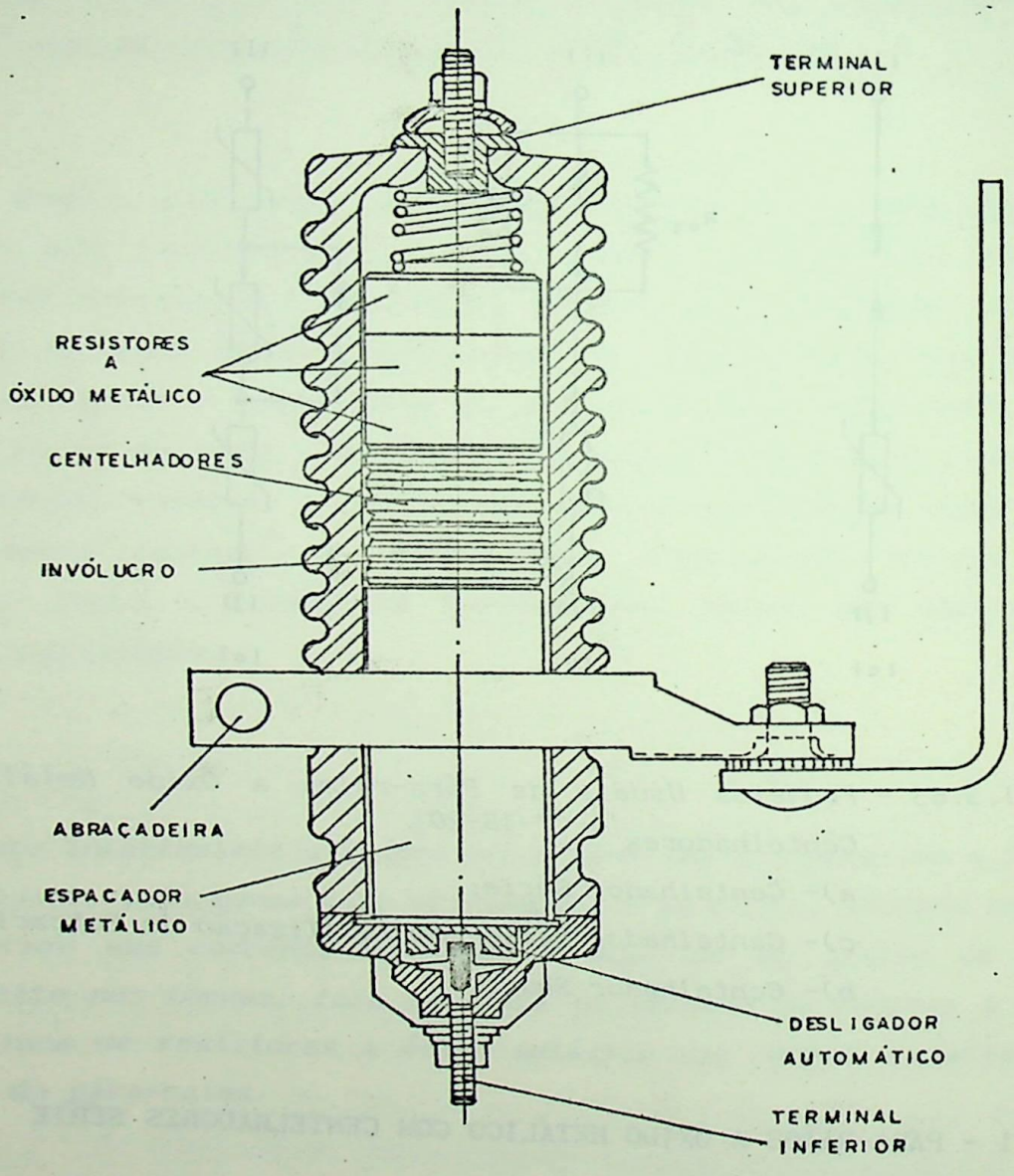


Figura II.3.64 - Vista em Corte de um Pára-raios para Sistemas de Distribuição (Permissão - 3M do Brasil Ltda.)

Este tipo de pára-raios, conforme mostra a Figura *II.3.64*, pode ser utilizado na proteção de linhas aéreas contra descargas atmosféricas ou em qualquer tipo de aplicação onde a deficiência dos centelhadores em responder a impulsos com elevada taxa de crescimento não apresente importância.

Em resumo, as vantagens, bem como, as devantagens deste tipo de projeto de pára-raios são as seguintes:*

a) - *Vantagens:*

- *A estabilidade térmica não se constitue em um fator limitante na aplicação dos pára-raios;*

- *Elevada capacidade frente a sobretensões a freqüência industrial, determinada, obviamente pelos centelhadores; e*

- *Problemas quanto a poluição semelhantes aos existentes com os pára-raios a carboneto de silício; em tese, resolvidos.*

b) - *Desvantagens:*

- *Resposta frente a impulsos íngrimes de um centelhador a ar.*

* *Nota -*

→ *Não se constitui em novidade o fato que, no presente momento, os resistores a óxido metálico fabricados no Brasil, com tecnologia local, apresentam comportamento aquém dos importados porém, na grande maioria dos casos, muito superior aos equivalentes a carboneto de silício. Deste modo, os centelhadores série utilizados nos pára-raios a óxido metálico fabricados com tecnologia nacional apresentam a função, complementar, de proteger, de modo global, os resistores. Um ponto de extrema importância que deve ser sempre relembrado é o fato que, uma vez adequadamente construídos, estes pára-raios devem*

apresentar desempenho superior aos seus equivalentes a carboneto de silício.

II.3.12.2 - PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO COM CENTELHADORES SÉRIE E EQUALIZAÇÃO DE POTENCIAL .

Nos pára-raios para sistemas em alta tensão, em tese, segundo as normas *ANSI - CSA*, classe intermediária ou estação, ou quando se necessita controlar a tensão disruptiva dos centelhadores em pára-raios classe distribuição, impondo um comportamento, proporcional, é necessário que os centelhadores apresentem equalização de potencial.

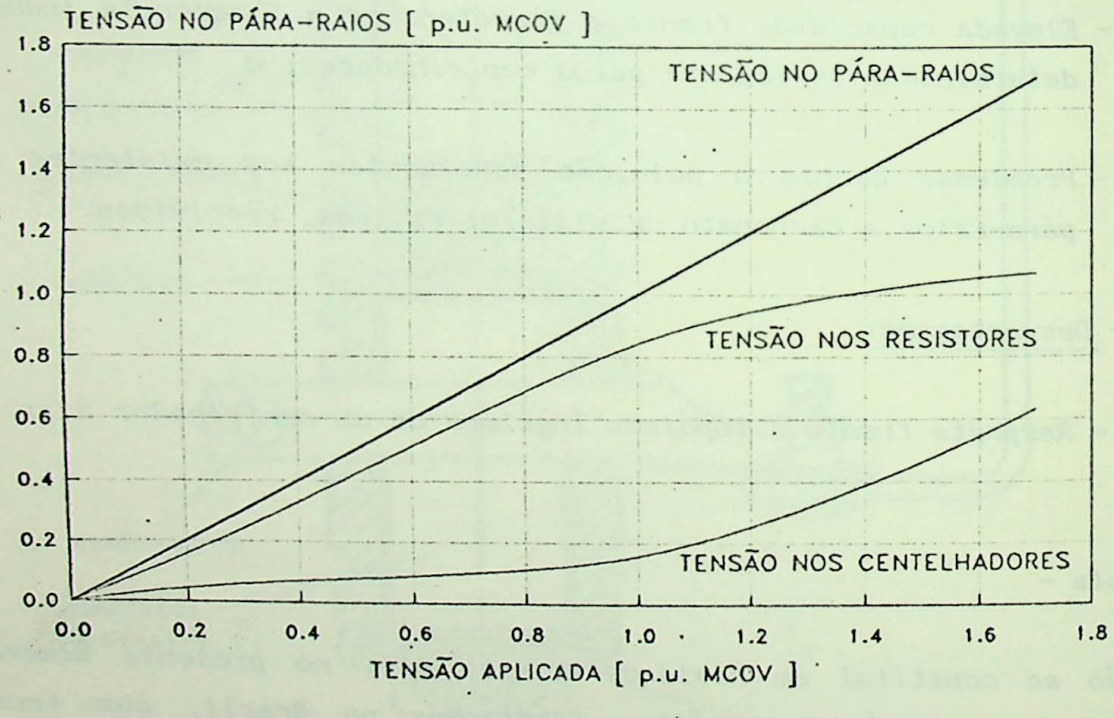


Figura II.3.65 - Distribuição de Tensão em um Pára-raios com Centelhadores com Equalização de Potencial Segundo Projeto Ohio Brass[96]

No caso específico dos pára-raios a óxido metálico, a equalização de potencial, ao contrário dos pára-raios a carboneto de silício, apresenta

característica predominantemente capacitiva, portanto, linear.*

** Nota -*

→ *Em um pára-raios com centelhadores, o tipo de equalização de potencial também é determinado pelas características dos resistores que, no caso dos a carboneto de silício e a óxido metálico são bastante distintas.*

A interação com os resistores principais, a óxido metálico, é tal que, a medida que a tensão aplicada cresce, os centelhadores passam a suportar parcelas cada vez maiores da tensão aplicada ao pára-raios, conforme mostra a Figura *II.3.65.*

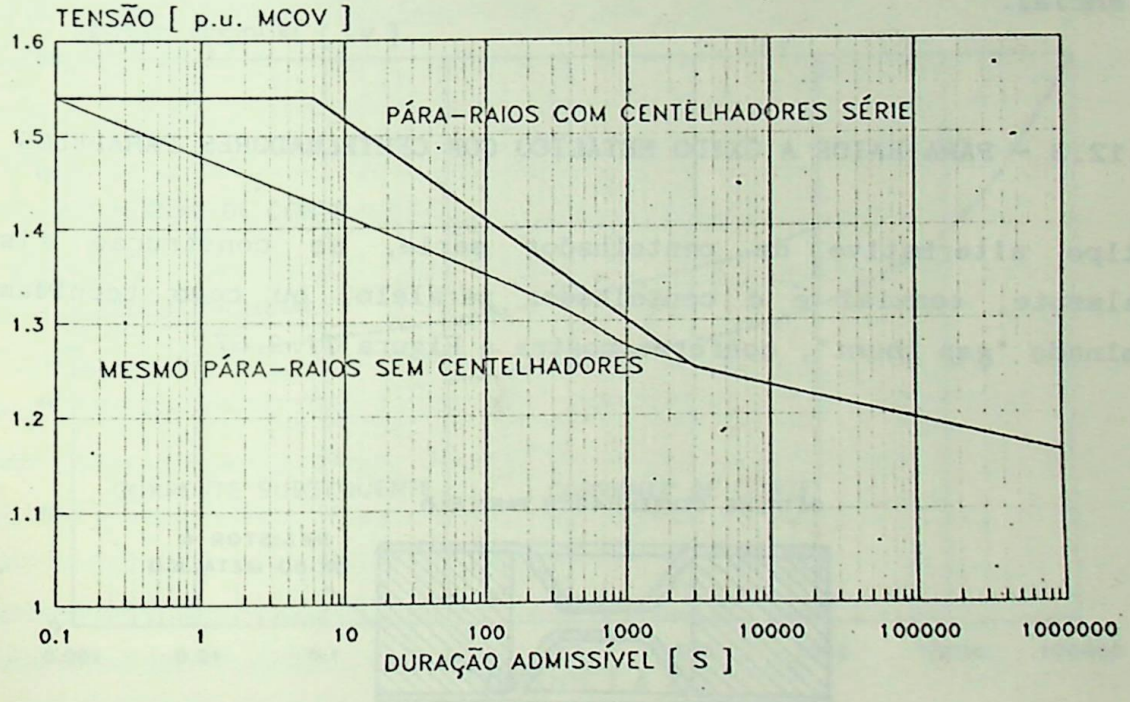


Figura II.3.66 - Efeito da Utilização de Centelhadores com Equalização de Potencial na Suportabilidade Frente a Sobretensões em Freqüência Industrial de um Pára-raios[96]

Normalmente, nestes casos, sob condições normais de tensão em freqüência industrial, a tensão aplicada aos centelhadores, por projeto, fica em torno de *0.20 p.u.* da tensão aplicada ao pára-raios. Devido ao fato do sistema de equalização ser predominantemente capacitivo, ele não dissipa

elevados níveis de energia mesmo quando submetido a sobretensões em freqüência industrial de baixa amplitude, deste modo, a suportabilidade frente a sobretensões a freqüência industrial deste tipo de pára-raios é significativamente superior que a apresentada por um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores equivalente, conforme indica a comparação mostrada na Figura *II.3.66.**

* *Nota -*

→ *É, aparentemente, óbvio que pára-raios com centelhadores série sem equalização de potencial devem apresentar suportabilidade frente a sobretensões em freqüência industrial superior a qualquer outro projeto equivalente com centelhadores série e equalização de potencial.*

II.3.12.3 - PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO COM CENTELHADORES PARALELOS

Um tipo alternativo de centelhador série, de construção física, normalmente, coaxial é o centelhador paralelo, ou como tecnicamente denominado *"gap shunt"*, conforme mostra a Figura *II.3.67.*

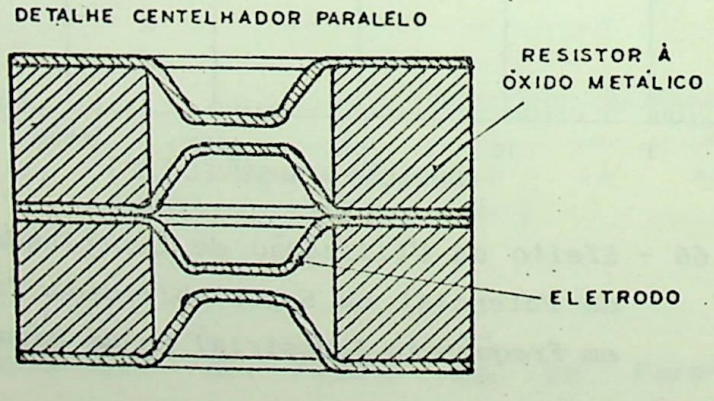


Figura II.3.67 - Corte de um Centelhador Coaxial Paralelo Típico[64]

Os centelhadores paralelos substituem com grande facilidade os centelhadores série com equalização de potencial, pois, é razoavelmente óbvio, que os fabricantes de resistores a óxido metálico podem vir a fabricá-los com maior facilidade.

O desempenho deste pára-raios é algo intermediário entre o de um pára-raios com centelhadores série e sem centelhadores. Deste modo, a filosofia de projeto adotada nestes casos prevê um desempenho semelhante ao de um pára-raios sem centelhadores frente a impulsos de manobra, fato que pressupõem um baixo desgaste dos eletrodos dos centelhadores, bem como, um desempenho semelhante ao de um pára-raios com centelhadores série, frente a impulsos atmosféricos, fato que, pode implicar em níveis de proteção bastante reduzidos.

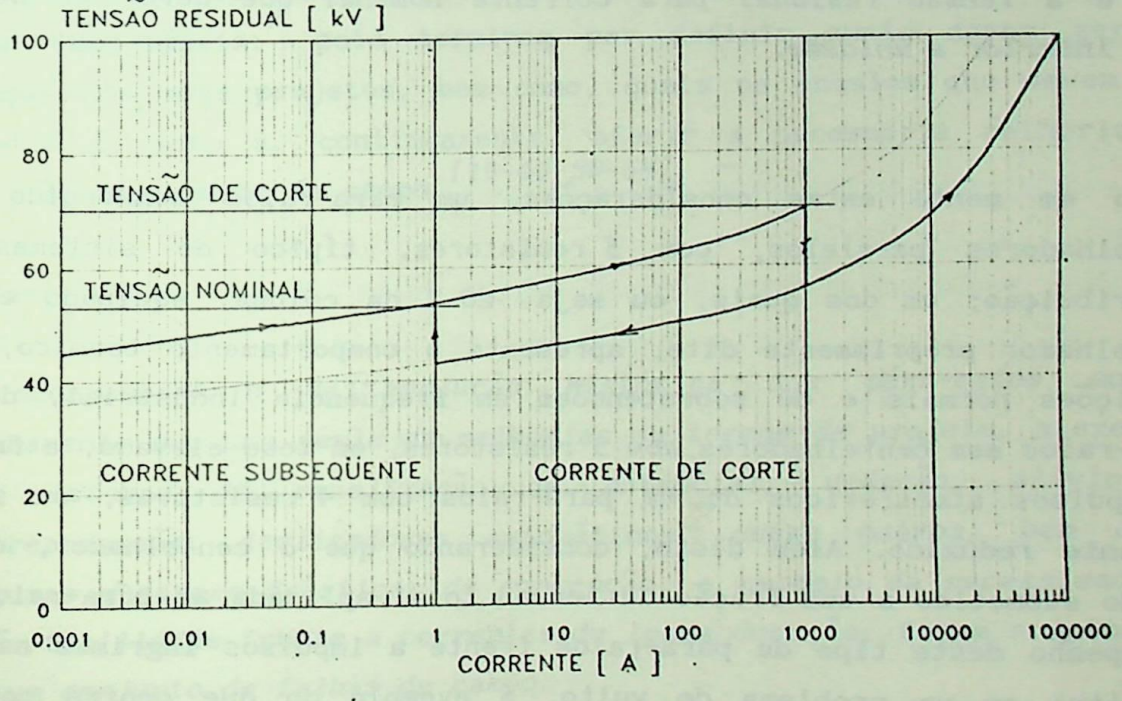


Figura II.3.68 - Característica Operativa de um Pára-raios com Centelhadores Paralelos[6-64]

Normalmente, os centelhadores paralelos equipam entre *10 %* a *20 %* da coluna de resistores dos pára-raios, e podem ser, fisicamente agrupados ou distribuídos a cada quinto ou décimo. A entrada, em condução dos centelhadores paralelos, determinada pela *"Corrente de Corte"*, com valor entre *1000 A* e *3000 A*, conforme mostra Figura *II.3.68*, deve ser

coordenada com as características elétricas e térmicas dos resistores que os mesmos curto circuitam quando de sua atuação.**

Notas -

** - Conforme mostra a Figura II.3.68; os pára-raios com centelhadores paralelos possuem uma corrente subseqüente, normalmente inferior a existente em qualquer pára-raios a carboneto de silício equivalente. Convém ressaltar que a escolha da amplitude da corrente subseqüente é determinada, basicamente, pelo nível de proteção oferecido pelo pára-raios*

*** - Um ponto importante neste caso é a relação entre a Tensão de corte e a Tensão residual para Corrente nominal que deve ser sempre inferior a unidade.*

Tendo em mente estas considerações, um pára-raios construído com centelhadores paralelos, com 5 resistores, típico de sistemas de distribuição; um dos quais, ou seja, 20 % da coluna, equipado com o centelhador propriamente dito, apresenta o comportamento térmico, sob condições normais e de sobretensões em freqüência industrial, de um pára-raios sem centelhadores com 5 resistores, em tese elevado, e frente a impulsos atmosféricos de um pára-raios com 4 resistores, ou seja, bastante reduzido. Além disto, considerando que o centelhador, opera quando submetido a uma fração da tensão total aplicada ao pára-raios, o desempenho deste tipo de pára-raios frente a impulsos íngrimes não se constitui em um problema de vulto, a exemplo do que ocorre com os pára-raios construídos com centelhadores série.*

** Nota -*

→ Os pára-raios a óxido metálico com centelhadores série e equalização de potencial, devido ao fato de seus centelhadores entrarem em condução sob uma parcela da tensão total aplicada apresentam comportamento semelhante frente a impulsos íngrimes.

II.4 - MECANISMOS DE FALHA DOS PÁRA-RAIOS E SUAS CONSEQÜÊNCIAS

Where there is no vision the people perish
(Provérbios XXIX - 18)

Devido a natureza aleatória das solicitações impostas aos pára-raios, a sua concepção geral e, por conseguinte, os seus métodos de construção vem sendo, ao longo dos tempos, fortemente influenciados pelo seu desempenho de campo. Deste modo, o conhecimento dos mecanismos associados às falhas dos pára-raios e, principalmente, a série de conseqüências resultante das mesmas são atividades complementares de grande importância,* pois terminam por definir quais devem ser as mudanças nos seus projetos, bem como, quais os ensaios que devem ser adotados de modo a, continuamente, aferir a necessária melhoria do perfil de desempenho de campo. *[19-49-50-64]*

* *Nota -*

→ *O acompanhamento da evolução histórica dos pára-raios mostra claramente que uma série de melhorias em termos de projeto, a exemplo de sistemas de equalização de potencial, vedação, alívio de sobrepresssão, desligadores automáticos, entre outros, bem como, algumas mudanças drásticas de concepção, a exemplo da necessidade de suportabilidade frente a correntes de longa duração, foram originárias de um conjunto de falhas de campo.*

Considerando que a construção física e os métodos de instalação dos pára-raios a carboneto de silício e a óxido metálico são bastante similares, é razoável supor que os modos de falha e suas consequências são, virtualmente, idênticos. *[6]* Por outro lado, é sempre conveniente, relembrar que a quantidade de pára-raios a carboneto de silício instalados, bem como, o seu tempo médio de instalação, em alguns casos,

por volta de *40 anos*, fornece uma massa de dados sobre seu desempenho imensamente superior, pelo menos, em volume a existente para os pára-raios a óxido metálico fato que, em tese, pode tornar algumas das conclusões, parcialmente tendenciosas.*

** Nota -*

→ *O comportamento frente a contaminação ambiental pode ser citado como um bom exemplo de uma conclusão tendenciosa pois, a princípio, é possível imaginar que a ausência de centelhadores atuaria no sentido de eliminar os problemas relativos a presença de depósitos de contaminantes sob os invólucros dos pára-raios, porém, a médio prazo, foram detectados uma série de novos fenômenos, que embora existam nos pára-raios a carboneto de silício, são para os mesmos, aparentemente inócuos.*

II.4.1 - MECANISMOS DE FALHA DE UM PÁRA-RAIOS

O desenvolvimento dos mecanismos de falha de um pára-raios, ou seja, a perda de sua capacidade de suportar as solicitações em freqüência industrial e, via de regra, de realizar seu ciclo de operação corretamente,* depende, fundamentalmente, da associação entre os motivos responsáveis por sua origem e os mecanismos relacionados com o crescimento do processo assim iniciado.

** Nota -*

→ *Para executar um ciclo de operação, o pára-raios deve atuar frente a solicitação a ele imposta, no caso de pára-raios para sistemas em média tensão, normalmente, surtos de origem atmosférica, protegendo deste modo o sistema contra a sobretensão associada, e, retornar a condição prévia inicial.*

A falha de um pára-raios pode se desenvolver de modo súbito, por

exemplo, em um intervalo de tempo inferior a meio ciclo de tensão em freqüência industrial, ou de modo gradual, neste caso, no decorrer de um intervalo de tempo que pode estar situado entre vários ciclos de tensão em freqüência industrial ou mesmo, entre vários dias.

Uma série de motivos podem conduzir um pára-raios a carboneto de silício ou a óxido metálico a falhar de modo súbito, porém, dentre estes, os mais comuns são os seguintes:

a]- Perfuração dos resistores não lineares principais* devido ao fenômeno de concentração de corrente e, por conseguinte, elevação anormal de temperatura, em canais condutores, fenômeno denominado de *"tunneling"* que pode ser oriundo de um único pulso de *"corrente de longa duração"* ou de *"operações sucessivas"* em um *"curto espaço de tempo"*;**

b]- Descarga interna devido a um possível curto-circuito entre os arcos formados na *"região de contato"* entre os resistores não lineares principais, notavelmente, quando da descarga de correntes de grande amplitude;

c]- Descarga interna nos centelhadores, caso existam, ou nos resistores não lineares principais, devido aos fenômenos relacionados com a *"penetração de umidade"* nos invólucros dos pára-raios;[49-50] ou

d]- Falha dielétrica no material que compõe o *"colar isolante"* dos resistores não lineares principais.[19]

Notas -

* - *Nos sistemas de equalização de potencial dos pára-raios a carboneto de silício também se utilizam resistores não lineares, porém, dotados de características distintas das oferecidas pelos resistores não lineares utilizados para limitar a corrente*

subseqüente, conhecidos como principais.

** - *Normalmente, as falhas devido a operações sucessivas são relacionadas com a operação dos pára-raios frente a sobretensões sustentadas, fato extremamente problemático nos pára-raios a carboneto de silício, ou frente a poluição atmosférica onde, no caso específico dos pára-raios a carboneto de silício a falha se desenvolve devido existência de uma série, normalmente, contínua de interrupções de corrente subseqüente.*

No caso dos pára-raios a carboneto de silício e a óxido metálico com centelhadores, os motivos que conduzem a falhas graduais mais comuns são os seguintes:

a]- Descarga externa aos resistores de equalização de potencial devido aos fenômenos relacionados com a lenta penetração de umidade e a formação de compostos, normalmente, óxidos condutores; [49-50]

b]- Atuação repetida dos centelhadores devido a contaminação ambiental* ou a uma série de descargas de manobra ou de correntes de longa duração repetitivas;

c]- Descargas nos centelhadores devido a metalização dos seus espaçadores entre eletrodos causada por descargas de corrente de elevada amplitude, ou ainda a falhas na interrupção de corrente subseqüente; [19-49-50]

d]- Falha na interrupção de correntes subseqüentes; [19-49-50]

e]- Operação na presença de sobretensões em freqüência industrial anormais relacionadas com, por exemplo, ferrorressonância, ou perda de neutro; [16-24-46] ou

f]- Avalanche térmica, ou seja, "*Thermal runaway*" dos resistores de

equalização de potencial.**

Notas -

** - Este fenômeno é preponderante, principalmente, nos pára-raios a carboneto de silício e nos a óxido de zinco com centelhadores dotados de elevada corrente subseqüente.*

*** - Oriunda da elevada carga térmica imposta ao sistema de equalização de potencial por sobretensões em freqüência industrial, obviamente, inferiores a "Tensão disruptiva sob freqüência industrial", ou pela presença de contaminação ambiental em pára-raios multi-unidades.*

Já com relação aos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores os motivos que conduzem a falhas graduais mais comuns são os seguintes:

a]- Degradação dos resistores não lineares devido a existência de contaminação ambiental; *[94-95]*

b]- Falha dielétrica de um ou mais resistores não lineares; ou

c]- Avalanche térmica, ou seja, *"Thermal runaway"*, resultado da absorção de energia excessiva, degradação dos resistores não lineares ou sobretensões em freqüência industrial.

II.4.2 - FATORES QUE AFETAM OS MECANISMOS DE FALHA DE UM PÁRA-RAIOS

Independentemente de qual seja a causa ou velocidade com que o fenômeno se desenvolve, durante o estágio final de uma falha envolvendo um pára-raios, é formado no interior do invólucro do mesmo um arco de potência, ao qual, obviamente, se encontra relacionado um determinado nível de energia que, finalmente, resulta no colapso mecânico do conjunto formado pelo invólucro e seu sistema de vedação, normalmente,

devido:

a]- Ao crescimento rápido da pressão no interior pára-raios, até que sejam atingidos valores muito elevados o que fatalmente implica na explosão do invólucro; ou

b]- A imposição de um choque térmico muito severo ao material do invólucro fato que, normalmente, resulta em seu colapso por fragmentação.

A Figura *II.4.1* mostra que, normalmente, uma falha por choque térmico ocorre sob um nível de energia inferior ao necessário para provocar uma falha por explosão do invólucro.[97]

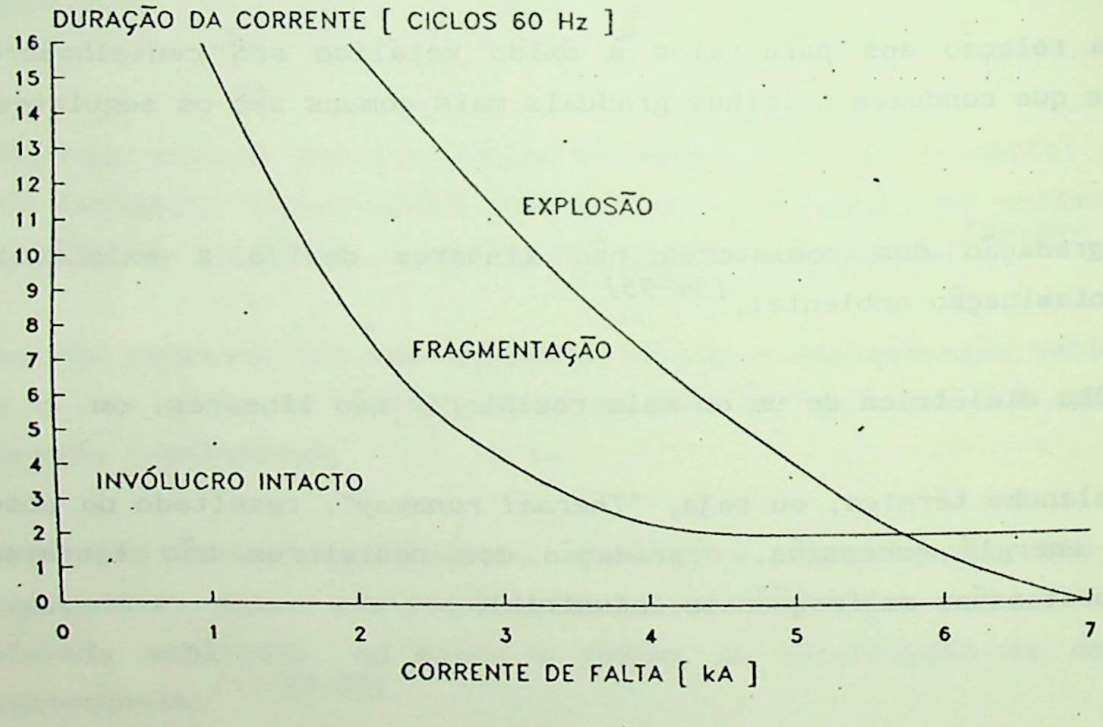


Figura II.4.1 - Característica Tempo Versus Corrente Limite para os Modos de Falha de um Pára-raios Classe Distribuição Típico[97]

II.4.2.1 - ENERGIA ASSOCIADA AO ARCO DE POTÊNCIA

Uma vez estabelecido, um arco de potência só é mantido caso a energia

consumida seja superior as perdas na forma de calor. Uma análise detalhada do processo de balanço de energia é bastante complexa e depende de dados tais como, comprimento do arco, amplitude da corrente, grau de confinamento determinado pelos componentes internos do pára-raios, da coluna de plasma, associada ao arco e elevação da pressão interna permitida pelo projeto do invólucro, parâmetros responsáveis pelo controle da *"Tensão de arco - U_{Arco}"*.

Como conseqüência, a *"Tensão de arco - U_{Arco}"* em um pára-raios submetido a uma corrente de falta em freqüência industrial varia instantaneamente com a amplitude desta mesma corrente, bem como, com as mudanças que podem vir a ocorrer no meio físico que envolve o arco, originárias, por exemplo, da atuação dos dispositivos de alívio de sobrepressão, elevação da temperatura ou eventual desintegração do invólucro do pára-raios que, por sua vez, impõem modificações que podem persistir por vários ciclos da tensão em freqüência industrial, conforme mostra a Figura *II.4.2.*

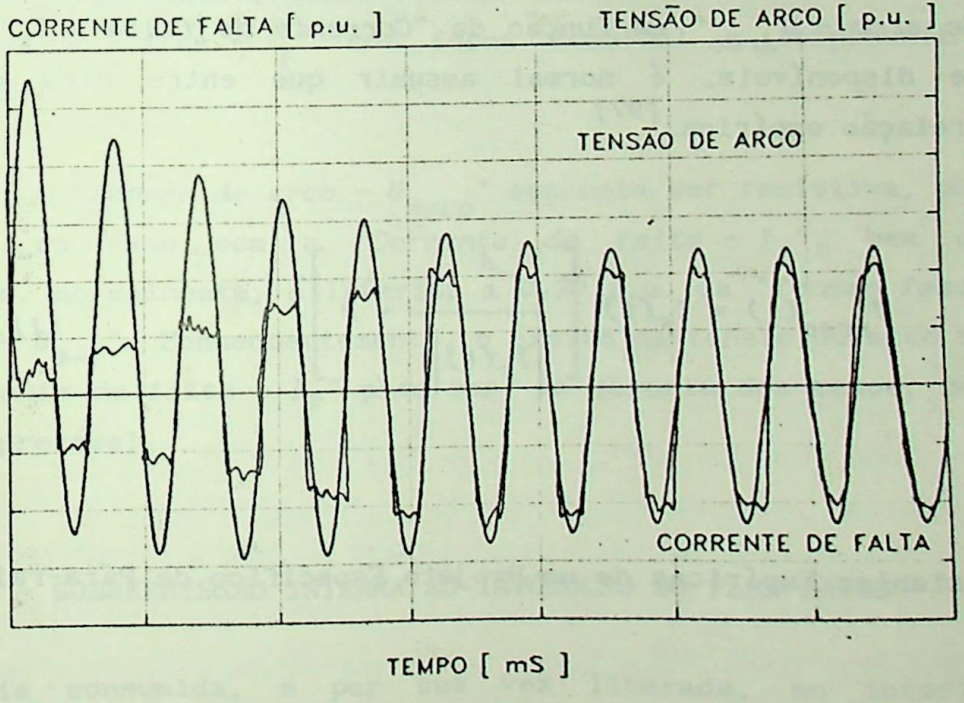


Figura II.4.2 - Tensão de Arco e Corrente de Falta Durante o Desenvolvimento de uma Falha em um Pára-raios Classe Distribuição[6]

O consumo de energia associado a um arco de potência pode ser calculado por integração numérica das formas de corrente e tensão de arco conforme a seguir.[98]

$$E_{Arco} = \int U_{Arco}(t)\ I_F(t)\ dt \qquad (II.4.2.1.1)$$

onde:

E_{Arco} = Consumo de Energia no Arco de Potência [J];

$U_{Arco}(t)$ = Tensão de Arco Instantânea [V]; e

$I_F(t)$ = Corrente de Falta Instantânea [A].

No entanto, como os resultados de ensaios que mostrem o comportamento da *"Tensão de arco - U_{Arco}"* em função da *"Corrente de falta - I_F"* não são usualmente disponíveis, é normal assumir que entre eles existe a seguinte relação empírica.[97]

$$U_{Arco}(t) = I_F(t) \left[\frac{A}{\left| I_F(t) \right|} + B \right] \qquad (II.4.2.1.2)$$

onde:

A, B = Constantes Empíricas de um Projeto Específico de Pára-raios.

A Tabela *II.46* mostra os valores das constantes *"A"* e *"B"* obtidas de ensaios em pára-raios de *18 kV* e *21 kV*. Estas constantes são proporcionais ao comprimento do invólucro dos pára-raios e, por exemplo, deste modo, um pára-raios de *6 kV* possui constantes *"A"* e *"B"* em torno de *30 %* dos valores indicados na Tabela *II.46*.

Constantes Empíricas da Tensão de Arco		
Projeto do Pára-raios	A - [Volts]	B - [Ohms]
Joslyn - Modelo Q	1700	0.15
McGraw Edison - Modelo E7	2500	0.15
McGraw Edison - Modelo E0	1150	0.10

Tabela II.46 - Constantes Empíricas da Tensão de Arco

Deste modo, o *"Consumo de energia teórico"* de um arco de potência é calculado através da substituição adequada da expressão *(II.4.1.2.2)* na expressão *(II.4.1.2.1)*, sendo recomendado, nestes casos, considerar uma *"Corrente de falta - I_F"* com forma senoidal e componente contínua apropriada.

Em geral, a *"Tensão de arco - U_{Arco}"* aparenta ser resistiva, ou seja, se encontra em fase com a *"Corrente de falta - I_F"*, bem como, sua amplitude, normalmente, é inferior a *0.20 p.u.* da *"Tensão fase-terra do sistema - $U_{\Phi-T}$"*. Consequentemente, o efeito da tensão de arco na redução da *"Corrente de falta - I_F"* pode ser, na maioria dos casos, considerado como desprezável.

II.4.2.2 - SOBREPRESSÃO INTERNA AO INVÓLUCRO DO PÁRA-RAIOS

A energia consumida, e por sua vez liberada, no interior de um pára-raios por um arco de potência típico, ou seja, associado a uma corrente de falta da ordem de *5 kA* durante, por exemplo, *10 ciclos*, pode atingir a casa de vários megajoules. Isto resulta no aquecimento do ar ou do nitrogênio existente no interior do invólucro, bem como, na geração de gases devido a vaporização de alguns dos elementos que

compõem o pára-raios propriamente dito. Mesmo nos pára-raios projetados para permitirem o alívio de uma possível sobrepressão interna a rapidez com que o processo de aquecimento se desenvolve, implica em um súbito aumento na pressão interna do invólucro que, por sua vez, pode resultar em sua explosão quando da ocorrência de correntes de falta que execedam a capacidade nominal dos dispositivos*,** previstos para executarem a função de aliviar as sobrepressões. *[19-33-98→102]*

Notas - .

* *Não confundir com os primeiros pára-raios a carboneto de sílicio que apresentavam a mesma designação com significado distinto*

** *Os pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão apresentam duas possibilidades básicas para efetuar o alívio de uma possível sobrepressão interna, uma delas o tradicional dispositivo de alívio de sobrepressão, outra, de menor custo, denominada genéricamente de construção "Tipo Vented" que permite a ejeção dos terminais superior, inferior ou ambos.*

A *"Ruptura"* do invólucro se constitui no ponto crucial a partir do qual, qualquer sobrepressão interna a um pára-raios é liberada. Dependendo do projeto do pára-raios, a condição definida pelo termo *"Ruptura"* resulta da operação dos dispositivos de alívio de sobrepressão, da ejeção dos terminais metálicos superior, inferior ou ambos, responsáveis pela vedação do invólucro ou mesmo, fragmentação do pára-raios. No entanto, independentemente de qual foi o mecanismo que resultou na *"Ruptura"* do invólucro, cada projeto de pára-raios possui um nível de pressão interna específico a partir do qual, este fenômeno apresenta elevada probabilidade de ocorrência.

A *"Pressão de ruptura"* de um determinado pára-raios pode ser diretamente relacionada com a energia liberada por um arco de potência interno ao seu invólucro pois, em um volume fechado de gás, energia, temperatura e pressão são proporcionais. Portanto, dentro de uma limitada faixa de

amplitudes de corrente onde, energia e corrente são proporcionais, é razoável assumir que a *"Energia de ruptura"* é constante, conforme mostra a distribuição horizontal das medidas realizadas em arranjos experimentais, relatada na Figura *II.4.3.*[33]

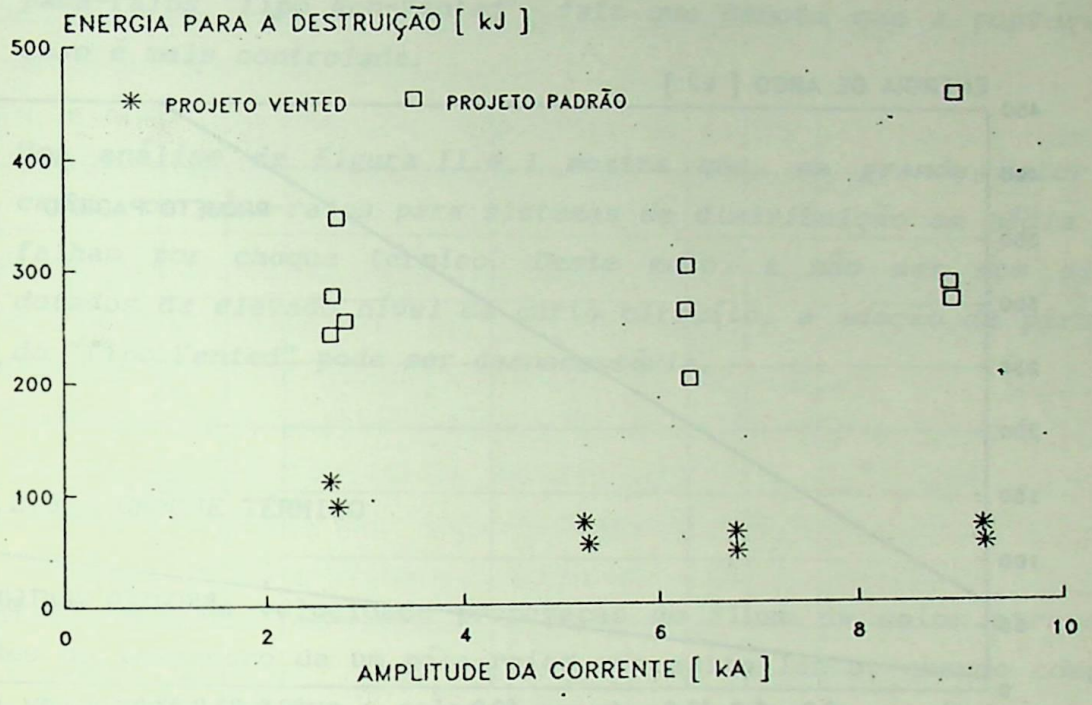


Figura II.4.3 - Energia de Ruptura de Dois Diferentes Projetos de Pára-raios Classe Distribuição[33]

É óbvio que para cada projeto de pára-raios a *"Energia de Ruptura"* das unidades individuais produzidas apresenta um valor médio e um desvio padrão que refletem a qualidade e o processo de produção adotado, deste modo, fatores tais como, variações na suportabilidade dos diferentes materiais utilizados, falhas estruturais nos materiais e tolerâncias dimensionais de fabricação podem ser responsáveis por este comportamento estatístico e, portanto, devem ser objeto de rígido controle.

A Figura *II.4.4* mostra e comprova que a natureza estatística da *"Energia de Ruptura"* dos invólucros dos pára-raios pode ser determinada e analizada. Neste caso, convém ressaltar que os projetos padrão, ou seja,

os tradicionalmente utilizados, também denominados *"Tipo Non-Vented"* suportam níveis de *"Energia de Ruptura"* superiores aos projetos do *"Tipo Vented"* fato, aparentemente, inesperado, que, no entanto, tem sua lógica baseada no significado do termo *"Ruptura"*, que conduz a situações distintas em ambos casos.

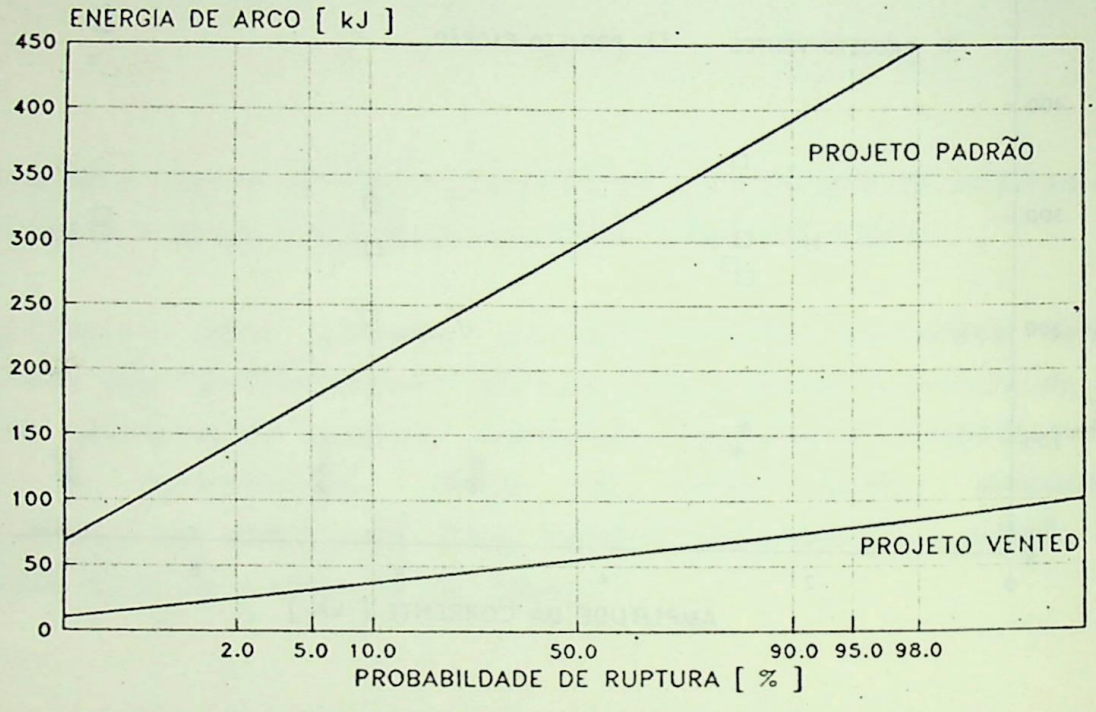


Figura II.4.4 - Probabilidade Cumulativa de Ruptura do Invólucro de um Pára-raios em Função da Liberação de Energia de Arco para Dois Diferentes Projetos de Pára-raios Classe Distribuição[33]

Nos pára-raios que seguem o projeto considerado padrão, ou seja, *"Tipo Non-Vented"* o termo *"Ruptura"* significa ejeção forçada, sem controle algum, dos terminais de vedação seguida da expulsão das partes internas do pára-raios, ou explosão do invólucro. Já no caso dos projetos *"Tipo Vented"* o termo *"Ruptura"* tem por significado ejeção controlada dos terminais de vedação seguida ou não da expulsão das partes internas do pára-raios, isto termina por resultar em níveis de *"Energia de Ruptura"* muito inferiores* aos existentes nos casos assumidos como padrão pois

este tipo de projeto tem como objetivo evitar a explosão do invólucro.**

Notas -

* - *Notar que o desvio padrão associado com a "Energia de Ruptura" do invólucro de um pára-raios "Tipo Vented" também é inferior a de um pára-raios "Tipo Non-Vented", fato que denota que a ruptura neste caso é mais controlada.*

** - *Uma análise da Figura II.4.1 mostra que, na grande maioria dos casos, os pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão falham por choque térmico. Deste modo, a não ser nos sistemas dotados de elevado nível de curto circuito, a adoção de pára-raios do "Tipo Vented" pode ser desnecessária.*

II.4.2.3 - CHOQUE TÉRMICO

Devido ao fato da velocidade propagação do fluxo de calor através das paredes do invólucro de um pára-raios ser muito lenta, quando comparada com a velocidade com que o calor é gerado pelo arco de potência, a parte interior do invólucro apresenta, momentaneamente, uma temperatura superior a da parte exterior do mesmo. Logo, uma diferença de temperatura entre parte interna e externa do invólucro da ordem de *500°Celsius* pode resultar em uma solicitação devido a expansão diferenciada do material muito superior a sua suportabilidade, no caso específico de um invólcro em porcelana, algo em torno de *240 MPa*, valor bastante superior a suportabilidade do material que fica entre *15 MPa* e *50 MPa.*[99] Nestes casos a fragmentação do invólucro ocorre, tipicamente, entre *0.1 - 1.0 seg* após o início do arco, ou seja, após o calor ter penetrado razoavelmente dentro da porcelana.

Conforme mostra a Figura *II.4.1*, caso a *"Corrente de falta - I_F"*, responsável pela manutenção do arco de potência, for interrompida em um tempo inferior a *2* ou *3 ciclos* o pára-raios, provavelmente, não entra em modo de falha por choque térmico pois, o intervalo de tempo não é

suficientemente longo para que o calor penetre profundamente nas paredes do invólucro, no caso em porcelana.

II.4.3 - OS MODOS DE FALHA DE UM PÁRA-RAIOS E OS RISCOS À SEGURANÇA

A maneira, com a qual um projeto de pára-raios trabalha as solicitações de sobrepressão e choque térmico, é responsável pela definição de seu desempenho perante os modos de falha que, por sua vez, determinam os níveis e riscos a segurança do público e das equipes de manutenção. *[103]*

As falhas por fragmentação e virtual desintegração do invólucro de um pára-raios devido ao choque térmico são as mais benéficas pois, tipicamente, os fragmentos do invólucro e das partes internas do pára-raios caem em regiões do solo próximas ao ponto de instalação do pára-raios. Nestes casos, a segurança do público é limitada aos danos e ferimentos causados pelos fragmentos quentes. Com respeito às equipes de manutenção, o trabalhador que se encontrar muito próximo ao pára-raios sob falta, pode ser submetido a severas queimaduras, bem como, descargas elétricas em freqüência industrial.

Os maiores riscos a segurança do público e das equipes de manutenção resultam da existência de níveis de sobrepressão muito elevados no interior dos invólucros dos pára-raios e, por conseguinte, estes devem ser os aspectos a serem considerados em qualquer análise de segurança que envolvam falhas com pára-raios. A natureza exata dos riscos à segurança do público e das equipes de manutenção depende do tipo de projeto adotado para os pára-raios, para os quais, normalmente, são adotadas as alternativas básicas a seguir:

a] - Pára-raios Tipo Padrão:-

Estes pára-raios são construídos por invólucro em porcelana com espessura, relativamente, reduzida complementado por sistema de vedação constituído por um ou dois terminais rígidos, em ferro fundido ou aço

estampado. Devido a alta rigidez oferecida pelo conjunto os níveis de sobrepressão no interior do pára-raios são extremamente elevados, fato que, normalmente, resulta na desintegração, na forma de explosão do invólucro o que, por sua vez, implica na projeção a grandes distâncias e sob velocidade elevada de fragmentos quentes do invólucro e das partes internas do pára-raios. Obviamente, este modo de falha se constitui no que maior risco impõe ao público e às equipes de manutenção. *[103]*

b] - Pára-raios Tipo Vented:-

Quando comparados com os pára-raios *"Tipo Padrão"*, os pára-raios *"Tipo Vented"* apresentam um invólucro em porcelana de espessura superior, bem como, um sistema de vedação constituído por um ou dois terminais em cobre ou alumínio, portanto dotado de baixa rigidez.* Nos projetos mais simples a ejeção de um ou mesmos dos dois terminais é o fator responsável pelo alívio da sobrepressão interna, no entanto, nos projetos mais sofisticados, conforme mostra a Figura *II.4.5*, os terminais podem incorporar diafragmas em chumbo, cuja ruptura, normalmente, mais controlada, atua no sentido de melhorar o desempenho do conjunto.**

Notas -

* - *Embora sejam desconhecidos resultados de ensaios que venham a comprovar estas característica, os pára-raios a óxido metálico ZLD - HITACHI, são os que, devido a características específicas de projeto, apresentam a maior probabilidade de possuirem o desempenho de um pára-raios "Tipo Vented" frente a faltas.*

** - *Este tipo de projeto incorpora os princípios básicos dos primeiros dispositivos de alívio de sobrepressão utilizados em pára-raios classe intermediária e estação.* *[19]*

Deste modo, quando um pára-raios *"Tipo Vented"* entra em modo de falha,

os terminais em cobre ou alumínio são ejetadas, normalmente, em conjunto com fragmentos de alguns dos elementos que constituem a parte ativa do pára-raios, fato que, permite ao invólucro permanecer, pelo menos, por alguns instantes, intacto. No entanto, após decorridos alguns ciclos, o invólucro se desintegra por fragmentação, devido ao choque térmico. Enquanto que, a ejeção de fragmentos a altas temperaturas pode resultar em danos e ferimentos, o raio de ação dos fenômenos associados a *"Ruptura"* de um pára-raios *"Tipo Vented"* é bem mais reduzido que o que o correspondente a um pára-raios *"Tipo Padrão"*. [104]

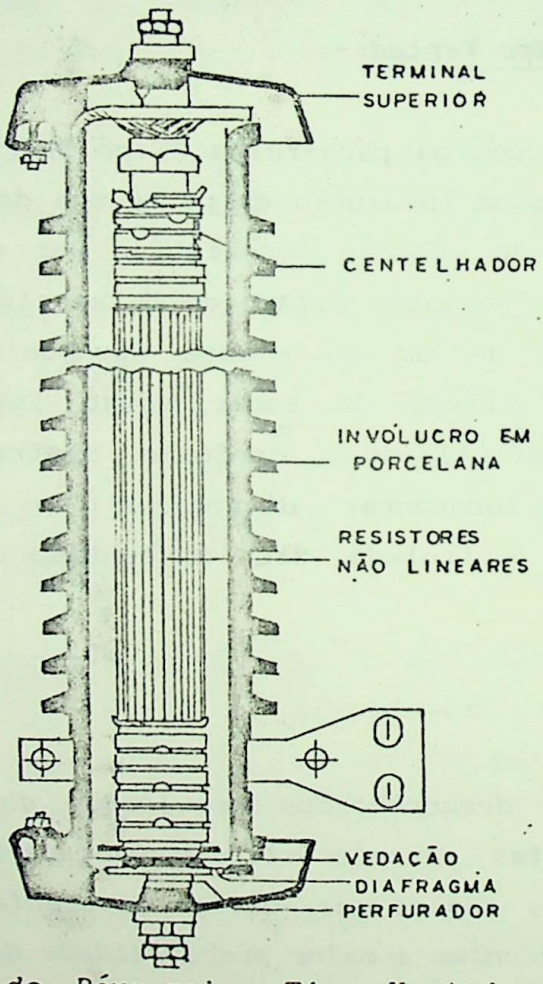


Figura II.4.5 - Projeto de Pára-raios Tipo Vented para Sistemas de Distribuição em Média Tensão [101-105]

c] - Pára-raios Classe Intermediária e Classe Estação:-

Os pára-raios classe intermediária e classe estação, incorporam por projeto, dispositivos especiais, conforme mostra a Figura *II.4.6*

denominados, *"Dispositivos de Alívio de Sobrepressão"* que permitem aliviar, em associação com determinados níveis de corrente, a pressão interna do pára-raios sem a ejeção de qualquer fragmento relacionado com a sua parte interna ativa. No entanto, as Normas permitem ao invólucro deste tipo de pára-raios se desintegrar por fragmentação oriunda de choque térmico desde que, todas os fragmentos ejetados no decorrer do processo, fiquem restritos a uma área pré-delimitada.*

* *Nota -*

→ *Não existem, na literatura, dados relacionados com o balanço do flange superior, durante a etapa de falha do pára-raios e, dependendo da distância entre equipamentos e pára-raios, este fato, pode resultar em danos extras a buchas de outros equipamentos, por exemplo transformadores.*

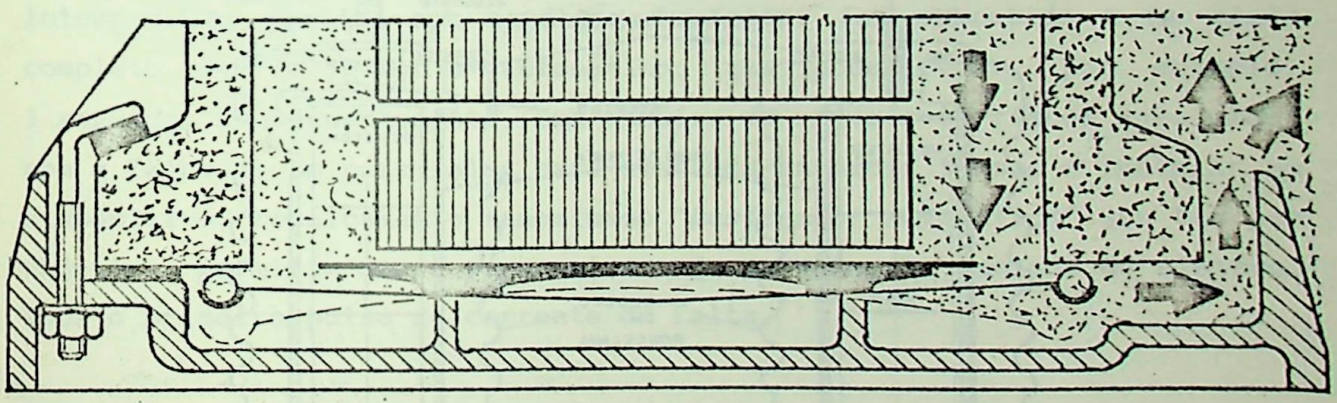


Figura II.4.6 - Projeto de um Pára-raios Equipado com Dispositivo de Alívio de Sobrepressão[105]

Embora os mecanismos adotados nestas classes de pára-raios praticamente

eliminem a maioria dos riscos a segurança os dispositivos de alívio de sobrepressão apresentam custos de fabricação que virtualmentem impedem sua utilização generalizada nos pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão.

Quanto aos riscos oferecidos ao público e às equipes de manutenção, os mesmos são ligeiramente inferiores aos oferecidos pelos pára-raios *"Tipo Vented"*.

d] - Pára-raios Distribuição Tipo Non-Fragmenting:-

Os pára-raios *"Tipo Non-Fragmenting"*, conforme mostra a Figua *II.4.7*, representam uma nova área na tecnologia de proteção contra surtos e de modo a reduzir ao mínimo, os riscos impostos pelas falhas dos pára-raios possuem características que, virtualmente, permitem eliminar os problemas relativos a sobrepressão interna e choque térmico.

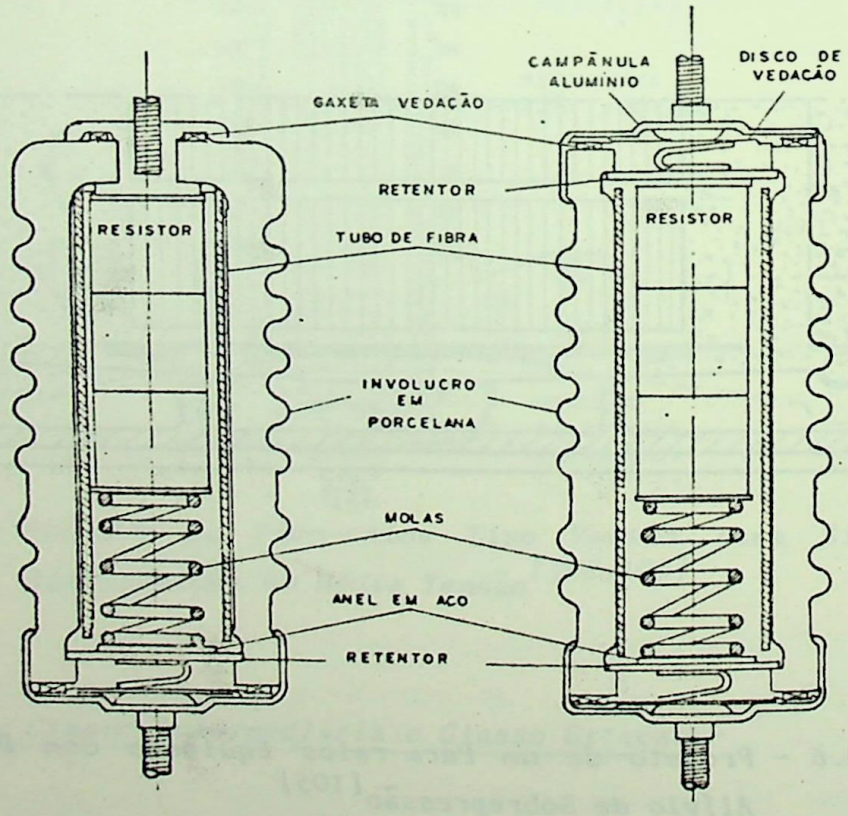


Figura II.4.7 - Projeto de um Pára-raios Tipo Non-Fragmenting[99]

Este tipo de projeto oferece um desempenho geral superior aos demais economicamente exequíveis, porém, impõe um ligeiro aumento de volume e custo. [99-101-106]

II.4.4 - INTERAÇÃO FALHAS EM PÁRA-RAIOS - SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Conforme comentado, o modo de falha de um pára-raios e, por conseguinte, os riscos associados a mesma, podem ser diretamente relacionados com a quantidade de energia liberada pelo arco de potência desenvolvido no interior de seu invólucro, quantidade esta, definida pela amplitude e duração da corrente de falta no ponto de instalação do pára-raios.

Deste modo, é razoavelmente óbvio que o religamento automático dos circuitos de distribuição pode contribuir para o aumento dos riscos associados com as falhas dos pára-raios, visto que, a maioria dos pára-raios *"Tipo Non-Fragmenting"* não possue capacidade de suportar faltas internas por mais um intervalo de tempo superior a *10 ciclos*. Portanto, mesmo um pára-raios *"Tipo Vented"* pode vir a falhar de modo intempestivo quando, sob condição de falta, for submetido a um ciclo completo de religamento automático, que pode durar, por exemplo, *1 segundo*. Consequentemente, uma maneira de reduzir os riscos envolvidos com a falha de um pára-raios para sistemas em média tensão é instalar um dispositivo, tecnicamente denominado *"Desligador Automático"* que tem por objetivo, permitir que o pára-raios seja prontamente isolado do sistema, após o primeiro pulso de corrente de falta. *,**,***

Notas -

* - *Esta função também pode ser executada por um dispositivo denominado "Desligador de Linha", semelhante a maioria dos desligadores automáticos não incorporados ao invólucro fabricados no mercado nacional porém, conectado entre linha e terminal superior de vedação do pára-raios.*

** - *Os centelhadores externos também são meios alternativos para*

permitir o isolamento dos pára-raios do sistema porém, apresentam como principal desvantagem, o fato de elevarem, substancialmente, o Nível de Proteção oferecido pelo conjunto.

**** - A escolha do tipo de dispositivo a ser adotado é, normalmente, determinada pelo binômio "Custo - Nível de Proteção". No entanto, alguns fatores trabalhistas podem ser determinantes como, por exemplo, nos Estados Unidos, onde a legislação trabalhista adotada em alguns dos estados da união, força a instalação de pára-raios de distribuição com centelhadores externos.*

Em áreas de baixo nível de curto circuito, os pára-raios classes intermediária e estação, que, usualmente, são instalados sem qualquer dispositivo para permitir isolar os pára-raios defeituosos do sistema podem sobreviver sem danos* de monta a um ciclo completo de religamento automático. É óbvio que um pára-raios nestas condições falhou eletricamente, no entanto, a falta de danos aparentes no invólucro, bem como, de sinalização de atuação do *"Dispositivo de Alívio de Sobrepressão"*,** podem permitir que este pára-raios se constitua em uma falta permanente para o sistema que, por sua vez, via de regra, resulta em elevado tempo de desligamento.

Notas -

** - Ou seja, com invólucro intacto e ausência de sinais que revelem a ocorrência de um arco externo.*

*** - As Normas exigem que os "Dispositivos de Alívio de Sobrepressão" possuam um meio de sinalizar sua atuação, uma vez que a mesma sinaliza que o pára-raios se encontra inutilizado porém, sistemas antigos não possuem esta facilidade.*

Um ponto interessante que deve ser relembrado é o fato que, um pára-raios submetido a uma falha, mesmo que adequadamente isolado do sistema, se constitui em um fator de risco para este sistema pois, a

menos que o pára-raios defeituoso seja imediatamente substituído o equipamento que ele deve proteger, nestes casos, fica totalmente a descoberto e, portanto, pode entrar em modo de falha, subitamente, impondo tempos de desligamento elevados.

II.4.5 - DESCONEXÃO DE UM PÁRA-RAIOS DEFEITUOSO DO SISTEMA

Existe um enorme número de vantagens em se prever a desconexão de um pára-raios defeituoso de um sistema de distribuição em média tensão e, dentre estas, as mais importantes se encontram relacionadas a seguir:

a]- Remover qualquer possibilidade de manutenção de uma falta permanente no sistema, incluindo aquelas, nas quais o nível de curto-circuito por não ser elevado, possa resultar na remoção da falta por explosão do pára-raios;

b]- Reduzir a violência e os riscos associados com as falhas, naquelas situações onde os pára-raios apresentam capacidade de falhar de modo não explosivo durante o primeiro ciclo do religamento automático;

c]- Permitir visualizar um pára-raios sob falha, mesmo que ele não apresente danos visíveis;*

d]- Tentar isolar o pára-raios durante os estágios iniciais do desenvolvimento da falta, evitando, deste modo, com que a mesma apresente grau de violência elevado.

** Nota -*

→ *Com respeito aos desligadores automáticos fabricados no mercado nacional, uma série de ensaios realizados pelo CEPEL*[108] *tem mostrado que aproximadamente 40.0 % dos pára-raios que apresentam desligadores automáticos atuados, possuem condições teóricas, pelo menos, em termos dos resultados dos ensaios de recebimento, caso sejam reinstalados, de operar normalmente.*

A experiência atual com os pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão tem indicado que, com excessão dos projetos que seguem a filosofia *"Non-Fragmenting"*, em praticamente todos os demais casos o desenvolvimento de uma falha interna resulta na completa destruição do pára-raios, durante os primeiros ciclos de corrente relacionada com a formação de um arco de potência no interior do invólucro, fato que, em tese, torna as primeiras três vantagens acima discutíveis, bem como, lança uma série de dúvidas quanto a necessidade de se prover os pára-raios de meios que permitam desconectar as unidades defeituosas do sistema. No entanto, estudos recentes, tem mostrado que em torno *70 %* dos pára-raios classe distribuição, para sistemas em média tensão, inutilizados por uma falha interna são efetivamente isolados do sistema durante os estágios iniciais de desenvolvimento das faltas responsáveis por estas falhas, fato que, estatísticamente, confirma a eficácia destes meios na redução do número de falhas violentas. *[33-103]*

A única desvantagem significativa relacionada com a utilização de meios ou dispositivos externos para promover a desconexão de um pára-raios defeituoso do sistema é o fato que, após sua operação, que implica em isolar o pára-raios do sistema, não existe mais sentido em se abordar a *"Coordenação de Isolamento"*, ou seja, em última análise, a qualidade da proteção contra sobretensões oferecida, pelo menos, até que a substituição deste pára-raios seja efetuada. Além disto, estes dispositivos também estão sujeitos a falhas e, nestes casos, via de regra, como recentemente vem se observando, podem contribuir em muito, para a manutenção de taxas de falhas de pára-raios elevadas. *[107]*

II.4.5.1 - CENTELHADORES EXTERNOS

Os *"Centelhadores externos"*, como sugere o próprio nome, são dispositivos conectados, externamente, em série com um pára-raios completo. O arranjo assim formado se encontra praticamente isolado do sistema, exceto quando o surto de tensão atinge níveis, que permitam com que o centelhador entre em disrupção. Uma vez que o centelhador entra em disrupção, a resistência por ele oferecida a passagem de corrente é,

virtualmente, nula, deste modo, o pára-raios é efetivamente conectado ao sistema e, portanto, passa a operar conforme sua maneira usual.

Durante a operação do conjunto o sistema de equalização de potencial dos centelhadores dos pára-raios, ou ainda, sua capacitância interna atua no sentido de assegurar, que o centelhador externo seja submetido a maior parcela da tensão em freqüência industrial, imposta pelo sistema. [18]

a]- Arranjo Físico:-

Nos pára-raios montados diretamente sobre os equipamentos protegidos, no caso específico de transformadores, sobre os tanques dos mesmos* é possível, conforme mostra a Figura *II.4.8*, que o centelhador externo seja montado entre o terminal superior do pára-raios e a bucha do equipamento.

** Nota -*

→ Este tipo de montagem não é comum no Brasil.

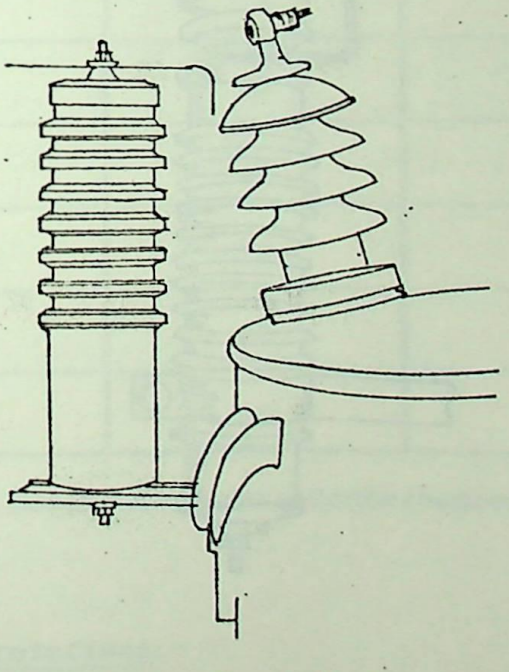


Figura II.4.8 - Arranjo de um Centelhador Externo Montado em um Tanque de um Transformador Segundo Ohio Brass [18]

Este tipo de arranjo apresenta baixo custo e possui excelente desempenho frente a problemas relativos a contaminação ambiental visto que o invólucro do pára-raios é utilizado somente como elemento de suporte de um dos eletrodos do centelhador e, deste modo, sob condições normais de operação, não se encontra energizado, fato que impede a manifestação de praticamente todos os problemas normais relacionado com a presença da contaminação ambiental.

Nos casos, onde o pára-raios não é montado diretamente sobre os equipamentos protegidos, é utilizado, conforme mostra a Figura *II.4.9*, um *"Centelhador Integral"*.*

* *Nota -*

→ *Não se conhece local, no Brasil, onde se adota este tipo de montagem.*

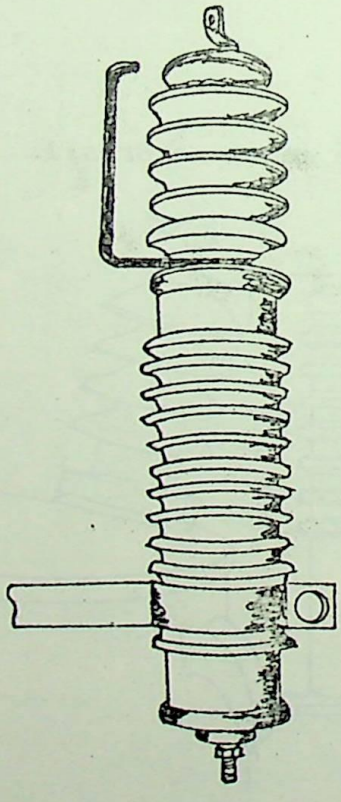


Figura II.4.9 - Arranjo de um Centelhador Externo Integral Conectado a um Pára-raios Segundo McGraw Edison[6]

Neste arranjo, uma estrutura isolante adicional é montada no terminal superior do pára-raios e o espaçamento em ar é formado com o auxílio de um eletrodo posicionado paralelamente a esta estrutura. Os custos adicionais envolvidos na fabricação da estrutura isolante adicional, normalmente em porcelana, bem como, as restrições físicas impostas ao seu projeto, resultam em um fraco desempenho deste conjunto com respeito as condições de contaminação ambiental.

b]- Seleção da Tensão Disruptiva de um Centelhador Externo:-

Os centelhadores externos devem ser ajustados no campo, de modo a suportarem as solicitações, em freqüência industrial, impostas pelos sistemas conforme recomenda a Tabela *II.47*.

Ajustes Recomendados para Centelhadores Externos		
Tensão Nominal [kV]	*Ajuste Recomendado [mm]*	
	Mínimo	*Máximo*
3.00	*5*	*6*
6.00	*10*	*10*
9.00	*12*	*12*
12.00	*19*	*22*
18.00	*22*	*28*
21.00	*25*	*25*

Tabela II.47 - Ajuste Recomendado para Centelhadores Externos

c]- Características Protetivas:-

Devido ao fato, dos centelhadores externos, praticamente, isolarem os

pára-raios dos sistemas, a resposta inicial dos conjuntos por eles formados, frente a impulsos de tensão é a mesma que é fornecida por simples centelhadores, o que, essencialmente, implica na existência de uma forte dependência entre a tensão disruptiva e a taxa de crescimento dos impulsos.

Logo, a conexão de um centelhador externo a um pára-raios, é responsável pela elevação da tensão disruptiva do conjunto entre *1.50 p.u.* e *2.00 p.u.* do valor nominal apresentado pelo pára-raios, deste modo, este tipo de arranjo não é recomendado para a proteção de equipamentos dotados de baixas margens de isolamento como, por exemplo, cabos de potência isolados e transformadores para sistemas de distribuição com tensão operativa superior a *25 kV*, inclusive.

A aplicação de centelhadores a pára-raios a óxido metálico, conforme anteriormente abordado, atua no sentido de reduzir sua sensibilidade frente a sobretensões temporárias em freqüência industrial,* bem como, impõe um retardo de tempo na sua operação.

** Nota -*

→ *Por apresentar reduzida sensibilidade frente a sobretensões em freqüência industrial, o sistema centelhador externo e pára-raios a óxido metálico tem apresentado bom desempenho na proteção de linhas de transmissão em sistemas de alta tensão.* [108-109]

d]- Efeito da Utilização de Centelhadores Externos nos Modos de Falha:-

Considerando que os centelhadores externos atuam no sentido de isolar, completamente, os pára-raios dos sistemas de potência, exceto quando sob condições de surto, as falhas oriundas de envelhecimento e instabilidade térmica são virtualmente eliminadas, e mesmo, problemas tais como, penetração de umidade são bastante retardados. Deste modo, é razoável afirmar que as falhas envolvendo pára-raios equipados com centelhadores externos, devem ser súbitas pois só podem ocorrer na situação de

centelhador atuado, fato em tese, substancialmente raro.

Caso o pára-raios esteja em condição de falha, o arco de potência estabelecido no centelhador externo, virtualmente, conduz a corrente de falta fase-terra do sistema no ponto de instalação do pára-raios, que, no caso, deve ser interrompida por algum dos elementos que constituem o sistema de proteção contra sobrecorrentes. Após a extinção do arco de potência e o restabelecimento da operação do sistema, sob condições normais, notar que o centelhador externo isola o pára-raios defeituoso do sistema, casos os danos oriundos da falta fase-terra no ponto de instalação do pára-raios não forem visíveis, o mesmo pode permanecer instalado na condição de falha por razável período de tempo.*,**

Notas -

*- *Nestes casos, o nível de proteção oferecido pelo conjunto é praticamente o oferecido pelo centelhador externo que, obviamente, a menos de danos a ele imposto, pela corrente de falta fase-terra, pode ser considerado como adequado.*

**- *Em tese, o nível de proteção oferecido pelo conjunto formado por um centelhador externo e pára-raios na condição de falha pode, inclusive, ser inferior ao oferecido por um conjunto equivalente intacto porém, é óbvio que os problemas relativos a interrupção de corrente subseqüente persistem e, deste modo, cada atuação do conjunto danificado deve corresponder, uma atuação do sistema de proteção contra sobrecorrentes.*

Caso, o pára-raios sob falha, permaneça conectado ao sistema, a repetida passagem de corrente de falta, caso óbvio de operação constante, fato estatisticamente raro, atua no sentido de forçar a evolução progressiva do defeito na direção de uma falha de carácter, provavelmente, explosivo pois, normalmente, as sucessivas descargas de corrente de falta através do interior do invólucro atuam no sentido de reduzir, ou mesmo, eliminar

quaisquer características específicas de projeto que objetivem reduzir os riscos associados com a explosão de um pára-raios.

II.4.5.2 - DESLIGADORES AUTOMÁTICOS

Os *"Desligadores automáticos"* são dispositivos cujos princípios de atuação, a exemplo dos *"Elos fusíveis"* são definidos pelo comportamento térmico de um determinado conjunto de materiais frente a passagem de correntes, normalmente em freqüência industrial.

Em termos construtivos, estes dispositivos podem fazer parte integrante do corpo do pára-raios, em específico de seu sistema de vedação, ou serem conectados, externamente, ao seu terminal inferior porém, em ambos casos, possuem o objetivo de desconectar, nos pára-raios defeituosos, o condutor de descida para terra, isolando-os deste modo, do sistema.*

** Nota -*

→ *Os desligadores automáticos, incorporados ao corpo do pára-raios são, virtualmente, imunes a presença da contaminação ambiental. Nos casos, onde os desligadores automáticos não possuem equalização de potencial, bem como, o pára-raios não é instalado com a abraçadeira aterrada, a presença de contaminação ambiental, via de regra, resulta na destruição dos seus invólucros.*

Conforme mostra a Figura *II.4.10* o projeto de desligador automático mais difundido,* é constituído, basicamente, por um eletrodo superior, um pequeno centelhador, um resistor ou capacitor de equalização,**,*** um cartucho explosivo e um pino metálico encerrados em um corpo em baquelite.

Notas -

**- Existem projetos de desligadores automáticos que não utilizam um*

cartucho explosivo, normalmente calibre 22, para iniciar o processo de ruptura do corpo de baquelite, mas sim, um material capaz de produzir um enorme volume de gases sob a ação de calor.

***- O resistor de equalização do desligador automático tem como objetivo reduzir o nível de radio interferência que, no caso de pára-raios com centelhadores com equalização de potencial, ou mesmo a óxido metálico seria elevado devido a constante disrupção do centelhador do desligador. Já os desligadores automáticos dos pára-raios com centelhadores sem equalização de potencial, não necessitam de nenhum elemento de equalização extra pois, praticamente, toda a tensão do sistema é imposta ao seu centelhador principal.*

****- Nos casos, onde os desligadores automáticos não possuem equalização de potencial, os ensaios de tensão disruptiva devem ser realizados com os mesmos em condição de operar pois, eles são responsáveis pelo acréscimo de um centelhador extra ao pára-raios, fato que, pode modificar, ligeiramente, os resultados dos ensaios.*

a]- Princípio de Operação de um Desligador Automático:-

Em condições de operação normal, ou seja, sob tensão fase-terra, conforme mostra a Figura *II.4.11*, o pára-raios é conectado à terra através do resistor ou capacitor de equalização, quando a corrente ultrapassa alguns ampéres, a queda de tensão no sistema de equalização torna-se alta o suficiente para provocar a disrupção do centelhador do desligador automático e, deste modo, o calor associado ao arco de potência assim formado acaba por ser responsável pela detonação do cartucho explosivo que, por sua vez, fragmenta o invólucro em baquelite e impulsiona o terminal inferior do conjunto para longe do corpo do pára-raios a alta velocidade.

Caso o condutor de descida for adequadamente longo e flexível, a conexão à terra, normalmente permanece, em relação ao terminal inferior do

pára-raios, em uma posição suficientemente afastada, portanto, capaz de permitir com que as correntes subseqüentes ou as elevadas correntes de fuga associadas aos pára-raios a carboneto de silício e a óxido metálico, respectivamente, sejam interrompidas.

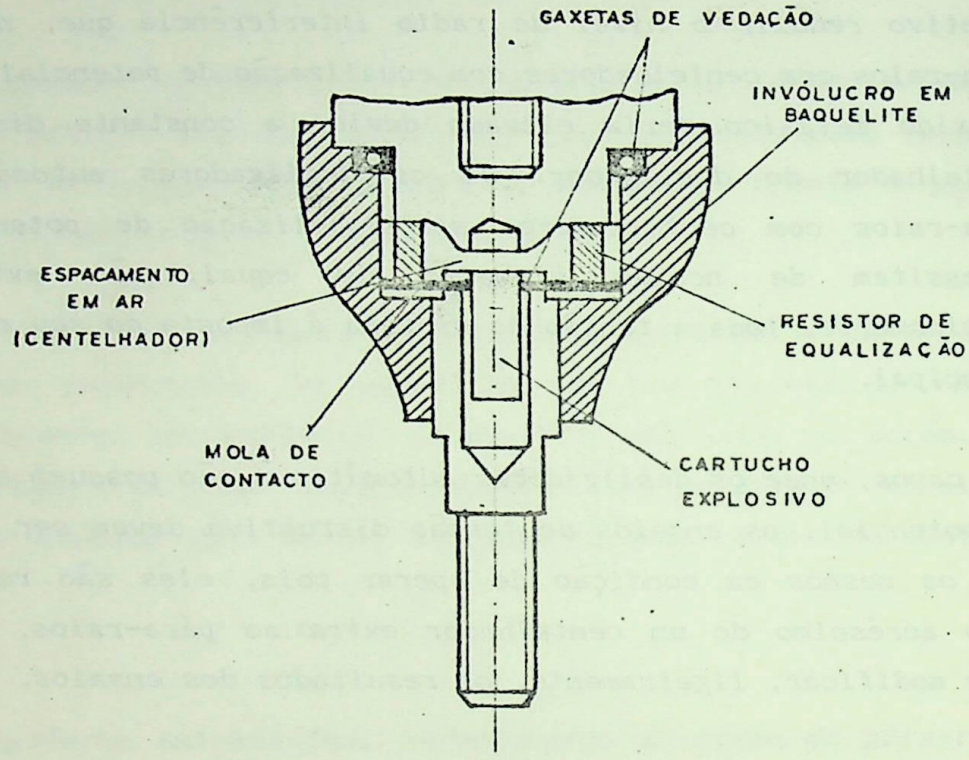


Figura II.4.10 - Corte de um Desligador Automático Não Incorporado ao Corpo do Pára-raios Segundo Ohio Brass[18]

Por outro lado, o espaçamento em ar criado pela operação de um desligador automático não é capaz de interromper as correntes de falta do sistema, estas, de carácter indutivo, portanto, no caso de uma falha súbita do pára-raios, por sua vez, associada a uma corrente de falta interna implica na atuação da proteção do sistema contra sobrecorrentes e, por conseguinte, na sua recomposição através de religamento, preferencialmente, automático.

No entanto, em qualquer dos casos acima, caso os condutores de descida sejam corretamente especificados e instalados, o espaçamento em ar resultante da operação de um desligador automático é, normalmente, suficiente para permitir isolar completamente um pára-raios defeituoso

do sistema.*

** Nota -*

→ *Nestes casos, os pára-raios devem apresentar distâncias de isolamento, principalmente, entre terminal inferior e abraçadeira, por sua vez aterrada, capaz de suportar a tensão fase-terra do sistema.* [110]

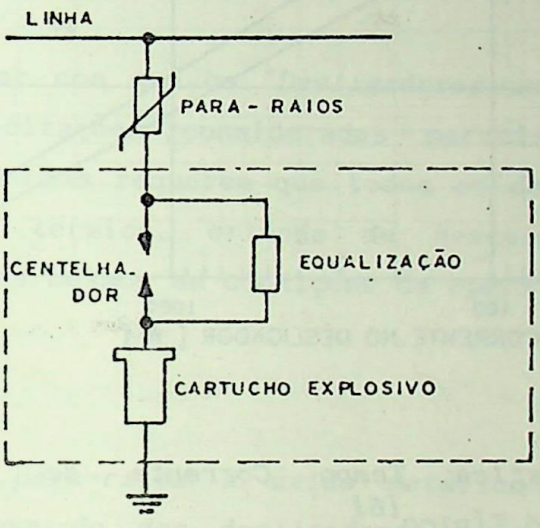


Figura II.4.11 - Circuito Equivalente de um Desligador Automático [6]

A atuação deste tipo de desligador automático é resultado do contato da parte inferior do arco de potência, desenvolvido no centelhador deste dispositivo, com a parte superior do cartucho explosivo ou com regiões próximas a ele. Deste modo, o calor gerado pelo arco de potência eleva a temperatura do cartucho explosivo até a temperatura de ignição de sua carga, algo em torno de *200°Celsius*. Devido ao fato da tensão de arco ser virtualmente constante para uma larga faixa de corrente, o tempo até

ser atingida a temperatura de ignição da carga explosiva do cartucho é inversamente proporcional a amplitude da corrente, fato que resulta em uma característica de atuação para os desligadores, semelhante a mostrada na Figura *II.4.12.*

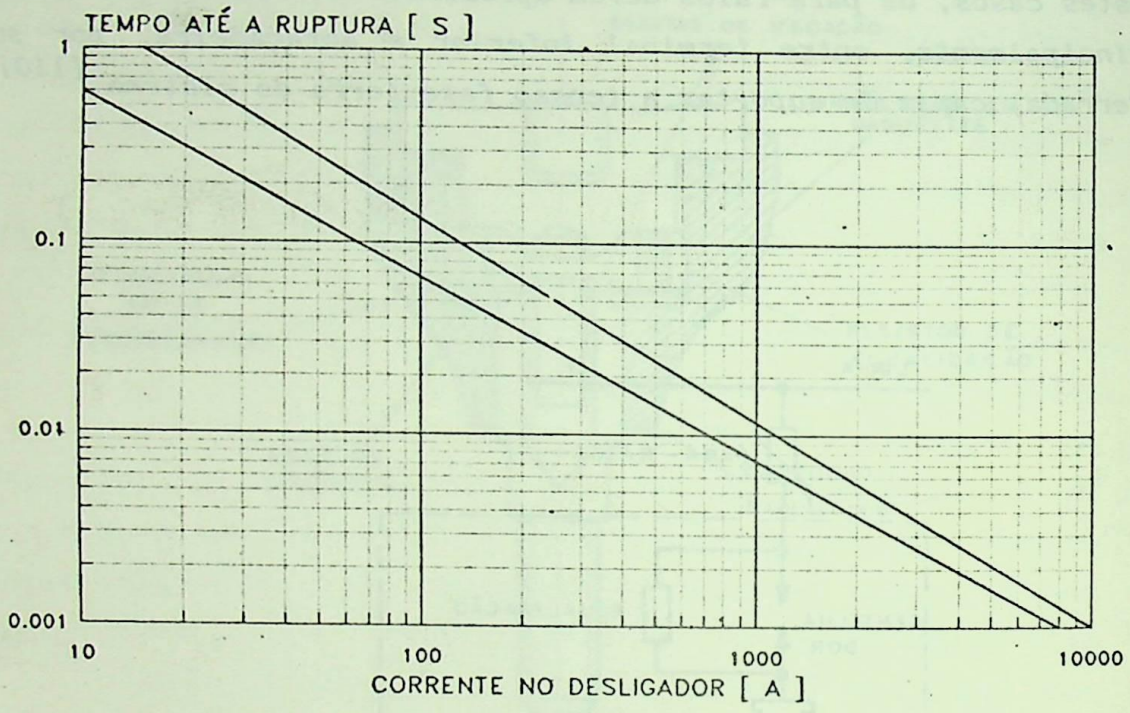


Figura II.4.12 - Característica Tempo Corrente de um Desligador Automático Típico[6]

A proporcionalidade simples oriunda deste tipo de construção* quando comparada com os sistemas que utilizam o calor gerado por resistores, onde a dependência entre o tempo até ser atingida a temperatura de ignição da carga explosiva é proporcional ao quadrado da corrente, fato que, aumenta a sensibilidade do conjunto frente a descargas de corrente de grande amplitude, típicas de impulsos atmosféricos, permite construir desligadores automáticos, virtualmente, insensíveis a correntes de curta duração. Deste modo, os desligadores automáticos construídos utilizando o conceito de proporcionalidade simples podem ser facilmente projetados para apresentar uma resposta rápida frente a correntes de fuga ou subseqüentes anormais e ignorar correntes de, por exemplo *100 kA* com

tempo de duração de algumas dezenas de microsegundos.

** Nota -*

→ *Quaisquer mudanças de materiais, por exemplo, dos pinos sobre os quais são montados os cartuchos explosivos, podem resultar em mudanças na característica "Tempo de Atuação" versus "Corrente" dos desligadores automáticos e, portanto, devem ser objeto de verificação periódica. Uma das maneiras de se avaliar se o material, originalmente utilizado, foi modificado é realizar um "Ensaio de Aplicação de Torque".*

De modo a evitar com que os *"Desligadores automáticos"* venham a atuar frente a solicitações consideradas normais os *"Ensaios de tipo"* previstos nas Normas requerem que todos os demais ensaios que resultam em solicitação térmica, oriunda de descargas de corrente,* sejam realizados com os mesmos em condições de operar.

** Nota -*

→ *No caso dos pára-raios a óxido metálico de modo a comprovar o desempenho adequado dos desligadores automáticos, os mesmos devem estar em condições de operar, inclusive nos ensaios que forçam a circulação de correntes de fuga que, em alguns casos, podem atingir vários ampéres no intervalo de tempo de vários ciclos.*

Dentro deste contexto, a atuação de um desligador automático acaba por se constituir em um forte indicativo da ocorrência de alguns dos seguintes problemas:

a]- Falha interna do pára-raios e descarga da corrente de falta do sistema no seu ponto de instalação;

b]- Descarga de um surto de amplitude ou duração superior aos limites de

projeto do desligador automático;*

c]- No caso de pára-raios a carboneto de silício, os centelhadores entraram em condução repetitivamente devido a pequenos danos oriundos de surtos, penetração de umidade ou contaminação ambiental;

d]- Os limites de estabilidade térmica dos resistores a óxido metálico foram excedidos devido a aplicação de sobretensões temporárias excessivas em termos de amplitude, tempo ou ambos, ou devido a surtos atmosféricos e de manobra superiores aos limites de projeto;

e]- O invólucro do pára-raios sofreu descarga externa devido a presença de níveis elevados de contaminação ambiental;**

f]- Operação inadequada do desligador automático.***

Notas -

*- *Nestes casos, o pára-raios pode, inclusive, permanecer em boas condições de operação, portanto é necessário ter assegurada uma boa correlação entre as suportabilidades dos desligadores automáticos e dos pára-raios. Deste modo, a prática comum em algumas concessionárias de realizar concorrências em separado para pára-raios e desligadores automáticos resulta na maioria dos casos em erros de aplicação e, portanto, deve ser evitada.*

**- *O aterramento das abraçadeiras pode evitar este tipo de ocorrência porém, é conveniente relembrar que o fato de se aterrar ou não as abraçadeiras pode modificar as tensões disruptivas dos pára-raios e, portanto, devem ser seguidas nestes casos, as recomendações dos fabricantes.*

***- *Existem evidências no exterior que este tipo de ocorrência representa somente 2.0 % das ocorrências com desligadores automáticos porém, um estudo recente realizado no Brasil mostra que, no mercado nacional, estas ocorrências podem representar*

40.0 % das ocorrências com desligadores automáticos. [108]

Conforme discutido, a operação de um desligador automático pode implicar ou não, em danos ou falhas no respectivo pára-raios. No entanto, é prática, usualmente aceita em, virtualmente, todo o mundo assumir que a existência de um desligador automático atuado, fato, facilmente detectável, inclusive a olho nú, implica na existência de uma condição de falha, envolvendo o pára-raios a ele associado, mesmo na ausência de danos visíveis.

b]- *Efeito da Utilização de Desligadores Automáticos nos Modos de Falha:-*

A operação de um desligador automático remove a conexão de terra do pára-raios a uma velocidade e a uma distância suficiente para prover a interrupção uma corrente subseqüente de várias centenas de ampéres.

A capacidade de interrupção de corrente de um desligador automático é resultante da elevada velocidade de separação do condutor de descida do terminal inferior do pára-raios, bem como, da característica resistiva da maioria das correntes subseqüentes, isto implica que correntes de falta de algumas dezenas de ampéres podem não ser interrompidas por apresentarem característica indutiva.

Estes fatos, indicam que os desligadores automáticos são capazes de isolar completamente um pára-raios defeituoso do sistema sem a necessidade de operação adicional de qualquer dispositivo para proteção contra sobrecorrentes, durante o desenvolvimento gradual da seqüência de falhas anterior a falha total dos resistores não lineares principais do pára-raios. Considerando agora, que o projeto de um desligador automático é, basicamente, o mesmo para todas as tensões nominais de pára-raios oferecidas pelos fabricantes, resultados recentes tem mostrado que a eficácia da interrupção de correntes varia com a tensão nominal do sistema, conforme mostra a Tabela *II.48.* [51]

Tensão do Sistema [kV]	% das Falhas Envolvendo Pára-raios Eliminadas pelos Desligadores Automáticos *
8.0 - 12.0	70.0 - 80.0
25.0 - 27.6	30.0

Tabela II.48 - Pára-raios Defeituosos Eliminados pela Atuação dos Desligadores Automáticos.

* Nota -

→ Os resultados obtidos pelo CEPEL,[108] são relativos a pára-raios com tensão nominal 9.0 kV e 12.0 kV, no entanto, não permitem a formação de nenhuma conclusão positiva com respeito a Tabela II.48.

Os pára-raios que não foram retirados de operação pelos desligadores automáticos, ficam em duas categorias. A primeira delas é aquela, na qual as condições do sistema, resultaram no rápido desenvolvimento da corrente de falta através do pára-raios de maneira que, o mesmo entrou em modo de falha antes que o desligador automático tivesse tempo para oferecer uma reação efetiva e eficiente. A segunda, e mais comum delas é aquela na qual, a operação do desligador automático foi de algum modo dificultada, normalmente, por práticas erradas de conexão, como por exemplo, condutores de descida com comprimento inadequado, condutores de descida dotados de rigidez mecânica elevada ou distâncias inadequadas entre o terminal inferior do pára-raios e os pontos aterrados próximos.*

* Nota -

→ Esta distância, inclusive no pára-raios, deve ser suficiente para

permitir isolar a tensão fase-terra do sistema.

A falha em interromper as correntes subseqüentes, ou mesmo, a instabilidade térmica, fatalmente, resultam na eventual falha, normalmente, por perfuração, ou seja, *"puncturing"*, dos resistores não lineares principais e, por conseguinte, no desenvolvimento de um arco de potência no interior do pára-raios. É notório que, a maioria dos pára-raios, não possuem capacidade para suportar uma falta interna por mais de um ciclo e, deste modo, são virtualmente destruídos, antes que, qualquer dispositivo de proteção contra sobrecorrentes tenha tempo hábil de atuar. No entanto, este tipo de acontecimento indesejável e de alto risco com respeito a segurança do público e das equipes de manutenção tem, como vantagem, eliminar o problema relativo a existência de pára-raios defeituosos no sistema.

Um ponto interessante, é o fato que, a atuação benéfica dos desligadores automáticos em interromper o desenvolvimento e a formação de uma falta fase-terra no interior dos pára-raios não é reconhecida pelas normas atualmente em vigor e, portanto, nenhum ensaio neste sentido foi desenvolvido, fato que, em tese, tem sua justificativa pois, primeiramente, é necessário que as concessionárias venham a atentar ao correto modo de conexão dos desligadores automáticos antes de se otimizar a utilização de sua capacidade de interrupção de corrente.

O único aspecto negativo, com respeito a operação dos desligadores automáticos é a ausência de qualquer tipo de proteção contra surtos* durante o tempo que demanda a substituição do pára-raios defeituoso pois, mesmo nas concessionárias que mantém como prática constante, a inspeção periódica podem ser necessários alguns meses para que um pára-raios defeituoso seja detectado e substituido.

** Nota -*

→ *O invólucro do pára-raios, caso adequadamente projetado pode servir de proteção de retaguarda para um pára-raios defeituoso.*

Estudos recentes[6] tem demonstrado que os pára-raios defeituosos isolados do sistema são responsáveis por, pelo menos *20.0 %* das falhas em equipamentos de distribuição, consequentemente, alternativas frente a utilização de pára-raios providos com desligadores automáticos como tentativa de reduzir o número de falhas em equipamentos sensíveis a sobretensões ou de custo elevado devem ser analisadas ou adotadas e, dentre estas, destaca-se a instalação do pára-raios do lado da carga dos elos fusíveis.

Existem diferenças óbvias entre os mecanismos de desenvolvimento de falhas graduais nos pára-raios a carboneto de silício e nos a óxido metálico. A corrente associada a um pára-raios a óxido metálico em processo de falha por instabilidade térmica, ou seja, *"Thermal Runaway"* ou por falha de um de seus resistores não lineares é da ordem de alguns décimos a no máximo algumas dezenas de ampéres, deste modo, é razoável supor que a atuação dos desligadores automáticos associados a estes pára-raios também seja diferenciada, fato que pode tornar, virtualmente inútil, a aplicação indiscriminada de alguns projetos de desligadores automáticos. Nestes casos o desenvolvimento da falha prossegue ininterruptamente até que se estabeleça pelo interior do pára-raios uma corrente de falta que, seguramente, resulta, ou em sua fragmentação ou em última instância, explosão.

II.4.5.3 - REQUISITOS PARA A CONEXÃO DOS DESLIGADORES AUTOMÁTICOS

Os requisitos, para a conexão dos desligadores automáticos são de duas espécies, os relativos, a conexão propriamente dita e os relativos as necessidades de isolamento entre o terminal inferior do pára-raios e as partes metálicas aterradas, assim seja:

a]- Requisitos dos Condutores de Descida:-

De modo a permitir a separação adequada, a manutenção de uma elevada velocidade de separação, bem como, eliminar qualquer movimento de

retorno a sua posição original devido a uma ação semelhante a uma mola, os condutores de descida* devem ser longos e flexíveis, com no mínimo as seguintes características:

I- Comprimento mínimo de *0.50 metros;*

II- Bitola máxima *6 AWG;*

III- Conter no mínimo *49 tentos.*

** Nota -*

→ *O termo "Condutor de Descida" se refere ao trecho de condutor entre o terminal inferior do pára-raios e o terminal comum aos 3 pára-raios que compõem a proteção contra surtos de qualquer equipamento trifásico, normalmente, parte do tanque deste equipamento.*

b]-Requisitos de Isolamento:-

Após a operação do desligador automático, o terminal inferior do pára-raios fica submetido a tensão de linha pois, se encontra desconectado da terra, logo, para evitar que ocorram descargas entre este terminal e qualquer ponto aterrado é necessário que os espaçamentos em ar sejam capazes de suportar a tensão fase-terra do sistema.

Nestes casos devem ser consideradas duas situações distintas:

I]- Abraçadeiras Aterradas:-

Em muitas instalações as abraçadeiras dos pára-raios são aterradas, ou por razões de segurança, ou mesmo por características próprias da instalação, a exemplo dos pára-raios montados sobre os tanques dos transformadores. Nestes casos, uma distância mínima em ar [110] entre o terminal inferior do pára-raios e a abraçadeira, necessita ser garantida de modo que, a solicitação de tensão não seja superior ao valor indicado

na Tabela *II.49*.

Distância	* *Solicitação Máxima [kV/cm]*
Fuga	*1.40*
Arco	*2.00*

Tabela II.49 - Solicitação Máxima Permitida entre o Terminal Inferior de um Pára-raios e Abraçadeira Aterrada

** Nota -*

→ *Solicitação definida com base na Tensão Nominal - U_n dos pára-raios a carboneto de silício ou na Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV dos pára-raios a óxido metálico.*

Conforme mostra a Tabela *II.49* as solicitações máximas de tensão entre o terminal inferior e a abraçadeira de um pára-raios defeituoso, retiradas de projetos que tem apresentado bom desempenho de campo, são muito superiores a permitida sob condições de poluição atmosférica, no caso, algo em torno de *0.40 kV/cm* nas mesmas bases. Estas solicitações elevadas são permitidas por razões econômicas, bem como, devido ao fato de, em uma determinada região, existirem poucos pára-raios submetidos a este tipo contingência, além disto, qualquer descarga externa ocasional não deve apresentar influência relevante com respeito ao grau de confiabilidade do sistema nem impor danos relevantes ao pára-raios em questão.

II]- Abraçadeiras Isoladas:-

Quando as abraçadeiras são isoladas e separadas de um ponto aterrado por uma distância de pelo menos *30 cm* de material isolante como, por exemplo, madeira ou fibra de vidro, os desligadores automáticos podem operar, com sucesso, sob o dobro das solicitações listadas na Tabela *II.49*.

III - NORMALIZAÇÃO NACIONAL E INTERNACIONAL

What is needed now, I think, more than at any tyme
in our history-certainly more than at any time since
the turn of the century, is an examination,
or rather, a re-examination of our policy ....

(George Fielding Elliot)

III.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Who builds a ship, must first lay down the keel
(Robert Bridges)

No moderno cenário industrial, a normalização se constitui em um dos principais pontos chaves, e não raras vezes, o principal sustentáculo sobre o qual se orienta e internacionaliza a produção de qualquer bem ou equipamento.

Através de um conjunto adequado de normas internacionais o desempenho, bem como, a intercambiabilidade entre bens e equipamentos produzidos sob as mais variadas condições é assegurado e, deste modo, normalmente, a origem dos mesmos pouco, as vezes nenhum significado, representa no comportamento final dos sistemas assim construídos.

A normalização, por se constituir em uma solução de consenso entre fabricantes e consumidores, apresenta em seus foros, excelente oportunidade de transferência de conhecimento, ou seja, do tão propalado *"Know-How"* e, deste modo, deve sempre receber um tratamento adequado por parte dos governos nacionais, pois seguramente, a exemplo de algumas políticas, diga-se de passagem, comumente utilizadas, pode assegurar, de

maneira extremamente sutil, áreas de reserva de mercado.

Normalmente, cada país, possue seu conjunto de normas nacionais, adequadas, obviamente, aos perfis aquisitivo e de consumo locais e, deste modo, soa razoável afirmar que o grau de normalização, bem como, sua rigidez refletem o nível de desenvolvimento pelo qual a sociedade que os elaborou, atravessa.

É também óbvio, que as atividades resultantes do sempre crescente comércio internacional, impõem a premente necessidade de existência de uma normalização geral, capaz de garantir, de modo global, principalmente, a utilização adequada e a operação conjunta de bens e equipamentos das mais variadas procedências.

No entanto, em vários casos específicos, algumas normas nacionais, via de regra, pertinentes a países dotados de elevado padrão social médio, terminam por impor requisitos superiores aos existentes nas normas internacionais e, nestes casos, quando solicitado por uma das partes, são usualmente referenciadas e aceitas por todos os envolvidos no processo, fato que, em tese, pode resultar na exclusão de alguns competidores menos avisados, impondo pois, uma velada e sutil reserva de mercado que, não raro, passa completamente desapercebida.

De modo geral, a correta análise da normalização vigente, bem como, dos procedimentos que a originou pode e, normalmente serve, para orientar e definir a maioria dos processos utilizados na produção dos bens e equipamentos a ela relacionada, porém, também é óbvio que qualquer especulação de carácter teórico retirada destes documentos necessita de comprovação prática.

A idéia de se impor uma normalização à produção se encontra em parte fundamentada nos princípios da produção em massa onde a competitividade de mercado e o crescente consumo terminam por resultar na necessidade de se utilizar de técnicas que venham a maximizar o lucro.

As primeiras tentativas para normalizar, ou seja, compatibilizar as

especificações técnicas, bem como, os métodos de ensaio, utilizados para comprovar o desempenho dos pára-raios, bem como de outros equipamentos eletricos, datam do início do *Século XX*,[1] orientadas basicamente pela competição tecnológica e de mercado entre a *GENERAL ELECTRIC* e a *WESTINGHOUSE ELECTRIC COPORATION* período no qual, apesar da existência de mentes extremamente brilhantes, devido a ausência de meios de observação adequados, muito pouco era conhecido com respeito as solicitações impostas a estes equipamentos, sobre a tecnologia de materiais para uso eletrotécnico e sobre os equipamentos para ensaios dielétricos.

No entanto, um cuidadoso exame dos fatos mostra desde esta época, a existência de uma tendência, sempre crescente, em acrescentar novos dados e metodologias, oriundas de resultados obtidos com o auxílio de experiências de campo e laboratório, aos procedimentos gerais de avaliação e desempenho dos pára-raios e, deste modo, as suas normas registraram várias e importantes inflexões e, provavelmente, outras devem ainda ocorrer, ao longo dos tempos, normalmente definidas, primeiramente pelo advento de equipamentos de ensaio adequados a representar fenômenos levantados no campo e, finalmente pela introdução de novas técnicas, conceitos e materiais.[2→5]

Dentre as várias normas existentes sobre pára-raios para sistemas de potência, as mais difundidas, inclusive utilizadas como documento básico para a elaboração de várias normas nacionais são as publicadas sob o patrocínio da *"IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION"* e da *"ANSI - AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE"*.*

* *Nota -*

→ *Os documentos fornecidos pela IEC são os normalmente utilizados para a elaboração das NBR - NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRAS.*

A incorporação de novos procedimentos de avaliação às normas técnicas é realizada através de revisões, orientadas por comissões de estudo de

carácter nacional ou internacional, função óbvia do caso e, apresenta um grau de periodicidade, em tese, intimamente ligado a evolução tecnológica e, não raras vezes, ao grau de obsolescência do produto ou equipamento por elas padronizado.*

* *Nota -*

→ *Definir grau de obsolescência de um produto é uma tarefa, normalmente problemática pois, são vários os enfoques responsáveis pelo término da vida útil de uma determinada tecnologia e, dentre estes, talvez o mais importante e, comumente relegado a um segundo plano, pela comunidade técnica é o critério econômico, fato que pode ser alterado pela existência de um mercado competitivo porém, a formação de grandes blocos industriais tende a manter esta situação e, deste modo, sempre é necessário amortizar toda uma série de investimentos em pesquisa tecnológica e em equipamentos de produção antes de se viabilizar novas tecnologias.*

Dentro deste contexto as normas sobre pára-raios para sistemas de potência tem apresentado um período médio de revisão da ordem de *10 anos* e, provávelmente, a nível internacional, as revisões sofridas pelos documentos relativos aos pára-raios a carboneto de silício devem ser as últimas pois, aparentemente, os mesmos já alcançaram seu máximo limite tecnológico e, em alguns casos, principalmente no que se refere aos sistemas de alta e extra-alta tensão, sua fabricação vem sendo constantemente descontinuada.*

* *Nota -*

→ *Fato que, pelo menos a nível local, não vem se verificando com os pára-raios a carboneto de silício para sistemas de distribuição em média tensão que, em tese, determina a não obsolescência a nível econômico deste equipamento.*

III.2 - NORMAS BRASILEIRAS - COMENTÁRIOS

You Gotta Believe, in yourself

(Redda Kabbani)

As *Normas Brasileiras* sobre pára-raios a resistores não lineares para sistemas de potência, a menos de modificações de pequena monta são, em grande parte, oriundas de documentos desenvolvidos a nível internacional pela *IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECNICAL COMMISSION.*

A estrutura normativa geral adotada pela *ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS* da qual o *CB-3 COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE* é parte integrante, assume a subdivisão dos requisitos relativos a um produto ou equipamento a ser normalizado em, basicamente, 4 seções que discorrem sobre assuntos específicos e, deste modo são complementares umas as outras, conforme a seguir:

I) - *Especificação Básica:*- É a norma responsável pela definição de toda a terminologia associada a um produto ou equipamento, pela definição dos requisitos mínimos em termos de ensaios, no caso, divididos em *"Ensaios de Tipo ou Protótipo"*,* *"Ensaios de Recebimento"*** e *"Ensaios de Rotina"*,*** bem como, pela normalização das solicitações e dos limites das respostas frente as mesmas;****

II) - *Método de Ensaio:*- É a norma que define os procedimentos a serem adotados durante a execução dos ensaios normalizados pela *"Especificação Básica"*, correspondente;

III) - *Guia de Aplicação:*- É a norma que define quais devem ser os procedimentos e recomendações a serem adotados ao se instalar um produto ou equipamento dotado dos requisitos normalizados por uma

carácter nacional ou internacional, função óbvia do caso e, apresenta um grau de periodicidade, em tese, intimamente ligado a evolução tecnológica e, não raras vezes, ao grau de obsolescência do produto ou equipamento por elas padronizado.*

** Nota -*

→ *Definir grau de obsolescência de um produto é uma tarefa, normalmente problemática pois, são vários os enfoques responsáveis pelo término da vida útil de uma determinada tecnologia e, dentre estes, talvez o mais importante e, comumente relegado a um segundo plano, pela comunidade técnica é o critério econômico, fato que pode ser alterado pela existência de um mercado competitivo porém, a formação de grandes blocos industriais tende a manter esta situação e, deste modo, sempre é necessário amortizar toda uma série de investimentos em pesquisa tecnológica e em equipamentos de produção antes de se viabilizar novas tecnologias.*

Dentro deste contexto as normas sobre pára-raios para sistemas de potência tem apresentado um período médio de revisão da ordem de *10 anos* e, provávelmente, a nível internacional, as revisões sofridas pelos documentos relativos aos pára-raios a carboneto de silício devem ser as últimas pois, aparentemente, os mesmos já alcançaram seu máximo limite tecnológico e, em alguns casos, principalmente no que se refere aos sistemas de alta e extra-alta tensão, sua fabricação vem sendo constantemente descontinuada.*

** Nota -*

→ *Fato que, pelo menos a nível local, não vem se verificando com os pára-raios a carboneto de silício para sistemas de distribuição em média tensão que, em tese, determina a não obsolescência a nível econômico deste equipamento.*

III.2 - NORMAS BRASILEIRAS - COMENTÁRIOS

You Gotta Believe, in yourself
(Redda Kabbani)

As *Normas Brasileiras* sobre pára-raios a resistores não lineares para sistemas de potência, a menos de modificações de pequena monta são, em grande parte, oriundas de documentos desenvolvidos a nível internacional pela *IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECNICAL COMMISSION.*

A estrutura normativa geral adotada pela *ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS* da qual o *CB-3 COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE* é parte integrante, assume a subdivisão dos requisitos relativos a um produto ou equipamento a ser normalizado em, basicamente, 4 seções que discorrem sobre assuntos específicos e, deste modo são complementares umas as outras, conforme a seguir:

I) - *Especificação Básica:*- É a norma responsável pela definição de toda a terminologia associada a um produto ou equipamento, pela definição dos requisitos mínimos em termos de ensaios, no caso, divididos em *"Ensaios de Tipo ou Protótipo"*,* *"Ensaios de Recebimento"*** e *"Ensaios de Rotina"*,*** bem como, pela normalização das solicitações e dos limites das respostas frente as mesmas;****

II) - *Método de Ensaio:*- É a norma que define os procedimentos a serem adotados durante a execução dos ensaios normalizados pela *"Especificação Básica"*, correspondente;

III) - *Guia de Aplicação:*- É a norma que define quais devem ser os procedimentos e recomendações a serem adotados ao se instalar um produto ou equipamento dotado dos requisitos normalizados por uma

determinada *Especificação Básica* e ensaiado segundo o *Método de Ensaio* correspondente; e

IV) - *Padronização:*- É a norma responsável pela definição de padrões adequados a produtos ou equipamentos, normalizados pelas normas anteriores porém, que apresentam elevada taxa de consumo ou utilização, a exemplo dos pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão.

Notas -

* - *Os Ensaios de Tipo ou Protótipo são ensaios realizados após o projeto e desenvolvimento de um novo produto ou equipamento de modo a determinar seu desempenho e demonstrar sua conformidade frente as Normas. Uma vez realizados, estes ensaios não necessitam ser repetidos a menos que o projeto seja modificado.*

** - *Os Ensaios de Recebimento são ensaios realizados em unidades representativas de um lote de produção, usualmente na presença dos compradores ou de seus representantes, com o objetivo de verificar a conformidade dos resultados obtidos com os garantidos pelo fabricante que, a menos de uma coincidência que nunca ocorre, devem ser distintos dos requisitos mínimos ou máximos normalizados.*

*** - *Os Ensaios de Rotina são ensaios realizados em cada nova unidade produzida com o objetivo de verificar as característica mínimas de qualidade e uniformidade de produção em conformidade com o projeto definido pelos Ensaios de Tipo.*

**** - *Conforme comentado, segundo as NORMAS BRASILEIRAS os "Ensaios de Tipo ou Protótipo" não necessitam ser realizados em bases periódicas, no entanto, algumas normas internacionais contemplam algumas verificações periódicas de tipo ou conformidade, denominadas de "Ensaios de Conformidade de Tipo" que, normalmente, apresentam como principal objetivo aferir a*

qualidade e uniformidade de produção.

A rigor, os pára-raios para sistemas de potência são fabricados segundo duas linhas tecnológicas distintas, a primeira, mais antiga, normalmente denominada *"Convencional"* com resistores não lineares a carboneto de silício e a segunda, mais moderna, com resistores não lineares a óxido metálico.*

** Nota -*

→ *Os pára-raios a óxido metálico, segundo a normalização internacional patrocinada pela IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, devem ser construídos sem centelhadores de espécie alguma, conceito não compartilhado pela ANSI -TAMERICAN NATIONAL STANDARD ASSOCIATION.*

Em termos das *NORMAS BRASILEIRAS*, a tecnologia baseada nos resistores a óxido metálico seguiu, primeiramente, a orientação recomendada pela *IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION* porém, a medida que os fabricantes locais começaram a tomar contacto com a mesma, devido a uma série de problemas de carácter econômico-produtivo[6] a orientação original foi reavaliada de modo a cobrir as principais tendências detectadas.*,**,***

Notas -

* - *Avaliações econômicas, determinadas por peculiaridades da estrutura de custos vigente no mercado nacional, indicam que em termos ecônomicos os pára-raios a óxido metálico classe distribuição para sistemas em média tensão devem ser projetados e construídos com centelhadores série. Já com respeito aos pára-raios a óxido metálico classe estação existe uma região de litígio nos sistemas de média e alta tensão.*

** - *As principais solicitações impostas aos pára-raios para sistemas*

com tensão máxima operativa de àté 145 kV são de origem atmosférica logo, não existe necessidade premente de utilizar nestes sistemas pára-raios dotados de um elevado desempenho frente a surtos de manobra, ou seja, de elevada capacidade de absorção de energia, fato que, virtualmente torna o desempenho de um pára-raios com centelhadores e resistores a óxido metálico ou carboneto de sílicio equivalente ao de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores de espécie alguma.

**** - Após uma série de discussões optou-se por limitar a tensão nominal dos pára-raios a óxido metálico classe estação a 39 kV, em tese, uma restrição severa que, no entanto, atua no sentido de permitir o desenvolvimento harmônico da emergente indústria nacional. É também óbvio que durante etapas posteriores este limite pode e deve ser revisto mas antes disto é necessário que um mínimo nível tecnológico venha a ser estabelecido.*

Dentro deste contexto as *NORMAS BRASILEIRAS* sobre *"PÁRA-RAIOS A RESISTORES NÃO LINEARES PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA"* elaboradas pela *CE-37 COMISSÃO DE ESTUDOS SOBRE PÁRA-RAIOS* do *CB-3 COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE* assumem a seguinte itemização:[8→14]

*I] - PROJETO 3:37.1-001:- Pára-raios a Resistor não Linear a Carboneto de Silício SiC para Circuitos de Potência de Corrente Alternada, Especificação.**

*II] - PROJETO 3:37.1-002:- Pára-raios a Resistor não Linear a Carboneto de Silício SiC para Circuitos de Potência de Corrente Alternada, Método de Ensaio.***

*III] - PROJETO 3:37.5-001:- Pára-raios a Resistor não Linear a Carboneto de Silício SiC para Sistemas de Distribuição, Padronização.****

IV] - PROJETO 3:37.7-001:- Pára-raios a Resistor não Linear a Óxido Metálico sem Centelhadores para Circuitos de Potência de Corrente

Alternada, Especificação.****

V] - PROJETO 3:37.7-002:- Pára-raios a Resistor não Linear a a Óxido Metálico sem Centelhadores para Circuitos de Potência de Corrente Alternada, Método de Ensaio.****

VI] - PROJETO 3:37.11-001:- Pára-raios a Resistor não Linear a Óxido Metálico com Centelhadores para Circuitos de Potência de Corrente Alternada, Especificação.****

VII] - PROJETO 3:37.11-002:- Pára-raios a Resistor não Linear a a Óxido Metálico com Centelhadores para Circuitos de Potência de Corrente Alternada, Método de Ensaio.****

Notas -

* - Que deve ser publicada como NBR - 5287.

** - Que deve ser publicada como NBR - 5309.

*** - Projeto sujeito a revisão segundo recente padronização elaborada pelo CODI - COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO.

**** - Projeto em votação final ou em fase de publicação portanto sem número NBR.

A itemização acima implica em uma série de críticas com respeito a interdependência entre os documentos, fato coberto pela maioria das normas de carácter internacional que, no entanto não se deve constituir em demérito algum.*

* Nota -

→ Apesar de uma série de percalços, na maioria das vezes, de carácter econômico, um ponto de extrema importância deve ser realçado, ou seja,

os trabalhos realizados pela maioria das "COMISSÕES DE ESTUDO da CE-37", através de seus membros ou das entidade que os patrocinam, se encontram, dentro de seus limites, a altura dos trabalhos desenvolvidos pelas "COMISSÕES DE ESTUDO da IEC e da ANSI", fato que, em última análise, denota a existência, a nível nacional, de uma base tecnológica de porte.

Com respeito aos *PROJETOS 3:37.1-001* e *3:37.1-002* existe uma série de críticas, principalmente, no que diz respeito ao *"Ensaio de Alta Corrente de Curta Duração"* pois os limites para os parâmetros responsáveis pela avaliação de desempenho são considerados por alguns técnicos como execessivamente abrangentes.*,**

Notas -

* - *Durante várias das reuniões da COMISSÃO DE ESTUDO foram discutidos aspectos sobre este ensaio, inclusive, se o mesmo apresenta ou não algum significado prático pois, com muita propriedade, conforme exposto na ocasião, a "Tensão Residual" oferecida pela maioria dos pára-raios sob as condições de corrente requeridas pela Norma é superior ao "Nível Básico de Isolamento" dos equipamentos. A opinião predominante na ocasião da elaboração do texto base para a CE-3:37.1 foi, pela manutenção do ensaio, como anteriormente determinado pelas NORMAS BRASILEIRAS, ou seja, segundo a Norma IEC, no entanto, tendo em mente o grau de solicitação imposto pelas correntes de alta amplitude, foi adotado um método de avaliação de desempenho semelhante ao preconizado pela Norma ANSI.*

** - *Neste caso a solução ideal deveria contemplar, a metodologia completa, conforme proposta pela Norma ANSI porém, como detectado na ocasião, isto poderia implicar na exclusão momentânea de uma boa parte dos fabricantes do mercado. A solução adotada foi, sem sombra de dúvida, um compromisso, pois, outros temas tais como, vedação, são muito mais importantes que este mero detalhe de origem estatística, ou seja, a suportabilidade frente a uma corrente*

baixa probabilidade, porém algumas recomendações deveriam ter se originado dos estudos realizados nesta época e prazos deveriam ser estabelecidos para que os problemas relativos a suportabilidade frente a correntes de alta amplitude fossem devidamente sanados.

Os *PROJETOS 3:37.1-001* e *3:37.1-002* apresentam um outro ponto polêmico, passível de deve ser resolvido no decorrer de sua próxima e, provávelmente última revisão, relacionado com o *Ensaio de Descargas de Linha de Transmissão*, que de modo inadequado, ao incorporar o procedimento de calibração do gerador de constantes distribuídas recomendado pela *ANSI - AMERICAN NATIONAL STANDARD ASSOCIATION*, também incorporou o conceito de *"Classe de Descarga de Linhas"* associado que, obviamente não encontra paralelo a nível da normalização internacional segundo a *IEC INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.*[*,**,***,****]

Notas -

**- O método para a verificar a adequacidade dos elementos do gerador de constantes distribuídas, conforme recomendado pela Norma ANSI, permite através de uma série de medidas e fórmulas simplificadas, determinar, em última análise, se as perdas associadas ao sistema se encontram dentro de limites adequados.* [15]

***- Os sistemas montados conforme recomendado na Norma ANSI são extremamente flexíveis e, via de regra, permitem um ajuste rápido de constantes, bem como, a utilização de reatâncias com núcleo em ar dotadas de baixo fator de qualidade.*

****- As "Classes de Descarga de Linhas" recomendadas na Norma ANSI mantém uma boa correlação com os parâmetros de linhas reais, fato que permite, que os pára-raios venham a ser ensaiados em condições próximas as existentes no campo.*

*****- Ao se incorporar o conceito de "Classe de Descarga de Linhas" conforme recomendado pela Norma ANSI a correlação mantida com a*

Norma IEC foi perdida fato que pode resultar, para os menos avisados, em erros de aplicação pois, não existe uma correlação de resultados entre ambas.

Os *PROJETOS 3:37.7-001* e *3:37.7-002* foram retirados na integra, com pequenas modificações em termos de forma que, no entanto, não comprometem o conteúdo geral do texto, dos *DRAFTS* que resultaram na Norma *IEC 99.4 - 1992*. Deste modo, estes documentos refletem, de maneira extremamente fiel, uma tendência internacional direcionada, basicamente, para a concepção, construção e ensaios de pára-raios para sistemas de alta e extra alta tensão.*,**,***,****

Notas -

* - *A Norma ANSI equivalente tem embutida uma série de conceitos cujo objetivo principal é equivalentar em termos de "Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n" os pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão fato que, a princípio, deve reduzir o número de ocorrências envolvendo erros de aplicação.*

** - *Não existe na Norma IEC 99.4 - 1992 e, por conseguinte, nos documentos relativos aos PROJETOS 3:37.7-001 e 3:37.7-002, comentários com respeito a suportabilidade dos pára-raios frente a sobretensões em freqüência industrial, relacionada com o "Limite de Estabilidade Térmica", a não ser os sutilmente fixados nos"Ensaio de Ciclo de Operação Combinado e Estabilidade Térmica" e nos procedimentos para a verificação da "Característica Sobretensão versus Tempo".*

*** - *A diferença entre os esforços térmicos impostos pelo "Ensaio de Ciclo de Operação - Norma ANSI", considerado o que resulta em maior solicitação quando de pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão e pelo "Ensaio de Ciclo de Operação Combinado - Norma IEC" resultam em comportamento diferenciado com respeito a sobretensões em freqüência industrial, fato que, em*

respeito a sobretensões em freqüência industrial, fato que, em tese, vem a facilitar a aplicação dos pára-raios classe de distribuição projetados segundo a Norma ANSI.

**** - *Com respeito a maioria dos pára-raios classe estação o desempenho frente a sobretensões em freqüência industrial é, virtualmente, idêntico pois, as solicitações térmicas impostas pelo "Ensaio de Ciclo de Operação - Norma ANSI", e pelo "Ensaio de Ciclo de Operação Combinado - Norma IEC" são, dentro de limites, praticamente equivalentes.*

Um das falhas existentes na Norma *IEC 99.4 - 1992* e, por conseguinte, nos *PROJETOS 3:37.7-001* e *3:37.7-002* é relacionada com o problema da *Absorção de Energia* que é tratado segundo abordagem clássica, ou seja, sob o enfoque de *Descarga de Linhas* e de *Limite de Estabilidade Térmica*.*,**,***

Notas -

* - *A Norma ANSI também assume este tipo de tratamento para o problema relacionado com a "Absorção de Energia" dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores.*

** - *A adoção de uma abordagem clássica para a "Absorção de Energia" permite resolver basicamente todos os problemas relacionados com as manobras tradicionais. No entanto, existe uma série de manobras que resultam em correntes de descarga superiores as tradicionalmente obtidas nos "Ensaios de Descarga de Linhas de Transmissão". O ponto em questão é que nestes casos ocorre uma redução na capacidade de "Absorção de Energia" dos resistores a óxido metálico, que deve ser quantificada pois, caso este fato for ignorado é possível que se incorra em um sobredimensionamento desnecessário dos pára-raios ou mesmo em erros de aplicação.*

*** - *Uma série de estudos com relação a "Absorção de Energia" sob*

correntes com forma não normalizada vem sendo realizada e, deste modo, é provável que o reflexo de seus resultados venham a ser incorporados no decorrer da próxima revisão das Normas IEC e, por conseguinte, das Normas NBR.

Os *PROJETOS 3:37.11-001* e *3:37.11-002* surgiram de uma série de polêmicas entre fabricantes, laboratórios e grandes concessionárias do exixo sul-sudeste originadas por ocasião da elaboração dos *PROJETOS 3:37.1-001* e *3:37.1-002* que, em tese, poderia englobar as solicitações pertinentes aos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, bastando para tanto efetuar uma mudança no título da norma, incluir algumas novas definições,* bem como, modificar o escopo de alguns ensaios. No entanto, a evolução dos debates direcionou o esforço para a elaboração de um conjunto de documentos separados.**

Notas -

* - *Os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores apresentam pequenas particularidades que os ligeiramente diferenciam dos pára-raios convencionais a carboneto de silício. Dentre estas, talvez a mais sútil e marcante seja a existente entre centelhadores série e paralelos, determinada pelo método utilizado para equalizar o potencial nos mesmos que, obviamente, não consta de uma norma sobre pára-raios a carboneto de silício e, portanto, e exemplo de outras, deve ser incluída no escopo de uma norma geral.*

** - *Elaborar uma norma geral sobre pára-raios com centelhadores série implica na elaboração conjunta de uma norma com o objetivo específico de definir quais são os requisitos mínimos que os resistores não lineares para pára-raios para sistemas de potência devem apresentar, fato reconhecido e adotado pela EDF - ELECTRICITÉ DE FRANCE,* [16] *com relação aos resistores a óxido metálico que, por sua vez, não discutido e, portanto, previsto por ocasião das reuniões que resultaram na forma final dos documentos relativos aos PROJETOS 3:37.1-001 e 3:37.1-002. Deste modo, apesar de suscitar*

em duas normas distintas deve ser encarada como correta.

Um dos pontos que suscitou grande polêmica durante a elaboração dos documentos relativos aos *PROJETOS 3:37.11-001* e *3:37.11-002* foi o pertinente a limitação imposta, por acordo geral,* à tensão nominal e à classe dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, ou seja, *39 kV, Classe Estação Serviço Leve - Intermediária*, respectivamente.**

Notas -

** - O objetivo desta limitação foi assegurar e preservar o desenvolvimento tecnológico harmônico entre resistores não lineares a óxido metálico e pára-raios, bem como, dificultar a invasão do mercado de alta tensão, no caso até a classe de 145 kV, por pára-raios tecnologicamente não consolidados fato que, além de comprometer o desempenho dos sistemas, atua no sentido de impedir a difusão de um tecnologia capaz de a médio prazo mudar o perfil do mercado.*

*** - Os limites impostos não devem ser encarados como uma restrição ao desenvolvimento tecnológico pois, abrangem, provavelmente, algo em torno de 70 % do mercado total de pára-raios fato que, permite que praticamente todas as empresas de capital predominantemente nacional que desejam atuar neste mercado, que assim o façam porém, com a devida competência e sob o um mínimo de regras.*

III.3 - NORMAS NORTE-AMERICANAS - COMENTÁRIOS

To make an end is to make a beginning.
The end is where we start from.
(T.S.Eliot)

As *Normas Norte-Americanas* sobre pára-raios a resistores não lineares para sistemas de potência, são baseadas em uma série de trabalhos levados a termo ao longo dos anos pelo *IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS*, fórum de carácter mundial, e seus antecessores em conjunto com a *ANSI - AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE* e, deste modo, se constituem em documentos aceitos amplamente a nível mundial.

A estrutura normativa adotada pela *ANSI - AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE* da qual o *IEEE POWER ENGINNERING SOCIETY* é parte integrante assume a subdivisão dos requisitos relativos a um produto ou equipamento a ser normalizado em basicamente 2 seções, em tese, independentes, conforme a seguir:

I) - *Norma de Especificação e Ensaio:*- É a norma responsável pela definição de toda a terminologia associada a um produto ou equipamento, pela definição dos requisistos em termos de ensaios, divididos, no caso em *"Ensaios de Projeto, Tipo ou Protótipo"*, *"Ensaios de Recebimento"*, *"Ensaios de Rotina"* e *"Ensaios de Conformidade de Tipo"*,* pela normalização das solicitações e dos limites das respostas frente as mesmas, bem como, pelos procedimentos a serem adotados durante a execução dos ensaios normalizados;** e

II) - *Guia de Aplicação:*- É a norma que define quais devem ser os procedimentos e recomendações a serem adotados ao se instalar um produto ou equipamento dotado dos requisitos normalizados e

ensaiado segundo uma determinada *Norma de Especificação e Ensaio.*

Notas -

* - *Os Ensaios de Conformidade de Tipo tem como principal objetivo aferir a qualidade e uniformidade de produção de um determinado produto ao longo do seu período de fabricação. No caso específico de pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão as Normas ANSI padronizam quais ensaios devem ser realizados pois, não é necessário repetir toda a bateria de Ensaios de Tipo, mas somente os relevantes, ou seja, os pertinentes aos níveis de proteção, e suportabilidade frente a impulsos atmosféricos, bem como, sua periodicidade.*

** - *Segundo o ponto de vista de alguns usuários a adoção de um documento único, que englobe a Especificação e os Métodos de Ensaio, se constitue em uma prática que deveria ser seguida pelas NORMAS BRASILEIRAS pois tem como principal objetivo facilitar o manuseio de toda a documentação.*

Dentro do atual contexto tecnológico as *NORMAS NORTE-AMERICANAS* sobre *"PÁRA-RAIOS A RESISTORES NÃO LINEARES PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA"* elaboradas pelo *SURGE PROTECTIVE DEVICES COMMITTEE* do *IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY* assumem a seguinte itemização: [17-18]

I] - *ANSI - IEEE - C-62.1:- Standard for Silicon Carbide Surge Arresters for Alternating-Current Power Circuits.*

II] - *ANSI - IEEE - C-62.11:- Standard for Metal Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Power Circuits.*

A *Norma ANSI - IEEE - C-62.1 - 1984* é, sem nenhuma dúvida, o melhor e mais completo documento escrito sobre pára-raios convencionais a carboneto de silício para circuitos em corrente alternada pois,

praticamente todas as solicitações passíveis de ocorrer em campo,*,** desde as relativas aos pequenos pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão, até as pertinentes aos gigantescos pára-raios para sistemas de transmissão em extra-alta tensão são cobertas pela mesma.

Notas -

* - *Considerando que uma das principais funções de uma norma é definir uma série de solicitações padronizadas, as quais os equipamentos devem responder satisfatoriamente, é razoável supor que, existam poucas diferenças entre as solicitações impostas pelas principais normas internacionais, fato que, no entanto, não se verifica. Em alguns casos, a exemplo do Ensaio de Ciclo de Operação, o nível das solicitações imposto pela Norma ANSI - IEEE - C-62.1 - 1984 é razoavelmente superior ao imposto por exemplo pela Norma IEC 99.1 - 1991. Em outros, a exemplo do Ensaio de Alta Corrente de Curta Duração, ocorre o contrário. O ponto chave em questão passa a ser o relativo aos mecanismos de avaliação de desempenho recomendados e, neste caso, de um modo geral, os pára-raios projetados segundo a Norma ANSI - IEEE - C-62.1 - 1984 suportam com boa margem de segurança o conjunto de ensaios propostos pela Norma IEC -99.1 - 1991.*

** - *Como excessão a esta regra se encontra, por exemplo, a ausência de uma definição de um ensaio adequado para a determinação da redução da suportabilidade dielétrica dos centelhadores após uma descarga de manobra, fato que pode induzir um pára-raios a carboneto de silício para sistemas de transmissão em extra-alta tensão a falhar intempestivamente.*

Dentro deste contexto a *Norma ANSI - IEEE - C-62.1 - 1984* se constituí no documento ideal para a *Compra Internacional* de pára-raios a carboneto de silíco para sistemas de potência em corrente alternada.

A *Norma ANSI - IEEE - C-62.11 - 1988* apesar de abrager, como nenhuma

outra, todas as linhas de desenvolvimento tecnológico diretamente relacionadas com a construção de pára-raios a óxido metálico,* pode ser visualizada como uma adaptação, aparentemente extremamente adequada, da *Norma ANSI - IEEE - C-62.1 - 1984*, principalmente no que diz respeito aos pára-raios a óxido metálico para sistemas de distribuição em média tensão pois, nestes casos, tem como objetivo possibilitar a substituição imediata de um pára-raios a carboneto de silício por seu equivalente em termos de *Tensão de Ciclo de Operação* - U_n a óxido metálico.**,***

Notas -

* - *A Norma ANSI - IEEE - C-62.11 - 1988 é a única que possibilita meios para avaliar o desempenho de pára-raios com centelhadores, no caso, série ou paralelos.*

** - *Os pára-raios a óxido metálico para sistemas de distribuição em média tensão projetados segundo os requisitos exigidos pela Norma ANSI - IEEE - C-62.11 - 1988 possuem uma "Temperatura Limite de Estabilidade" elevada e, portanto, apresentam alta suportabilidade frente a sobretensões em freqüência industrial, fato que, facilita sua aplicação a estes sistemas.*

*** - *A suportabilidade frente a sobretensões em freqüência industrial dos pára-raios classe intermediária e classe estação não é tão elevada quanto a apresentada pelos pára-raios classe distribuição e, portanto, os primeiros requerem cuidados extras quando de sua especificação e aplicação no campo, principalmente quando de substituições diretas.*

Com respeito a *Absorção de Energia* a *Norma ANSI - IEEE - C-62.11 - 1988* assume a abordagem clássica, ou seja, restringe o problema a interação entre o resultado do *Ensaio de Descargas de Linhas* e a *Temperatura Limite de Estabilidade** sem, no entanto, manifestar nenhuma preocupação aparente com os *Limites de Energia Específica [kJ/kV]*** que, caso adequadamente utilizados, em conjunto com os resultados de *Estudos de*

Transitórios Eletromagnéticos, permitem especificar, normalmente com uma boa folga operacional, um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores.***

Notas -

* - *Segundo a Norma ANSI - IEEE - C-62.11 - 1988 o principal ensaio em termos de solicitação térmica, principalmente, no caso de pára-raios a óxido metálico sem centelhadores para sistemas de alta tensão, ou seja, até 242 kV é o "Ensaio de Ciclo de Operação".*

** - *Apesar de historicamente serem os fabricantes norte-americanos os primeiros a reconhecer a dependência existente entre a energia absorvida por um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores e a corrente de descarga a Norma ANSI - IEEE - C-62.11 - 1988 estranhamente, é omissa com respeito a este aspecto.*

*** - *A solicitação térmica imposta por uma operação de manobra ao um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores pode ser superior a "Classe de Descarga de Linha" relativa a sua "Tensão Nominal de Ciclo de Operação - U_n" e, deste modo, torna-se imprescindível conhecer a real capacidade de absorção de energia do pára-raios para que se possa elaborar a especificação correta do mesmo, fato em parte, negligenciado na Norma ANSI - IEEE - C-62.11 - 1988.*

III.4 - NORMAS INTERNACIONAIS - COMENTÁRIOS

No airplane takes off from mother earth and point its nose skyward until has been conceived by the dreamer, until drawings have been made by the designer, and until it has been fabricated by the expert builder and tested by scientifc specialists
(H.H. Arnold)

As *Normas Internacionais* sobre pára-raios a resistores não lineares para sistemas de potência, são baseadas em uma série de trabalhos levados realizados pelos vários *COMITÊS TÉCNICOS NACIONAIS* que constituem a *IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION*.

As *NORMAS IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION* representam o consenso internacional sobre um determinado tema. Logo, neste âmbito, se constituem em recomendações que, em tese, dentro do possível, devem ser acatadas pelos *COMITÊS TÉCNICOS NACIONAIS** que, deste modo, passam a promover unificação internacionais.

* *Nota -*

→ *Dentro deste contexto, de modo a dirimir possíveis dúvidas, quaisquer divergências entre as recomendações que constam nas NORMAS IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION e nas NORMAS NACIONAIS devem ser claramente indicadas nas mesmas.*

A estrutura normativa adotada pela *IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION* da qual o *COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE* é parte integrante* assume a subdivisão dos requisitos relativos a um produto ou equipamento a ser normalizado em basicamente 2 seções, em tese, independentes, conforme a seguir:

I) - Norma de Especificação e Ensaio:- É a norma responsável pela

definição de toda a terminologia associada a um produto ou equipamento, pela definição dos requisistos em termos de ensaios, divididos, no caso em *"Ensaios de Projeto, Tipo ou Protótipo"*, *"Ensaios de Recebimento"* e *"Ensaios de Rotina"* pela normalização das solicitações e dos limites das respostas frente as mesmas, bem como, pelos procedimentos a serem adotados durante a execução dos ensaios normalizados; e

II) - *Guia de Aplicação:*- É a norma que define quais devem ser os procedimentos e recomendações a serem adotados ao se instalar um produto ou equipamento dotado dos requisitos normalizados e ensaiado segundo uma determinada *Norma de Especificação e Ensaio.*

* *Nota -*

→ *Apesar do carácter internacional das recomendações das NORMAS IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION que, por sua vez, são adotadas pelo COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE, esta deveria ser a divisão adotada por este último fato que no entanto, sem demérito algum, não se verifica.*

Dentro do atual contexto tecnológico as *NORMAS INTERNACIONAIS* sobre *"PÁRA-RAIOS A RESISTORES NÃO LINEARES PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA"* elaboradas pelo *IEC TECHNICAL COMMITTEE N° 37 - SURGE ARRESTERS* assumem a seguinte itemização: [19-20]

I] - *IEC 99.1:*- *Non-Linear Resistor Type Gapped Surge Arresters for Alternating-Current Systems.*

II] - *IEC 99.4:*- *Metal Oxide Surge Arresters Without Gaps for Alternating-Current Systems.*

A *Norma IEC 99.1 - 1991* é a mais recente e, provavelmente última,

revisão da *NORMA INTERNACIONAL* sobre pára-raios convencionais a resistores não lineares para circuitos em corrente alternada.*,**,***

Notas -

* - *A revisão publicada em 1991 é a terceira, a segunda data de 1970, portanto, virtualmente desatualizada.*

** - *As principais modificações introduzidas pela terceira revisão da Norma IEC 99.1 são relativas aos "Métodos de Medição da Tensão Residual", aos "Ensaios de Ciclo de Operação e de Alívio de Sobrepressão", bem como, aos valores de "Tensão Disruptiva e Residual" padronizados.*

*** - *As modificações introduzidas na terceira revisão da Norma IEC 99.1, sob o enfoque dos pára-raios convencionais a carboneto de silício, não são suficientes para a equivalentar a Norma ANSI - IEEE - C-62.1 - 1984.*

Um dos pontos falhos da *Norma IEC 99.1 1991* é a ausência de uma redefinição nos critérios de avaliação de desempenho dos pára-raios,*,** fato, plenamente contemplado pela *Norma ANSI - IEEE - C-62.1 - 1984* e revisões anteriores.

Notas -

* - *Apesar da existência de uma série de evidências práticas que apontam no sentido de mudanças os métodos de avaliação de desempenho dos pára-raios previstos na Norma IEC 99.1 - 1991, são basicamente os mesmos previamente definidos em sua segunda revisão, fato que, virtualmente a compromete pois, deste modo as modificações introduzidas não são adequadamente aferidas.*

** - *Um dos pontos que pode ter induzido o IEC TECHNICAL COMMITTEE Nº 37 - SURGE ARRESTERS a adotar a posição de rever parcialmente a*

Norma IEC 99.1 é a perspectiva de descontinuidade de produção dos pára-raios a carboneto de sílicio fato válido sob a ótica dos grandes fabricantes de pára-raios classe estação para sistemas de transmissão em alta e extra-alta tensão mas, razoavelmente improvável sob a ótica, de boa parte, dos fabricantes de pára-raios classe distribuição para sistemas em média tensão que, constituem a maior parte do negócio tanto com respeito ao número de peças quanto ao volume financeiro.

Em termos tecnológicos a *Norma IEC - 99.4 - 1992* é restrita aos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, amplamente utilizados nos sistemas de transmissão em alta e extra-alta tensão.*,**

Notas -

** - A Norma IEC - 99.4 - 1992 não estabelece requisitos para avaliar o desempenho de pára-raios a óxido metálico com centelhadores série ou paralelos comumente comercializados no mercado norte-americano.*

*** - Considerando que a Norma IEC - 99.1 - 1991 não se encontra, pelo menos, explicitamente, restrita somente a pára-raios a resistores a carboneto de silício, é possível, em tese, utilizá-la para a determinação do desempenho dos pára-raios a óxido metálico com centelhadores.*

Em termos de requisitos a *Norma IEC - 99.4 - 1992* possui uma seqüência extremamente lógica, na qual os pára-raios classe distribuição e estação para sistemas em média tensão são solicitados por impulsos de alta corrente e curta duração e os classe estação para sistemas em alta e extra-alta tensão por impulsos de corrente de descarga de manobra.*

** Nota -*

→ Apesar de se constituirem em requisitos lógicos as solicitações

térmicas impostas pela Norma IEC - 99.4 - 1992 são inferiores as impostas pela Norma ANSI - IEEE C-62.11 - 1988, fato que possibilita com que os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores classe distribuição para sistemas em média tensão projetados segundo esta última apresentem uma suportabilidade frente a sobretensões em freqüência industrial superior aos projetados segundo a primeira. O ponto em questão é que este melhor desempenho é resultante de uma solicitação irreal, não contemplada pela Norma IEC - 99.4 - 1992, por outro lado, os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores para sistemas de distribuição em média tensão necessitam possuir uma elevada suportabilidade frente a sobretensões em freqüência industrial, eventos pouco estudados e, portanto, sob os quais pouco se conhece.

Com respeito a *Absorção de Energia* a *Norma IEC - 99.4 - 1992* também assume a abordagem clássica; ou seja, restringe o problema a interação entre o resultado do *Ensaio de Descargas de Linhas* e a *Temperatura Limite de Estabilidade.*[*] No entanto, adequadamente, define uma série de *Limites para a Energia Específica [kJ/kV].*[**,***]

Notas -

* - *Segundo a Norma IEC - 99.4 - 1992 o principal ensaio em termos de solicitação térmica é o "Ensaio de Ciclo de Operação Combinado".*

** - *A exemplo que se verifica na Norma ANSI - IEEE - C-62.11 - 1988 também a Norma IEC - 99.4 - 1992 é omissa com respeito a dependência existente entre a energia absorvida por um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores e a corrente de descarga.*

*** - *A definição de "Limites para a Energia Específica [kJ/kV]" é uma das condições essenciais para, em conjunto com "Estudos de Transitório Eletromagnético", especificar e aplicar de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, principalmente em sistemas de alta e extra-alta tensão. Com respeito a este aspecto*

a Norma IEC - 99.1 - 1992 ainda deveria complementar esta informação com a definição de "Limites para a Corrente de Descarga [Id]", permitindo, deste modo, a correta aplicação dos critérios clássicos para a especificação de um pára-raios frente a absorção de energia

Em tese, as informações relativas aos *Limites Padrão de Absorção de Energia e de Corrente Descarga*, bem como, a *Dependência entre Energia Absorvida e Corrente de Descarga* são informações peculiares a cada projeto de pára-raios, inclusive se constituem em dados de projeto e, portanto, fazem parte do acervo dos fabricantes. No entanto, a ausência de métodos padronizados que permitam verificar estes dados atuam no sentido de dificultar a otimização do uso dos pára-raios a óxido metálico.

É razoavelmente óbvio admitir que a função de detalhar com precisão o desempenho de um pára-raios, ou mesmo qualquer outro equipamento, não é objetivo das *Normas Técnicas*, porém é fato que, a evolução tecnológica implica na necessidade de otimizar a utilização dos equipamentos e ferramentais, deste modo, é esperado que sejam fornecidados dados que permitam que esta tarefa venha a ser corretamente desempenhada.

IV - COMENTÁRIOS FINAIS

Never in the field of human conflict was so much owed by so many to so few

(Winston L.S. Churchill) .

IV.1 - GENERALIDADES

I should like to be able to offer the hope that the shadow over the world might swiftly pass. I cannot. The facts compel stating, with candor, that darker periods may lie ahead
(Franklin D. Roosevelt)

Esta *Dissertação* tem como principal objetivo oferecer uma visão, simplificada, porém global de todos os aspectos envolvidos com o projeto e construção de pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão, de modo que, sua correta aplicação e utilização seja plenamente exequível a qualquer técnico dotado de conhecimentos básicos sobre *"Coordenação de Isolamento"*.

A organização geral e o encaminhamento dos assuntos seguiram a concepção adotada em um conjunto de trabalhos[1→3] e estudos específicos sobre *Pára-raios para Sistemas de Potência em Corrente Alternada*, bem como, a existente em parte do documento *"Application Guide for Surge Arresters on Distribution Systems"*,[4] publicado pela *"Ontario Hydro"*.

Os comentários, distribuídos ao longo do texto, na grande maioria dos casos, na forma de notas apresentam como suporte experimental uma seqüência de trabalhos realizados por fabricantes e laboratórios ao

longo dos últimos *10 anos* no Brasil.

A partir de uma abordagem conceitual e histórica foram apresentados, sem excessivo nível de detalhamento, uma série de tópicos sobre as várias tecnologias existentes para a construção de pára-raios principalmente para sistemas de distribuição em média tensão e, dentro deste contexto, virtualmente, nenhuma ênfase foi dada com respeito a capacidade de absorção de energia, aos sistemas de equalização de potencial, ou seja, ao controle da qualidade da disrupção dos pára-raios a carboneto de silício, a não ser o estritamente necessário para o correto entendimento dos mecanismos de funcionamento destes equipamentos.

Por se constituirem no *"Presente Estado da Arte"*, bem como, pelo fato de não possuirem, na maioria das vezes, centelhadores de espécie alguma, os pára-raios a óxido metálico, receberam um tratamento mais elaborado, principalmente no que tange aos fenômenos relacionados com sua *Capacidade de Absorção de Energia,* [5→12] pois a sua incorreta compreensão pode resultar em erros de aplicação.

De modo complementar, bem como, para facilitar a análise dos mecanismos térmicos que controlam o desempenho dos pára-raios a óxido metálico foi apresentado um modelo térmico adequado para estudos em regime permanente e transitório que pode, oportunamente, e em conjunto com uma série de modelos matemáticos para o comportamento dos pára-raios ser implementado, fato que, devido ao enfoque adotado nesta *Dissertação* não foi realizado.

Com respeito aos modelos matemáticos utilizados para representar o comportamento não linear dos pára-raios a carboneto de silício e a óxido metálico foram desenvolvidos e apresentados desde modelos extremamente simples como o *"Modelo Alpha"* ou mesmo o *"Modelo Linearizado"* até mais os mais sofisticados a exemplo do *"Modelo Logarítmico"*. Em alguns casos, a exemplo dos pára-raios a carboneto de silício foi introduzido um enfoque estatístico para o problema e, principalmente, dentro deste contexto, é conveniente ressaltar que, a princípio, não existe uma preferência ou mesmo recomendação pela aplicação de qualquer destes

modelos pois, a utilização de um modelo matemático deve contemplar, primordialmente, o grau de detalhamento imposto pelos estudos a serem realizados, bem como, a disponibilidade de dados dotados de um mínimo grau de confiabilidade.

Os principais ensaios utilizados no projeto da parte interna ativa dos pára-raios para sistemas de potência foram, em parte, abordados sem no entanto se ater a detalhes e, de modo complementar, a série de resultados comumente obtidos com o auxílio dos mesmos, ou seja, os níveis de proteção, apresentados e quando necessário discutidos.

Em última instância foram apresentados e discutidos os modos de falha de um pára-raios para sistemas de distribuição em média tensão, os possíveis problemas impostos por estes modos de falha, bem como, as medidas recomendadas para reduzir seus efeitos inclusive, a nível de projeto.

Objetivando permitir uma melhor visão e compreensão do atual estado da arte no final desta *Dissertação* é apresentada uma série de comentários qualitativos e considerações sobre o atual estágio da normalização nacional e internacional sobre pára-raios para sistemas de potência.

De modo até sistemático uma série de comentários sobre pára-raios estação, principalmente, a carboneto de silício foram evitados, bem como, não foram apresentados modelos matemáticos a nível de detalhamento do comportamento individual dos resistores não lineares, que seguramente resultariam em uma extensiva série de considerações que fogem ao escopo adotado.

Em termos globais é esperado que esta *Dissertação* atue no sentido de permitir um melhor entendimento do comportamento dos pára-raios para sistemas de potência, bem como, que deste entendimento uma série de erros de aplicação oriundos basicamente de problemas conceituais sejam evitados.

IV.2 - TENDÊNCIAS NO ESTADO DA ARTE

The Space, The Final Frontier
(Preâmbulo Star Trek)

A proteção contra surtos de tensão, contexto no qual se inserem os pára-raios para sistemas de potência vem apresentando uma série de reviravoltas e curiosamente no presente são detectados uma série de indícios de retorno, sem sombra de dúvida saudável, ao passado.

Deste modo, os *Centelhadores Haste - Haste* vão sendo sistematicamente re-introduzidos na proteção de subestações em sistemas em alta tensão com reflexos óbvios em sistemas em média tensão. A par disto, no presente, fabricantes de renome internacional[13] discutem a re-introdução de centelhadores série nos pára-raios a óxido metálico para sistemas em média tensão.

O *"Avanço"* ou mesmo, como querem alguns, *"Atrazos"* Tecnológicos são determinados pelos problemas técnicos e econômicos enfrentados, principalmente, nos sistemas em alta e extra - alta tensão onde o volume de investimento é elevado a quantidade, em tese, reduzida e os resultados de procedimentos inadequados acabam por resultar em danos e prejuízos incompatíveis com o grau de investimento e satisfação pública.

O grande enfoque atual no Brasil, por problemas de cunho econômico, se concentra basicamente na re-introdução de centelhadores, efetivada com pleno exito em sistemas a nível de *145 kV* e em estudos para sistemas a nível de *242 kV*, para os quais podem ser re-utilizados *Centelhadores Tubulares.*

Com respeito aos pára-raios a óxido metálico os principais esforços se encontram direcionados no sentido de melhor detalhar o comportamento de seus resistores frente a surtos não padronizados, bem como, frente a absorção de energia. O mercado para pára-raios a óxido metálico para

sistemas em média tensão se encontra virtualmente divido entre os fabricantes nacionais e, neste caso, é possível que dentro de alguns anos ocorra um conflito entre os defensores da teoria de pára-raios sem centelhadores, no presente representado por um projeto norte - americano desenvolvido pela *Joslyn Manufacturing Company,* e os defensores da teoria de pára-raios com centelhadores, projeto nitidamente nacional, que deve ser melhor elaborado em termos de processo de obtenção dos resistores a óxido metálico, bem como, do pára-raios, principalmente, em termos de centelhadores e projeto de vedação.

A nível internacional os principais esforços se concentram na obtenção de dados que detalhem o comportamento dos pára-raios a óxido metálico frente a contaminação ambiental, bem como, com respeito a capacidade de absorção de energia de seus resistores.

Após a solução satisfatória destes problemas é esperado que os esforços devam ser canalizados para a determinação de parâmetros mais confiáveis sobre a degradação dos pára-raios a óxido metálico frente a surtos de corrente de amplitude e formas não padronizados, bem como, com respeito aos parâmetros relacionados com os surtos atmosféricos.

De modo complementar um conjunto de estudos sobre aplicação não convencional de pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, alguns dos quais já se encontram em estágios avançados, devem ser realizados principalmentos os relacionados com a substituição de resistores de pré - inserção em disjuntores de alta e extra - alta tensão, com o controle de sobretensões sustentadas de grande amplitude, bem como, com a melhoria do desempenho frente a surtos atmosféricos de linhas em regiões com solos de elevada resistividade e com o desempenho frente a surtos dos transformadores de potência.

As técnicas de produção em massa de resistores a óxido metálico devem ser aprimoradas e, devem ser investigadas a possibilidade de utilização de novos materiais sendo possível, neste caso, a obtenção de resistores dotados de uma melhor capacidade de absorção de energia, que em parte depende do grau de homogeneidade interno dos mesmos, bem como, dotados

de um perfil de envelhecimento menos pronunciado.

Um conjunto de novos ensaios objetivando, principalmente, determinar o desempenho dos pára-raios a óxido metálico frente a surtos rápidos deve ser desenvolvido para que, deste modo, uma série de dúvidas frente ao seu comportamento frente a estas solicitações seja corretamente definido.

Com respeito aos sistemas de distribuição, a importância dos resultados dos trabalhos a serem desenvolvidos ao longo dos próximos anos, se encontra diretamente relacionada com o impacto econômico que algumas das melhorias por eles introduzidas podem resultar, principalmente, em termos de custos de produção. É esperado que qualquer impacto no sentido de aumentar os custos de produção venha a atuar no sentido de perpetuar a aplicação de pára-raios a carboneto de silício, ou mesmo, propiciar uma maior dissiminação do uso de centelhadores. No entanto, qualquer previsão é arriscada pois o comportamento dos custos relacionados com manutenção e energia não suprida podem comprometer o resultado desta análise.

Ainda neste sentido, um interessante conflito deve surgir com respeito a normalização internacional pois os esforços impostos pela Norma *ANSI*, com respeito específico aos pára-raios a óxido metálico para sistemas de distribuição em média tensão são superiores aos impostos pela Norma *IEC*, fato que, pelo menos, em tese pode resultar em uma série de falhas devido a erros de especificação.

De um modo geral, estas são as principais tendências que podem ser delineadas no presente momento porém, somente o tempo é senhor da razão.

V - BIBLIOGRAFIA

Ac ne forte roges, quo me duce, quo lare tuter,
Nullius addictus iurare in verba magistri

(Virgílio, 70-19 AC)

V.1 - BIBLIOGRAFIA GERAL E HISTÓRICA

A sense of the whole is a sign of a sound mind, and there is nothing more to be desired at the present moment
(Platão, 427-347 AC)

I- CAPÍTULO:- INTRODUÇÃO E COMENTÁRIOS INICIAIS

[1]- ALLEN,E.J. et alli; "General Electric Lightning Arrester Seminar"; SCHENECTADY - 1974.

[2]- ALLEN,E.J. et alli; "General Electric Distribution Surge Arrester Seminar"; PITTISFIELD - 1979.

[3]- HUTCHINSON Jr.,R.W.; "Long Distance Electric Power Transmission"; D.VAN NOSTRAND COMPANY; SECOND EDITION; NEW YORK - 1908.

[4]- STEINMETZ,C.P.; "The Oxide Film Lightning Arrester"; AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS; AIEE PAS 37 - pp 871→880 - 1918.

[5]- STAFFORD,H.D.; "Troubles of Electrical Equipment";

McGRAW-HILL BOOK COMPANY; FIRST EDITION, NEW YORK - 1937.

[6]- FIELD,C.; "The Oxide Film Lightning Arrester";
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AIEE - PAS 37 - pp 881→896 - 1918.

[7]- ATHERTON,A.L.; "Developments in Autovalve Lightning Arresters";
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AIEE - PAS 42 - pp 179→186 - 1923.

[8]- LOUGEE,N.A.;"Pellet Type of Oxide Film Lightning Arrester";
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AIEE - PAS 42 - pp 905→909 - 1923.

[9]- EVANS,R.D.; "Transmission and Distribution Reference Book";
WESTINGHOUSE ELECTRICAL CORPORATION;
FORTH EDITION; EAST PITTSBURGH - 1964.

[10]- McEACHRON,K.B. et alli.; "THYRITE - A New Material for Lightning Arresters";
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AIEE - PAS 49 - pp 410→420 - 1930.

[11]- DOBLE ENGINEERING COMPANY; "Arrester Field-Test Guide";
DOBLE CLIENT COMMITTEE ON ARRESTERS, CAPACITOR AND INSULATORS;
FOURTH EDITION; WATERTOWN - 1975

[12]- MARTINEZ,M.L.B. et alli; "Medição de Corrente de Fuga uma Alternativa para a Manutenção de Pára-raios";
X°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
CURITIBA - 1989.

[13]- KUBOTA,M. et alli; "O Controle do Estado de Pára-raios por Corrente de Fuga";
V°CONGRESSO IBERO AMERICANO DE MANUTENÇÃO;
LISBOA - 1989.

[14]- SAKSHAUG,E.C. et alli; "A New Concept in Station Arrester Design";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 96 - pp. 647→656 -1977.

[15]- IMATAKI,M. et alli; "Advanced Metal Oxide Surge Arrester for Gas Insulated Switchgear";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 103 - pp. 2990→2998 - 1984.

[16]- MIZUNO,M. et alli; "Thermal Stability and Life of The Gapless Surge Arrester";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
PAS 100 - pp. 2664→2671 - 1981.

[17]- MARTINEZ,M.L.B.; "Pára-raios a ZnO - Tipos Construtivos";
I°SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS NO SETOR ELÉTRICO;
CURITIBA - 1987.

[18]- MARTINEZ,M.L.B.; "Pára-raios a Óxido de Zinco - ZnO para Sistemas de Distribuição - Características Construtivas - Comentários Gerais";
I°SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BELO HORIZONTE - 1990.

[19]- WESTROM,A.C.,LAW,S.W.;"Increasing the Reliability of Metal Oxide Arrester";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PWRD 5 - pp. 1823→1829- 1990.

[20]- COGO,J.R., MARTINEZ,M.L.B.M.; "Aspectos Tecnológicos da Construção de Pára-raios para Sistemas de Potência em Média Tensão";
VI°SEMINÁRIO DE PESQUISA DA EFEI;
ITAJUBÁ - 1992.

[21]- CAPARAT,C.; "Protection Des Réseaux et Instalations Contre les

Surtensions";
H.DUNOD ET E.PINAT, ÉDITEURS; PREMIER EDITION; PARIS - 1914.

[22]- STEINMETZ,C.P.; "General Lectures on Electrical Engineering";
McGRAW-HILL BOOK COMPANY; FIFTH EDITION; NEW YORK - 1918.

[23]- DE NERVILLE,F.-G, HARDY, A.; "Protection Contre les Effets Nuisibles de L'Eletricité;
LIBRARIE J.B.BAILLIÉRE ET FILS; PREMIER EDITION; PARIS - 1928.

[24]- RUSHMORE,D.B., DUBOIS,D.; "Protection Against Lightning, and The Multi-Gap Lightning Arrester";
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AIEE - PAS 26 - pp 425→459 - 1907.

[25]- CREIGHTON,E.E.; "New Principles in the Desing of Lightning Arresters;
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AIEE - PAS 26 - pp 461→486 - 1907.

[26]- ELETROBRÁS - MEMÓRIA DA ELETRICIDADE; "Panorama do Setor de Energia Elética no Brasil";
CENTRO DA MEMÓRIA DA ELETRICIDADE NO BRASIL;
ELETROBRÁS; RIO DE JANEIRO - 1988.

[27]- FLUGUM,R.D.; "Operation of Lightning Arresters on Abnormal Power Frequency Voltage";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 89 - pp. 1444→1454 - 1970.

[28]- SPARROW,L.J, DOONEE,R.M; "UK Experience in the Investigation of the Pollution Performance of Metal Oxide Surge Arresters";
INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE E. SYSTEMS;
CIGRÉ 33.07 - SESSION 1988.

[29]- BARGIGIA,A. et alli.; "Behaviour of Metal Oxide Surge Arrrester

under Different Environmental Conditions";
INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE E. SYSTEMS;
CIGRÉ 33.14 - SESSION 1988.

[30]- KOCH,R.E. et alli.; "Design of Zinc Oxide Transmission Line Arresters for Application on 138 kV Towers";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 104 - pp. 2675→2680 - 1985.

[31]- RIBEIRO,J.R., McCALLUM,M.E.; "An Application of Metal Oxide Surge Aresters in the Elimination of Need for Closing Resistors in EHV Breakers";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PWRD 4 - pp. 282→291 - 1989.

[32]- O.BARROS,F.D. et alli.; "Estudo de Viabilidade Técnica da Supressão de Pára-raios de Entrada de Linha nas Subestações em 138 kV da CESP";
DIRETORIA DE ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES - DEPT. PROJETOS
COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1979.

[33]- O.BARROS,F.D. et alli.; "A Utilização de Centelhadores na Subestação de São Carlos II - 138 kV em Substituição aos Pára-raios de Entrada de Linha";
DIRETORIA DE ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES - DEPT. PROJETOS
COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1979.

[34]- KASTRUP FILHO,O.; "Centelhador em Vãos de Linha: Sua Utilização como Dispositivo de Proteção Contra Sobretensões nas Subestações de 138 kV do Sistema de Furnas";
IX°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BELO HORIZONTE - 1987.

[35]- SCHAEFER,J.C, RAVAGLIO,M.A; "Ensaios Dielétricos em Centelhadores para a Proteção de Subestações de 138 kV";
C. TÉCNICA 026 - 90; COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA - 1990.

[36]- SCHAEFER,J.C et alli.; "Utilização de Centelhadores em Subestações: Aspectos Construtivos, Ensaios Dielétricos e de Arco de Potência";
XI°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
RIO DE JANEIRO - 1991.

[37]- FUJIWARA,Y. et alli.; "Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arresters"
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 101 - pp. 978→985 - 1982.

[38]- VERDOLIN,R.T., et alli.; "Determinação da Capacidade de Absorção de Energia e Corrente em Resistores Não Lineares de ZnO - Uma Proposta de Metologia de Cálculo - CIGRÉ Brasil GT 33-06";
XI°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
RIO DE JANEIRO - 1991.

[39]- McMILLEN,C.J. et alli.; "The Development of an Oil-Imersed Surge Arrester for Distribution Transformers";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 104 - pp. 2482→2491 - 1985.

[40]- MUKAE,K et alli.; "Zinc Oxide - Praseodymium Oxide Elements for Surge Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PWRD 3 - pp. 591→598 - 1988.

II- CAPÍTULO:- EQUIPAMENTOS PARA PROTEÇÃO CONTRA SURTOS DE TENSÃO

[1]- IEEE W.GROUP - ON CHARACTERISTICS OF PROTECTIVE GAPS; "Sparkover Characteristics of High Voltage Protetective Gaps";

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 92 - pp. 196→205 - 1973.

[2]- ANSI C68.1 - TABLE III; "Measurement of Test Voltage in Dielectric Tests";
AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE;
ANSI C68.1 - 1942.

[3]- LISCHYNA,L.K.; "Lightning Protection of 230 kV Stations by Pipe-Gaps";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 87 - pp. 145→154 - 1968.

[4]- WAGNER,C.F., HILEMANN,A.R.; "Predischarge Current Characteristics of Paralel Electrods Gaps";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 83 - pp. 1236→1242 - 1964.

[5]- EVANS,R.D.; "Transmission and Distribution Reference Book";
WESTINGHOUSE ELECTRICAL CORPORATION;
FORTH EDITION; EAST PITTSBURGH - 1964.

[6]- LAT,M.V. et alli.; "Application Guide for Surge Aresters on Distribution Systems";
ONTARIO HYDRO RESEARCH DIVISION;
FIRST EDITION; TORONTO - 1988.

[7]- O.BARROS,F.D. et alli.; "Estudo de Viabilidade Técnica da Supressão de Pára-raios de Entrada de Linha nas Subestações em 138 kV da CESP";
DIRETORIA DE ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES - DEPT. PROJETOS
COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1979.

[8]- O.BARROS,F.D. et alli.; "A Utilização de Centelhadores na Subestação de São Carlos II - 138 kV em Substituição aos Pára-raios de Entrada de Linha";

DIRETORIA DE ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES - DEPT. PROJETOS
COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1979.

[9]- SCHAEFER,J.C, RAVAGLIO,M.A; "Ensaios Dielétricos em Centelhadores para a Proteção de Subestações de 138 kV";
C. TÉCNICA 026 - 90; COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA
COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA - 1990.

[10]- KASTRUP FILHO,O.; "Centelhador em Vãos de Linha:- Sua Utilização como Dispositivo de Proteção Contra Sobretensões nas Subestações de 138 kV do Sistema de Furnas";
IX°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BELO HORIZONTE - 1987.

[11]- ELETRONORTE-MAIN; "Sistema Amapá - Estudo dde Coordenação de Isolamento para a UHE Coaracy Nunes e SE da Central";
DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO;
ELETRONORTE - MAIN ENGENHARIA - 1990.

[12]- FOLEY,J.M. et alli.; "Lightning Arresters Silicon-Carbide Valve Blocks V-A Characteristics";
ELECTRICAL PRODUCTS DIVISION;
3M COMPANY; SAINT PAUL - 1978.

[13]- BOLEN,N.E.; "A Mathematical Study of the Thermal Behaviour of Silicon-Carbide Valve Blocks";
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AIEE - PAS 80 - pp 109→115 - 1961.

[14]- SAKSHAUG,E.C.; "Influence of Rate of Rise on Distribution Arrester Protective Characteristics";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 98 - pp. 519→527 - 1979.

[15]-BARGIGIA,A. et alli.; "The response of Metal Oxide Resistors for Surge Arresters to Step Front Current Impulses";

FIFTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON H.V. ENGINEERING;
BRAUNSCHWEIG - 1987.

[16]- ANSI C62.2; "Standard Guide for Application of Valve Type Lighning Arresters for Alternating Current Systems";
AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE;
ANSI C62.2 - 1969.

[17]- VEERARAGHAVAN,A. et alli.; "Determination of Surge Diverter Voltage/Current Characteristics";
INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
IEE - PROCEEDING 122 - pp. 373→376 - 1975.

[18]- THE OHIO BRASS COMPANY; "How Does a Distribution Class Surge Arrester Work";
THE OHIO BRASS COMPANY;
FIRST EDITION; MANSFIELD - 1975.

[19]- MARTINEZ,M.L.B; "Pára-raios a Carboneto de Silício para Sistemas de Potência"; (Apostila Curso Sobretensões)
FUPAI - FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO A INDUSTRIA;
1ª EDIÇÃO; ITAJUBÁ - 1984.

[20]- ZIELINSK,J.J, RADZIWILL,J.; "Volt-Time Curves of Valve-Type Lightning Arresters and the Insulation Treat by Switching Surges";
INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE E. SYSTEMS;
CIGRÉ 33.06 - SESSION 1970.

[21]- KALB,J.W., YOST,A.G.; "New Currente Limting Gap Extends Valve-Type Lightning Arrester Performance";
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AEEE - PAS 78, Part III-A - pp. 462→467 - 1959.

[22]- SAKSHAUG,E.C.; "Current Limiting Gap Arresters - Some Fundamental Considerations";

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 90 - pp. 1563→1573 - 1971.

[23]- CARROL,D.P., et alli.; "A Dynamic Surge Arrester Model for Use in Power System Transient Studies";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 91 - pp. 1057→1067 - 1972.

[24]- MARTINEZ,M.L.B; "Critérios para Especificação de Pára-raios a Carboneto de Silício"; (Apostila Curso C. Isolamento)
FUPAI - FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO A INDUSTRIA;
1ª EDIÇÃO; ITAJUBÁ - 1986.

[25]- FLUGUM,R.D.; "Operation of Lightning Arresters on Abnormal Power Frequency Voltage";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 89 - pp. 1444→1454 - 1970.

[26]- McGRAW EDISON COMPANY; "Distribution System Protection Manual";
THE McGRAW EDISON COMPANY;

[27]- ANSI C62.1; "IEEE Standard for Surge Arresters for Alternating Current Power Systems";
AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE;
ANSI C62.1 - 1984.

[28]- IEC 99.1; "Non Linear Resistor-Type Gapped Surge Arresters for A.C. Systems";
INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION;
IEC 99.1 - 1991.

[29]- MARTINEZ,M.L.B.; "Ensaios de Tensão Disruptiva sob Impulso Atmosférico em Pára-raios para Sistemas de Distribuição - A Aplicação de Métodos Estatistícos, Comentários e Resultados";
I°SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BELO HORIZONTE - 1990.

[30]- MARTINEZ,M.L.B.,OLIVEIRA,A.; "Ensaios de Tensão Disruptiva sob Impulso Atmosférico e Tensão Residual em Pára-raios para Sistemas de Potência";
XI°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
RIO DE JANEIRO - 1991.

[31]- STANDARD 4; "Standard Techniques for High Voltage Testing";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE Std. 4 - 1978.

[32]- NBR 5309; "Pára-raios de Resistor Não Linear a Carboneto de Silício para Circuitos de Potência de Corrente Alternada";
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS;
NBR 5309 - 1989.

[33]- LAT,M.V.,KORTSCHINSKI,J.; "Distribution Arrester Research";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 101 - pp. 3496→3505 - 1981.

[34]- CSA C233; "Non-Linear Resistor Type Lightning Arrester for Alternating Current Systems";
CANADIAN STANDARD ASSOCIATION
CSA C233 - 1971.

[35]- OZAKI,K.; "Operating Duty of Lightning Arrester Against Switching Surges";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 85 - pp. 831→837 - 1965.

[36]- TAYLOR Jr.,E.R,MERRY,S.M.; "Switching Surge Duty on Modern Arrester";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - SUMMER MEETING, 70 TP 617 PWR - 1970.

[37]- SARBACK,E.; "Switching Surge Operating Duty of Lightning

Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 87 - pp. 1521→1531 - 1968.

[38]- YOST,A.G., et alli.; "Transmission Line Discharge Testing for Station and Intermediate Lightning Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 84 - pp. 79→87 - 1965.

[39]- HOWARD,S.B, et alli.; "Long-Duration Surge Testing of Lightning Arresters";
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AEEE - PAS 70, Part II - pp. 1487→1491 - 1950.

[40]- CENTRAL ELECTRICITY RESEARCH LABORATORY; "The Effects of Pollution on Single Unit Surge Diverters - Experimental Results";
CENTRAL ELECTRICITY RESEARCH LABORATORY;
JOB VB 380 - 1977.

[41]- LAT,M.V.; "Contamination Performance of 21 kV Distribution Class Lightning Arresters";
ONTARIO HYDRO RESEARCH DIVISION;
REPORT 77-421-H.

[42]- NASSER,E.; "The Sparking of Lightning Arresters Due to Conductive Contaminants";
JOURNAL OF THE FRANKLIN INSTITUTE;
JFI 294, 1972.

[43]- NASSER,E.; "The Behaviour of Lightning Arresters under the Influence of Contamination";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
PAPER 31 CP - pp. 66-117 - 1965.

[44]- EATON,W.H.,SAKSHAUG,E.C.; "Contamination Testingof Lightning Arrester - I";

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
PAPER 31 CP - pp. 65-72 - 1964.

[45]- VEUNA,M.V., et alli.; "Sparkover and Insulation Performance of HV Lightning Arresters Under Pollution Conditions Including Live-Washing";
INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE E. SYSTEMS;
CIGRÉ 33.07 - SESSION 1976.

[46]- IEEE TUTORIAL COURSE; "Surge Protection in Power Systems";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
COURSE TEXT 79 EH 0144-6 PWR; COPYRIGHT - 1978.

[47]- PEREIRA,P.S., MARTINEZ,M.L.B.;"Modelagem de Curvas de Magnetização em Sistemas Elétricos";
II°-SEMINÁRIO DE PESQUISA DA EFEI;
ITAJUBÁ - 1982.

[48]- PEREIRA,P.S., MARTINEZ,M.L.B.; "Simulação do Comportamento Transitório de TC's";
VII°-S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BRASÍLIA - 1984.

[49]- MARTINEZ,M.L.B. et alli; "Medição de Corrente de Fuga uma Alternativa para a Manutenção de Pára-raios";
X°-S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
CURITIBA - 1989.

[50]- KUBOTA,M. et alli; "O Controle do Estado de Pára-raios por Corrente de Fuga";
V°-CONGRESSO IBERO AMERICANO DE MANUTENÇÃO;
LISBOA - 1989.

[51]- LAT,M.V.; "Causes of Lightning Arresters Failures";
ONTARIO HYDRO RESEARCH DIVISION;
REPORT 77-519-H.

[52]- GAIBROIS,G.L.; "Small Block Distribution Arresters Win with Field Performance";
TRANSMISSION AND DISTRIBUTION - SEPTEMBER 1980.

[53]- LAT,M.V.; "Failures of Type-GP6 6 kV Intermediate Class Surge Arresters in Uniform 70 Distribution Stations"
ONTARIO HYDRO RESEARCH DIVISION;
REPORT 79-535-H.

[54]- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE; "Study of Lightning Current Through Distribution Arresters";
ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE;
FINAL REPORT EPRI EL - 1140 - 1979.

[55]- SAKSHAUG,E.C. et alli; "A New Concept in Station Arrester Design";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 96 - pp. 647→656 -1977.

[56]- MIZUNO,M. et alli; "Thermal Stability and Life of The Gapless Surge Arrester";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
PAS 100 - pp. 2664→2671 - 1981.

[57]- RAGALLER,K., et alli.; "Surges in High-Voltage Networks";
BBC - BROWN BOVERI COMPANY LIMITED;
PLENUN PRESS; FIRST EDITION; NEW YORK - 1980

[58]- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE; "Development of a New Type of Nonlinear Resistance Valve Block for Surge Arresters";
ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE;
FINAL REPORT EPRI EL - 11647- 1980.

[59]- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE; "Gappless Surge Arresters for Power Systems Applications - Volume I, II and III";
ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE;

FINAL REPORT EPRI EL - 3166 - 1983.

[60]- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE; "Metal Oxide Surge Arresters for Gas-Insulated Systems - Phases I and II";
ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE;
FINAL REPORT EPRI EL.- 2876 - 1983.

[61]- KOBAYSAKY,M., et alli.; "Development of Zinc-Oxide Non-Linear Resistors and Their Applications to Gapless Surge Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 97 - pp. 1149→1159 - 1978.

[62]- SWEETANA,A., et alli.; "Design, Development and Testing of 1200 kV and 500 kV Gapless Surge Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 101 - pp. 2319→2327 - 1982.

[63]- BRONIKOWSKI,R.J., DUPONT,J.P.; "Development and Testing of MOVE Arrester Elements";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 101 - pp. 1638→1642 - 1982.

[64]- MARTINEZ,M.L.B.; "Pára-raios a Óxido Metálico para Sistemas de Potência"; (Apostila Curso Sobretensões)
FUPAI - FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO A INDUSTRIA;
1ª EDIÇÃO; ITAJUBÁ - 1984.

[65]- LAT,M.V.; "A Method for Performance Prediction of Metal Oxide Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 104 - pp. 2665→2673 - 1985.

[66]- COMITE BRASILEIRO DE ELETRICIDADE; "Pára-raios de Resistor Não Linear para Sistemas de Potência"; (Apostila)
COMITE BRASILEIRO DE ELETRICIDADE;
COBEI - 1985

[67]- FUJIWARA,Y., et alli.; "Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 101 - pp. 978→9873 - 1982.

[68]- VICAUD,A.; "AC Voltage Ageing of Zinc-Oxide Ceramics";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PWRD 1 - pp. 49→58 - 1986.

[69]- TOMINAGA,S., et alli.; "Stability and Long Term Degardation of Metal Oxide Surge Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - SUMMER MEETING - F79,637-07 - 1979.

[70]- McMILLEN,C.J. et alli.; "The Development of an Oil-Imersed Surge Arrester for Distribution Transformers";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 104 - pp. 2482→2491 - 1985.

[71]- KIRKBY,P.; "The Long Term Stability of Valve Elements Used in Metal Oxide Arresters";
ONTARIO HYDRO RESEARCH DIVISION;
REPORT CEA - 199 T 425.

[72]- IEC - 99.4; "Metal Oxide Surge Arresters Without Gaps for A.C. Systems";
INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION;
IEC - 99.4 - 1992.

[73]- ABNT CE 37.7; "Pára-raios de Resistor Não Linear a Óxido Metálico sem Centelhadores para Circuitos de Potência de Corrente Alternada";
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS;
ABNT - COBEI - 1989.

[74]- ANSI C62.11; "IEEE Standard for Metal Oxide Surge Arresters for Alternating Current Power Circuits";
AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE;
ANSI C62.1 - 1986.

[75]- LAT,M.V.; "Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 102 - pp. 2194→2202 - 1983.

[76]- LAU,M., et alli.; "Surge Discharge Capability and Thermal Stability of Metal Oxide Surge Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 103 - pp. 282→289 - 1984.

[77]- NISHIWAKI,S., et alli.; "Study of Thermal Runnaway-Equivalent Prorated Model of a ZnO Surge Arrester";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 103 - pp. 413→421 - 1984.

[78]- DRUMMOND M., et alli.; "Solicitações de Corrente e Energia em Pára-raios de Zno Decorrentes de Sobretensões Internas no Sistema - Compatibilização de Resultados de Estudos com Ensaios do Equipamento";
III° ENCONTRO REGIONAL LATINO AMERICANO DA CIGRÉ;
FOZ DO IGUAÇÚ - 1989.

[79]- MARTINEZ, M.; "Absorção de Energia por Pára-raios de ZnO, Comentários";
X°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
CURITIBA - 1989.

[80]- NEUGEBAUER,W.; "Application of Arresters Near Shunt Capacitor Banks";
APPLICATION ENGINEERS CONFERENCE - TRANSMISSION ROUNDTABLE;
SCHENECTADY - 1983.

[81]- EDA,K.; "Destruction Mechanism of ZnO Varistors Due to High Current";
AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS;
JOURNAL OF APPLIED PHYSICS - pp. 2948→2955 - 1984.

[82]- MARTINEZ,M.L.B.,VERDOLIN,R.T.; "Lightning Arrester Transmission Line Discharge Test Generators Behaviour";
V° INTERNATIONAL SEMINAR ON HIGH VOLTAGE TECHNIQUES;
BRAUNSCHWEIG - 1987.

[83]- MARTINEZ,M.L.B., et alli.; "Ensaios para Avaliar a Capacidade de Descarga de Linhas de Transmissão em Pára-raios de Resistor Não Linear para Sistemas de Potência";
IX°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BELO HORIZONTE - 1987.

[84]- GENERAL ELECTRIC COMPANY; "ALUGARD II Station Arresters Design Test Data";
GENERAL ELECTRIC COMPANY
FIRST EDITION, PITTSFIELD - 1982.

[85]- MIZUKOSHI,A., et alli.; "Influence of Uniformity on Energy Absorption Capabilities of Zinc Oxide Elements as Applied in Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 102 - pp. 1384→1390 - 1983.

[86]- DANG,C., et alli.; "The Response of Metal Oxide Surge Arresters to Steep Fronted Current Impulses";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PWRD 1 - pp. 157→165 - 1986.

[87]- ZANDER,W.; "Influence of Material Heterogenity on the Ageing of ZnO Arrester Material";
V° INTERNATIONAL SEMINAR ON HIGH VOLTAGE TECHNIQUES;
BRAUNSCHWEIG - 1987.

[88]- VERDOLIN,R.T., et alli; "Metodologia de Ensaio para Investigação da Capacidade de Absorção de Energia em Pára-raios de ZnO"; IV° ENCONTRO REGIONAL LATINO AMERICANO DA CIGRÉ; PUERTO IGUAZÚ - 1991.

[89]- VERDOLIN,R.T., et alli.; "Determinação da Capacidade de Absorção de Energia e Corrente de Impulso em Resistores Não Lineares de ZnO, Uma Proposta de Metodologia de Cálculo - CIGRÉ BRASIL"; XI°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA; RIO DE JANEIRO - 1991.

[90]- ESMERALDO,P.C., et alli.; "Energy Absorption and Impulse Current Capability of Metal Oxide Arresters - A Proposed Methodology of Evaluation"; INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE E. SYSTEMS; CIGRÉ 33.13 - SESSION 1992.

[91]- SAKSHAUG,E.C., et alli.; "Contamination and Hot Wash Performance at Zinc Oxide Station Arresters"; INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS; IEEE - PAS 101 - pp. 1095→1102 - 1982.

[92]- LENK,D.W.; "An Examination of the Pollution Performance of Gapped and Gapless Metal Oxide Station Class Surge Arresters"; INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS; IEEE - PAS 103 - pp. 337→344 - 1984.

[93]- CSA C308; "Principles and Practice of Insulation Coordination"; CANADIAN STANDARD ASSOCIATION CSA C308 - 1985.

[94]- SPARROW,L.J, DOONEE,R.M; "UK Experience in the Investigation of the Pollution Performance of Metal Oxide Surge Arresters"; INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE E. SYSTEMS; CIGRÉ 33.07 - SESSION 1988.

[95]- BARGIGIA,A. et alli.; "Behaviour of Metal Oxide Surge Arrrester under Different Environmental Conditions";
INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE E. SYSTEMS;
CIGRÉ 33.14 - SESSION 1988.

[96]- THE OHIO BRASS COMPANY; "Application Guide for Dynavar Metal-Oxide Surge Arresters";
THE OHIO BRASS COMPANY;
FIRST EDITION; MANSFIELD - 1982.

[97]- McGRAW-EDISON COMPANY; "Correlation of Arrester Follow-Current, Isolator Operation and Pressure Relief Characteristics";
THE McGRAW-EDISON COMPANY.

[98]- LAT,M.; "Fusing Surge Arresters";
INTERNATIONAL CONFERENCE OF DISTRIBUTION FUSING;
CEA - ICDF - pp. 108→126 - 1981

[99]- KOCH,R.E.; "Development of Non-Fragmenting Distribution Arresters";
ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE;
FINAL REPORT EPRI EL - 3502 - 1984.

[100]- KERSAW,S.S.,NEIBUHR,W.D.; "Distribution Class Surge Arresters with Metal Oxide Varistors and Pressure Relief Capability";
INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
IEE - CONFERENCE 236 - pp. 102→106 - 1984.

[101]- OZAWA,J., et alli.; "Pressure Relief Design and Performance of Metal Oxide Surge Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PWRD 1 - pp. 151→157 - 1986.

[102]- IEEE WORKING GROUP OF SURGE PROTECTIVE DEVICE COMMITTEE; "A Review of Fault Withstand Considerations for Valve-Type Surge

Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 98 - pp. 2267→2275 - 1979.

[103]- LAT,M.V.; "Mode of Failure Tests on 21 kV Distribution Class Surge Arresters";
ONTARIO HYDRO RESEARCH DIVISION;
REPORT CEA - 78 - 398 - H.

[104]- LAT,M.V.; "Performance of Explosion Proof Distribution Class Surge Arresters";
ONTARIO HYDRO RESEARCH DIVISION;
REPORT CEA - 80 - 34 - H.

[105]- KOCH,R.E., SONGSTER,F.R.; "Development of Non-Fragmenting Distribution Surge Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 103 - pp. 3342→3353 - 1984.

[106]- LAT,M.V.; "Mode of Failure Performance of GENERAL ELECTRIC TRANQUEL Non Fragmenting, Distribution Arresters";
ONTARIO HYDRO RESEARCH DIVISION;
REPORT CEA - 85 - 30 - K.

[107]- VERDOLIN,R.T., OLIVEIRA,M.J.; "Critério de Diagnóstico de Pára-raios Defeituosos";
I°SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
BELO HORIZONTE - 1990.

[108]- KOCH,R.E., et alli.; "Design of Zinc Oxide Transmission Line Arresters for Application on 138 kV Towers";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 104 - pp. 2675→2680 - 1985.

[109]- MARTINEZ,M.; "Discussão Sobre a Utilização de Pára-raios a Óxido Metálico com Centelhadores";

I° PAINEL NACIONAL SOBRE PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO;
RIO DE JANEIRO - 1986.

[110]- MARTINEZ,M.L.B.; "Pára-raios a Óxide de Zinco - ZnO para Sistemas de Distribuição - Características Construtivas - Comentários Gerais";
I°SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BELO HORIZONTE - 1990.

III- CAPÍTULO:- NORMALIZAÇÃO NACIONAL E INTERNACIONAL

[1]- THOMAS,H.P.; "Practical Testing of Commercial Lightning Arresters";
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AIEE - PAS 26 - pp. 1097→1137 - 1907.

[2]- HOWARD,S.B., et alli.; "Long-Duration Surge Testing of Lightning Arresters";
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AIEE - PAS 70 - pp. 1487→1492 - 1951.

[3]- KALB,J.W, YOST,A.G.; "New Current-Limiting Gap Extends Valve-Type Lightning-Arrester Performance";
AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS;
AIEE - PAS 78 - pp. 462→467 - 1959.

[4]- YOST,A.G., et alli.; "Transmission Line Discharge Testing for Station and Intermediate Lighting-Arresteres";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 84 - pp. 79→87 - 1965.

[5]- SAKSHAUG,E.C. et alli; "A New Concept in Station Arrester Design";
INSTITUE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;

IEEE - PAS 96 pp. 647→656 - 1977.

[6]- MARTINEZ,M.L.B.; "Pára-raios a Óxido de Zinco - ZnO para Sistemas de Distribuição - Características Construtivas - Comentários Gerais";
I°-SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BELO HORIZONTE - 1990.

[7]- COGO,J.R., MARTINEZ,M.L.B.M.; "Aspectos Tecnológicos da Construção de Pára-raios para Sistemas de Potência em Média Tensão";
VI°-SEMINÁRIO DE PESQUISA DA EFEI;
ITAJUBÁ - 1992.

[8]- ABNT CE - 37; "PROJETO 3:37.1-001:- Pára-raios a Resistor não Linear a Carboneto de Silício SiC para Circuitos de Potência de Corrente Alternada - Especificação";
ABNT - COBEI - 1989.

[9]- ABNT CE - 37; "PROJETO 3:37.1-002:- Pára-raios a Resistor não Linear a Carboneto de Silício SiC para Circuitos de Potência de Corrente Alternada - Método de Ensaio";
ABNT - COBEI - 1989.

[10]- ABNT CE - 37; "PROJETO 3:37.5-001:- Pára-raios a Resistor não Linear a Carboneto de Silício SiC para Sistemas de Distribuição, Padronização";
ABNT - COBEI - 1989.

[11]- ABNT CE - 37; "PROJETO 3:37.7-001:- Pára-raios a Resistor não Linear a Óxido Metálico sem Centelhadores para Circuitos de Potência de Corrente Alternada - Especificação";
ABNT - COBEI - 1991.

[12]- ABNT CE - 37; "PROJETO 3:37.7-002:- Pára-raios a Resistor não Linear a a Óxido Metálico sem Centelhadores para Circuitos de Potência de Corrente Alternada - Método de Ensaio";

ABNT - COBEI - 1992.

[13]- ABNT CE - 37; "PROJETO 3:37.11-001:- Pára-raios a Resistor não Linear a Óxido Metálico com Centelhadores para Circuitos de Potência de Corrente Alternada - Especificação";
ABNT - COBEI - 1992.

[14]- ABNT CE - 37; "PROJETO 3:37.11-002:- Pára-raios a Resistor não Linear a a Óxido Metálico com Centelhadores para Circuitos de Potência de Corrente Alternada, Método de Ensaio";
ABNT - COBEI - 1992.

[15]- MARTINEZ,M.L.B.,VERDOLIN,R.T.; "Lightning Arrester Transmission Line Discharge Test Generators Behaviour";
V° INTERNATIONAL SEMINAR ON HIGH VOLTAGE TECHNIQUES;
BRAUNSCHWEIG - 1987.

[16]- VICAUD,A; "Draft Specification for ZnO Ceramics Used in Lightning Arresters for M.V., H.V. and E.H.V. Networks";
RELATÓRIO - HM 15/1165 - 1987;
EDF - ELECTRICITÉ DE FRANCE.

[17]- ANSI C62.1; "IEEE Standard for Surge Arresters for Alternating Current Power Systems";
AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE;
ANSI C62.1 - 1984.

[18]- ANSI C62.11; "IEEE Standard for Metal Oxide Surge Arresters for Alternating Current Power Circuits";
AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE;
ANSI C62.11 - 1986.

[19]- IEC 99.1; "Non Linear Resistor-Type Gapped Surge Arresters for A.C. Systems";
INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION;
IEC 99.1 - 1991.

[20]- IEC - 99.4; "Metal Oxide Surge Arresters Without Gaps for A.C. Systems";
INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION;
IEC - 99.4 - 1992.

IV- CAPÍTULO:- COMENTÁRIOS FINAIS

[1]- MARTINEZ,M.L.B; "Pára-raios a Carboneto de Silício para Sistemas de Potência"; (Apostila Curso Sobretensões)
FUPAI - FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO À INDUSTRIA;
1ª EDIÇÃO; ITAJUBÁ - 1984.

[2]- MARTINEZ,M.L.B; "Critérios para Especificação de Pára-raios a Carboneto de Silício"; (Apostila Curso C. Isolamento)
FUPAI - FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO A INDUSTRIA;
1ª EDIÇÃO; ITAJUBÁ - 1986.

[3]- MARTINEZ,M.L.B.; "Pára-raios a Óxido Metálico para Sistemas de Potência"; (Apostila Curso Sobretensões)
FUPAI - FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO A INDUSTRIA;
1ª EDIÇÃO; ITAJUBÁ - 1984.

[4]- LAT,M.V. et alli.; "Application Guide for Surge Aresters on Distribution Systems";
ONTARIO HYDRO RESEARCH DIVISION;
FIRST EDITION; TORONTO - 1988.

[5]- DRUMMOND M., et alli.; "Solicitações de Corrente e Energia em Pára-raios de Zno Decorrentes de Sobretensões Internas no Sistema - Compatibilização de Resultados de Estudos com Ensaios do Equipamento";
III° ENCONTRO REGIONAL LATINO AMERICANO DA CIGRÉ;
FOZ DO IGUAÇÚ - 1989.

[6]- MARTINEZ, M.; "Absorção de Energia por Pára-raios de ZnO, Comentários";
X°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
CURITIBA - 1989.

[7]- EDA,K.; "Destruction Mechanism of ZnO Varistors Due to High Current";
AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS;
JOURNAL OF APPLIED PHYSICS - pp. 2948→2955 - 1984.

[8]- MARTINEZ,M.L.B.,VERDOLIN,R.T.; "Lightning Arrester Transmission Line Discharge Test Generators Behaviour";
V° INTERNATIONAL SEMINAR ON HIGH VOLTAGE TECHNIQUES;
BRAUNSCHWEIG - 1987.

[9]- MARTINEZ,M.L.B., et alli.; "Ensaios para Avaliar a Capacidade de Descarga de Linhas de Transmissão em Pára-raios de Resistor Não Linear para Sistemas de Potência";
IX°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BELO HORIZONTE - 1987.

[10]- MIZUKOSHI,A., et alli.; "Influence of Uniformity on Energy Absorption Capabilities of Zinc Oxide Elements as Applied in Arresters";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PAS 102 - pp. 1384→1390 - 1983.

[11]- ZANDER,W.; "Influence of Material Heterogenity on the Ageing of ZnO Arrester Material";
V° INTERNATIONAL SEMINAR ON HIGH VOLTAGE TECHNIQUES;
BRAUNSCHWEIG - 1987.
RIO DE JANEIRO - 1991.

[12]- ESMERALDO,P.C., et alli.; "Energy Absorption and Impulse Current Capability of Metal Oxide Arresters - A Proposed Methodology of Evaluation";

INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE E. SYSTEMS;
CIGRÉ 33.13 - SESSION 1992.

[13]- WESTROM,A.C.,LAW,S.W.;"Increasing the Reliability of Metal Oxide Arrester";
INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS;
IEEE - PWRD 5 - pp. 1823→1829- 1990.

I- ANEXO:- CARACTERÍSTICA DISRUPTIVA DE UM CENTELHADOR HASTE-HASTE

[1]- LAT,M.V. et alli.; "Application Guide for Surge Aresters on Distribution Systems";
ONTARIO HYDRO RESEARCH DIVISION;
FIRST EDITION; TORONTO - 1988.

II- ANEXO:- REPRESENTAÇÃO DE PARES TENSÃO - CORRENTE

[1]- PEREIRA,P.S., MARTINEZ,M.L.B.;"Modelagem de Curvas de Magnetização em Sistemas Elétricos";
II°SEMINÁRIO DE PESQUISA DA EFEI;
ITAJUBÁ - 1982.

[2]- PEREIRA,P.S., MARTINEZ,M.L.B.; "Simulação do Comportamento Transitório de TC's";
VII°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BRASÍLIA - 1984.

III- ANEXO:- MODELO LOGARÍTMICO PARA PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

[1]- LAT,M.V. et alli.; "Application Guide for Surge Aresters on

Distribution Systems";
ONTARIO HYDRO RESEARCH DIVISION;
FIRST EDITION; TORONTO - 1988.

[2]- PEREIRA,P.S., MARTINEZ,M.L.B.;"Modelagem de Curvas de Magnetização em Sistemas Elétricos";
II°-SEMINÁRIO DE PESQUISA DA EFEI;
ITAJUBÁ - 1982.

TRABALHOS EM AUTORIA OU CO-AUTORIA CITADOS AO LONGO DO TEXTO

Apostilas →

[1]- MARTINEZ,M.L.B; "Pára-raios a Carboneto de Silício para Sistemas de Potência"; (Apostila Curso Sobretensões)
FUPAI - FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO A INDUSTRIA;
1ª EDIÇÃO; ITAJUBÁ - 1984.

[2]- MARTINEZ,M.L.B; "Critérios para Especificação de Pára-raios a Carboneto de Silício"; (Apostila Curso C. Isolamento)
FUPAI - FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO A INDUSTRIA;
1ª EDIÇÃO; ITAJUBÁ - 1986.

[3]- MARTINEZ,M.L.B.; "Pára-raios a Óxido Metálico para Sistemas de Potência"; (Apostila Curso Sobretensões)
FUPAI - FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO A INDUSTRIA;
1ª EDIÇÃO; ITAJUBÁ - 1984.

Artigos Seminários Nacionais →

[1]- PEREIRA,P.S., MARTINEZ,M.L.B.;"Modelagem de Curvas de Magnetização em Sistemas Elétricos";
II°-SEMINÁRIO DE PESQUISA DA EFEI;
ITAJUBÁ - 1982.

[2]- PEREIRA,P.S., MARTINEZ,M.L.B.; "Simulação do Comportamento Transitório de TC's";
VII°-S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BRASÍLIA - 1984.

[3]- MARTINEZ,M.; "Discussão Sobre a Utilização de Pára-raios a Óxido Metálico com Centelhadores";
I° PAINEL NACIONAL SOBRE PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO;

RIO DE JANEIRO - 1986.

[4]- MARTINEZ,M.L.B.; "Pára-raios a ZnO - Tipos Construtivos";
I°SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS NO SETOR ELÉTRICO;
CURITIBA - 1987.

[5]- MARTINEZ,M.L.B., et alli.; "Ensaios para Avaliar a Capacidade de Descarga de Linhas de Transmissão em Pára-raios de Resistor Não Linear para Sistemas de Potência";
IX°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BELO HORIZONTE - 1987.

[6]- MARTINEZ, M.; "Absorção de Energia por Pára-raios de ZnO, Comentários";
X°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
CURITIBA - 1989.

[7]- MARTINEZ,M.L.B. et alli; "Medição de Corrente de Fuga uma Alternativa para a Manutenção de Pára-raios";
X°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
CURITIBA - 1989.

[8]- MARTINEZ,M.L.B.; "Pára-raios a Óxide de Zinco - ZnO para Sistemas de Distribuição - Características Construtivas - Comentários Gerais";
I°SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BELO HORIZONTE - 1990.

[9]- MARTINEZ,M.L.B.; "Ensaios de Tensão Disruptiva sob Impulso Atmosférico em Pára-raios para Sistemas de Distribuição - A Aplicação de Métodos Estatisticos, Comentários e Resultados";
I°SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
BELO HORIZONTE - 1990.

[10]- MARTINEZ,M.L.B.,OLIVEIRA,A.; "Ensaios de Tensão Disruptiva sob Impulso Atmsoférico e Tensão Resldual em Pára-raios para

Sistemas de Potência";
XI°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
RIO DE JANEIRO - 1991.

[11]- VERDOLIN,R.T., et alli.; "Determinação da Capacidade de Absorção de Energia e Corrente em Resistores Não Lineares de ZnO - Uma Proposta de Metologia de Cálculo - CIGRÉ Brasil GT 33-06";
XI°S. NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
RIO DE JANEIRO - 1991.

[12]- COGO,J.R., MARTINEZ,M.L.B.M.; "Aspectos Tecnológicos da Construção de Pára-raios para Sistemas de Potência em Média Tensão";
VI°SEMINÁRIO DE PESQUISA DA EFEI;
ITAJUBÁ - 1992.

Artigos Seminários Internacionais →

[1]- MARTINEZ,M.L.B.,VERDOLIN,R.T.; "Lightning Arrester Transmission Line Discharge Test Generators Behaviour";
V° INTERNATIONAL SEMINAR ON HIGH VOLTAGE TECHNIQUES;
BRAUNSCHWEIG - 1987.

[2]- DRUMMOND M., et alli.; "Solicitações de Corrente e Energia em Pára-raios de Zno Decorrentes de Sobretensões Internas no Sistema - Compatibilização de Resultados de Estudos com Ensaios do Equipamento";
III° ENCONTRO REGIONAL LATINO AMERICANO DA CIGRÉ;
FOZ DO IGUAÇÚ - 1989.

[3]- KUBOTA,M. et alli; "O Controle do Estado de Pára-raios por Corrente de Fuga";
V°CONGRESSO IBERO AMERICANO DE MANUTENÇÃO;
LISBOA - 1989.

[4]- VERDOLIN,R.T., et alli; "Metodologia de Ensaio para Investigação

da Capacidade de Absorção de Energia em Pára-raios de ZnO";
IV° ENCONTRO REGIONAL LATINO AMERICANO DA CIGRÉ;
PUERTO IGUAZÚ - 1991.

[5]- ESMERALDO,P.C., et alli.; "Energy Absorption and Impulse Current Capability of Metal Oxide Arresters - A Proposed Methodology of Evaluation";
INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE E. SYSTEMS;
CIGRÉ 33.13 - SESSION 1992.

ANEXO - I

CARACTERÍSTICA DISRUPTIVA DE UM CENTELHADOR HASTE - HASTE

Research is the reconnaissance party of industry, roving the unknown territories ahead, indefinite yet not without purpose, seeing for the first time things that all the following world will see a few years hence

(S.M. Kintner)

Uma vez que a ruptura dielétrica dos gases é aleatória pois, se encontra relacionada com atrazos de tempo envolvendo a emissão e a colisão de elétrons, existe uma faixa de impulsos de tensão, em amplitude e forma, representada por uma *Distribuição Normal de Probabilidade*, dentro da qual este processo possui condições para se desenvolver.

O valor médio da *Distribuição Normal de Probabilidade* das tensões disruptivas é denominado *Tensão Disruptiva Crítica - CFO*. Com respeito aos impulsos atmosféricos o *Tempo até a Disrupção* sob *Tensão Disruptiva Crítica - CFO*, devido a forma do impulso padronizado, bem como, ao atrazo de tempo envolvido no desenvolvimento da ruptura dielétrica, se encontra entre *3 μs* e *20 μs*, ou seja, na cauda do impulso.

Deste modo, as características *"Tensão Disruptiva versus Tempo até a Disrupção"* e *"Tensão Disruptiva versus Espaçamento entre Eletrodos"* dos centelhadores haste - haste, utilizados em sistemas com tensão máxima operativa de até *145 kV*, para a proteção contra descargas atmosféricas, a exemplo de qualquer isolamento auto-regenerativo, são determinadas através da aplicação de uma série de impulsos padronizados de tensão, com amplitude progressivamente crescente, para os quais são anotados os

valores de *Tensão disruptiva* e *Tempo até a disrupção.**

* *Nota -*

→ *Caso a disrupção ocorra após a crista do impulso, ou seja, em sua cauda, pois existe um intervalo de tempo entre o início de sua formação e o seu estágio final, a tensão correspondente ao tempo de crista é usualmente considerada como a Tensão disruptiva, mesmo que a disrupção venha efetivamente ocorrer sob um valor de tensão inferior.*

As Figuras *I.1* a *I.4* mostram para centelhadores haste - haste de pequenas e grandes dimensões o valor da *Tensão Disruptiva Crítica - CFO*, para várias taxas de crescimento da tensão, com polaridade negativa e positiva sob *Temperatura de 25° Celsisus, 760 mmHg e 70 % de umidade relativa do ar.**

* *Nota -*

→ *A Tensão Disruptiva Crítica - CFO para impulsos com forma padronizada é definida pelas a curvas inferiores das Figuras I.1 a I.4.*

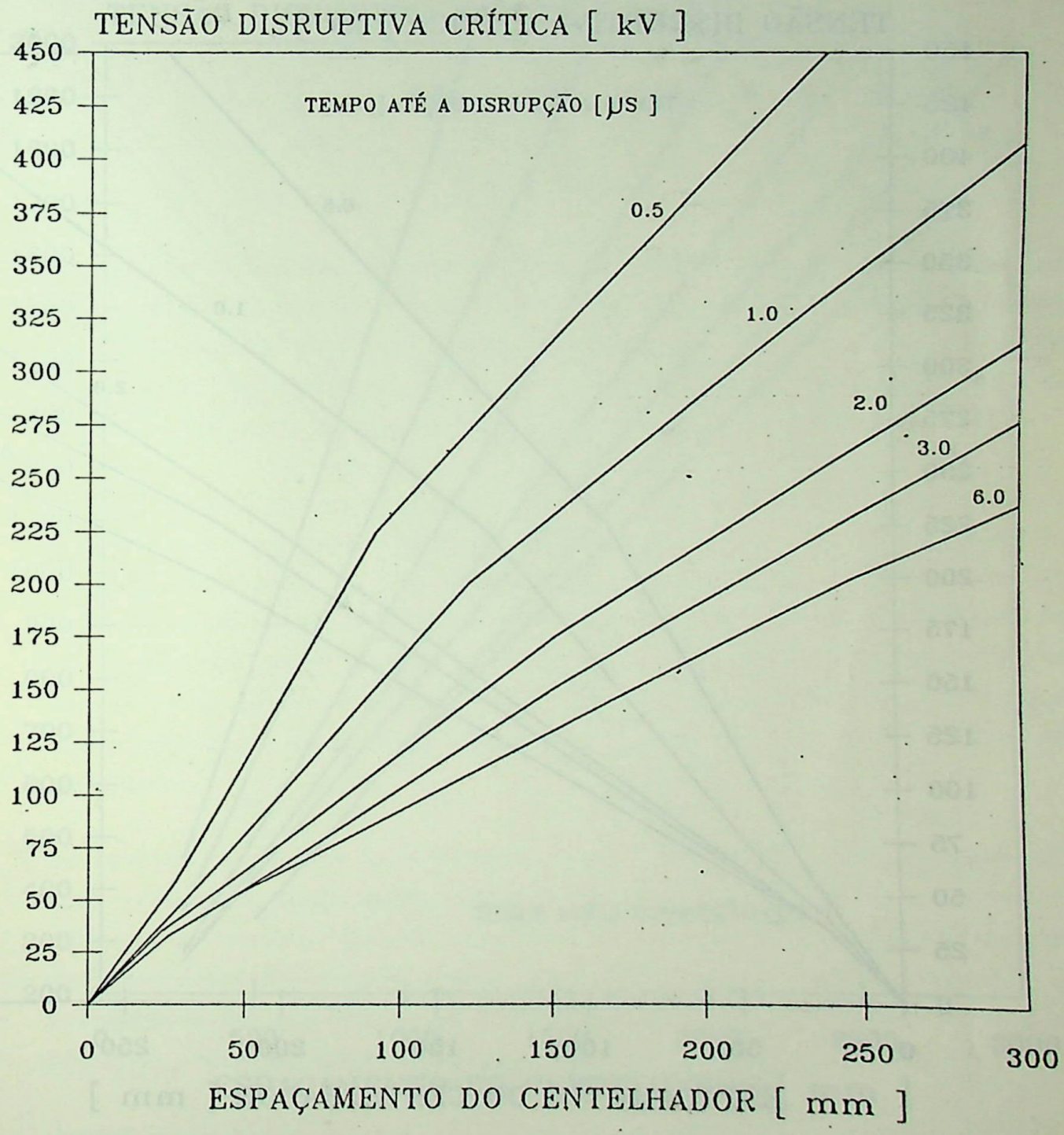


Figura I.1 - Característica Disruptiva de um Centelhador Haste - Haste de Pequenas Dimensões para Polaridade Negativa[1]

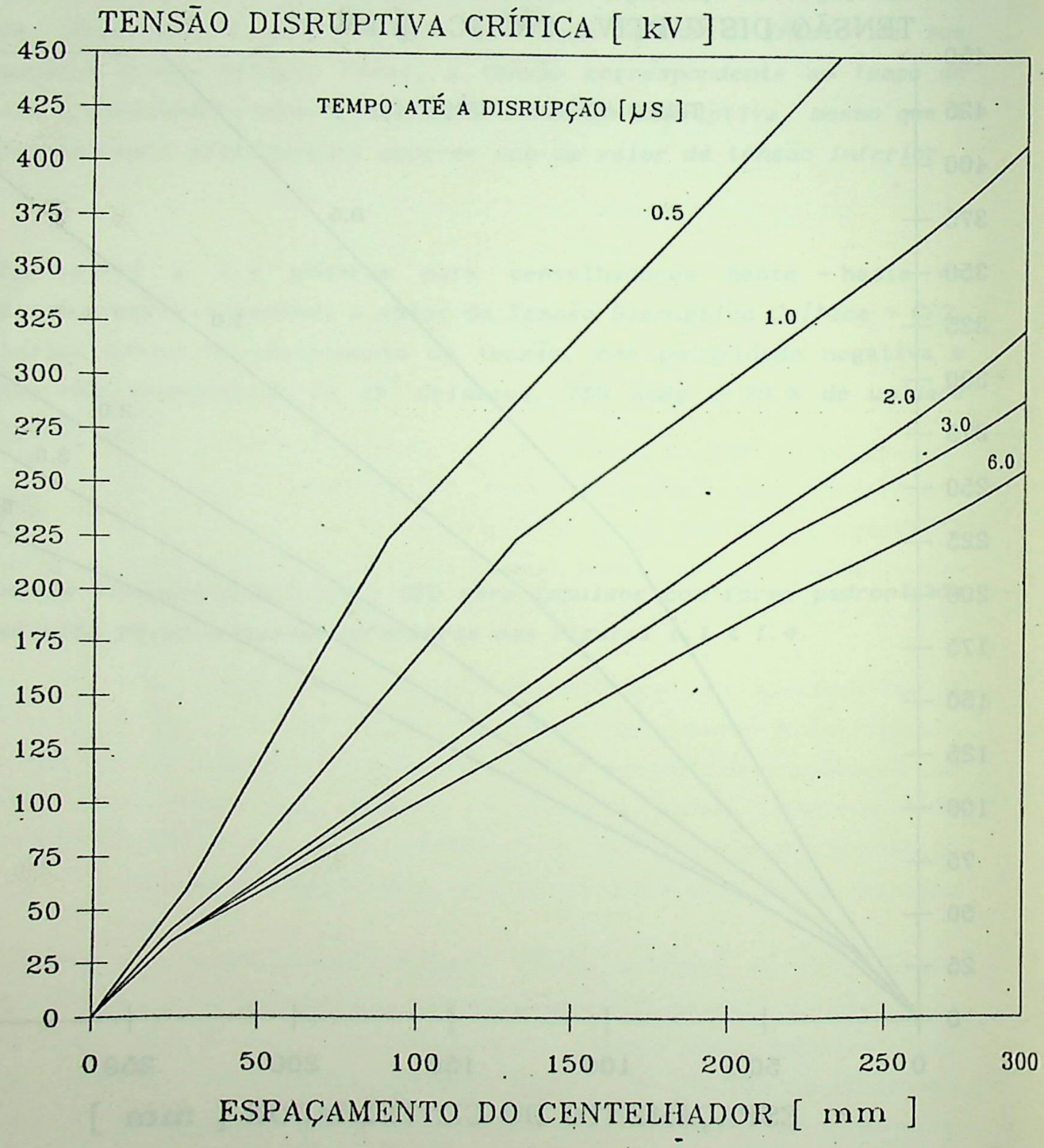


Figura I.2 - Característica Disruptiva de um Centelhador Haste - Haste de Pequenas Dimensões para Polaridade Positiva [1]

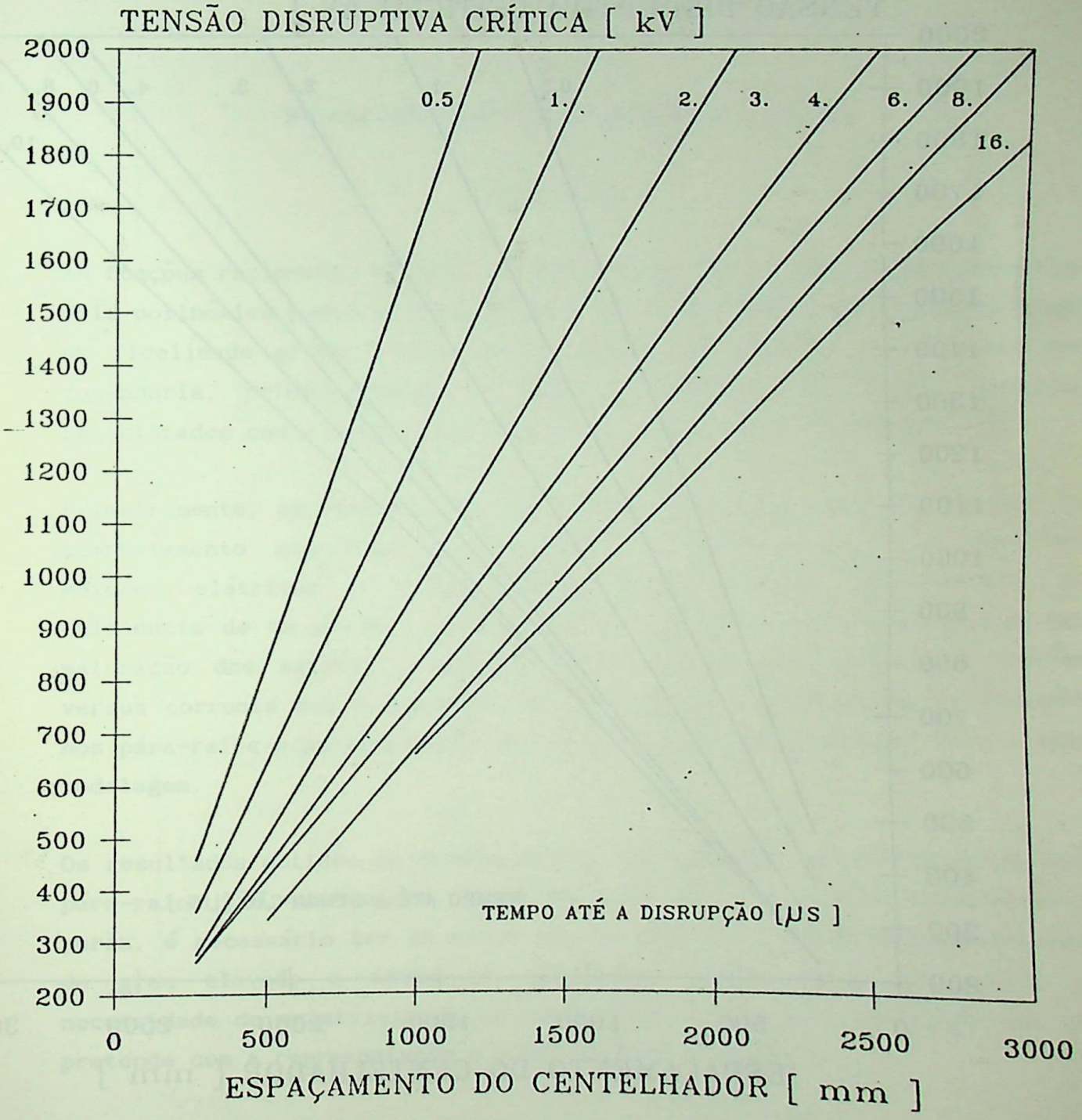


Figura I.3 - Característica Disruptiva de um Centelhador Haste - Haste de Grandes Dimensões para Polaridade Negativa[1]

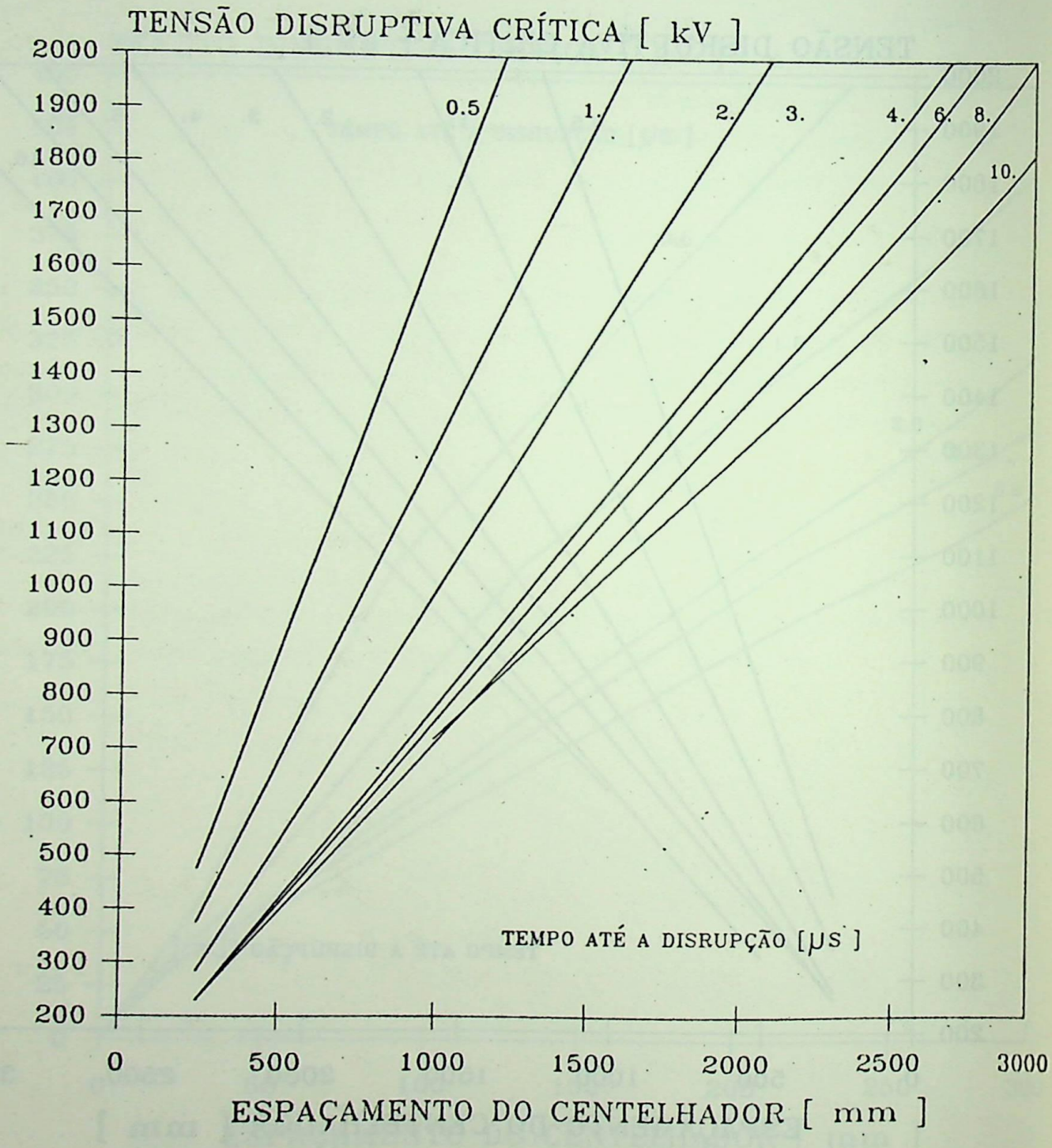


Figura I.4 - Característica Disruptiva de um Centelhador Haste - Haste de Grandes Dimensões para Polaridade Positiva[1]

ANEXO - II

REPRESENTAÇÃO DE PARES TENSÃO CORRENTE ATRAVÉS DE FUNÇÕES RACIONAIS

We are all ignorants about different things

(Mark Twain)

As funções racionais, ou seja, as funções definidas pelo quociente entre dois polinômios podem ser utilizadas para representar com excelente grau de fidelidade grande parte dos fenômenos não lineares existentes na engenharia, principalmente, os que se encontram de alguma maneira relacionados com a saturação de uma das grandezas de interesse. [1,2]

Primeiramente, as funções racionais foram aplicadas para representar o comportamento magnético dos materiais utilizados na construção de motores elétricos e transformadores. No entanto, considerando a existência de um elevado grau de semelhança entre a característica de saturação dos materiais ferromagnéticos e as características tensão versus corrente dos resistores não lineares e centelhadores utilizados nos pára-raios é possível estender este tipo de representação para a sua modelagem.

Os resultados obtidos na modelagem das características não lineares dos pára-raios são, obviamente, dependentes do grau da função aproximante, porém, é necessário ter em mente que no caso de representações dotadas de grau elevado o tempo de simulação cresce, fato que impõe a necessidade de existência de um compromisso entre os resultados que se pretende com a representação e a sua futura utilização.*

** Nota -*

→ É possível através de uma função racional representar, por exemplo, a

característica tensão versus corrente de um resistor não linear porém, nestes casos, é recomendado que seja utilizada uma função de grau reduzido pois, devido a existência de correntes elevadas podem ocorrer erros matemáticos durante a execução de seu processo de síntese. Uma conseqüência advinda deste fato é a baixa representatividade que esta função pode vir a oferecer, em tese, resultado do perfil dos dados utilizados para dar início ao processo e, nestes casos é necessário que se faça uso do bom senso que deve orientar qualquer solução de engenharia.

De modo a ilustrar a capacidade de representação das funções racionais sejam os exemplos a seguir:

Característica Tensão Residual - Corrente de Descarga *		
	Tensão [Volts]	Corrente [Ampéres]
1	1250	5
2	1600	10
3	3000	50
4	3675	100
5	5950	500
6	8250	1500
7	10000	3000
8	11600	5000
9	13750	10000
10	21000	65000

Tabela II.1 - Dados Tensão Residual Corrente de Descarga

* Nota -

→ Pára-raios ALUGARD - II - 6.0 kV

Característica Tensão de Arco - Corrente de Descarga *		
	Tensão [Volts]	Corrente [Ampéres]
1	2000	10
2	4000	20
3	6400	50
4	7600	100
5	8000	200
6	6200	500
7	4300	1000
8	2200	2000
9	1000	3000

Tabela II.2 - Dados Tensão de Arco Corrente de Descarga

* Nota -

→ Pára-raios ALUGARD - II - 6.0 kV

→ Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga:-

$$U_R(I) = \frac{445.9196 + 6.9958\ I + 0.4015x10^{-2}\ I^2 + 0.20638x10^{-7}\ I^3}{1 + 0.1916\ I + 0.11358x10^{-2}\ I^2 + 0.24271x10^{-6}\ I^3}\ I$$

→ Característica Tensão Centelhador versus Corrente de Descarga:-

$$U_{CENT}(I) = \frac{247.3539 + 0.86531x10^{-1}\ I - 0.36999x10^{-4}\ I^2}{1 + 0.17217x10^{-1}\ I + 0.52275x10^{-4}\ I^2}\ I$$

para:- $I > 4000$ [A] → $U_{CENT}(I) = 0.00$

```
C
C    PROGRAMA PARA APROXIMAÇÃO DE CURVA ATRAVÉS DE FUNÇÕES RACIONAIS
C
C                          F(x) = P(x)/Q(x)
C
C
C    O PROGRAMA EM QUESTÃO CALCULA A MELHOR APROXIMAÇÃO PARA UM CONJUNTO
C    DE PARES ORDENADOS "TENSÃO - CORRENTE" ATRAVÉS DE DE UMA FUNÇÃO
C    RACIONAL, OU SEJA, DE UM QUOCIENTE ENTRE DOIS POLINÔMIOS.
C
C    OS DADOS SÃO FORNECIDOS SOB FORMA DE PARES DE PONTOS
C    [CORRENTE,TENSÃO]
C
C    O PROGRAMA É INTERATIVO, OU SEJA, O USUÁRIO PODE TOMAR DECISÕES
C    SOBRE O ANDAMENTO DO MESMO EM FUNÇÃO DOS RESULTADOS E DE SUAS
C    NECESSIDADES.
C
C
C    O PROGRAMA ESTÁ DIMENSIONADO PARA UM NÚMERO DE PARES A APROXIMAR
C    (MÁXIMO DE 51 E, QUALQUER VALOR MENOR OU IGUAL A ZERO OU SUPERIOR A
C    51 INTERROMPERÁ O PROGRAMA) E EMITIRÁ A MENSAGEM:
C
C         ###ERRO NUMERO 1###.
C
C    LOGO APOS SEGUE A PERGUNTA QUAL ALTERNATIVA DESEJADA, CONFORME
C    ABAIXO ABAIXO:
C
C          1*** APROXIMAÇÃO POR FUNÇÃO RACIONAL
C          2*** STOP
C
C    UMA VEZ EXECUTADA A SUBROTINA DE APROXIMAÇÃO O PROGRAMA IMPRIME UM
C    VALOR DE ERRO PERCENTUAL MÁXIMO EM RELACAO AOS PONTOS DADOS E
C    PERGUNTA AO USUARIO SE DEVE OU NÃO PROSSEGUIR.
C
C    CASO NÃO FOR O DESEJADO O PROGRAMA RETORNA, ESPERANDO UMA ORDEM
C    SOBRE UMA NOVA TENTATIVA DE APROXIMAÇÃO OU PARA FINALIZAR CONFORME
```

```
C     VISTO ACIMA.
C
C     CASO A APROXIMAÇÃO FOR ACEITA, O PROGRAMA IMPRIME OS COEFICIENTES
C     DA MESMA EM FORMULÁRIO CONTÍNUO E AGUARDA ORDEM PARA PLOTAR AS
C     CURVAS DE TENSÃO - CORRENTE E RESISTÊNCIA - CORRENTE ASSOCIADAS.
C
C     PARA ISTO É NECESSÁRIO SE INTRODUZIR O VALOR FINAL DE CORRENTE E O
C     VALOR DO INCREMENTO.
C
C     O PROGRAMA CALCULA O NÚMERO DE PONTOS A SER PLOTADO E, CASO O MESMO
C     SEJA SUPERIOR A 501 ELE ESTE VALOR COMO DEFAULT.
C
C     É FACULTATIVO AO USUÁRIO MUDAR O VALOR FINAL POSITIVO DO EIXO DAS
C     TENSÕES OU DAS RESISTÊNCIAS CASO O MESMO ASSIM O DESEJAR.
C
C     O PROGRAMA TESTA AINDA SE A RESISTÊNCIA APRESENTA TRECHOS COM
C     VALORES NEGATIVOS, IMPRIMINDO MENSAGEN, CASO ISTO OCORRA.
C
C     LOGO APÓS O PROGRAMA PERGUNTA AO USUÁRIO SE O MESMO DESEJA MAIS
C     ALGUMA COISA, SENDO POSSÍVEL SE ESCOLHER AS SEGUINTES OPÇÕES:
C
C          1### LER NOVA CARACTERÍTICA A APROXIMAR
C          2### REALIZAR UMA NOVA APROXIMAÇÃO
C          3### PLOTAR NOVAS CURVAS
C          4### STOP
C
C     EXISTE AINDA UMA MENSAGEM DE ERRO COMPLEMENTAR.
C
C          ###ERRO NUMERO 2###
C             GRAU DA FUNCAO RACIONAL APROXIMANTE <=0 OU SUPERIOR A 10
C
C          ********** INÍCIO DO PROGRAMA PRINCIPAL **********
C
C          INTERFACE PARA COMANDO DISPLAY - LINGUAGEM C
C
      interface to integer*2 function system [c]
```

```
     +           (string[reference])
         character*1 string
         end
         interface to integer*2 function spawn
     +           [c,varying,alias:'spawnlp']
     +           (mode)
         integer*2 mode
         end
C
C        FINAL DAS INSTRUÇÕES DA INTERFACE DO COMANDO DISPLAY
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
         integer*2 system, spawn
C
C        DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DADOS DE PLACA
C
      CHARACTER*15 FABRIC,TIPO
      CHARACTER*10 VOLTNON
C
C        DIMENSINAMENTO DAS VARIÁVEIS
C
      DIMENSION CORR(51),TENSAO(51),CORR1(501),XSAIDA(501,1),
     *XRES(501,1),XCOF(21),XCOFR1(11),XCOFR2(11)
C
C        DEFINIÇÃO ÁREAS EM COMMON
C
      COMMON /PART1/CORR,TENSAO
      COMMON /PART2/FABRIC,TIPO,VOLTNON
         i = system('echo off' c)
         i = system('cls' c)
C
C        DEFINIÇÃO DO ARQUIVO RELATIVO AO TERMINAL DE VÍDEO
C
      OPEN(1,FILE='CON:')
      WRITE(1,1000)
 1000 FORMAT(4(/),8X,'PROGRAMA PARA APROXIMAR.CARACTERISTICA TENSAO '
```

```
     *,' - CORRENTE DE PARA-RAIOS',13(/),27X,'MANUEL L. B. MARTINEZ',
     *4(/))
      PAUSE
C
C          DEFINIÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS
C
      OPEN(3,FILE='LPT1:')
      OPEN(4,FILE='CRCV-I.PR',STATUS='NEW')
C
C          TESTE DA CONDIÇÃO DA IMPRESSORA
C
    5 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1001)
 1001 FORMAT(3(/),5X,'VERIFICACAO DAS CONDICOES DO SISTEMA',4(/),5X,'
     *A IMPRESSORA ESTAH HABILITADA ( 1/SIM; 0/,NAO ) ? ')
      READ(*,*)ISGIP
      IF(ISGIP.LE.0.OR.ISGIP.GT.1) GOTO 5
      WRITE(1,1002)
 1002 FORMAT(1(/),5X,'O PROGRAMA APRX ESTAH CARREGADO NO DRIVE - A ',
     *'( 1/SIM; 0/NAO ) ? ')
      READ(*,*)LDRV
      IF(LDRV.LE.0.OR.LDRV.GT.1) GOTO 5
      WRITE(1,1003)
 1003 FORMAT(1(/),5X,'O PROGRAMA ENERGRAPHICS ESTAH ALOCADO EM -','C'
     *':ENERGRAP ( 1/SIM; 0/NAO ) ? ')
      READ(*,*)IENER
      IF(IENER.LE.0.OR.IENER.GT.1) GOTO 5
   10 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1004)
 1004 FORMAT(3(/),5X,'----- DIRETORIO ARQUIVOS *.DAT -----',2(/))
          i = system('dir *.dat/w' c)
      WRITE(1,1005)
 1005 FORMAT(5(/),5X,'----- CARREGAR DADOS ARQUIVO - => ')
          i = system('newdata.exe' c)
```

```
C
C          LEITURA DO NUMERO DE PONTOS A APROXIMAR
C
      OPEN(2,FILE='DATV-I.$$$',STATUS='OLD')
      READ(2,2000)VOLTNON,FABRIC,TIPO
 2000 FORMAT(5(/),1X,A10,1X,A16,1X,A17)
      READ(2,2001)NPONTOS
 2001 FORMAT(5(/),7X,I2,2X,F12.0,4(/))
      IF(NPONTOS.LE.0.OR.NPONTOS.GT.51) CALL XERROR(1,0)
C
C          LEITURA DO CONJUNTO DE PONTOS A APROXIMAR
C
      READ(2,2002)(CORR(J),TENSAO(J),J=1,NPONTOS)
 2002 FORMAT(8F10.0)
      TENSIN=TENSAO(1)
      DO 15 I=1,NPONTOS
   15 TENSAO(I)=TENSAO(I)-TENSIN
   20 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1006)
 1006 FORMAT(3(/),5X,'INTRODUZIR OPCAO :',4(/),5X,'1 # APROXIMACAO ',
     *'POR FUNCAO RACIONAL',3(/),5X,'2 # STOP',6(/),5X,'OPCAO = ? ')
      READ(*,*) ISG
      GO TO (25,130),ISG
C
C          CHAMADA DA SUBROTINA RACIONAL
C
   25 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1007)
 1007 FORMAT(4(/),5X,'APROXIMACAO POR FUNCAO RACIONAL',4(/),5X,'INT',
     *'RODUZIR GRAU DA FUNCAO (MAX.=10) ? ')
      READ(*,*)IGRAU
          i = system('cls' c)
      IF(IGRAU.LE.0.OR.IGRAU.GT.10) CALL XERROR(2,0)
      CALL RACIONAL(XCOF,NPONTOS,IGRAU,INDCT)
```

```
      IF(INDCT.EQ.0) GO TO 20
C
C          IMPRESSÃO DOS RESULTADOS EM FORMULÁRIO
C
      IF (ISGIP.EQ.0) GO TO 40
      WRITE(3,3001)FABRIC,TIPO,VOLTNON
 3001 FORMAT(1H1,15(/),10X,'APROXIMACAO CARACTERISTICA V - I PARA-',
     *'RAIOS',3(/),1X,A16,1X,A17,1X,A10,3(/),10X,'SUBROTINA FUNCAO',
     *' RACIONAL',2(/))
      WRITE(3,3002)
 3002 FORMAT(10X,'TEM-SE OS SEGUINTES COEFICIENTES:',3(/))
      DO 30 I=0,IGRAU
   30 WRITE(3,3003)I,XCOF(I+1)
 3003 FORMAT(20X,'A(',I3,') ###',G27.20,/)
      DO 35 I=IGRAU+2,2*IGRAU+1
      J=I-(IGRAU+1)
   35 WRITE(3,3004)J,XCOF(I)
 3004 FORMAT(20X,'B(',I3,') ###',G27.20,/)
      WRITE(3,3005)
 3005 FORMAT(2(/),10X,'EQ. NA FORMA ###',2(/),15X,'Y=((A0+A1*X**1+',
     *'...+AN*X**N)/(1+ B1*X**1 +...+BN*X**N))*X')
C
C          IMPRIMIR COEFICIENTES DA FUNÇÃO, GRAU E LIMITE
C
   40 CONTINUE
      WRITE(4,4001)IGRAU,CORR(NPONTOS),TENSIN
 4001 FORMAT(I5,F10.4,G20.10)
      WRITE(4,4002)(XCOF(I),I=1,2*IGRAU+1)
 4002 FORMAT(4G20.13)
C
C          OBTENÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS:
C
C          TENSÃO - CORRENTE E RESISTÊNCIA - CORRENTE
C
C
   45 CONTINUE
```

```
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1008)
 1008 FORMAT(3(/),15X,'CARACTERISTICA TENSAO - CORRENTE (CALCULADA)',
     *5(/),5X,'TRACO CURVA APROXIMADA ( 1/SIM;0/NAO ) ?')
      READ(*,*)INDC
      IF(INDC.LT.0.OR.INDC.GT.1) GOTO 45
      IF(INDC.EQ.0) GO TO 70
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1009)
 1009 FORMAT(3(/),15X,'CARACTERISTICA TENSAO - CORRENTE (CALCULADA)',
     *4(/),5X,'INTRODUZIR VALOR FINAL P/ A CORRENTE ?')
      READ(*,*)XFCORR
C
C         VERIFICAÇÃO DA CONTINUIDADE DA FUNÇÃO RACIONAL NO ESPAÇO
C         AMOSTRAL DADO
C
      CALL VERIFY(XCOF,0.DO,XFCORR,IGRAU,IVER,IROOT,1)
      IF(IVER.EQ.0) GOTO 20
C
C         LEITURA DO INCREMENTO PARA CÁLCULO
C
      WRITE(1,1010)
 1010 FORMAT(5X,'INTRODUZIR INCREMENTO PARA VERIFICACAO ?')
      READ(*,*)XINC
C
C         CÁLCULO DO NÚMERO DE PONTOS A VERIFICAR
C
      NPNT=1+INT(XFCORR/XINC+ 0.001)
      IF(NPNT.LE.0.OR.NPNT.GT.501)NPNT=501
      XINC=XFCORR/(NPNT-1)
      DO 50 I=1,NPNT
   50 CORR1(I)=(I-1)*XINC
C
C         CONSTRUÇÃO DO VETOR RESPOSTA SUBROTINA RACIONAL
C
      DO 65 J=1,NPNT
```

```
      XOUT1=0.DO
      DO 55 I=0,IGRAU
   55 XOUT1=XOUT1+XCOF(I+1)*CORR1(J)**I
      XOUT2=1.DO
      DO 60 I=1,IGRAU
   60 XOUT2=XOUT2+XCOF(IGRAU+I+1)*CORR1(J)**I
      XSAIDA(J,1)=XOUT1/XOUT2*CORR1(J)+TENSIN
   65 CONTINUE
C
C          IMPRESSÃO DO NÚMERO DE PONTOS - VETOR RESPOSTA
C
      OPEN(5,FILE='CURVV-I.PR',STATUS='NEW')
      WRITE(5,5001)(CORR1(J),XSAIDA(J,1),J=1,NPNT)
 5001 FORMAT(2F20.10)
C
C          CHAMADA DA SUBROTINA DE PLOTAGEM
C
      OPEN(7,FILE='DADOSPR.DAT',STATUS='NEW')
      CALL PLOTER(1,NPNT,LDRV,IENER)
C
C
C          CÁLCULO DA RESISTÊNCIA INCREMENTAL
C
   70 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1011)
 1011 FORMAT(3(/),10X,'CURVA DA RESISTENCIA INCREMENTAL',5(/),5X,'CA'
     *,'LCULADA COMO DERIVADA DA CARACTERISTICA TENSAO - CORRENTE',5(
     */),5X,'TRACO CURVA RESISTENCIA INCREMENTAL ( 1/SIM;0/NAO ) ?')
      READ(*,*)IND
      IF(IND.LT.0.OR.IND.GT.1) GOTO 70
      IXSTOR=0
      IF(IND.EQ.0)GO TO 115
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1012)
 1012 FORMAT(3(/),10X,'CURVA DA RESISTENCIA INCREMENTAL',4(/),5X,'IN'
```

```
     *'TRODUZIR VALOR FINAL P/ CORRENTE ?')
      READ(*,*)XFCORR
C
C          VERIFICAÇÃO DA CONTINUIDADE DA FUNÇÃO RACIONAL NO ESPAÇO
C          AMOSTRAL DADO
C
      CALL VERIFY(XCOF,0.DO,XFCORR,IGRAU,IVER,IRROT,1)
      DO 75 I=1,IGRAU+1
   75 XCOFR1(I)=XCOF(I)
      XCOFR2(1)=1.DO
      DO 80 I=2,IGRAU+1
   80 XCOFR2(I)=XCOF(I+IGRAU)
C
C          LEITURA DO INCREMENTO PARA CÁLCULO
C
      WRITE(1,1013)
 1013 FORMAT(5X,'INTRODUZIR INCREMENTO P/ VERIFICACAO ?')
      READ(*,*)XINC
      NPNT=1+INT(XFCORR/XINC+0.001)
      IF(NPNT.LE.0.OR.NPNT.GT.501) NPNT=501
      XINC=XFCORR/(NPNT-1)
      DO 85 I=1,NPNT
   85 CORR1(I)=(I-1)*XINC
      XRESMIN=1.0D+06
      XRESMAX=0.0D0
      DO 105 K=1,NPNT
C
C     TOMADA DA REFERÊNICIA PARA CÁLCULO DA RESISTÊNCIA INCREMENTAL
C
      X=CORR1(K)
C
C          DERIVAR FUNÇÃO RACIONAL
C
      U=0.DO
      ULINHA=0.DO
      V=0.DO
```

```
      VLINHA=0.DO
      DO 90 I=0,IGRAU
      U=U+XCOFR1(I+1)*X**(I+1)
   90 ULINHA=ULINHA+(I+1)*XCOFR1(I+1)*X**(I)
      DO 100 I=0,IGRAU
      V=V+XCOFR2(I+1)*X**I
      IF(I-1.LT.0)GO TO 100
      VLINHA=VLINHA+I*XCOFR2(I+1)*X**(I-1)
  100 CONTINUE
      Y=(ULINHA*V-VLINHA*U)/V**2
      IF(Y.LT.0.DO) IXSTOR=1
C
C          CÁLCULO DA RESISTÊNCIA INCREMENTAL
C
      XRES(K,1)=Y
      IF(ABS(Y).LT.XRESMIN) XRESMIN=Y
      IF(ABS(Y).LT.XRESMAX) GO TO 105
      XRESMAX=Y
      XCORMAX=X
  105 CONTINUE
C
C          IMPRESSÃO DO NÚMERO DE PONTOS, VETOR RESPOSTA
C
      OPEN(6,FILE='CURVL-I.TC',STATUS='NEW')
      WRITE(6,6001)(CORR1(J),XRES(J,1),J=1,NPNT)
 6001 FORMAT(2F20.10)
C
C          REFAZER ARQUIVO 4
C
      OPEN(4,FILE='CRCV-I.TC',STATUS='OLD')
      READ(4,4003)IGRAU,XLIMIT,TENSIN
 4003 FORMAT(I5,F10.0,G20.0)
C
C          IMPRIMIR XRESMIN E DADOS FINAIS
C
      WRITE(4,4004)IGRAU,XLIMIT,TENSIN,XRESMIN,XCORMAX
```

```
 4004 FORMAT(I5,F10.5,G20.10,2G15.8)
C
C
C          CHAMADA DO PLOTER
C
      OPEN(7,FILE='DADOSPR.DAT',STATUS='NEW')
      CALL PLOTER(2,NPNT,LDRV,IENER)
C
C          TESTE SE A RESISTÊNCIA ASSUME VALORES NEGATIVOS JUNTO AO ZERO
C
      INDT=0
C
C          APROXIMAÇÃO FUNÇÃO RACIONAL
C
      IF(XCOFR1(1).LT.0.DO)INDT=1
      IF(INDT.EQ.0) GO TO 115
  110 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1014)
 1014 FORMAT(3(/),5X,'A FUNCAO RESISTENCIA INCREMENTAL ASSUME VALOR',
     *'ES NEGATIVOS PROXIMO DE ZERO',2(/),5X,'ISTO PODE CAUSAR PROBL'
     *,'EMAS CASO A CORRENTE',2(/),5X,'PASSE POR ZERO NO DECORRER DO'
     *,' TEMPO DE SIMULACAO',12(/),5X,'DEVO CONTINUAR (1/SIM:0/NAO) '
     *,'?')
      READ(*,*)ISIGNAL
      IF(ISIGNAL.LT.0.OR.ISIGNAL.GT.1) GOTO 110
      IF(ISIGNAL.EQ.1) GO TO 120
      GO TO 130
  115 IF(IXSTOR.EQ.0) GOTO 120
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1015)
 1015 FORMAT(3(/),5X,'A FUNCAO RESISTENCIA INCREMENTAL ASSUME VALOR',
     *'ES NEGATIVOS NO SEU INTERVALO DE VALIDADE',2(/),5X,'LOGO A M',
     *'ESMA NAO EH RECOMENDAHVEL COMO APROXIMACAO PARA OS PONTOS EM',
     *' QUESTAO')
      GO TO 130
```

```
  120 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1016)
 1016 FORMAT(3(/),5X,'INTRODUZIR OPCAO :',4(/),5X,'1 ## LER NOVA CA',
     *'RACTERISTICA A APROXIMAR',3(/),5X,'2 ## NOVA APROXIMACAO',3(/)
     *,5X,'3 ## NOVAS CURVAS',3(/),5X,'4 ## STOP ',6(/),5X,'OPCAO = '
     *'?')
      READ(*,*)IND
      IF(IND.LT.0.OR.IND.GE.4) GO TO 130
      GO TO (10,25,45,130),IND
C
C         FINALIZAR
C
  130 CLOSE(7)
      CLOSE(6)
      CLOSE(5)
      CLOSE(4)
      CLOSE(3)
      CLOSE(2)
      CLOSE(1)
          i = system('del datv-i.$$$' c)
          i = system('echo on' c)
      STOP
      END
C
C
C        ************** SUBROTINAS AUXILIARES **********************
C
C         XERROR : ERRROS
C
C         GJORDAN : RESOLUÇÃO DE SISTEMAS
C
C         SUBROTINA P/ INDICAR ERROS NO DECORRER DO PROGRAMA
C
      SUBROUTINE XERROR(I,J)
          integer*2 system, spawn
```

```
      i = system('cls' c)
      WRITE(1,1000)I
 1000 FORMAT(5(/),5X,'ERRO NUMERO ',I3,' VERIFIQUE!!!!!')
      STOP
      END
C
C         SUBROTINA PARA RESOLVER SISTEMA DE EQUAÇÕES LINEARES
C         PELO MÉTODO DE GAUSS-JORDAN
C
      SUBROUTINE GJORDN(A,N,M,NN,MM)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(N,M)
      I1=1
      ISG=2
      N1=NN
      N2=NN-1
      M1=MM
      DO 10 I=1,N2
      CALL ELIMIM(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      CALL TROCA(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      ISG=ISG+1
   10 M1=M1-1
      CALL ELIMIM(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      RETURN
      END
C
C         ELIMINAÇÃO DO SISTEMA GAUSS-JORDAN
C
      SUBROUTINE ELIMIM(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(N,M)
      IF(DABS(A(1,1)).LT.1.OD-45) CALL TROCAR(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      DO 10 I1=2,M1
   10 A(1,I1)=A(1,I1)/A(1,1)
      DO 20 I1=2,N1
      DO 20 I2=2,M1
```

```
   20 A(I1,I2)=A(I1,I2)- A(I1,1)*A(1,I2)
      DO 30 I1=1,N1
      DO 30 I2=2,M1
   30 A(I1,I2-1)=A(I1,I2)
      RETURN
      END
C
C          TROCA SISTEMA GAUSS JORDAN
C
      SUBROUTINE TROCA(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(N,M)
      I1=ISG
   10 DO 20 I2=1,M1
      T=A(I1,I2)
      A(I1,I2)=A(I1-1,I2)
   20 A(I1-1,I2)=T
      IF(I1.EQ.2) GO TO 30
      I1=I1-1
      GO TO 10
   30 RETURN
      END
C
C          TROCAR SISTEMA GAUSS-JORDAN
C
      SUBROUTINE TROCAR(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(N,M)
          integer*2 system, spawn
      IF(I.EQ.N1)GO TO 50
      DO 10 I1=ISG,N1
      IF(DABS(A(I1,1)).GT.1.0D-45) GO TO 30
   10 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1000)I
 1000 FORMAT(3(/),5X,'APOS ',I2,' ELIMINACOES O SISTEMA EH INDETERMI'
```

```
     *,'NADO',10(/))
      STOP
   30 DO 40 I2=1,M1
      T=A(I1,I2)
      A(I1,I2)=A(1,I2)
   40 A(1,I2)=T
      RETURN
   50 IF(DABS(A(1,2)).GT.1.0D-45) GO TO 70
      GO TO 30
   70 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1001)
 1001 FORMAT(3(/),5X,'O SISTEMA EH IMPOSSIVEL',10(/))
      STOP
      END
C
C     ********** SUBROTINA PARA A APROXIMAÇÃO DE FUNÇÕES **************
C
C          RACIONAL: FUNÇÃO RACIONAL
C
C          VERIFY → VERIFICAÇÃO DE DESCONTINUIDADE DA FUNÇÃO RACIONAL
C
C          POLRT → CALCULA RAÍZES DO DENOMINADOR DA FUNÇÃO RACIONAL
C
C          PLOTER → ACESSO AO PROGRAMA ENERGRAPHICS
C
C          SUBROTINA FUNÇÃO RACIONAL
C
      SUBROUTINE RACIONAL(XCOF,NPONTOS,IGRAU,INDCT)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C
C          DIMENSIONAMENTO E DEFINIÇÃO DE REGIÕES EM COMMON
C
      DIMENSION XSOMA1(21),XSOMA2(21),XSOMA3(20).
      DIMENSION CORR(51),TENSAO(51),A(21,22),XCOF(21),XCOFANT(21)
      DIMENSION XCOFOTIMO(21),DELTAXCOF(21)
```

```
      COMMON /PART1/CORR,TENSAO
          integer*2 system, spawn
C
C         CARREGAR DADOS PARA A EXECUÇÃO DA SUBROTINA
C
          i = system('cls' c)
      WRITE(1;1000)
 1000 FORMAT(3(/),15X,'SUBROTINA FUNCAO RACIONAL - DADOS ADICIONAIS',
     *4(/),5X,'INTRODUZIR O LIMITE PARA ITERACOES ? ')
      READ(*,*)LIMIT
      WRITE(1,1001)
 1001 FORMAT(5X,'INTRODUZIR TOLERANCIA PERCENTUAL (MAXIMO 1% ) ?')
      READ(*,*)XTOLRANC
      IF(LIMIT.LE.0.OR.LIMIT.GT.50)LIMIT=20
      IF(XTOLRANC.LT.1.)XTOLRANC=1.
    5 ITERACT=0
      IROOT=0
      DO 10 I=1,2*IGRAU+1
      XCOF(I)=0.DO
      XCOFANT(I)=0.DO
   10 XCOFOTIMO(I)=0.DO
      ITEROTIMO=0
      XMAXOTIMO=1000.
      INDSETOT=0
C
C         ZERAR SOMADORES
C
   20 DO 30 I=1,2*IGRAU+1
      XSOMA1(I)=0.DO
   30 XSOMA2(I)=0.DO
      DO 50 I=1,2*IGRAU
   50 XSOMA3(I)=0.DO
      ITERACT=ITERACT+1
C
C         DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES
C
```

```
      DO 120 N=1,NPONTOS
      XPI=0.DO
      DO 60 J=1,IGRAU
   60 XPI=XPI+XCOF(IGRAU+1+J)*CORR(N)**J
      XPI=XPI+1.DO
      IF(DABS(TENSAO(N)).GT.1.D-12.AND.DABS(XPI).GT.1.D-12) GO TO 70
      GO TO 120
   70 CONST=2.DO/(XPI*TENSAO(N))**2
   80 DO 90 J=1,2*IGRAU+1
   90 XSOMA1(J)=XSOMA1(J)+CONST*CORR(N)**(J+1)
      DO 100 J=1,2*IGRAU+1
  100 XSOMA2(J)=XSOMA2(J)-CONST*CORR(N)**(J)*TENSAO(N)
      DO 110 J=1,2*IGRAU
  110 XSOMA3(J)=XSOMA3(J)+CONST*CORR(N)**J*TENSAO(N)**2
  120 CONTINUE
C
C          CARREGAR MATRIZ DOS COEFICIENTES
C
      DO 130 J=1,IGRAU+1
      DO 130 I=1,IGRAU+1
      N=I+J-1
  130 A(I,J)=XSOMA1(N)
      DO 140 J=IGRAU+2,2*IGRAU+1
      DO 140 I=1,IGRAU+1
      N=I+J-(IGRAU+1)
      A(J,I)=XSOMA2(N)
  140 A(I,J)=XSOMA2(N)
      DO 150 J=IGRAU+2,2*IGRAU+1
      DO 150 I=IGRAU+2,2*IGRAU+1
      N=I+J-(2*IGRAU+2)
  150 A(I,J)=XSOMA3(N)
C
C          CARREGAR VETOR RESPOSTA DA MATRIZ
C
     DO 160 I=1,IGRAU+1
  160 A(I,2*(IGRAU+1))=-XSOMA2(I)
```

```
      DO 170 I=1,IGRAU
  170 A(I+IGRAU+1,2*(IGRAU+1))=-XSOMA3(I)
C
C         RESOLVER O SISTEMA
C
          CALL GJORDN(A,21,22,2*IGRAU+1,2*IGRAU+2)
C
C         CARREGAR COEFICIENTES DO SISTEMA
C
      N=2*IGRAU+1
      DO 180 I=1,2*IGRAU+1
      XCOF(I)=A(N,1)
  180 N=N-1
C
C         VERIFICAR A CONTINUIDADE DA FUNÇÃO RACIONAL APROXIMANTE
C
      CALL VERIFY(XCOF,CORR(1),CORR(NPONTOS),IGRAU,IVER,IROOT,0)
      IF(IVER.EQ.0) GO TO 210
C
C         TESTE SE FOI ALCANÇADO O LIMITE PARA AS ITERAÇÕES
C
      IF(ITERACT.NE.LIMIT) GO TO 190
      IF(INDSETOT.EQ.0)GO TO 320
      GO TO 300
C
C         CARREGAR COEFICIENTES ANTERIORES
C
  190 DO 200 I=1,2*IGRAU+1
  200 XCOFANT(I)=XCOF(I)
      GO TO 20
C
C         DETERMINAÇÃO DO ERRO PERCENTUAL MÁXIMO OBSERVADO
C
  210 XMAX=0.D0
      ISG=0
      DO 240 J=1,NPONTOS
```

```
      DO 120 N=1,NPONTOS
      XPI=0.DO
      DO 60 J=1,IGRAU
   60 XPI=XPI+XCOF(IGRAU+1+J)*CORR(N)**J
      XPI=XPI+1.DO
      IF(DABS(TENSAO(N)).GT.1.D-12.AND.DABS(XPI).GT.1.D-12) GO TO 70
      GO TO 120
   70 CONST=2.DO/(XPI*TENSAO(N))**2
   80 DO 90 J=1,2*IGRAU+1
   90 XSOMA1(J)=XSOMA1(J)+CONST*CORR(N)**(J+1)
      DO 100 J=1,2*IGRAU+1
  100 XSOMA2(J)=XSOMA2(J)-CONST*CORR(N)**(J)*TENSAO(N)
      DO 110 J=1,2*IGRAU
  110 XSOMA3(J)=XSOMA3(J)+CONST*CORR(N)**J*TENSAO(N)**2
  120 CONTINUE
C
C          CARREGAR MATRIZ DOS COEFICIENTES
C
      DO 130 J=1,IGRAU+1
      DO 130 I=1,IGRAU+1
      N=I+J-1
  130 A(I,J)=XSOMA1(N)
      DO 140 J=IGRAU+2,2*IGRAU+1
      DO 140 I=1,IGRAU+1
      N=I+J-(IGRAU+1)
      A(J,I)=XSOMA2(N)
  140 A(I,J)=XSOMA2(N)
      DO 150 J=IGRAU+2,2*IGRAU+1
      DO 150 I=IGRAU+2,2*IGRAU+1
      N=I+J-(2*IGRAU+2)
  150 A(I,J)=XSOMA3(N)
C
C          CARREGAR VETOR RESPOSTA DA MATRIZ
C
     DO 160 I=1,IGRAU+1
  160 A(I,2*(IGRAU+1))=-XSOMA2(I)
```

```
      DO 170 I=1,IGRAU
  170 A(I+IGRAU+1,2*(IGRAU+1))=-XSOMA3(I)
C
C         RESOLVER O SISTEMA
C
          CALL GJORDN(A,21,22,2*IGRAU+1,2*IGRAU+2)
C
C         CARREGAR COEFICIENTES DO SISTEMA
C
      N=2*IGRAU+1
      DO 180 I=1,2*IGRAU+1
      XCOF(I)=A(N,1)
  180 N=N-1
C
C         VERIFICAR A CONTINUIDADE DA FUNÇÃO RACIONAL APROXIMANTE
C
      CALL VERIFY(XCOF,CORR(1),CORR(NPONTOS),IGRAU,IVER,IROOT,0)
      IF(IVER.EQ.0) GO TO 210
C
C         TESTE SE FOI ALCANÇADO O LIMITE PARA AS ITERAÇÕES
C
      IF(ITERACT.NE.LIMIT) GO TO 190
      IF(INDSETOT.EQ.0)GO TO 320
      GO TO 300
C
C         CARREGAR COEFICIENTES ANTERIORES
C
  190 DO 200 I=1,2*IGRAU+1
  200 XCOFANT(I)=XCOF(I)
      GO TO 20
C
C         DETERMINAÇÃO DO ERRO PERCENTUAL MÁXIMO OBSERVADO
C
  210 XMAX=0.D0
      ISG=0
      DO 240 J=1,NPONTOS
```

```
      ERRO=0.DO
C
C          CÁLCULO DA FUNÇÃO PONTO A PONTO
C
      XOUT1=0.DO
      DO 220 I=0,IGRAU
  220 XOUT1=XOUT1+XCOF(I+1)*CORR(J)**I
      XOUT2=1.DO
      DO 230 I=1,IGRAU
  230 XOUT2=XOUT2+XCOF(IGRAU+I+1)*CORR(J)**I
      XSAIDA=XOUT1/XOUT2*CORR(J)
C
C          DETERMINAÇÃO DO ERRO
C
      IF(DABS(TENSAO(J)).LE.1.D-10)GO TO 240
      ERRO=(XSAIDA-TENSAO(J))/TENSAO(J)*100.DO
      IF(DABS(ERRO).GT.XTOLRANC) ISG=1
      IF(DABS(ERRO).GT.XMAX) XMAX=DABS(ERRO)
  240 CONTINUE
C
C          TESTAR SE A TOLERÂNCIA FOI ULTRAPASSADA
C
      IF(ISG.EQ.1) GO TO 250
      GO TO 290
C
C          CARREGAR COEFICIENTES ANTERIORES
C
  250 DO 260 I=1,2*IGRAU+1
  260 XCOFANT(I)=XCOF(I)
C
C          TESTE SE A TOLERÂNCIA VERIFICADA E MENOR QUE A MELHOR ATUAL
C
      IF(DABS(XMAX).GT.XMAXOTIMO) GO TO 280
C
C          ASSUMIR ATUAL COMO MELHOR APROXIMAÇÃO
C
```

```
      INDSETOT=1
      ITEROTIMO=ITERACT
      XMAXOTIMO=DABS(XMAX)
      DO 270 I=1,2*IGRAU+1
  270 XCOFOTIMO(I)=XCOF(I)
C
C         VERIFICAR SE AS ITERACÕES ATINGIRAM O LIMITE
C
  280 IF(ITERACT.EQ.LIMIT) GO TO 300
      GO TO 20
C
C          SAÍDA DE DADOS
C
  290 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1002)XMAX,ITERACT
 1002 FORMAT(3(/),15X,'SUBROTINA FUNCAO RACIONAL - DADOS PARCIAIS',4(
     */),5X,'ERRO PERCENTUAL MAXIMO OBSERVADO = ',G15.7,2(/),5X,'IT',
     *'ERACAO EM QUESTAO = ',I3)
      WRITE(1,1003)
 1003 FORMAT(10(/),5X,'RESULTADOS OBTIDOS SAO SATISFATORIOS ( 1/SIM',
     *';0/NAO ) ? ')
      READ(*,*)INDCT
      GO TO 360
  300 IF(INDSETOT.EQ.0) GO TO 320
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1004)XMAXOTIMO,ITEROTIMO
 1004 FORMAT(3(/),15X,'SUBROTINA FUNCAO RACIONAL - DADOS PARCIAIS',4(
     */),5X,'ESTOUROU LIMITES PARA ITERACOES !!!!',2(/),5X,'ERRO MI',
     *'NIMO PERCENTUAL OBSERVADO = ',G15.7,2(/),5X,'ITERACAO EM QUES'
     *,'TAO = ',I3,7(/),5X,'RESULTADOS SAO SATIFATORIOS (1/SIM;0/NAO'
     *,') ? ')
      READ(*,*)INDCT
      IF(INDCT.EQ.0) GO TO 360
      DO 310 I=1,2*IGRAU+1
  310 XCOF(I)=XCOFOTIMO(I)
```

```
      GO TO 360
  320 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1005)
 1005 FORMAT(3(/),15X,'SUBROTINA FUNCAO RACIONAL - DADOS PARCIAIS',4
     *4(/),5X,'DENTRO DO NUMERO DE ITERACOES E TOLERANCIA DETERMIN',
     *'ADOS',2(/),5X,'NAO FOI ENCONTRADA UMA RESPOSTA CONTINUA',2(/)
     *,5X,'VOU DESINCREMENTAR GRAU DO POLONOMIO E PROSSEGUIR')
      IF(IGRAU-IROOT.LE.0)GO TO 330
      IGRAU=IGRAU-IROOT
      GO TO 340
  330 IGRAU=IGRAU-1
      GO TO 340
C
C         TESTE DO VALOR PARA O GRAU MINIMO=1
C
  340 IF(IGRAU.LE.0)GO TO 350
      WRITE(1,1006)IGRAU
 1006 FORMAT(4(/),5X,'O NOVO VALOR PARA O GRAU EH ',I5)
      GO TO 5
C
C         FINALIZAR
C
  350 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1007)
 1007 FORMAT(3(/),15X,'SUBROTINA FUNCAO RACIONAL - DADOS FINAIS',4(/)
     *,5X,'DENTRO DAS CONDICOES DADAS EH IMPOSSIVEL DETERMINAR RESP',
     *'OSTA')
      PAUSE
  360 RETURN
      END
C
C
C         SUBROTINA VERIFY
C
```

```
      SUBROUTINE VERIFY(XCOF,XMIN,XMAX,IGRAU,IVER,IROOT,IPARM)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DIMENSION XCOF(10),XCOFD(11),COF(11),ROOTR(11),ROOTI(11)
          integer*2 system, spawn
C
C         CARREGAR COEFICIENTES
C
      XCOFD(1)=1.DO
      DO 10 I=1,IGRAU
   10 XCOFD(I+1)=XCOF(I+IGRAU+1)
C
C         CHAMADA DA SUBROTINA POLRT
C
      CALL POLRT(XCOFD,COF,IGRAU,ROOTR,ROOTI,IERROR)
C
C         TESTAR O ERRO EM POLRT
C
      IF(IERROR.EQ.0)GO TO 20
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1000)IERROR
 1000 FORMAT(3(/),5X,'NA EXECUCAO DE POLRT ACONTECEU O ERRO NUMERO ='
     *,I2)
      STOP
C
C         VERIFICAR A EXISTÊNCIA DE RAIZES NO ESPAÇO AMOSTRAL
C
   20 IVER=0
      JROOT=0
      DO 30 I=1,IGRAU
      IF(DABS(ROOTI(I)).GT.1.0D-04) GO TO 30
      IF(ROOTR(I).LT.XMIN.OR.ROOTR(I).GT.XMAX) GOTO 30
      JROOT=JROOT+1
   30 CONTINUE
      IF(JROOT.GT.IROOT)IROOT=JROOT
      IF(JROOT.EQ.0)RETURN
      IVER=1
```

```
      IF(IPARM.EQ.0) RETURN
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1001)
 1001 FORMAT(3(/),5X,'A FUNCAO RACIONAL DENTRO DO INTERVALO DADO EH',
     *' DESCONTINUA',10(/))
      STOP
      END
C
C          CÁLCULO DAS RAÍZES DE UM POLINÔMIO
C
      SUBROUTINE POLRT(XCOF,COF,M,ROOTR,ROOTI,IER)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DIMENSION XCOF(11),COF(11),ROOTR(11),ROOTI(11)
      IFIT=0
      N=M
      IER=0
      IF(XCOF(N+1))10,25,10
   10 IF(N)15,15,32
   15 IER=1
   20 RETURN
   25 IER=4
      GO TO 20
   30 IER=2
      GO TO 20
   32 IF(N-11)35,35,30
   35 NX=N
      NXX=N+1
      N2=1
      KJ1=N+1
      DO 40 L=1,KJ1
      MT=KJ1-L+1
   40 COF(MT)=XCOF(L)
C
C          SETAR VALORES INICIAIS
C
   45 XO=0.00500101D0
```

```
      YO=0.01000101DO
C
C          ZERAR CONTADOR INICIAL
C
      IN=0
   50 X=XO
C
C          INCREMENTAR VALORES INCIAIS E O CONTADOR
C
      XO=-10.DO*YO
      YO=-10.DO*X
C
C          SETAR VALORES ATUAIS DE X E Y
C
      X=XO
      Y=YO
      IN=IN+1
      GO TO 59
   55 IFIT=1
      XPR=X
      YPR=Y
C
C          AVALIAR O POLINOMIO E SUAS DERIVADÁS
C
   59 ICT=0
   60 UX=0.DO
      UY=0.DO
      V=0.DO
      YT=0.DO
      XT=1.DO
      U=COF(N+1)
      IF(U)65,130,65
   65 DO 70 I=1,N
      L=N-I+1
      XT2=X*XT-Y*YT
      YT2=X*YT+Y*XT
```

```
      U=U+COF(L)*XT2
      V=V+COF(L)*YT2
      FI=I
      UX=UX+FI*XT*COF(L)
      UY=UY-FI*YT*COF(L)
      XT=XT2
   70 YT=YT2
      SUMSQ=UX*UX+UY*UY
      IF(SUMSQ)75,110,75
   75 DX=(V*UY-U*UX)/SUMSQ
      X=X+DX
      DY=-(U*UY+V*UX)/SUMSQ
      Y=Y+DY
   78 IF(DABS(DY)+DABS(DX)-1.D-08)100,80,80
C
C        INCREMENTAR O CONTADOR DAS ITERAÇÕES
C
   80 ICT=ICT+1
      IF(ICT-500)60,85,85
   85 IF(IFIT)100,90,100
   90 IF(IN-5)50,95,95
   95 IER=3
      GO TO 20
  100 DO 105 L=1,NXX
      MT=KJ1-L+1
      TEMP=XCOF(MT)
      XCOF(MT)=COF(L)
  105 COF(L)=TEMP
      ITEMP=N
      N=NX
      NX=ITEMP
      IF(IFIT)120,55,120
  110 IF(IFIT)115,50,115
  115 X=XPR
      Y=YPR
  120 IFIT=0
```

```
      IF(X)122,125,122
  122 IF(DABS(Y)-DABS(X)*1.D-12)135,125,125
  125 ALPHA=X+X
      SUMSQ=X*X+Y*Y
      N=N-2
      GO TO 140
  130 X=0.D0
      NX=NX-1
      NXX=NXX-1
  135 Y=0.D0
      SUMSQ=0.D0
      ALPHA=X
      N=N-1
  140 L1=1
      L2=2
      COF(L2)=COF(L2)+ALPHA*COF(L1)
  145 DO 150 L=2,N
  150 COF(L+1)=COF(L+1)+ALPHA*COF(L)-SUMSQ*COF(L-1)
  155 ROOTI(N2)=Y
      ROOTR(N2)=X
      N2=N2+1
      IF(SUMSQ)160,165,160
  160 Y=-Y
      SUMSQ=0.D0
      GO TO 155
  165 IF(N)20,20,45
      END
C
C
C          SUBROTINA PLOTER
C
C
      SUBROUTINE PLOTER(K,NPONTOS,LDRV,IENER)
C
C          DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS E DADOS DE PLACA
C
```

```
      CHARACTER*15 FABRIC,TIPO
      CHARACTER*10 VOLTNON
C
C          DIMENSINAMENTO DAS VARIÁVEIS
C
      DIMENSION CORR1(501),XSAIDA(501),XRES(501)
C
C          DEFINIÇÃO ÁREAS EM COMMON
C
      COMMON /PART2/FABRIC,TIPO,VOLTNON
          integer*2 system, spawn
C
C          VERIFICAÇÃO DA EXISTÊNCIA DO PROGRAMA ENERGRAPHICS
C
          IF(IENER.EQ.0) GO TO 110
      GO TO (10,50),K
   10 IF(LDRV.EQ.0) GO TO 15
      WRITE(3,3001)
 3001 FORMAT(1H1)
   15 OPEN(5,FILE='CURVV-I.PR',STATUS='OLD')
      READ(5,5001)(CORR1(J),XSAIDA(J),J=1,NPONTOS)
 5001 FORMAT(2F20.10)
      IF(CORR1(1).LT.1E-6.OR.XSAIDA(1).LT.1E-6) GO TO 20
      GO TO 40
   20 NPONTOS=NPONTOS-1
      DO 30 J=1,NPONTOS
      CORR1(J)=CORR1(J+1)
   30 XSAIDA(J)=XSAIDA(J+1)
C
C          PREPARAR DADOS DE SAIDA PARA PLOTER
C
   40 XMIN=CORR1(1)
      XMAX=CORR1(NPONTOS)
      YMIN=XSAIDA(1)
      YMAX=XSAIDA(NPONTOS)
          i = system('cls' c)
```

```
      WRITE(1,1000)YMAX,YMIN
 1000 FORMAT(3(/),5X,'VALORES - MAXIMO E MINIMO DA FUNCAO',2(/),7X,
     *'TENSAO MAXIMA => ',F10.3,2(/),7X,'TENSAO MINIMA => ',F10.3,5(/
     */),5X,'MODIFICO OS VALORES ( 1/SIM;0/NAO ) ? ')
      READ(*,*) IMOD
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1001)
 1001 FORMAT(3(/),5X,'VALORES - MAXIMO E MINIMO DA FUNCAO',2(/),7X,
     *'TENSAO MAXIMA => ')
      READ(*,*)YMAX
      WRITE(1,1002)
 1002 FORMAT(2(/),7X,'TENSAO MINIMA => ')
      READ(*,*)YMIN
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1003)
 1003 FORMAT(3(/),5X,'VALORES DA ESCALA DOS EIXOS  - X => E Y =>',2(/
     *),7X,'EIXO => X ' )
      READ(*,*)XSTEP
      WRITE(1,1004)
 1004 FORMAT(2(/),7X,'EIXO => Y ' )
      READ(*,*)YSTEP
          i = system('cls' c)
C
C
C         MONTAR ARQUIVO DE DADOS PARA INTERFACE ENERGRAPHICS
C
      WRITE(7,7001)XMIN,XMAX,YMIN,YMAX
 7001 FORMAT(F10.4,',',F10.4,',',F10.4,',',F10.4)
      WRITE(7,7002)XSTEP,YSTEP
 7002 FORMAT(F10.4,',',F10.4)
      WRITE(7,7003)
 7003 FORMAT('CURVA TENSAO - CORRENTE PARA-RAIOS')
      WRITE(7,7004)
 7004 FORMAT(' CORRENTE [ A ], TENSAO [ V ]')
      WRITE(7,7005)(CORR1(J),XSAIDA(J),J=1,NPONTOS)
 7005 FORMAT(F20.10,',',F20.10)
```

```
      GO TO 90
C
C        . LEITURA DE DADOS CARACTERISTICA RESISTENCIA INCREMENTAL
C
   50 IF(LDRV.EQ.0) GO TO 55
      WRITE(3,3002)
 3002 FORMAT(1H1)
   55 OPEN(6,FILE='CURVR-I.PR',STATUS='OLD')
      READ(6,6001)(CORR1(J),XRES(J),J=1,NPONTOS)
 6001 FORMAT(2F20.10)
      IF(CORR1(1).LT.1E-6.OR.XRES(1).LT.1E-6) GO TO 60
      GO TO 80
   60 NPONTOS=NPONTOS-1
      DO 70 J=1,NPONTOS
      CORR1(J)=CORR1(J+1)
   70 XRES(J)=XRES(J+1)
C
C          PREPARAR DADOS DE SAIDA PARA PLOTER
C
   80 XMIN=CORR1(1)
      XMAX=CORR1(NPONTOS)
      YMIN=XRES(NPONTOS)
      YMAX=XRES(1)
      WRITE(1,1005)YMAX,YMIN
 1005 FORMAT(3(/),5X,'VALORES - MAXIMO E MINIMO DA FUNCAO',2(/),7X,
     *'RESISTENCIA MAXIMA => ',F10.3,2(/),7X,'RESISTENCIA MINIMA => '
     *,F10.3,5(/),5X,'MODIFICO OS VALORES ( 1/SIM;0/NAO ) ? ')
      READ(*,*) IMOD
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1006)
 1006 FORMAT(3(/),5X,'VALORES - MAXIMO E MINIMO DA FUNCAO',2(/),7X,
     *'RESISTENCIA MAXIMA => ')
      READ(*,*)YMAX
      WRITE(1,1007)
 1007 FORMAT(2(/),7X,'RESISTENCIA MINIMA => ')
      READ(*,*)YMIN
```

```
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1008)
 1008 FORMAT(3(/),5X,'VALORES DA ESCALA DOS EIXOS  - X => E Y =>',2(/
     *),7X,'EIXO => X ')
      READ(*,*)XSTEP
      WRITE(1,1009)
 1009 FORMAT(2(/),7X,'EIXO => Y ' )
      READ(*,*)YSTEP
C
C          MONTAR ARQUIVO DE DADOS PARA INTERFACE ENERGRAPHICS
C
C
      WRITE(7,7006)XMIN,XMAX,YMIN,YMAX
 7006 FORMAT(F10.4,',',F10.4,',',F10.4,',',F10.4)
      WRITE(7,7007)XSTEP,YSTEP
 7007 FORMAT(F10.4,',',F10.4)
      WRITE(7,7008)
 7008 FORMAT('CURVA RESISTENCIA - CORRENTE PARA-RAIOS')
      WRITE(7,7009)
 7009 FORMAT(' CORRENTE [ A ], RESISTENCIA [ Ohms ]')
      WRITE(7,7010)(CORR1(J),XRES(J),J=1,NPONTOS)
 7010 FORMAT(F20.10,',',F20.10)
   90 CONTINUE
      IF(LDRV.EQ.0) GO TO 100
C
C          COMANDO DAS INTERFACES EM LINGUAGEM C
C
          i = system('c:' c)
          i = system('copy a:dadospr.dat' c)
  100 CONTINUE
          i = system('intface' c)
          i = system('eng' c)
          i = system('del dadospr.dat' c)
          i = system('del engdata.eng' c)
      IF(LDRV.EQ.0) GO TO 120
          i = system('a:' c)
```

```
      i = system('del dadospr.dat' c)
    GO TO 120
110 CONTINUE
      i = system('cls' c)
    WRITE(1,1010)
1010 FORMAT(3(/),5X,'O PLOTER NAO ESTAH HABILITADO',18(/))
    PAUSE
120 RETURN
    END
```

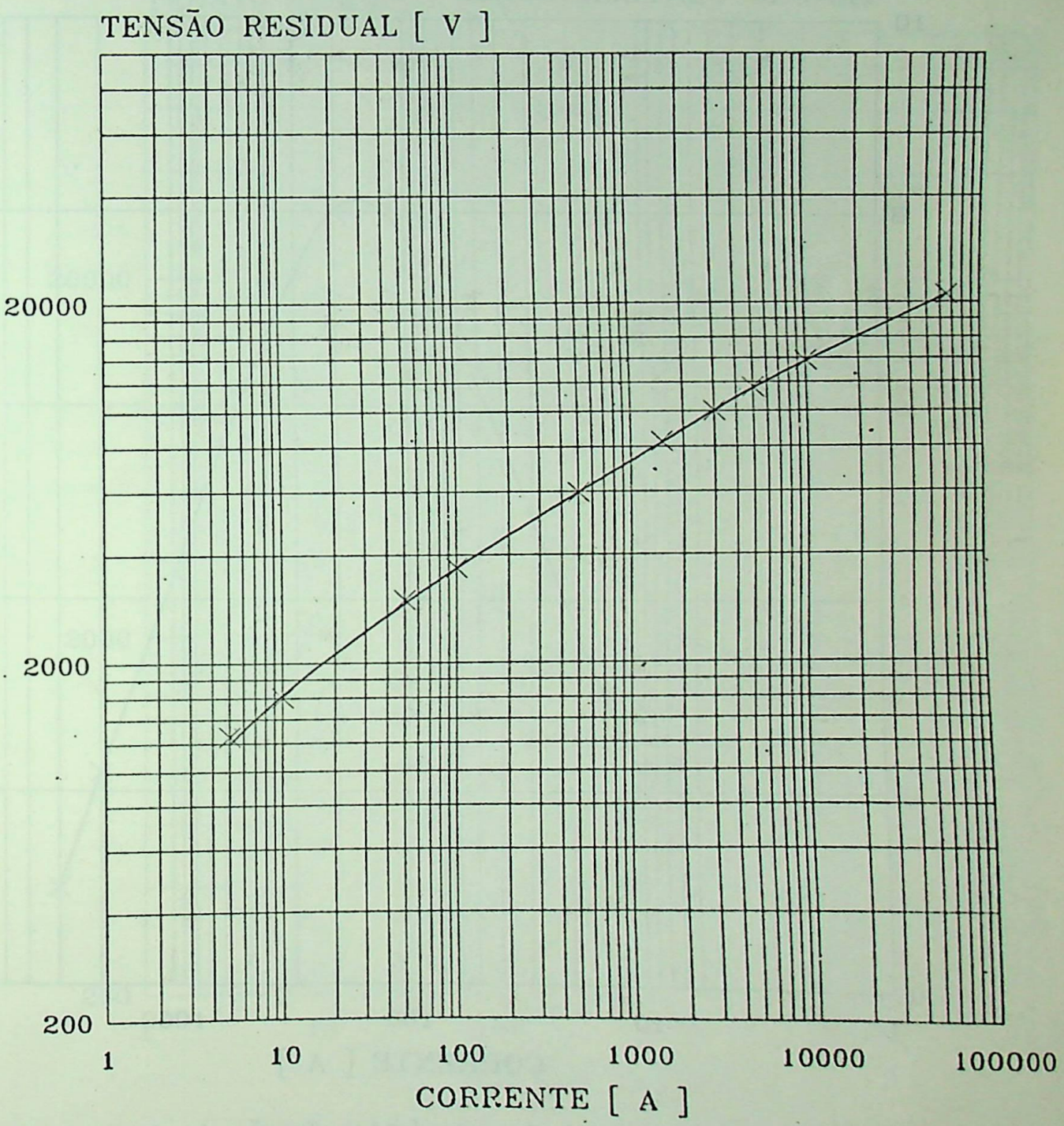


Figura II.1 - Aproximação para a Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga Mostrada na Tabela II.1

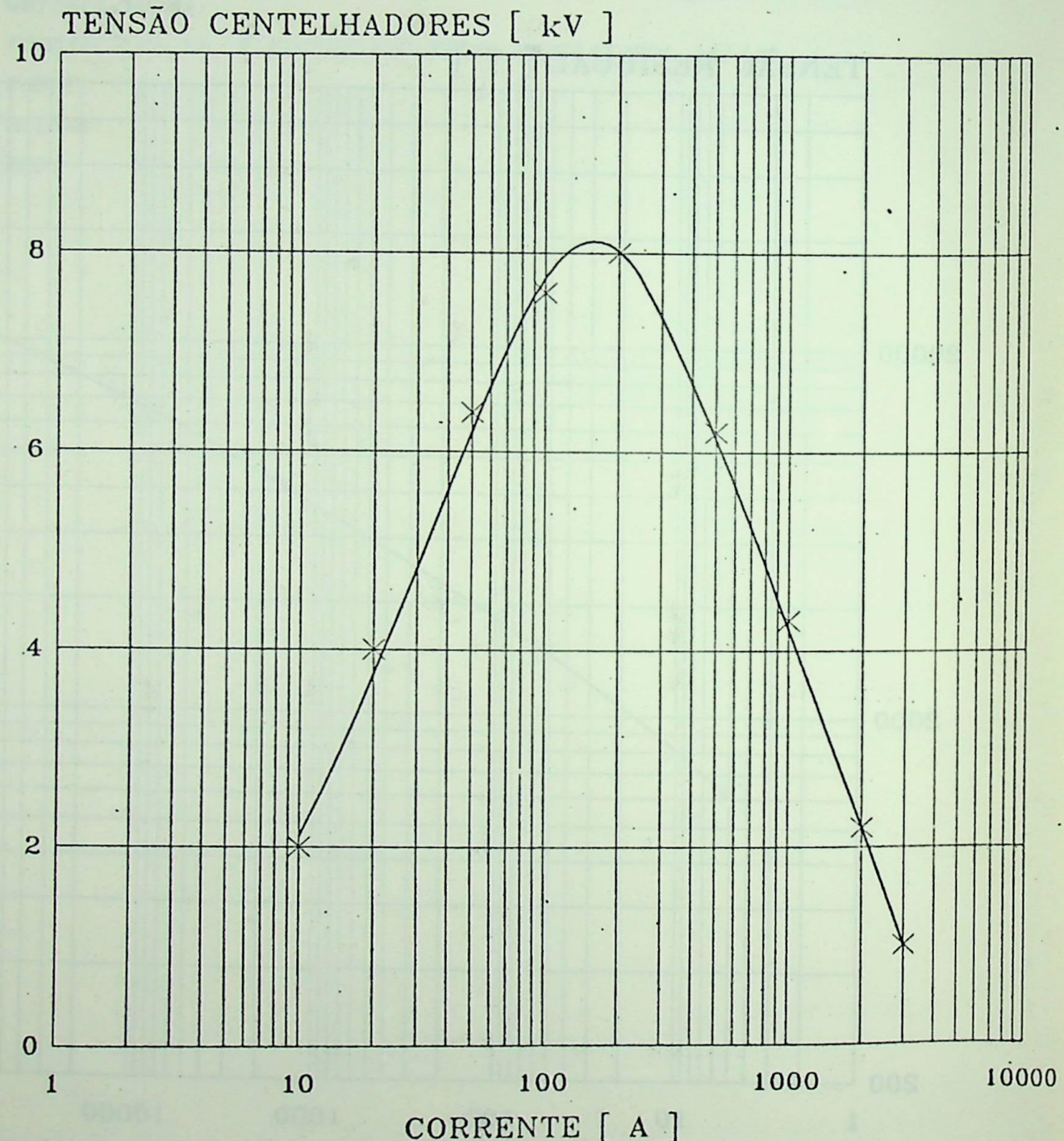


Figura II.2 - Aproximação para a Característica Tensão de Arco versus Corrente de Descarga Mostrada na Tabela II.2

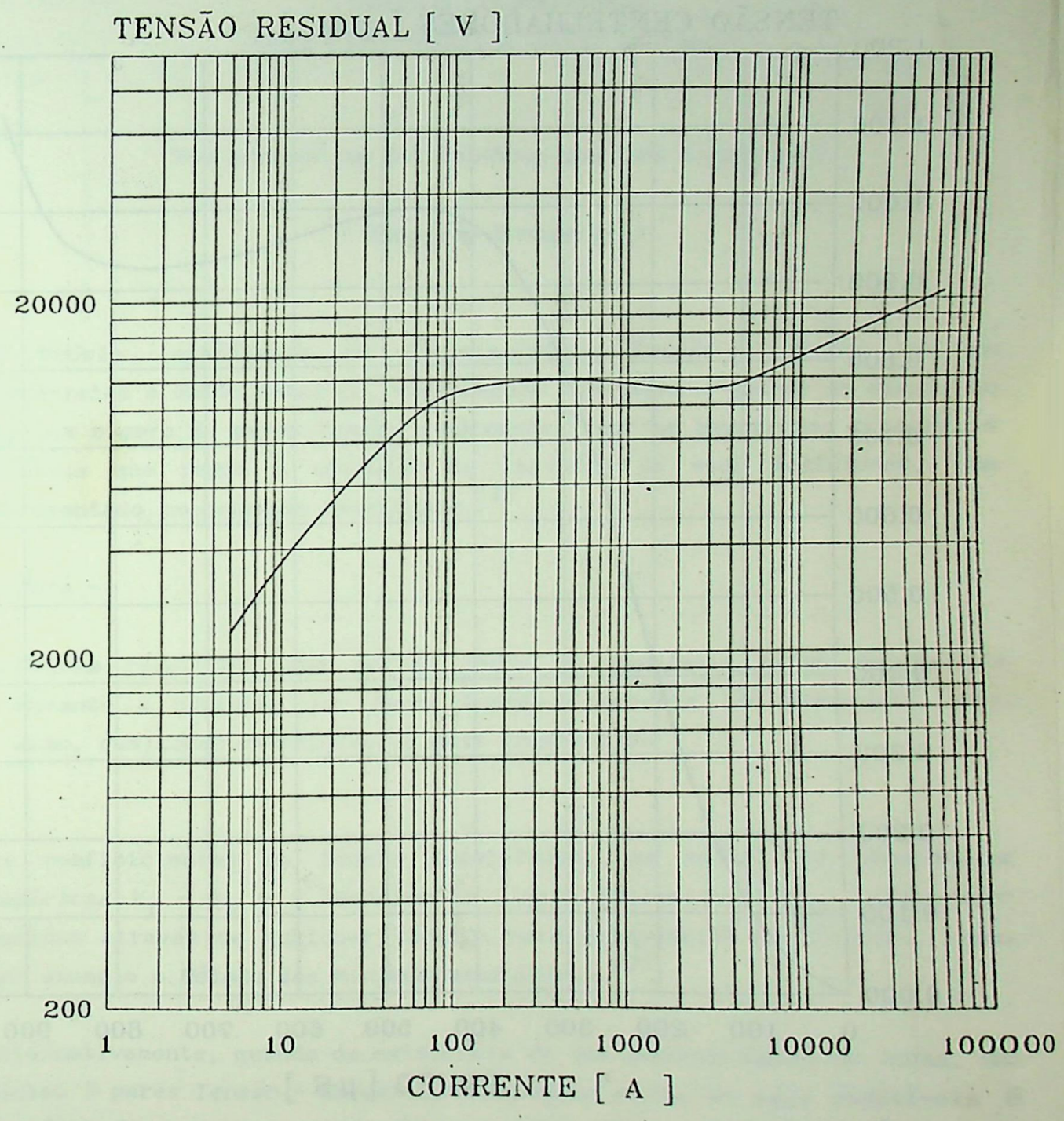


Figura II.3 - Aproximação para a Característica Tensão Corrente de Descarga de um Pára-raios com Centelhadores Ativos.

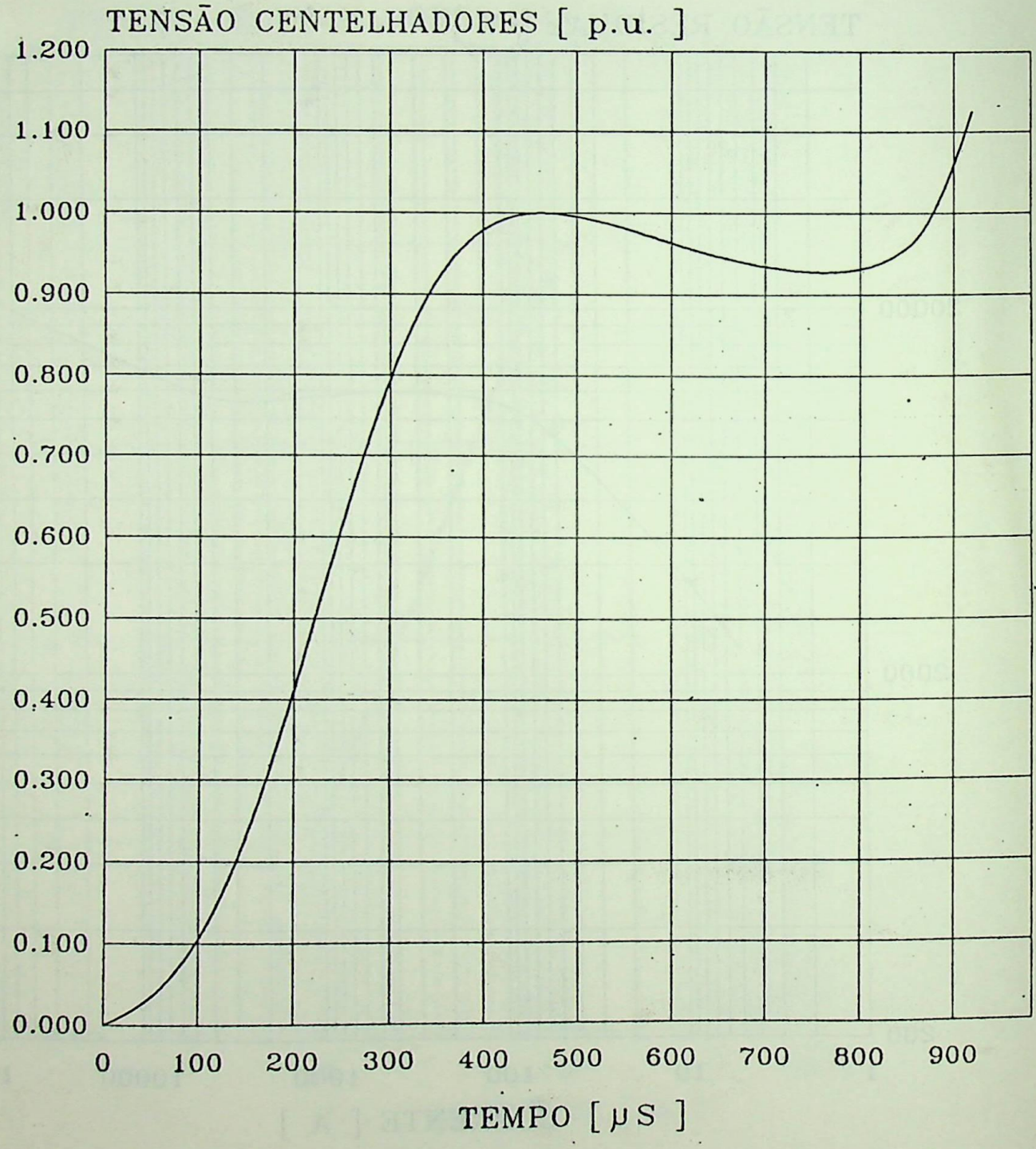


Figura II.4 - Aproximação para a Característica Tensão de Arco versus Tempo de um Centelhador Ativo

ANEXO - III

MODELO LOGARÍTMICO PARA PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

You can ask me for anything you like except time

(Napoleão Bonaparte)

O *Modelo Logarítmico* da *Característica Tensão - Corrente* de um pára-raios a óxido metálico, recomendado basicamente quando se dispõe de um bom número de pares *Tensão - Corrente*,* por se basear nos princípios físicos que regem a condução de corrente de seus resistores, tem apresentado execelentes resultados.[1]

* *Nota -*

→ *Convém ressaltar, que nestes casos os possíveis erros de medida durante a obtenção dos pares Tensão - Corrente são atenuados, bem como, quaisquer extrapolações mais confiáveis.*

Os coeficicientes do *Modelo Logarítmico*, ou sejam, as *Constantes Empíricas* k_1 - k_2 e a *Resistência Linear Equivalente* $R_{LEq.}$ podem ser obtidos através de qualquer técnica para aproximação de funções, como por exemplo o *Método dos Mínimos Quadráticos.*[2]

Alternativamente, quando da existência de uma pequena massa de dados, no mínimo *3 pares Tensão - Corrente*, escolhidos entre os mais confiáveis é possível fazer uso de uma série de expressões simplificadas* para o cálculo dos coeficientes do *Modelo Logarítmico*, no entanto, convém ressaltar que nestes casos podem ocorrer problemas relativos a

confiabilidade das extrapolações.

* Nota -

→ As expressões para o cálculo das constantes k_1 e k_2 devem ser resolvidas por Métodos Numéricos para Determinação de Raízes, ou seja, Bissecção ou Newtow, disponíveis na maioria das calculadoras de bolso e, portanto, não impõem maiores dificuldades.

→ Cálculo de k_1 :-

$$U_2 = k_1 \left(\frac{1}{k_2 - Ln(I_2)} - \frac{I_2}{I_3(k_2 - Ln(I_3))} \right) + \frac{I_1 U_3}{I_3}$$

→ Cálculo de k_2 :-

$$U_1 = \frac{U_2 - \frac{I_2}{I_3} U_3}{(k_2 - Ln(I_1))\left(\frac{1}{k_2 - Ln(I_2)} - \frac{I_2}{I_3(k_2 - Ln(I_3))} \right)} + \frac{I_1 U_3}{I_3} -$$

$$- \frac{I_1}{I_3} \frac{U_2 - \frac{I_2}{I_3} U_3}{(k_2 - Ln(I_3))\left(\frac{1}{k_2 - Ln(I_2)} - \frac{I_2}{I_3(k_2 - Ln(I_3))} \right)}$$

→ Cálculo de $R_{LEq.}$:-

$$R_{LEq.} = \frac{1}{I_3} \left(U_3 - \frac{k_1}{k_2 - Ln(I_3)} \right)$$

De modo a ilustrar a capacidade de representação do *Modelo Logarítmico* sejam os exemplos a seguir:

Característica Tensão Residual - Corrente de Descarga		
	Tensão [Volts]	Corrente [Ampéres]
1	4000	1
2	4400	8
3	4500	15
4	4800	60
5	5200	350
6	5300	500
7	5350	600
8	5600	1500
9	5900	3000
10	6200	5000
11	6400	7000
12	6750	10000
13	7000	12500
14	7200	15000
15	7500	20000
16	8000	30000
17	8400	40000
18	8700	50000
19	9100	65000

Tabela III.1 - Dados Tensão Residual versus Corrente de Descarga

Característica Tensão Residual - Corrente de Descarga *		
	Tensão [Volts]	Corrente [Ampéres]
1	4200	1
2	6900	1500
3	7200	3000
4	7500	5000
5	8000	10000
6	8600	20000
7	9000	30000
8	10300	40000

Tabela III.2 - Dados Tensão Residual versus Corrente de Descarga

* Nota -

→ Pára-raios GENERAL ELECTRIC TRANQUEL XE - 3.0 kV

→ Característica Tensão Residual - Corrente de Descarga ## Exemplo I:-

$$U_R(I) = \frac{100478.899}{25.117273 - Ln(\ I\ )} + 0.031718\ I$$

→ Característica Tensão Residual - Corrente de Descarga ## Exemplo II:-

$$U_R(I) = \frac{81505.047}{19.405960 - Ln(\ I\ )} - 0.0202017\ I$$

** Este Modelo não apresenta significado físico **

As expressões simplificadas para o cálculo dos coeficientes quando aplicadas aos dados da Tabela *III.1* implicam nos seguintes resultados:

→ *Pares:- (1, 4000); (1500, 5600); (10000, 6750)*

$$U_R(I) = \frac{108212.692}{26.985900 - Ln(I)} + 0.066228\ I$$

→ *Pares:- (1500, 5600); (10000, 6750); (65000, 9100)*

$$U_R(I) = \frac{69092.347}{19.706754 - Ln(I)} + 0.016753\ I$$

```
C
C
C     PROGRAMA PARA APROXIMAÇÃO DA CARACTERÍSTICA DE UM PARA-RAIOS A
C     ÓXIDO METÁLICO ATRAVÉS DA FUNÇÃO:
C
C
C                          V(I) = C1/(C2 - LN(I))+Rs*I
C
C
C     O PROGRAMA EM QUESTÃO CALCULA OS MELHORES COEFICIENTES PARA UM
C     CONJUNTO DE PARES ORDENADOS "TENSÃO-CORRENTE" SOB A FORMA DE UMA
C     FUNÇÃO LOGARÍTMICA.
C
C     OS DADOS SÃO FORNECIDOS SOB FORMA DE PARES DE PONTOS
C     [CORRENTE,TENSÃO]
C
C     O PROGRAMA É INTERATIVO, OU SEJA, O USUÁRIO PODE TOMAR DECISÕES
C     SOBRE O ANDAMENTO DO MESMO EM FUNÇÃO DOS RESULTADOS E DE SUAS
C     NECESSIDADES.
C
C
C     O PROGRAMA ESTÁ DIMENSIONADO PARA UM NÚMERO DE PARES A APROXIMAR
C     (MÁXIMO DE 51 E, QUALQUER VALOR MENOR OU IGUAL A ZERO OU SUPERIOR
C     A 51 INTERROMPERÁ O PROGRAMA) E EMITIRÁ A MENSAGEM:
C
C                          ###ERRO NÚMERO 1###.
C
C     LOGO APÓS SEGUE A PERGUNTA QUAL ALTERNATIVA DESEJADA, CONFORME
C     ABAIXO :
C
C          1*** CÁLCULO DOS COEFICIENTES
C          2*** STOP
C
C     UMA VEZ EXECUTADA A SUBROTINA DE CÁLCULO O PROGRAMA IMPRIME UM
C     VALOR DE ERRO PERCENTUAL MÁXIMO EM RELAÇÃO AOS PONTOS DADOS E
C     PERGUNTA AO USUÁRIO SE DEVE OU NÃO PROSSEGUIR.
```

```
C
C     CASO FOR DESEJADO O PROGRAMA RETORNA, ESPERANDO UMA ORDEM SOBRE
C     UMA NOVA TENTATIVA DE CÁLCULO OU PARA FINALIZAR CONFORME VISTO
C     ACIMA.
C
C     CASO A APROXIMAÇÃO FOR ACEITA, O PROGRAMA IMPRIME OS COEFICIENTES
C     DA MESMA EM FORMULÁRIO CONTÍNUO E AGUARDA ORDEM PARA PLOTAR AS
C     CURVAS DE TENSÃO - CORRENTE E RESISTÊNCIA - CORRENTE ASSOCIADAS
C
C     PARA ISTO ÉNECESSÁRIO SE INTRODUZIR O VALOR FINAL DE CORRENTE E O
C     VALOR DO INCREMENTO.
C
C     O PROGRAMA CALCULA O NÚMERO DE PONTOS A SER PLOTADO E, CASO O
C     MESMO SEJA SUPERIOR A 501 ELE ESTE VALOR COMO DEFAULT.
C
C     É FACULTATIVO AO USUÁRIO MUDAR O VALOR FINAL POSITIVO DO EIXO DAS
C     TENSÕES OU DAS RESISTÊNCIAS CASO O MESMO ASSIM O DESEJAR.
C
C     LOGO APÓS O PROGRAMA PERGUNTA AO USUÁRIO SE O MESMO DESEJA MAIS
C     ALGUMA COISA, SENDO POSSÍVEL SE ESCOLHER AS SEGUINTES OPÇÕES:
C
C
C           1### LER NOVA CARACTERÍSTICA A APROXIMAR
C           2### REALIZAR UM NOVO CÁLCULO DE COEFICIENTES
C           3### PLOTAR NOVAS CURVAS
C           4### STOP
C
C
C     ********** INÍCIO DO PROGRAMA PRINCIPAL **********
C
C        INTERFACE PARA COMANDO DISPLAY - LINGUAGEM C
C
      interface to integer*2 function system [c]
     +          (string[reference])
      character*1 string
      end
```

```
      interface to integer*2 function spawn
     +            [c,varying,alias:'spawnlp']
     +            (mode)
      integer*2 mode
      end
C
C       FINAL DAS INSTRUÇÕES DA INTERFACE DO COMANDO DISPLAY
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
       integer*2 system, spawn
C
C       DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DADOS DE PLACA
C
      CHARACTER*15 FABRIC,TIPO
C
C       DIMENSINAMENTO DAS VARIÁVEIS
C
      DIMENSION CORR(51),TENSAO(51),CORR1(501),XSAIDA(501,1),
     *XRES(501,1),XCOF(3)
C
C       DEFINIÇÃO ÁREAS EM COMMON
C
      COMMON /PART1/CORR,TENSAO
      COMMON /PART2/FABRIC,TIPO
C
C       EQUAÇÕES DE SISTEMA
C
       i = system('echo off' c)
       i = system('cls' c)
C
C       DEFINIÇÃO DO ARQUIVO RELATIVO AO TERMINAL DE VÍDEO
C
      OPEN(1,FILE='CON:')
      WRITE(1,1000)
 1000 FORMAT(4(/),8X,'PROGRAMA PARA CALCULO DOS COEFICIENTES DA CAR',
     *'ACTERISTICA',2(/),22X,'TENSAO - CORRENTE DE PARA-RAIOS',11(/),
```

```
     *27X,'MANUEL L. B. MARTINEZ',3(/))
      PAUSE
C
C          DEFINIÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS
C
      OPEN(3,FILE='LPT1:')
      OPEN(4,FILE='CVV-I.PR',STATUS='NEW')
C
C          TESTE DA CONDIÇÃO DA IMPRESSORA
C
    5 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1001)
 1001 FORMAT(3(/),5X,'VERIFICACAO DAS CONDICOES DO SISTEMA',4(/),5X,
     *'A IMPRESSORA ESTAH HABILITADA ( 1/SIM; 0/,NAO ) ? ')
      READ(*,*)ISGIP
      IF(ISGIP.LT.0.OR.ISGIP.GT.1) GOTO 5
      WRITE(1,1002)
 1002 FORMAT(1(/),5X,'O PROGRAMA APRX ESTAH CARREGADO NO DRIVE - A ',
     *'( 1/SIM; 0/NAO ) ? ')
      READ(*,*)LDRV
      IF(LDRV.LT.0.OR.LDRV.GT.1) GOTO 5
      WRITE(1,1003)
 1003 FORMAT(1(/),5X,'O PROGRAMA ENERGRAPHICS ESTAH ALOCADO EM -','C'
     *':ENERGRAP ( 1/SIM; 0/NAO ) ? ')
      READ(*,*)IENER
      IF(IENER.LT.0.OR.IENER.GT.1) GOTO 5
   10 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1004)
 1004 FORMAT(3(/),5X,'----- DIRETORIO ARQUIVOS *.DAT -----',2(/))
          i = system('dir *.dat/w' c)
      WRITE(1,1005)
 1005 FORMAT(5(/),5X,'----- CARREGAR DADOS ARQUIVO - => ')
          i = system('newdata.exe' c)
C
```

```
C          LEITURA DO NÚMERO DE PONTOS A APROXIMAR
C
      OPEN(2,FILE='DATV-I.$$$',STATUS='OLD')
      READ(2,2000)FABRIC,TIPO,VOLTN
 2000 FORMAT(5(/),1X,F10.0,1X,A16,1X,A17)
      READ(2,2001)NPONTOS
 2001 FORMAT(5(/),7X,I2,4(/))
      IF(NPONTOS.LE.0.OR.NPONTOS.GT.51) CALL XERROR(1,0)
C
C          LEITURA DO CONJUNTO DE PONTOS A APROXIMAR
C
      READ(2,2002)(CORR(J),TENSAO(J),J=1,NPONTOS)
 2002 FORMAT(8F10.0)
   15 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1006)
 1006 FORMAT(3(/),5X,'INTRODUZIR OPCAO :',4(/),5X,'1 # CALCULO DOS ',
     *'COEFICIENTES',3(/),5X,'2 # STOP',6(/),5X,'OPCAO = ? ')
      READ(*,*) ISG
      GO TO (20,70),ISG
C
C          CHAMADA DA SUBROTINA PARA CALCULO DOS COEFICIENTES
C
   20 CONTINUE
C
C          CONDIÇÕES INICIAIS
C
      XCOF(1)=0.0
      XCOF(2)=0.01*VOLTN
      XCOF(3)=1.66667E-5*VOLTN
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1007)
 1007 FORMAT(4(/),5X,'CALCULO DOS COEFICIENTES DA FUNCAO LOGARITMIC'
     *,'A')
          i = system('cls' c)
      CALL COEFIC(XCOF,NPONTOS,INDCT)
```

```
      IF(INDCT.EQ.0) GO TO 15
C
C          IMPRESSÃO DOS RESULTADOS EM FORMULÁRIO
C
      IF (ISGIP.EQ.0) GO TO 30
      WRITE(3,3001)FABRIC,TIPO,VOLTN
 3001 FORMAT(1H1,15(/),10X,'APROXIMACAO CARACTERISTICA V - I PARA-',
     *'RAIOS',3(/),1X,A16,1X,A17,1X,A10,3(/),10X,'FUNCAO LOGARITMI',
     *'CA',2(/))
      WRITE(3,3002)
 3002 FORMAT(10X,'TEM-SE OS SEGUINTES COEFICIENTES:',3(/))
      DO 25 I=1,2
   25 WRITE(3,3003)I,XCOF(I)
 3003 FORMAT(20X,'C',I1,' ###',G27.20,/)
      WRITE(3,3004)XCOF(3)
 3004 FORMAT(20X,'Rs ###',G27.20,/)
      WRITE(3,3005)
 3005 FORMAT(2(/),10X,'EQ. NA FORMA ###',2(/),15X,'V(I)=C1/(C2+LN(',
     *'I))+Rs*I')
C
C          IMPRIMIR COEFICIENTES DA FUNÇÃO
C
   30 CONTINUE
      REWIND 4
      WRITE(4,4001)CORR(NPONTOS)
 4001 FORMAT(F10.4)
      WRITE(4,4002)(XCOF(I),I=1,3)
 4002 FORMAT(4G20.13)
      GO TO 35
C
C          OBTENÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS
C
C          TENSÃO - CORRENTE E RESISTÊNCIA - CORRENTE
C
C
   35 CONTINUE
```

```
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1008)
 1008 FORMAT(3(/),15X,'CARACTERISTICA TENSAO - CORRENTE (CALCULADA)',
     *5(/),5X,'TRACO CURVA APROXIMADA ( 1/SIM;0/NAO ) ?')
      READ(*,*)INDC
      IF(INDC.LT.0.OR.INDC.GT.1) GOTO 35
      IF(INDC.EQ.0) GO TO 50
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1009)
 1009 FORMAT(3(/),15X,'CARACTERISTICA TENSAO - CORRENTE (CALCULADA)',
     *4(/),5X,'INTRODUZIR VALOR FINAL P/ A CORRENTE ?')
      READ(*,*)XFCORR
      IF(IVER.EQ.0) GOTO 15
C
C         LEITURA DO INCREMENTO PARA CÁLCULO
C
      WRITE(1,1010)
 1010 FORMAT(5X,'INTRODUZIR INCREMENTO PARA VERIFICACÀO ?')
      READ(*,*)XINC
C
C         CÁLCULO DO NÚMERO DE PONTOS A VERIFICAR
C
      NPNT=1+INT(XFCORR/XINC+ 0.001)
      IF(NPNT.LE.0.OR.NPNT.GT.501)NPNT=501
      XINC=XFCORR/(NPNT-1)
      DO 40 I=1,NPNT
   40 CORR1(I)=(I-1)*XINC
C
C         CONSTRUÇÃO DO VETOR RESPOSTA FUNÇÃO LOGARÍTMICA
C
      DO 45 J=1,NPNT
      XSAIDA(J,1)=XCOF(1)/(XCOF(2)-LOG(CORR1(J)))+XCOF(3)*CORR1(J)
   45 CONTINUE
C
C         IMPRESSÃO DO NÚMERO DE PONTOS - VETOR RESPOSTA
C
```

```
      OPEN(5,FILE='CURVV-I.PR',STATUS='NEW')
      WRITE(5,5001)(CORR1(J),XSAIDA(J,1),J=1,NPNT)
 5001 FORMAT(2F20.10)
C
C          CHAMADA DA SUBROTINA DE PLOTAGEM
C
      OPEN(7,FILE='DADOSPR.DAT',STATUS='NEW')
      CALL PLOTER(1,NPNT,LDRV,VOLTN,IENER)
C
C
C          CÁLCULO DA RESISTÊNCIA INCREMENTAL
C
   50 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1011)
 1011 FORMAT(3(/),10X,'CURVA DA RESISTENCIA INCREMENTAL',5(/),5X,'CA'
     *,'LCULADA COMO DERIVADA DA CARACTERISTICA TENSAO - CORRENTE',5(
     */),5X,'TRACO CURVA RESISTENCIA INCREMENTAL ( 1/SIM;0/NAO ) ?')
      READ(*,*)IND
      IF(IND.LT.0.OR.IND.GT.1) GOTO 50
      IXSTOR=0
      IF(IND.EQ.0)GO TO 65
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1012)
 1012 FORMAT(3(/),10X,'CURVA DA RESISTENCIA INCREMENTAL',4(/),5X,'IN'
     *'TRODUZIR VALOR FINAL P/ CORRENTE ?')
      READ(*,*)XFCORR
C
C          LEITURA DO INCREMENTO PARA CÁLCULO
C
      WRITE(1,1013)
 1013 FORMAT(5X,'INTRODUZIR INCREMENTO P/ VERIFICACAO ?')
      READ(*,*)XINC
      NPNT=1+INT(XFCORR/XINC+0.001)
      IF(NPNT.LE.0.OR.NPNT.GT.501) NPNT=501
      XINC=XFCORR/(NPNT-1)
```

```
      DO 55 I=1,NPNT
   55 CORR1(I)=(I-1)*XINC
      DO 60 J=1,NPNT
C
C          DERIVAR FUNÇÃO LOGARÍTMICA
C
C          CÁLCULO DA RESISTÊNCIA INCREMENTAL
C
      XRES(J,1)=-(XCOF(1)/CORR(J)/(XCOF(2)-LOG(CORR(J)))**2)+XCOF(3)
   60 CONTINUE
C
C          IMPRESSÃO DO NÚMERO DE PONTOS, VETOR RESPOSTA
C
      OPEN(6,FILE='CURVL-I.TC',STATUS='NEW')
      WRITE(6,6001)(CORR1(J),XRES(J,1),J=1,NPNT)
 6001 FORMAT(2F20.10)
C
C
C          CHAMADA DO PLOTER
C
      OPEN(7,FILE='DADOSPR.DAT',STATUS='NEW')
      CALL PLOTER(2,NPNT,LDRV,VOLTN,IENER)
   65 CONTINUE
         i = system('cls' c)
      WRITE(1,1016)
 1016 FORMAT(3(/),5X,'INTRODUZIR OPCAO :',4(/),5X,'1 ## LER NOVA CA',
     *'RACTERISTICA A APROXIMAR',3(/),5X,'2 ## REALIZAR UM NOVO CAL',
     *'CULO DE COEFICIENTES',3(/),5X,'3 ## NOVAS CURVAS',3(/),5X,'4',
     *' ## STOP ',6(/),5X,'OPCAO = ?')
      READ(*,*)IND
      IF(IND.LT.0.OR.IND.GE.4) GO TO 70
      GO TO (10,15,35,70),IND
C
C          FINALIZAR
C
   70 CLOSE(7)
```

```
      CLOSE(6)
      CLOSE(5)
      CLOSE(4)
      CLOSE(3)
      CLOSE(2)
      CLOSE(1)
          i = system('del datv-i.$$$' c)
          i = system('echo on' c)
      STOP
      END
C
C
C ********************** SUBROTINAS AUXILIARES ***************************
C
C
C         XERROR # ERRROS
C
C         GJORDAN # RESOLUÇÃO DE SISTEMAS
C
C         SUBROTINA XERROR
C
      SUBROUTINE XERROR(I,J)
          integer*2 system, spawn
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1000)I
 1000 FORMAT(5(/),5X,'ERRO NUMERO ',I3,' VERIFIQUE!!!!!')
      STOP
      END
C
C         SUBROTINA PARA RESOLVER SISTEMA DE EQUAÇÕES LINEARES
C         PELO MÉTODO DE GAUSS-JORDAN
C
      SUBROUTINE GJORDN(A,N,M,NN,MM)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(N,M)
      I1=1
```

```
      ISG=2
      N1=NN
      N2=NN-1
      M1=MM
      DO 10 I=1,N2
      CALL ELIMIM(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      CALL TROCA(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      ISG=ISG+1
   10 M1=M1-1
      CALL ELIMIM(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      RETURN
      END
C
C          ELIMINAÇÃO DO SISTEMA GAUSS-JORDAN
C
      SUBROUTINE ELIMIM(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(N,M)
      IF(DABS(A(1,1)).LT.1.0D-45) CALL TROCAR(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      DO 10 I1=2,M1
   10 A(1,I1)=A(1,I1)/A(1,1)
      DO 20 I1=2,N1
      DO 20 I2=2,M1
   20 A(I1,I2)=A(I1,I2)- A(I1,1)*A(1,I2)
      DO 30 I1=1,N1
      DO 30 I2=2,M1
   30 A(I1,I2-1)=A(I1,I2)
      RETURN
      END
C
C          TROCA SISTEMA GAUSS JORDAN
C
      SUBROUTINE TROCA(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(N,M)
      I1=ISG
```

```
   10 DO 20 I2=1,M1
      T=A(I1,I2)
      A(I1,I2)=A(I1-1,I2)
   20 A(I1-1,I2)=T
      IF(I1.EQ.2) GO TO 30
      I1=I1-1
      GO TO 10
   30 RETURN
      END
C
C          TROCAR SISTEMA GAUSS-JORDAN
C
      SUBROUTINE TROCAR(A,N,M,N1,M1,I,ISG)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(N,M)
          integer*2 system, spawn
      IF(I.EQ.N1)GO TO 50
      DO 10 I1=ISG,N1
      IF(DABS(A(I1,1)).GT.1.0D-45) GO TO 30
   10 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1000)I
 1000 FORMAT(3(/),5X,'APOS ',I2,' ELIMINACOES O SISTEMA EH INDETERMI'
     *,'NADO',2(/))
      STOP
   30 DO 40 I2=1,M1
      T=A(I1,I2)
      A(I1,I2)=A(1,I2)
   40 A(1,I2)=T
      RETURN
   50 IF(DABS(A(1,2)).GT.1.0D-45) GO TO 70
      GO TO 30
   70 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1001)
 1001 FORMAT(3(/),5X,'O SISTEMA EH IMPOSSIVEL',2(/))
```

```
      STOP
      END
C
C
C ************** SUBROTINA PARA O CÁLCULO DOS COEFICIENTES *************
C
C
C         COEFIC: CÁLCULO DO COEFICIENTES DA FUNÇÃO LOGARÍTMICA
C
C         PLOTER # ACESSO AO PROGRAMA ENERGRAPHICS
C
C
C         SUBROTINA COEFICIENTES DA FUNÇÃO LOGARÍTMICA
C
C
      SUBROUTINE COEFIC(XCOF,NPONTOS,INDCT)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C
C         DIMENSIONAMENTO E DEFINIÇÃO DE REGIÕES EM COMMON
C
      DIMENSION XSOMA1(9),XSOMA2(3)
      DIMENSION CORR(51),TENSAO(51),A(3,4),XCOF(3),XCOFOTIMO(3)
      COMMON /PART1/CORR,TENSAO
          integer*2 system, spawn
C
C         CARREGAR DADOS PARA A EXECUÇÃO DA SUBROTINA
C
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1000)
 1000 FORMAT(3(/),10X,'SUBROTINA CALCULO DOS COEFICIENTES',4(/),10X,
     *'INTRODUZIR LIMITE NUMERO ITERACOES ? ')
      READ(*,*)LIMIT
      WRITE(1,1001)
 1001 FORMAT(10X,'INTRODUZIR TOLERANCIA PERCENTUAL (MAXIMO 1% ) ? ')
      READ(*,*)XTOLRANC
      IF(LIMIT.LE.0.OR.LIMIT.GT.50)LIMIT=20
```

```
      IF(XTOLRANC.LT.1.)XTOLRANC=1.
    5 ITERACT=0
      DO 10 I=1,3
   10 XCOFOTIMO(I)=0.DO
      ITEROTIMO=0
      IPOTIMO=0
      XMAXOTIMO=1000.
      INDSETOT=0
C
C          ZERAR SOMADORES
C
   20 CONTINUE
      DO 30 I=1,9
   30 XSOMA1(I)=0.DO
      DO 40 I=1,3
   40 XSOMA2(I)=0.DO
      ITERACT=ITERACT+1
C
C
C          DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES
C
C
      DO 50 N=1,NPONTOS
      XPI=1.0DO/(XCOF(2)-LOG(CORR(N)))**2
      XSOMA1(1)=XSOMA1(1)+XPI
      XSOMA1(2)=XSOMA1(2)+XPI*(XCOF(3)*CORR(N)-TENSAO(N))
      XSOMA1(3)=XSOMA1(3)-XPI*CORR(N)*LOG(CORR(N))
      XSOMA1(4)=XSOMA1(4)+XPI*(XCOF(3)*CORR(N)-TENSAO(N))
      XSOMA1(5)=XSOMA1(5)+XPI*(XCOF(3)*CORR(N)-TENSAO(N))**2
      XSOMA1(6)=XSOMA1(6)-XPI*(XCOF(3)*CORR(N)-TENSAO(N))*CORR(N)*
     *LOG(CORR(N))
      XSOMA1(7)=XSOMA1(7)+XPI*(XCOF(2)*CORR(N)-CORR(N)*LOG(CORR(N))
      XSOMA1(8)=XSOMA1(8)+XPI*(XCOF(2)*CORR(N)-CORR(N)*LOG(CORR(N))*
     *(XCOF(3)*CORR(N)-TENSAO(N))
      XSOMA1(9)=XSOMA1(9)-XPI*(XCOF(2)*CORR(N)-CORR(N)*LOG(CORR(N))*
     *CORR(N)*LOG(CORR(N))
```

```
C
C          VETOR RESPOSTA DA MATRIZ DOS COEFICIENTES
C
      XSOMA2(1)=XSOMA2(1)-XPI*TENSAO(N)*LOG(CORR(N))
      XSOMA2(2)=XSOMA2(2)-XPI*TENSAO(N)*LOG(CORR(N))*(XCOF(3)*CORR(N)
     *-TENSAO(N))
      XSOMA2(3)=XSOMA2(3)-XPI*(XCOF(2)*CORR(N)-CORR(N)*LOG(CORR(N))*
     *TENSAO(N)*LOG(CORR(N)
   50 CONTINUE
C
C          CARREGAR MATRIZ DOS COEFICIENTES
C
      ICNT=0
      DO 60 J=1,3
      DO 60 I=1,3
      ICNT=ICNT+1
   60 A(J,I)=XSOMA1(ICNT)
C
C          CARREGAR VETOR RESPOSTA DA MATRIZ
C
      DO 70 I=1,3
   70 A(I,4)=XSOMA2(I)
C
C          RESOLVER O SISTEMA
C
      CALL GJORDN(A,3,4,3,4)
      ICNT=3
      DO 80 I=1,3
      XCOF(I)=A(ICNT,1)
      ICNT=ICNT-1
   80 CONTINUE
C
C          TESTE SE FOI ALCANÇADO O LIMITE PARA AS ITERAÇÕES
C
      IF(ITERACT.NE.LIMIT) GO TO 90
      GO TO 180
```

```
C
C          VERIFICAR COEFICIENTES CALCULADOS
C
   90 CONTINUE
      IPHIS=0
      IF(XCOF(1).LE.1.D-10) GOTO 100
      IF(XCOF(3).LE.1.D-10) IPHIS=1
      GOTO 110
  100 CONTINUE
      IF(XCOF(3).LE.1.D-10) IPHIS=1
C
C          DETERMINAÇÃO DO ERRO PERCENTUAL MÁXIMO OBSERVADO
C
  110 XMAX=0.DO
      ISG=0
      DO 120 J=1,NPONTOS
      ERRO=0.DO
C
C          CÁLCULO DA FUNÇÃO PONTO A PONTO
C
      XSAIDA=XCOF(1)/(XCOF(2)-LOG(CORR(J)))+XCOF(3)*CORR(J)
C
C          DETERMINAÇÃO DO ERRO
C
      IF(DABS(TENSAO(J)).LE.1.D-10)GO TO 120
      ERRO=(XSAIDA-TENSAO(J))/TENSAO(J)*100.DO
      IF(DABS(ERRO).GT.XTOLRANC) ISG=1
      IF(DABS(ERRO).GT.XMAX) XMAX=DABS(ERRO)
  120 CONTINUE
C
C          TESTAR SE A TOLERÂNCIA FOI ULTRAPASSADA
C
      IF(ISG.EQ.1) GO TO 130
      GO TO 170
  130 CONTINUE
          i = system('cls' c)
```

```
      WRITE(1,1002)ITERACT,XCOF(1),XCOF(2),XCOF(3)
 1002 FORMAT(5(/),2X,'#### DADOS ITERACAO #### ',I2,3(/),5X,'C1 = ',
     *F15.5,2(/),5X,'C2 = ',F15.5,2(/),5X,'Rs = ',F15.5)
      IF(IPHIS.EQ.0) GOTO 140
      WRITE(1,1003)
 1003 FORMAT(3(/),2X,'### FUNCAO SEM SIGNIFICADO FISICO')
  140 CONTINUE
      WRITE(1,1004)
 1004 FORMAT(4(/))
      PAUSE
C
C         TESTE SE A TOLERÂNCIA VERIFICADA É MENOR QUE A MELHOR ATUAL
C
      IF(DABS(XMAX).GT.XMAXOTIMO) GO TO 160
C
C         ASSUMIR ATUAL COMO MELHOR APROXIMAÇÃO
C
      INDSETOT=1
      IPHISOTIMO=IPHIS
      ITEROTIMO=ITERACT
      XMAXOTIMO=DABS(XMAX)
      DO 150 I=1,3
  150 XCOFOTIMO(I)=XCOF(I)
  160 IF(ITERACT.EQ.LIMIT) GO TO 180
      GO TO 20
C
C         SAÍDA DE DADOS
C
  170 CONTINUE
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1005)XMAX,ITERACT
 1005 FORMAT(3(/),15X,'SUBROTINA FUNCAO LOGARITMICA - DADOS PARCIAIS'
     *,4(/),5X,'ERRO PERCENTUAL MAXIMO OBSERVADO ==> ',G15.7,2(/),5X,
     *'ITERACAO EM QUESTAO ==> ',I3)
      IF(IPHIS.EQ.0) GOTO 175
      WRITE(1,1006)
```

```
1006 FORMAT(2(/),5X,'### FUNCAO SEM SIGNIFICADO FISICO')
 175 CONTINUE
     WRITE(1,1007)
1007 FORMAT(3(/),5X,'RESULTADOS OBTIDOS SAO SATISFATORIOS ( 1/SIM',
    *';0/NAO ) ? ')
     READ(*,*)INDCT
     GO TO 200
 180 CONTINUE
         i = system('cls' c)
     WRITE(1,1008)XMAXOTIMO,ITEROTIMO
1008 FORMAT(3(/),15X,'SUBROTINA FUNCAO LOGARITIMICA - DADOS PARCIA',
    *'IS',4(/),5X,'ESTOUROU LIMITES PARA ITERACOES !!!!',2(/),5X,'E'
    *,'RRO MINIMO PERCENTUAL OBSERVADO = ',G15.7,2(/),5X,'ITERACAO '
    *,'EM QUESTAO = ',I3,7(/),5X,'RESULTADOS SAO SATIFATORIOS (1/SI'
    *,'M;0/NAO) ? ')
     READ(*,*)INDCT
     IF(INDCT.EQ.0) GO TO 200
     IF(IPOTIMO.EQ.0) GOTO 185
         i = system('cls' c)
     WRITE(1,1009)
1009 FORMAT(5(/),2X,'### FUNCAO SEM SIGNIFICADO FISICO',10(/))
     PAUSE
 185 CONTINUE
     DO 190 I=1,3
     XCOF(I)=XCOFOTIMO(I)
 190 CONTINUE
 200 RETURN
     END
C
C        SUBROTINA PLOTER
C
     SUBROUTINE PLOTER(K,NPONTOS,LDRV,VOLTN,IENER)
C
C        DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS E DADOS DE PLACA
C
     CHARACTER*15 FABRIC,TIPO
```

```
C
C          DIMENSINAMENTO DAS VARIÁVEIS
C
      DIMENSION CORR1(501),XSAIDA(501),XRES(501)
C
C          DEFINIÇÃO ÁREAS EM COMMON
C
      COMMON /PART2/FABRIC,TIPO
          integer*2 system, spawn
C
C          VERIFICAÇÃO DA EXISTÊNCIA DO PROGRAMA ENERGRAPHICS
C
      IF(IENER.EQ.0) GO TO 110
      GO TO (10,50),K
   10 IF(LDRV.EQ.0) GO TO 15
      WRITE(3,3001)
 3001 FORMAT(1H1)
   15 OPEN(5,FILE='CURVV-I.PR',STATUS='OLD')
      READ(5,5001)(CORR1(J),XSAIDA(J),J=1,NPONTOS)
 5001 FORMAT(2F20.10)
      IF(CORR1(1).LT.1E-6.OR.XSAIDA(1).LT.1E-6) GO TO 20
      GO TO 40
   20 NPONTOS=NPONTOS-1
      DO 30 J=1,NPONTOS
      CORR1(J)=CORR1(J+1)
   30 XSAIDA(J)=XSAIDA(J+1)
C
C          PREPARAR DADOS DE SAIDA PARA PLOTER
C
   40 XMIN=CORR1(1)
      XMAX=CORR1(NPONTOS)
      YMIN=XSAIDA(1)
      YMAX=XSAIDA(NPONTOS)
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1000)YMAX,YMIN
 1000 FORMAT(3(/),5X,'VALORES - MAXIMO E MINIMO DA FUNCAO',2(/),7X,
```

```
     *'TENSAO MAXIMA => ',F10.3,2(/),7X,'TENSAO MINIMA => ',F10.3,5(/
     */),5X,'MODIFICO OS VALORES ( 1/SIM;0/NAO ) ? ')
      READ(*,*) IMOD
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1001)
 1001 FORMAT(3(/),5X,'VALORES - MAXIMO E MINIMO DA FUNCAO',2(/),7X,
     *'TENSAO MAXIMA => ')
      READ(*,*)YMAX
      WRITE(1,1002)
 1002 FORMAT(2(/),7X,'TENSAO MINIMA => ')
      READ(*,*)YMIN
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1003)
 1003 FORMAT(3(/),5X,'VALORES DA ESCALA DOS EIXOS  - X => E Y =>',2(/
     *),7X,'EIXO => X ' )
      READ(*,*)XSTEP
      WRITE(1,1004)
 1004 FORMAT(2(/),7X,'EIXO => Y ' )
      READ(*,*)YSTEP
          i = system('cls' c)
C
C
C         MONTAR ARQUIVO DE DADOS PARA INTERFACE ENERGRAPHICS
C
C
      WRITE(7,7001)XMIN,XMAX,YMIN,YMAX
 7001 FORMAT(F10.4,',',F10.4,',',F10.4,',',F10.4)
      WRITE(7,7002)XSTEP,YSTEP
 7002 FORMAT(F10.4,',',F10.4)
      WRITE(7,7003)
 7003 FORMAT('CURVA TENSAO - CORRENTE PARA-RAIOS')
      WRITE(7,7004)
 7004 FORMAT(' CORRENTE [ A ], TENSAO [ V ]')
      WRITE(7,7005)(CORR1(J),XSAIDA(J),J=1,NPONTOS)
 7005 FORMAT(F20.10,',',F20.10)
      GO TO 90
```

```
C
C          LEITURA DE DADOS CARACTERÍSTICA RESISTÊNCIA INCREMENTAL
C
   50 IF(LDRV.EQ.0) GO TO 55
      WRITE(3,3002)
 3002 FORMAT(1H1)
   55 OPEN(6,FILE='CURVR-I.PR',STATUS='OLD')
      READ(6,6001)(CORR1(J),XRES(J),J=1,NPONTOS)
 6001 FORMAT(2F20.10)
      IF(CORR1(1).LT.1E-6.OR.XRES(1).LT.1E-6) GO TO 60
      GO TO 80
   60 NPONTOS=NPONTOS-1
      DO 70 J=1,NPONTOS
      CORR1(J)=CORR1(J+1)
   70 XRES(J)=XRES(J+1)
C
C          PREPARAR DADOS DE SAÍDA PARA PLOTER
C
   80 XMIN=CORR1(1)
      XMAX=CORR1(NPONTOS)
      YMIN=XRES(NPONTOS)
      YMAX=XRES(1)
      WRITE(1,1005)YMAX,YMIN
 1005 FORMAT(3(/),5X,'VALORES - MAXIMO E MINIMO DA FUNCAO',2(/),7X,
     *'RESISTENCIA MAXIMA => ',F10.3,2(/),7X,'RESISTENCIA MINIMA => '
     *,F10.3,5(/),5X,'MODIFICO OS VALORES ( 1/SIM;0/NAO ) ? ')
      READ(*,*) IMOD
          i = system('cls' c)
      WRITE(1,1006)
 1006 FORMAT(3(/),5X,'VALORES - MAXIMO E MINIMO DA FUNCAO',2(/),7X,
     *'RESISTENCIA MAXIMA => ')
      READ(*,*)YMAX
      WRITE(1,1007)
 1007 FORMAT(2(/),7X,'RESISTENCIA MINIMA => ')
      READ(*,*)YMIN
          i = system('cls' c)
```

```
      WRITE(1,1008)
 1008 FORMAT(3(/),5X,'VALORES DA ESCALA DOS EIXOS  - X => E Y =>',2(/
     *),7X,'EIXO => X ')
      READ(*,*)XSTEP
      WRITE(1,1009)
 1009 FORMAT(2(/),7X,'EIXO => Y ' )
      READ(*,*)YSTEP
C
C
C          MONTAR ARQUIVO DE DADOS PARA INTERFACE ENERGRAPHICS
C
C
      WRITE(7,7006)XMIN,XMAX,YMIN,YMAX
 7006 FORMAT(F10.4,',',F10.4,',',F10.4,',','F10.4)
      WRITE(7,7007)XSTEP,YSTEP
 7007 FORMAT(F10.4,',','F10.4)
      WRITE(7,7008)
 7008 FORMAT('CURVA RESISTENCIA - CORRENTE PARA-RAIOS')
      WRITE(7,7009)
 7009 FORMAT(' CORRENTE [ A ], RESISTENCIA [ Ohms ]')
      WRITE(7,7010)(CORR1(J),XRES(J),J=1,NPONTOS)
 7010 FORMAT(F20.10,',',F20.10)
   90 CONTINUE
      IF(LDRV.EQ.0) GO TO 100
C
C          COMANDO DAS INTERFACES EM LINGUAGEM C
C
          i = system('c:' c)
          i = system('copy a:dadospr.dat' c)
  100 CONTINUE
          i = system('intface' c)
          i = system('eng' c)
          i = system('del dadospr.dat' c)
          i = system('del engdata.eng' c)
      IF(LDRV.EQ.0) GO TO 120
          i = system('a:' c)
```

```
      i = system('del dadospr.dat' c)
    GO TO 120
110 CONTINUE
      i = system('cls' c)
    WRITE(1,1010)
1010 FORMAT(3(/),5X,'O PLOTER NAO ESTAH HABILITADO',18(/))
    PAUSE
120 RETURN
    END
```

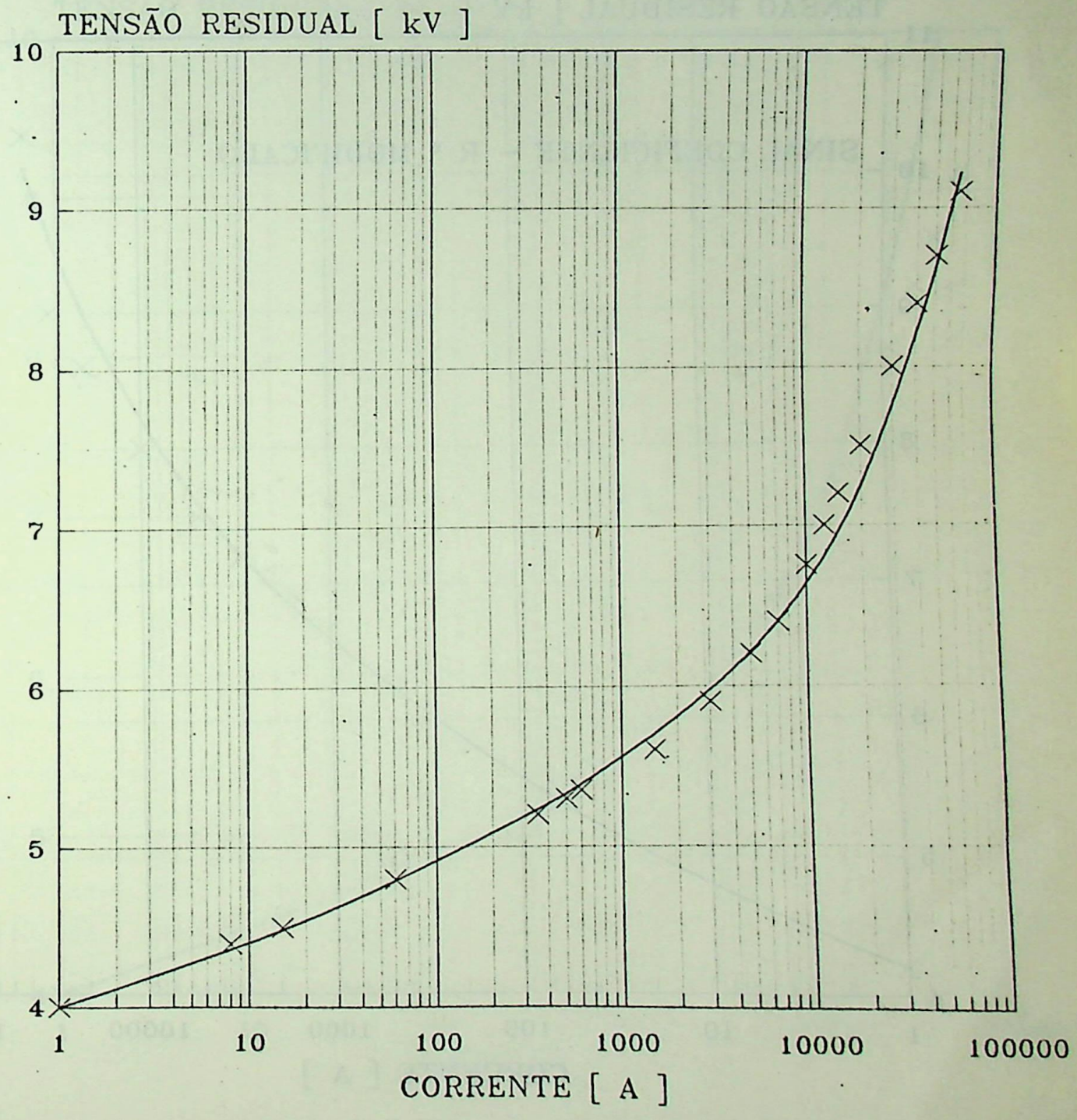


Figura III.1 - Aproximação para a Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga da Tabela III.1

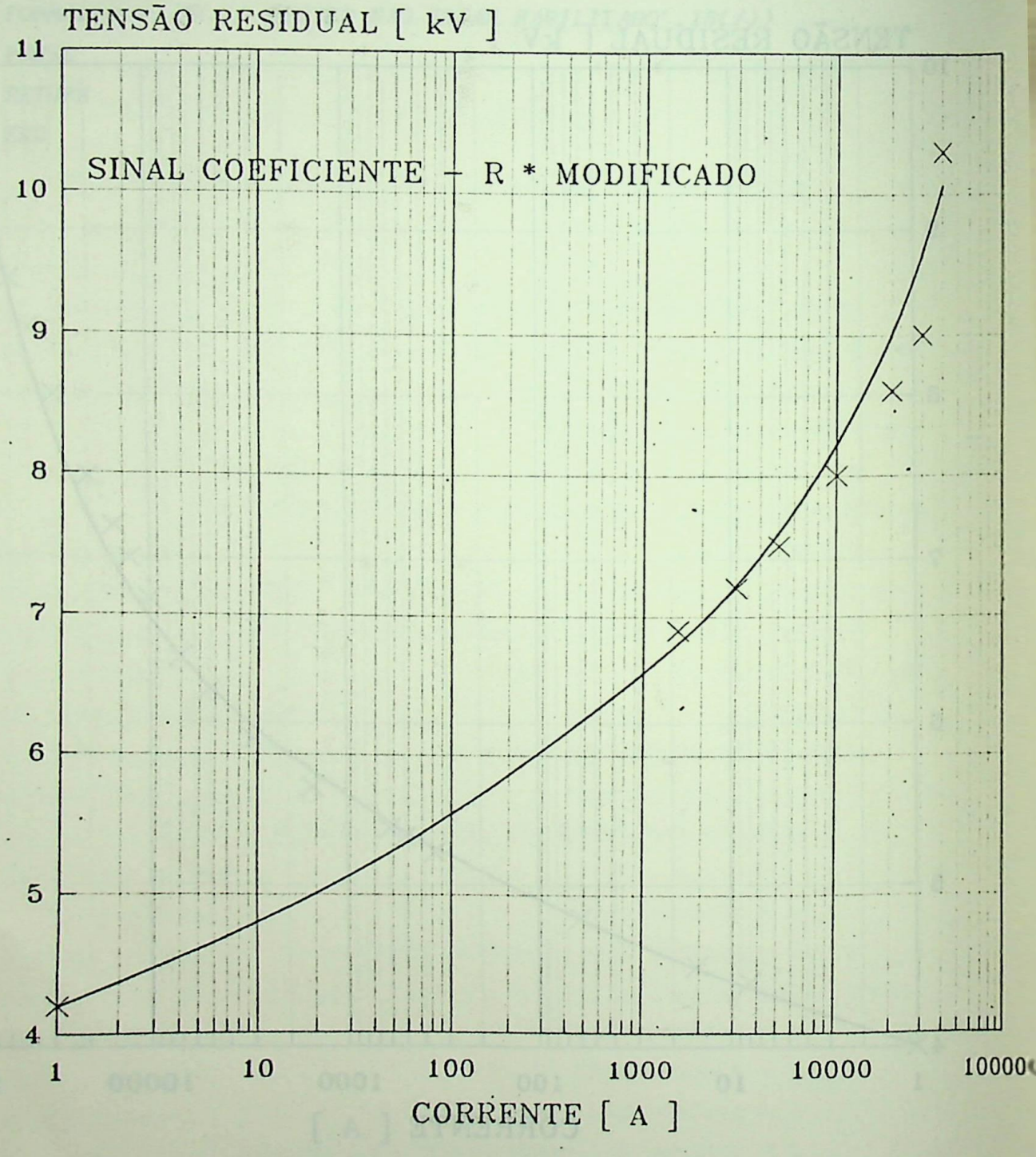


Figura III.2 - Aproximação para a Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga da Tabela III.2

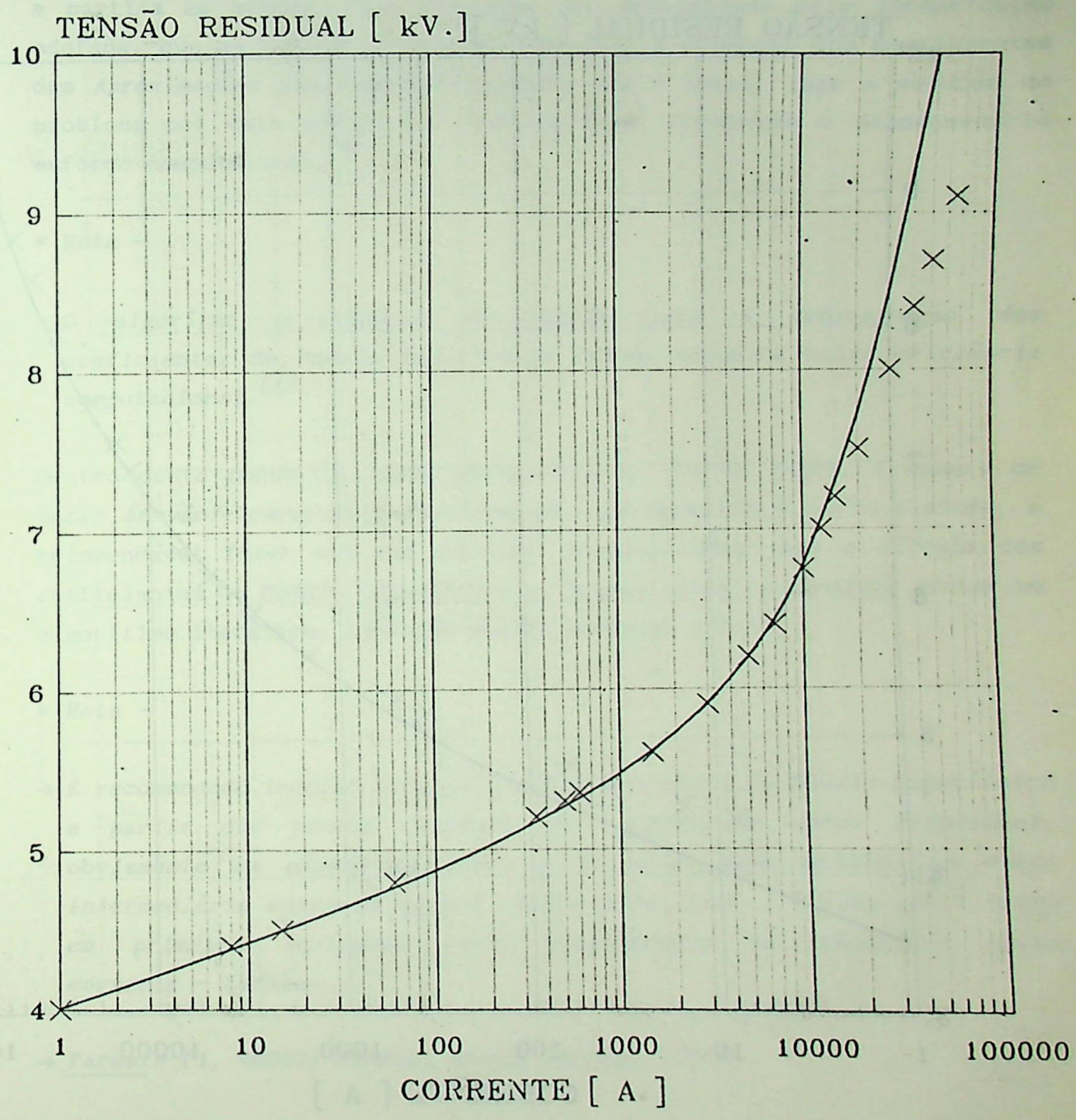


Figura III.3 - Aproximação Simplificada para a Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga da Tabela III.1

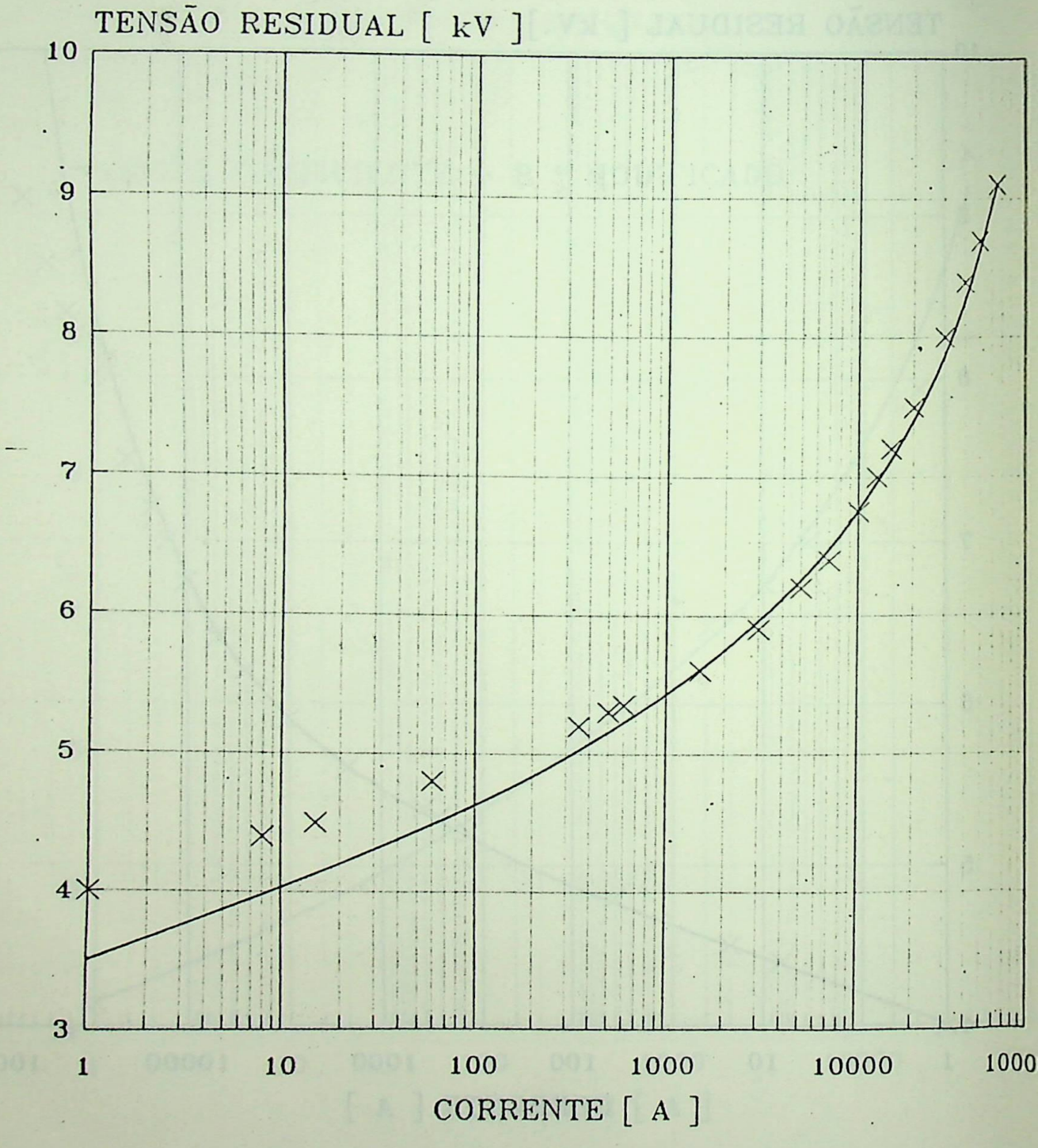


Figura III.4 - Aproximação Simplificada para a Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga da Tabela III.1

Conforme mostra a Figura *III.1* e a Figura *III.2*, o algorítimo implementado para o cálculo dos coeficientes do *Modelo Logarítmico* é bastante dependente do *número, bem como, da distribuição ao longo do intervalo de interesse dos pares tensão - corrente* disponíveis ao se dar a partida ao método, fato que pode ser determinado pela linearização adotada, que ao contrário da utilizada para a obtenção dos coeficientes das *Aproximações por Funções Racionais* não é total, logo a solução do problema por este algorítimo pode demandar um enorme e desnecessário esforço computacional.*

* *Nota -*

→ *O algorítmo normalmente recomendado para a determinação dos coeficientes do Modelo Logarítmico também aprsenta baixa eficiência computacional.*[1]

Dentro deste contexto, tendo em mente que, via de regra, o *número de pares tensão - corrente* fornecidos em catálogos não é muito elevado, é recomendável fazer uso das fórmulas simplificadas para o cálculo dos coeficientes do *Modelo Logarítmico* e, nestes casos, é possível adotar um algorítimo iterativo, conforme mostra a Figura *III.5*.*

* *Nota -*

→ *É recomendado iniciar o cálculo dos coeficientes do Modelo Logarítmico a partir dos pontos extremos do conjunto de dados disponível, obviamente em número de dois, e do ponto mais próximo ao valor intermediário entre os mesmos. Deste modo, para a Tabela III.1 devem em primeira instância serem considerados os seguintes pares corrente - tensão:*

→ *Pares:- (1, 4000); (30000, 8000); (65000, 9100)*

$$U_R(I) = \frac{88216.586}{22.054237 - Ln(\ I\ )} + 0.016306\ I$$

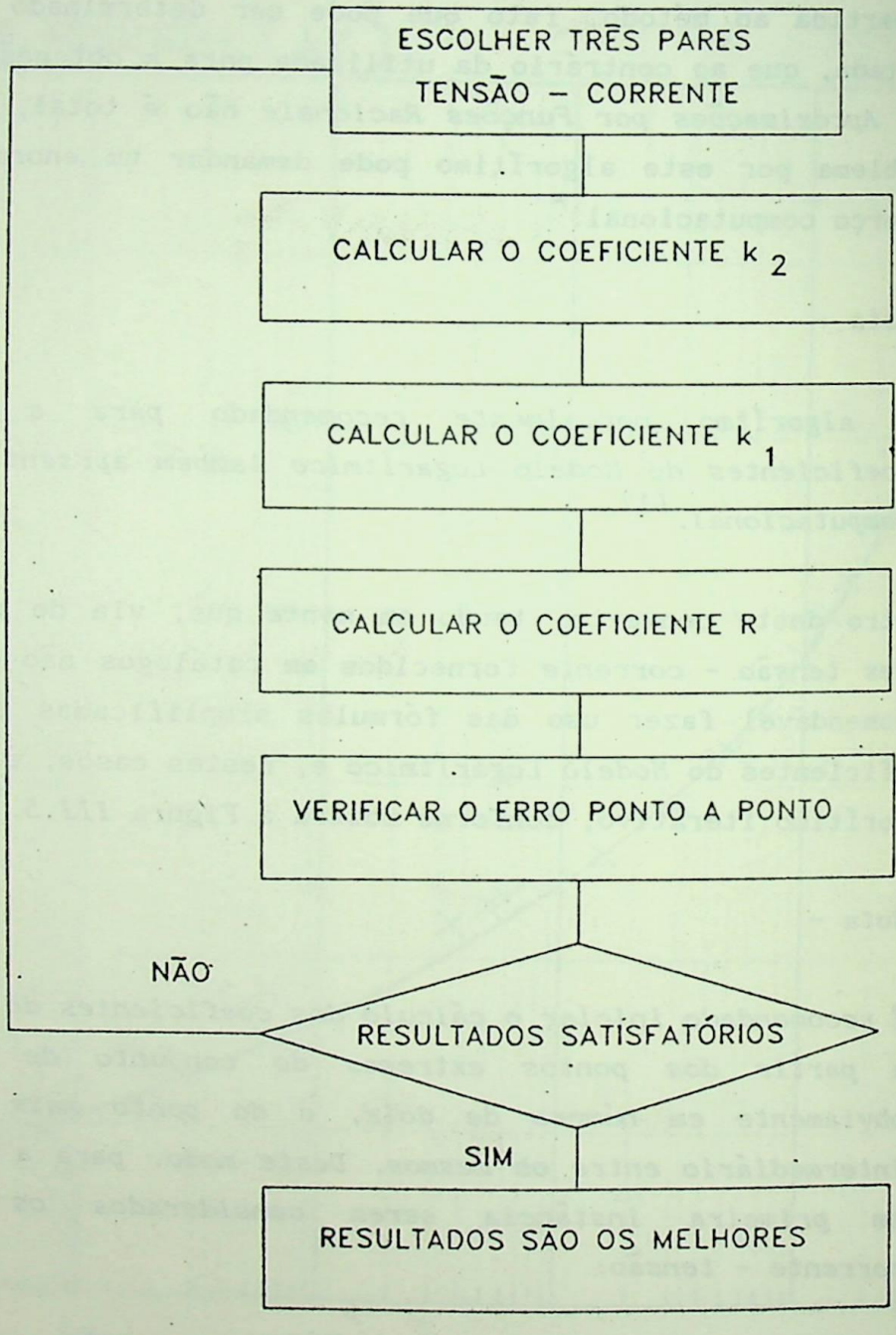


Figura III.5 - Algorítimo para o Cálculo dos Coeficientes do Modelo Logarítmico.

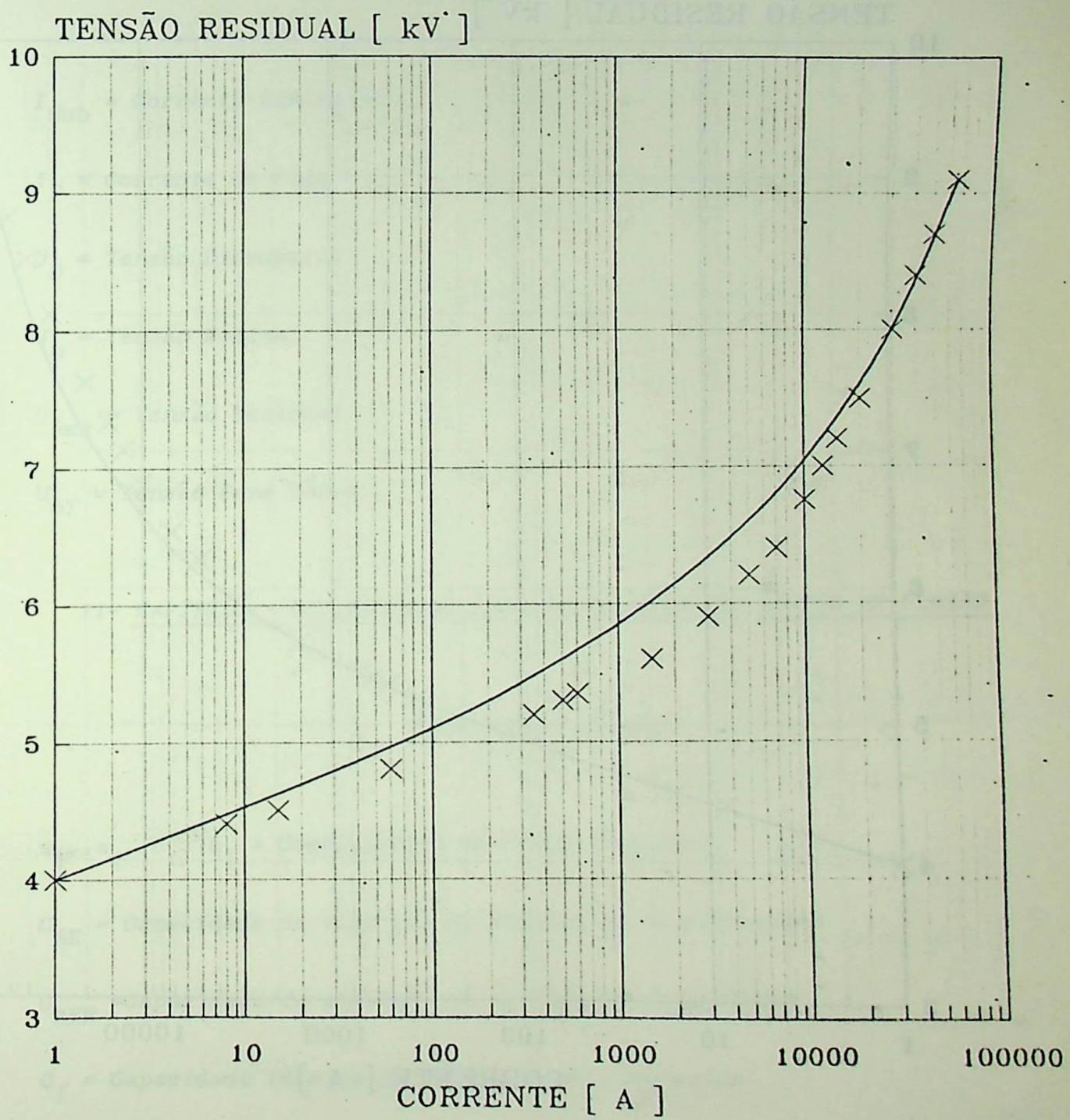


Figura III.6 - Aproximação Simplificada para a Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga da Tabela III.1 - 1

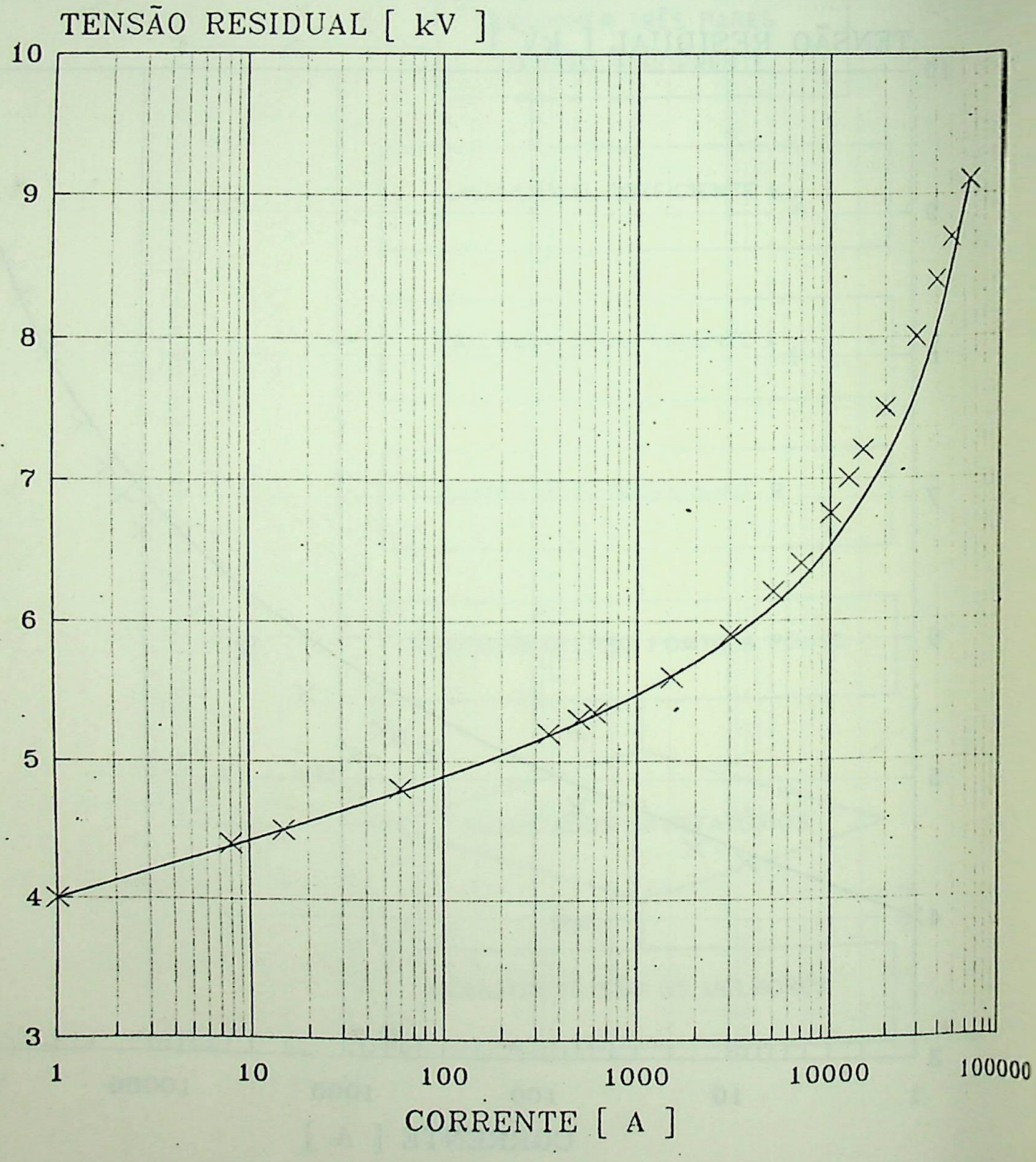


Figura III.7 - Aproximação Simplificada para a Característica Tensão Residual versus Corrente de Descarga da Tabela III.1 - 2

I- CAPÍTULO:- INTRODUÇÃO E COMENTÁRIOS INICIAIS

Caractéres Latinos:-

I_{Sub} = Corrente Subseqüente

I_F = Corrente de Fuga

U_D = Tensão Disruptiva

U_n = Tensão Nominal

U_{Res} = Tensão Residual

$U_{\phi T}$ = Tensão Fase Terra

II- CAPÍTULO:- EQUIPAMENTOS PARA PROTEÇÃO CONTRA SURTOS DE TENSÃO

Caractéres Latinos:-

a_i, a'_i, b_i, b'_i = Coeficientes da Função Racional

C_{AE} = Capacidade de absorção de energia de um pára-raios

C_{AER} =Capacidade de absorção de energia de um resistor

C_I = Capacidade Térmica do Invólucro do Pára-raios

C_l = Capacitância da Linha de Transmissão por Unidade de Comprimento

$C_{Eq.}$ = Capacitância Equivalente

COV = Tensão de Operação Contínua

C_R = Capacidade Térmica dos Resistores a Óxido Metálico

C_T = Capacidade Térmica dos Componentes de um Pára-raios a Óxido Metálico

$\frac{dI}{dt}$ = Taxa de Crescimento da Corrente

$[\frac{dI}{dt}]_{NP}$ = Frente de Onda Não Padronizada

$[\frac{dI}{dt}]_{P}$ = Frente de Onda Padronizada

D_{EI} = Diâmetro Externo Médio do Invólucro

D_{II} = Diâmetro Interno Médio do Invólucro

D_l = Comprimento da Linha de Transmissão

D_{Max} = Diâmetro Máximo do Invólucro

D_R = Diâmetro do Resistor a Óxido Metálico

E_{AB} = Energia Absorvida

E_{AC} = Espessura do anel de contato em borracha de silicone

E_C = Gradiente de Tensão Superficial

$E_{Lim.}$ = Máxima Energia Absorvida, por limite térmico

E_{MCT} = Energia máxima absorvida devido a existência de choque térmico

E_{MLET} = Energia máxima absorvida devido a existência de um limite de estabilidade térmica

E_{PR} = Energia Absorvida pelo páa-raios

$E_{Ref.}$ = Energia de Referência

F_{RC} = Fator de redução da capacidade de absorção de energia devido a conexão de N_{CP} colunas em paralelo

$F.U._{E}$ = Fator de Utilização relativo a Energia de Referência, sob Corrente de Descarga Máxima

$F.U._{I}$ = Fator de Utilização relativo a Corrente de Descarga Total

H = Constante de Proporcionalidade

H_R = Altura do Resistor a Óxido Metálico

I = Corrente após Transitório de Desenvolvimento da Tensão

I = Corrente de Descarga, em valores de crista

$I_a(t)$ = Expressão que Descreve o Decréscimo de Corrente Existente nos Resistores mais Modernos

I_D = Corrente de descarga pelo pára-raios

$I_{E.}$ = Corrente de Descarga Máxima

$I_F(t)$ = Corrente de Fuga para um Instante de Tempo (t)

I_{F_0} = Corrente de Fuga Inicial

I_F = Corrente de Fuga Efetiva

$I_F(t)$ = Corrente de Falta

I_{F+} = Corrente de Fuga Semi-Ciclo Positivo

I_{F-} = Corrente de Fuga Semi-Ciclo Negativo

I_{Max} = Corrente Máxima

I_{Ref} = Corrente de Referência

I_{Sub_0} = Corrente Subseqüente para Tensão Nominal

I_{Sub} = Corrente Subseqüente na Condição de Sobretensão $V_{p.u.}$

k_1, k_2, k_3 = Constantes de Proporcionalidade

k = Constante de Proporcionalidade

K = Constante de Boltzman (5.72×10^{-12} - [$W / cm^2 \, ^\circ K^4$]

KD = Fator de Correção devido a Densidade do Ar

K_{FO} = Fator de Correção para Frente de Onda

KH = Fator de Correção devido a Umidade

K_T = Fator de Sobretensão Máxima

$kV_{I_{Max}}$ = Tensão Residual para Corrente Máxima

kV_{Max} = Tensão Residual Máxima

$kV_{\mu s}$ = Taxa de Crescimento do Impulso

$kV_{\mu s_{IP}}$ = Taxa de Crescimento na Frente do Impulso Padrão

$K\phi$ = Fator de Sobretensão

L_c = Comprimento da parte do anel de contato localizada entre a superfície dos resistores e a superfície interna do invólucro

L_C = Distância de Escoamento do Invólucro do pára-raios

$L_{Eq.}$ = Indutância Parasita

L_{PR} = Indutância Parasita do Pára-raios

M = Acréscimo de Corrente Devido ao Envelhecimento ou Degradação Frente a Descarga de Surtos

n = Grau da Função Racional

n = Número de pulsos utilizados para digitalizar o impulso

n = Número de trechos para digitalizar o perfil de sobretensão

N_{CP} = Número de colunas de resistores em paralelo, formando o pára-raios completo

$N_{RS.}$ = Número de resistores em série, formando uma coluna de resistores

Q_{CV} = Fluxo de calor por convecção

R_{AV} = Resistência Térmica Adicional entre a Superfície Externa do Invólucro e o Ambiente, Devido a Existência de Vento

R_{CCAC} = Resistência Térmica Devido a Condução de Calor Através do Anel de Contato

R_{CCAII} = Resistência Térmica Devido a Condução de Calor Através da Camada de Ar no Interior do Invólucro do Pára-raios

R_{CCP} = Resistência Térmica Devido a Condução de Calor Através da Porcelana

$\mathcal{R}_e$ = Número de Reinold

R_{IA} = Resistência Térmica entre a Superfície Externa do Invólucro e o Ambiente

R_{IACF} = Resistência Térmica por Convecção Forçada entre a Superfície Externa da Porcelana e o Meio Ambiente

R_{IACN} = Resistência Térmica por Convecção Natural entre a Superfície Externa da Porcelana e o Meio Ambiente

$R_{LEq.}$ = Resistência Linear Equivalente

$R_{NEq.}$ = Resistência Não Linear Equivalente

R_{RI} = Resistência Térmica entre os Resistores a Óxido Metálico e a Superfície Externa do Invólucro

R_{RIA} = Resistência Térmica Devido a Radiação entre o Invólucro e o Meio Ambiente

R_{RICN} = Resistência Térmica por Convecção Natural entre os Resistores e a Superfície Interna da Porcelana

R_{RRI} = Resistência Térmica Devido a Radiação entre os Resistores a Óxido Metálico e o Invólucro

R_T = Resistência térmica através da superfície livre em ar

R'_T = Resistência térmica através da superfície do anel de contato

$R_{T\ Calculado}$ = Resistência térmica calculada

t = Tempo

T_1 = Tempo de Frente da Corrente de Impulso

T_2 = Tempo até Meia Amplitude na Cauda do Impulso

T_{90} = Intervalo de Tempo entre valores 10 % e 90 % da amplitude na frente do impulso

T_{DR} = Tempo de descarga do pulso retangular equivalente

T_{DS} = Tempo de descarga do pulso semi-senoidal

$U_{60_{Hz\ Max.}}$ = Máxima Sobretensão em Freqüência Industrial

U = Tensão Residual, em valores de crista

$U(t)$ = Tensão Desenvolvida nos Centelhadores em Função do Tempo

$U_{Arco}(\ t\ )$ = Tensão de arco

U_c = Tensão de carga da linha

U_d = Tensão Disruptiva sob Impulso Atmosférico

$U_{d\ FOWS}$ = Tensão Disruptiva na Frente do Impulso Padrão

$\overline{U}_{d_{60}}$ = Suportabilidade Média em Freqüência Industrial

$U_{d_{60_{Hz}}}$ = Suportabilidade em Freqüência Industrial

$\overline{U}_{d_{60_P}}$ = Suportabilidade Média Padrão em Freqüência Industrial

$\overline{U}_{dI}$ = Tensão Disruptiva a Impulso Atmosférico Polaridade Negativa Média Padrão

U_{dI_M} = Máxima Tensão Disruptiva a Impulso Atmosférico Polaridade Negativa nas Condições Locais

$U_{dI_{M_P}}$ = Máxima Tensão Disruptiva a Impulso Atmosférico Polaridade Negativa Padrão

U_i = Tensão aplicada

U_{Max} = Máxima Tensão de Manobra

U_{Max} = Tensão Máxima Desenvolvida nos Centelhadores em Função da Corrente após Transitório de Desenvolvimento da Tensão

$U_{n_{PR}}$ = Tensão nominal do pára-raios

U_{pr} = Tensão residual do pára-raios

U_{Ref} = Tensão de Referência

U_{R_F} = Tensão Residual para Corrente com Frente não Padronizada

U_{R_P} = Tensão Residual para Corrente com Frente Padronizada

$U_{\phi T}$ = Tensão Fase - Terra

V_C = Volume do componente do pára-raios

V_V = Velocidade do vento

W_R = Potência consumida, ou dissipada, pelos resistores

W_{RS} = Calor fornecido ao pára-raios devido a radiação solar

Z_l = Impedância de Surto da Linha de Transmissão

Caractéres Gregos:-

α = Coeficiente de Não Linearidade

α = Acréscimo de Corrente Devido a Descarga do Primeiro Surto

β = Acréscimo de Corrente Devido a Descarga dos Surtos Subseqüentes

$\Delta T_{FI \rightarrow U_n}$ = Intervalo de tempo de aplicação da tensão U_n

$\Delta T_{FI \rightarrow U_{n_{Max}}}$ = Máximo intervalo de tempo de aplicação da tensão U_n

$\Delta T_{FI \rightarrow U_{n-1}}$ = Intervalo de tempo complementar

$\Delta T_{d_{Ii}}$ = Tempo de descarga da corrente I_i

$\Delta T_{d_{Ii_{(Max.)}}}$ = Tempo de descarga máximo da corrente I_i

ΔT_i = Intervalo de tempo de aplicação de tensão

$\Delta\theta$ = Gradiente de Temperatura

$\Delta\theta_{U_i \rightarrow T_i}$ = Variação de temperatura sob a condição $U_i \rightarrow T_i$

ε_I = Emissividade do material do invólucro

ε_R = Emissividade do material dos resistores

ε_{RI} = Emissividade equivalente entre os resistores e o invólucro

φ = Comprimento do Contorno da Saia do Invólucro / Distância Entre as Saias do Invólucro

ψ = Fator de proporcionalidade entre a superfície interna do invólucro imersa em ar e sob o anel de contato

σ = Desvio Padrão da Tensão Disruptiva

σ_I = Desvio Padrão sob Impulso Atmosférico

θ = Temperatura do componente

θ_A = Temperatura do Ambiente

θ_I = Temperatura da Superfície Externa do Invólucro

θ_{II} = Temperatura da superfície interna do invólucro.

θ_{LMT} = Temperatura limite de operação

θ_{Max} = Temperatura limite de estabilidade

θ_{OP} = Temperatura de operação

θ_R = Temperatura dos Resistores a Óxido Metálico

III- CAPÍTULO:- NORMALIZAÇÃO NACIONAL E INTERNACIONAL

Caractéres Latinos:-

I_d = Corrente de Descarga

U_n = Tensão de Ciclo de Operação

IV- CAPÍTULO:- COMENTÁRIOS FINAIS

I- ANEXO:- CARACTERÍSTICA DISRUPTIVA DE UM CENTELHADOR HASTE-HASTE

Caractéres Latinos:-

CFO = Tensão Disruptiva Crítica

II- ANEXO:- REPRESENTAÇÃO DE PARES TENSÃO - CORRENTE

Caractéres Latinos:-

U_{CENT} = Tensão nos Centelhadores

$U_R(I)$ = Tensão Residual

III- ANEXO:- MODELO LOGARÍTMICO PARA PARA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

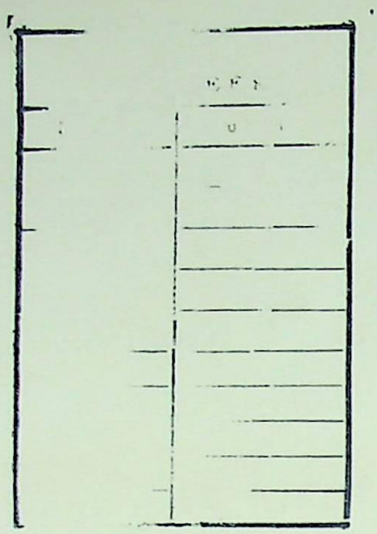
Caractéres Latinos:-

k_1, k_2 = Constantes Empíricas

$R_{LEq.}$ = Resistência Linear Equivalente

$U_R(I)$ = Tensão Residual

DATA 25/08/1993
PROC.
PED. PPG
LIV.
Cz$ DOACAS



EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200727
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA