

CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCOLHA DA TENSÃO NOMINAL DE UM PÁRA-RAIOS PARA SISTEMAS DE MÉDIA TENSÃO

Manuel Luís Barreira Martinez

João Roberto Cogo

EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá

Artigo apresentado no XII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
Recife 16 a 21 de Outubro de 1994

RESUMO

Este artigo tem por objetivo apresentar e discutir as principais regras práticas utilizadas na especificação da tensão nominal dos pára-raios para sistemas de média tensão convencionais, a carboneto de silício e a óxido metálico, sem centelhadores. Dentro deste contexto, de modo a definir os problemas associados com a especificação da tensão nominal de um pára-raios, uma série de conceitos relacionados com os ensaios conforme definidos nas normas técnicas, bem como, o impacto de algumas considerações e conclusões incorretas, são apresentados e discutidos.

O ponto de partida para a especificação da tensão nominal de um pára-raios, independente de sua tecnologia, é a amplitude das sobretensões em regime transitório e permanente existentes nas fases de um circuito submetidos a curtos-circuitos, usualmente, monofásico. Deste modo, inicialmente, são apresentados uma série de resultados de simulações de sobretensões, transitórias e em regime permanente, relacionados com curtos-circuitos, em sistemas de média tensão.

Baseado nos valores destes estudos, bem como, em um conjunto de aspectos tecnológicos relacionados com o desempenho das diferentes tecnologias de pára-raios frente as solicitações comumente impostas pelas sobretensões sustentadas e de manobra são apresentadas, discutidas e justificadas as principais regras práticas utilizadas na especificação da tensão nominal dos pára-raios, ou seja:

$U_n = 0,84 U_{F-F}$ (Sistema Solidamente Aterrado)

$U_n = 1,05 U_{F-F}$ (Sistemas Isolados)

onde:

U_{F-F} - Tensão de operação entre fases do sistema.

Paralelamente, um conjunto de erros de aplicação relacionados com a má interpretação de trechos das normas técnicas, são discutidos e explicados e, deste modo, por exemplo, a relação entre a “**Tensão Disruptiva a Freqüência Industrial**” e a “**Tensão Nominal**” de um pára-raios convencional a carboneto de silício, ou seja, o “**Fator 1,50**”, bem como, a relação entre a “**Tensão Nominal**” e a “**Máxima Tensão de Operação Contínua**” de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, ou seja, o “**Fator 1,17**”, conforme proposto pelas **Normas ANSI - CSA**, são justificados.

Finalmente, são discutidos os principais aspectos e considerações relacionados com a substituição de pára-raios convencionais a carboneto de silício por equivalentes a óxido metálico sem centelhadores.

CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCOLHA DA TENSÃO NOMINAL DE UM PÁRA-RAIOS PARA SISTEMAS DE MÉDIA TENSÃO

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	3
2 - COMENTÁRIOS SOBRE OS REQUISITOS DE NORMA	3
3 - TENSÃO NOMINAL PÁRA-RAIOS CONVENCIONAL	5
4 - TENSÃO NOMINAL DE UM PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO.....	13
5 - OS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES E AS PRÁTICAS DE NORMA.....	19
6 - CONCLUSÕES	23
7 - BIBLIOGRAFIA	24

1 - INTRODUÇÃO

A determinação da tensão nominal de um pára-raios convencional, ou seja, construídos com centelhadores série, bem como, da tensão de operação contínua e da suportabilidade frente a sobretensões sustentadas de um pára-raios a óxido metálico, ou seja, construídos sem centelhadores se constitui no ponto de partida para a especificação dos esquemas para proteção contra surtos de tensão que, tradicionalmente, quando de sistemas em média tensão são considerados como de origem, principalmente, atmosférica.

Tradicionalmente, todo este procedimento possui como ponto de partida, o estudo da tensão, em regime permanente, existente nas fases sãs por ocasião das faltas fase-terra. Quando da escolha da tensão nominal de um pára-raios convencional a má interpretação de alguns trechos das normas, pode conduzir a erros de aplicação que sobre a ótica comum são aparentemente inexplicáveis. Com respeito a escolha da tensão de operação contínua de um pára-raios a óxido metálico e, por conseguinte, da suportabilidade frente a sobretensões sustentadas, casos alguns cuidados não sejam tomados pode resultar, principalmente, quando da substituição dos pára-raios convencionais, em uma série de faltas sistemáticas envolvendo pára-raios.

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma série considerações sobre as regras básicas utilizadas na especificação da tensão nominal dos pára-raios convencionais a carboneto de silício e a óxido metálico sem centelhadores, tendo como base as Normas IEC e ANSI (I) - (IV), que por adotarem filosofias de projeto distintas, resultam em pára-raios dotados de desempenho diferenciado, bem como, o resultado de simulações de faltas fase-terra envolvendo sistemas típicos em média tensão.

Deste modo, primeiramente sejam algumas considerações sobre os requisitos impostos pelas Normas Técnicas e, subseqüentemente quais conclusões podem ser retiradas, com respeito a especificação da tensão nominal de um pára-raios, de um conjunto de simulações de faltas-fase terra em sistemas de média tensão.

2 - COMENTÁRIOS SOBRE OS REQUISITOS DE NORMA

Via de regra, os ensaios em equipamentos elétricos, conforme previstos nas normas técnicas, possuem inicialmente dois objetivos básicos.

Em primeiro plano, as normas atuam no sentido de fixar níveis mínimos de desempenho compatíveis com as solicitações impostas pelos sistemas de potência, através da definição de “Valores Característicos Específicos” e de “Padrões de Desempenho Especifico”, ou seja, no caso de qualquer pára-raios para sistemas de potência, por exemplo, dos valores padronizados de tensão residual e do desempenho esperado frente a surtos atmosféricos, na forma de ciclo de serviço, respectivamente.

Por outro lado, em segundo plano, as normas atuam, usualmente, de modo extremamente sutil e, em alguns casos amplamente negligenciado, no sentido de definir alguns “Requisitos Mínimos Necessários ao Correto Desempenho Frente a Solicitações Impostas pelos Sistemas de Potência”, na grande maioria dos casos em regime permanente, ou seja, no caso dos pára-raios convencionais e a óxido metálico para sistema de potência, por exemplo, os valores padronizados para tensão disruptiva mínima frente à tensão em frequência industrial e de tensão de operação contínua, respectivamente.

Dentro deste contexto, é razoavelmente óbvio que os “Valores Característicos Específicos”, bem como, os “Padrões de Desempenho Específico” apresentam um significado técnico bastante distinto dos “Requisitos Mínimos Necessários ao Correto Desempenho Frente às Solicitações Impostas pelos Sistemas de Potência” e, portanto, não devem ser confundidos sob pena de se cometer erros de aplicação que normalmente terminam por resultar em falhas intempestivas.

Com respeito aos pára-raios para sistemas de potência, uma das confusões mais comuns, quando são abordados pára-raios convencionais, é a relativa a “Tensão Disruptiva em Frequência Industrial”, ou seja, “valor mínimo de tensão em frequência industrial a partir do qual os centelhadores entram em condução” que, nada mais é que uma característica intrínseca dos pára-raios, relacionada com a sua capacidade de suportar as oscilações de tensão normais, obviamente, em frequência industrial, imposta pelos sistemas de potência¹. Este fato, em tese, permite com que os pára-raios convencionais se apresentem como auto-protegidos frente a atuações sob condições de sobretensões em frequência industrial que, caso venham ocorrer, normalmente, terminam por resultar em falha intempestiva dos mesmos. Logo, dentro deste contexto, a “Tensão Disruptiva em Frequência Industrial” não é uma “Característica de Proteção”.²

Notas:

- 1 - A Tensão disruptiva em frequência industrial tem por objetivo garantir que o pára-raios não atue, frente às oscilações de tensão relacionadas, por exemplo, com o período transitório das faltas para terra, bem como, frente a uma série de solicitações de manobra.
- 2 - Caso um pára-raios convencional venha a atuar frente a uma sobretensão em frequência industrial o valor de corrente subsequente a ser interrompido pelos centelhadores, normalmente excede a capacidade de extinção dos mesmos e, deste modo, é estabelecido no interior do pára-raios um curto-circuito, em tese, pelo menos inicialmente, limitado pelas resistências não lineares do pára-raios. Este fato termina por impor uma elevação de pressão no interior do invólucro do pára-raios, ou como de modo mais comum, um choque térmico que resulta na explosão ou fragmentação o invólucro, respectivamente. Convém ressaltar que os desligadores automáticos “ground or line disconnectors” não são previstos para evitar estes eventos.

Já quando são abordados os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores um dos principais pontos polêmico que, normalmente, resulta em uma série de confusões é o relativo a “Tensão Nominal” e sua correlação com a “Tensão de Operação Contínua”, ou seja, “máxima tensão aplicável aos terminais de um pára-raios sob a qual o mesmo desempenha corretamente seu ciclo de serviço” principalmente, no caso específico dos pára-raios para média tensão, onde as Normas IEC e ANSI apresentam para esta grandeza conceitos ligeiramente diferentes entre si.³ De um modo geral, caso exista alguma discordância entre os valores da “Tensão de Operação Contínua” e as solicitações impostas pelo sistema em termos globais, ou seja, manobras mais sobretensão em frequência industrial subsequente os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, devido a existência de um desequilíbrio térmico denominado térmico denominado “Thermal Runaway”, ou seja, “Avalanche Térmica”, entram em modo de falha.⁴

Notas

- 3 - No caso específico do pára-raios para sistemas em média tensão a Norma ANSI define um conjunto de pares “Tensão Nominal - Operação Contínua”. Isto apesar de, em tese, impor uma série de restrições ao livre projeto dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, ao contrário do que ocorre com as Normas IEC, permite garantir a equivalência entre os pára-raios projetados segundo esta norma e seus correspondentes convencionais, ou seja, a carboneto de silício. (VIII)
- 4 - O fenômeno de avalanche térmica é oriundo do desequilíbrio entre o montante de calor gerado e a capacidade de dissipação de calor dos pára-raios. Nestes casos o excedente de calor oriundo de uma geração superior a capacidade de dissipação resulta em um incremento de temperatura do pára-raios. Tendo em mente que o coeficiente de variação das resistências a óxido metálico com a temperatura é negativo, este processo é auto-realimentado positivamente e, deste modo, a temperatura e a corrente podem atingir valores que comprometem a integridade física do pára-raios.

Deste modo, qualquer interpretação duvidosa de algumas nuances existentes nas Normas pode resultar em ocorrências, sob a ótica de quem a cometeu, aparentemente inexplicáveis, senão seja:

3 - TENSÃO NOMINAL DE UM PÁRA-RAIOS CONVENCIONAL

Devido às características específicas de projeto, a “Tensão Nominal” de um pára-raios convencional a carboneto de silício⁵ deve ser no mínimo igual a “Máxima SobreTensão Temporária” no seu ponto de aplicação, no entanto, nunca inferior a 1,25 [p.u.] da tensão máxima fase terra, ou seja:⁶

$$U_n \geq TOV_{Max}. \quad (1)$$

$$U_n \geq 1,25 U_{F-TMax}. \quad (2)$$

onde:

U_n - Tensão nominal do pára-raios;

TOV_{Max} - Sobretensão sustentada máxima; e

U_{F-TMax} - Máxima tensão nominal fase-terra do sistema.

Notas

5 - Existem pára-raios convencionais, ou seja, com centelhadores série construídos com resistores não lineares a óxido metálico conforma ANSI e ABNT. (V) - (VII)

6 - Como exceção a esta regra se encontram os pára-raios para sistemas em Extra Alta Tensão, ou seja, que apresentam tensão máxima operativa superior à 240 [KV].

Normalmente, quando da ausência de qualquer dado sobre o sistema elétrico é recomendado adotar as seguintes considerações de cunho genérico, desenvolvidas com base nos conceitos e componentes simétricas:

$$U_n = 0,84 U_{F-F} \text{ (Sistemas Solidamente Aterrados)} \quad (3)$$

$$U_n = 1,05 U_{F-F} \text{ (Sistemas Isolados)} \quad (4)$$

onde:

U_{F-F} - Tensão de operação entre fases do sistema.

Logo de modo a exemplificar um dos tipos de erro mais usuais, em sistema de média tensão, durante a especificação da tensão nominal de um pára-raios convencional, seja o diagrama unifilar mostrados na FIGURA 3.1, no qual foram estudadas as faltas mais comuns passíveis de ocorrer neste tipo de sistema elétrico, ou seja, as faltas fase-terra.

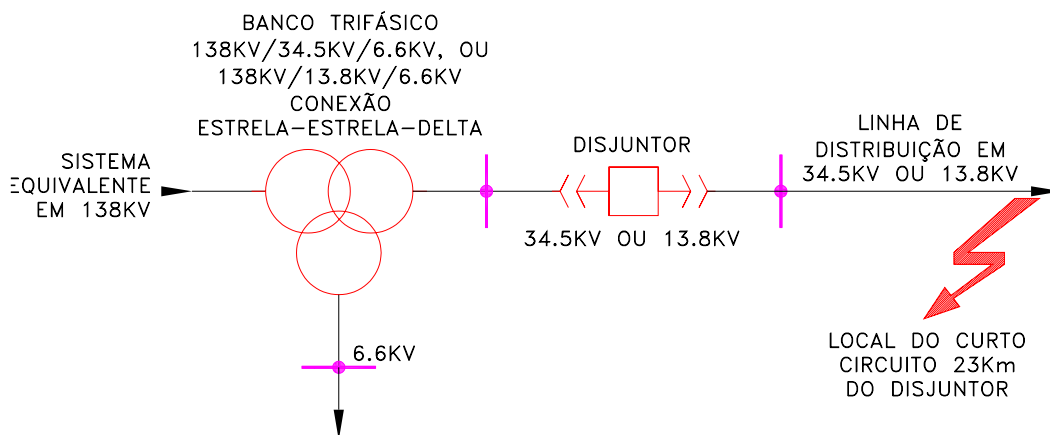


FIGURA 3.1 - DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA ESTUDADO COM RESPEITO A FALTAS FASE-TERRA.

Inicialmente, conforme mostra a FIGURA 3.1 o sistema estudado é composto por um equivalente em 138 [KV], um banco monofásico em 138/34,5/6,6 [KV], conectado em estrela-estrela-triângulo, com potência de 20 [MVA] alimentando uma linha de sub transmissão em 34,5 [KV] com 56 [km]. De maneira alternativa foi estudada uma configuração complementar com um banco monofásico em 138/13,8/6,6 [KV], conectado em estrela-estrela-triângulo, com potência de 20 [MVA] alimentando uma linha de distribuição em 13,8 [KV] com 23 [km]. Aos terminais remotos das linhas, para várias condições de aterramento do banco de transformadores foram aplicados curtos circuitos fase-terra sendo obtidos os valores de tensão transitória e em regime permanente mostrados na TABELA 3.1.

Conforme mostra a TABELA 3.1, em sistemas com tensão igual a 36,2 [KV] submetidos à faltas fase-terra existe, normalmente independentemente, do tipo de aterramento^{7,8} uma sobretensão transitória superior a sobretensão sustentada em frequência industrial.

Notas

- 7 - Não são apresentados e comentados resultados de estudos aterramentos capacitivos pois, neste caso conforme é previsto na teoria básica os níveis de sobretensão atingem valores muito elevados portanto incompatíveis com os níveis de isolamento normalmente utilizados nos sistemas elétricos.
- 8 - Em sistemas aterrados via indutores, este fenômeno é verificado teoricamente, porém não se espera que o mesmo ocorra em sistemas aterrados via resistores, fato que realmente ocorre quando de aterramento inferiores a 0,10 [p.u.] e níveis de curto circuito superiores aos apresentados pelos sistemas, diga-se de passagem reais, estudados.

TABELA 3.1 - TENSÃO TRANSITÓRIA E EM REGIME APÓS UM CURTO CIRCUITO MONOFÁSICO EM UM SISTEMA CONFORME FIGURA 3.1					
TENSÃO (MÓDULO) (p.u.)					
Aterramento Zn (p.u.)	Condição	15,0 [KV]		36,2 [KV]	
		Res.	Ind.	Res.	Ind.
0,0	Transitória	1,35	1,35	1,68	1,68
	Regime	1,35	1,35	1,65	1,61
0,1	Transitória	.-	.-	1,67	1,69
	Regime	.-	.-	1,65	1,63
0,2	Transitória	.-	.-	1,87	2,00
	Regime	.-	.-	1,67	1,64
0,3	Transitória	.-	.-	.-	2,05
	Regime	.-	.-	.-	1,66
0,4	Transitória	.-	.-	.-	2,08
	Regime	.-	.-	.-	1,67
0,5	Transitória	1,35	1,35	1,89	2,10
	Regime	1,35	1,35	1,68	1,67
1,0	Transitória	1,35	1,36	1,89	2,16
	Regime	1,35	1,36	1,68	1,72
2,0	Transitória	.-	.-	.-	2,18
	Regime	.-	.-	.-	1,85
3,0	Transitória	.-	.-	.-	2,20
	Regime	.-	.-	.-	1,93
5,0	Transitória	1,35	1,43	1,89	2,24
	Regime	1,35	1,43	1,68	2,05
10,0	Transitória	1,35	1,43	1,89	2,40
	Regime	1,35	1,43	1,68	2,20

O ponto em questão é que na maioria dos casos os pára-raios convencionais para sistemas em média tensão apresentam, devido à utilização de sistemas de equalização de potencial simplificados uma redução no valor da “Tensão Disruptiva frente a Impulsos de Manobra” conforme mostrado na FIGURA 3.2.

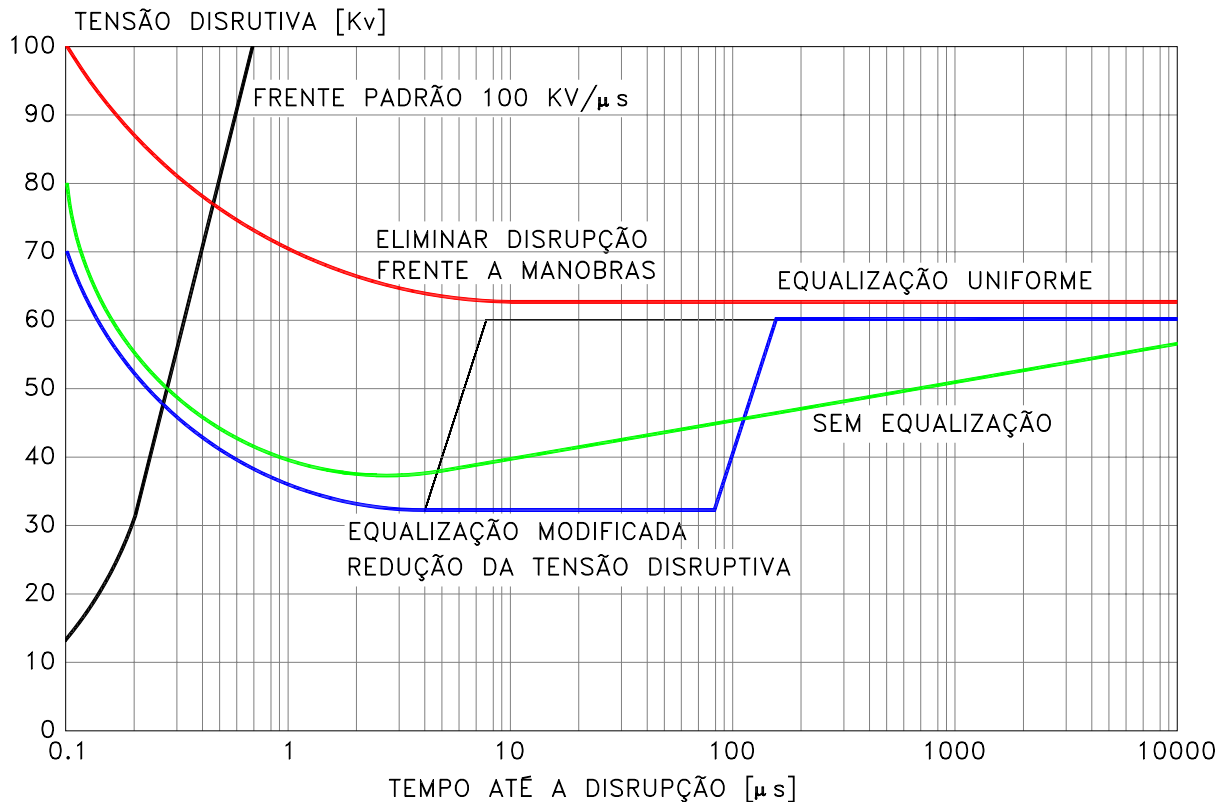


FIGURA 3.2 - CARACTERÍSTICA TENSÃO DISRUPTIVA DE CENTELHADORES DOTADOS DE VÁRIOS DISPOSITIVOS DE EQUALIZAÇÃO DE POTENCIAL.

Os centelhadores dos pára-raios para sistemas em média tensão até 21 [KV], normalmente, não possuem nenhum dispositivo de equalização de potencial. Deste modo, devido a existência de um sistema de equalização de potencial capacitivo com características parasitas, ocorre uma redução pronunciada na “Tensão Disruptiva frente a Impulsos Atmosféricos e de Manobra” do pára-raios que em alguns casos pode atingir a ordem de 60%, conforme mostra FIGURA 3.2. (VIII)

Para tensões nominais superiores a 21 [KV], ou seja, classe 36,2 [KV], tipicamente, os pára-raios apresentam sistemas de equalização de potencial mas, normalmente, não são tomados cuidados extras com os valores de “Tensão Disruptiva sob Impulsos de Manobra” ensaio inclusive não previsto em Norma.

Tendo em mente estas considerações pode ocorrer, obviamente dependendo do caso, que um pára-raios convencional mal especificado em termos de “Tensão Nominal” venha atuar sob condição de manobra condição de projeto não prevista o que pode conduzir o mesmo a um modo de falha intempestivo.

O modo de falha induzido por descargas de manobra se encontra obviamente relacionado com as situações impostas pelo sistema que, obviamente, são de origem estatística. A falha pode se manifestar por excesso de energia escoada ou ainda por redução na capacidade de reselagem do pára-raios após a descarga de uma corrente de manobra. (VIII)

A pior falha induzida que pode ocorrer nestas condições se encontra relacionada com a possibilidade de atuações consecutivas sob sobretensão em frequência industrial. Nestes casos a capacidade térmica dos centelhadores e resistores não lineares principais, bem como, a capacidade de extinção de corrente subsequente são de longe ultrapassadas pelas solicitações impostas pelos sistemas, lembrar que:

$$\mathbf{I_{sub.}} = \mathbf{I_{sub.Nom.}} \cdot \mathbf{Up.u.}^\alpha \quad (5)$$

onde:

I_{sub.} - Corrente subsequente;

I_{sub.Nom.} - Corrente subsequente nominal;

Up.u. - Tensão em por unidade da nominal;

α - Coeficiente de não linearidade $4 < \alpha < 5$.

Deste modo, segundo equação (5), ao atuar sob uma condição de sobretensão de 1,2 [p.u.] um pára-raios convencional fica submetido a uma corrente subsequente de aproximadamente 1,8 [p.u.] a 2,0 [p.u.] da corrente nominal, valores que, normalmente, excedem a capacidade de reselagem dos centelhadores quando não ultrapassam a capacidade de absorção de energia dos resistores não lineares a carboneto de silício.

De maneira a fornecer um exemplo de um erro comum no decorrer da especificação de um pára-raios convencional, seja escolher um pára-raios para um sistema em 36,2 [KV] do qual, a princípio se desconhecem maiores detalhes, além do fato do mesmo ser aterrado. Segundo as regras anteriormente definidas, a máxima tensão nominal, calculada segundo a equação (4), para este pára-raios é de 36 [KV], no entanto, tendo em mente o aspecto relacionado com as condições de aterramento, conforme mostra a equação (3), a tensão nominal deste pára-raios é de 30 [KV].^{9, 10, 11}

Notas:

9 - Em sistema de 34,5 [KV] é usual utilizar pára-raios de 27 [KV];

10 - Nestes casos o valor mínimo de “Tensão Nominal”, segundo equação (2), é de 24 [KV], ou seja 1,25 [p.u.]

11 - Qualquer valor de “Tensão Nominal” entre 30 [KV] e 36 [KV], atende, pelo menos em tese, os requisitos mínimos necessários ao correto desempenho dos pára-raios, o problema básico nestes casos fica restrito as condições impostas pela “Coordenação de isolamento”.

O problema ocorre quando o usuário se defronta com informações extras e procede a uma má interpretação destas, por exemplo, no caso sob discussão, seja a existência, em estoque, de um conjunto de pára-raios de 21 [KV] com tensão disruptiva mínima em frequência industrial, obtida via ensaios em laboratório de 1,6 [p.u.]^{12, 13} e, subsequentemente é requerido ao responsável técnico uma decisão sobre a instalação ou não destes pára-raios.¹⁴

Notas:

- 12 - Este valor varia de 1,5 [p.u.], ou seja, o mínimo normalizado a 2,2 [p.u.] porém, em nenhum caso este fato deve ou pode ser encarado como mérito ou não de um determinado pára-raios;
- 13 - O valor mais comum para esta faixa de tensão nominal é da ordem de 1,7 [p.u.] haja vista que estes pára-raios apresentam equalização de potencial resistiva.
- 14 - Pelos motivos acima expostos a resposta óbvia é que estes pára-raios são inadequados para um sistema com tensão de operação de 36,2 [KV].

Agora seja o raciocínio que considere de modo incorreto o termo “Tensão Disruptiva Mínima em Frequência Industrial”, que uma vez assumido como um “Valor Característico Específico” do pára-raios, via de regra resulta em falha intempestivas dos mesmos. Segundo a equação (6), é possível concluir que valores de tensão em frequência industrial inferiores a 1,69 [p.u.], não implicam na disrupção dos centelhadores.

Considerando a redução que ocorre na suportabilidade dos pára-raios na região de impulsos de manobra, conforme mostra a FIGURA 3.2, em tese, praticamente em qualquer condição de aterramento estudada, ou seja, entre 0,0 [p.u.] e 10,0 [p.u.], um pára-raios de 21 [KV] entra em disrupção sob solicitação de manobra e provavelmente sob condição de sobretensão em frequência industrial e, deste modo, muito possivelmente, em modo de falha pois, a corrente subsequente, bem como, a energia absorvida superam os limites de projeto do pára-raios, fato que impede sua utilização em sistemas de 36,2 [KV].¹⁵

$$U_{s \ 60 \ Hz} = 1,732 k_D \ 60 \ Hz U_n / U_{F-F} \quad (6)$$

onde:

$U_{s \ 60 \ Hz}$ - Tensão suportável a frequência industrial [p.u. Sistema], ou seja, Limite da Disrupção; e

$k_D \ 60 \ Hz$ ou **$k_s \ 60 \ Hz$** - Quociente “Tensão Disruptiva a Frequência Industrial - Tensão Nominal” do pára-raios, por hipótese, no caso exemplo, 1,6 [p.u.] (Característica do projeto do Pára-raios).

Notas

- 15 - Em termos de atuação frente a sobretensões de manobra, supondo, por exemplo, (Este valor é meramente orientativo, o que implica que deve ser sempre comprovado via ensaios ou informação dos fabricantes) uma redução na suportabilidade dos centelhadores de um determinado projeto de pára-raios para a ordem de 85,0% da suportabilidade frente a tensão em frequência industrial, o que resulta em um valor de tensão disruptiva sob manobra de aproximadamente 1,45 [p.u.], vem que os pára-raios de 21 [KV] atuam em qualquer condição de aterramento. Dependendo do caso estes pára-raios podem atuar inclusive frente a manobras de energização de linha fato já reportado.

Dentro deste contexto, suportabilidade frente a impulso de manobra de um pára-raios convencional a carboneto de silício é dada pela equação (7).

$$U_{SI} = 1,732 k_{DI} k_D 60Hz U_n / U_{F-F} \quad (7)$$

onde:

U_n - Tensão nominal do pára-raios [KV];

U_{SI} - Tensão suportável de manobra do pára-raios [p.u. Sistema], ou seja, Limite da Disrupção;

k_{DI} ou k_{SI} - Quociente “Tensão Disruptiva sob Impulso de Manobra - Tensão Disruptiva a Freqüência Industrial” do pára-raios, em valores de crista, por hipótese, no caso exemplo, 0,85 [p.u.] (Característica do Projeto do Pára-raios).

Uma alternativa usualmente utilizada em alta e extra alta tensão relativa a suportabilidade frente a tensão em freqüência industrial é a que assume que o valor da “Tensão Disruptiva Mínima de Manobra” deve ser no mínimo igual a “Máxima SobreTensão Sustentada Prospectiva” fato que, de modo indireto, determina a “Tensão Nominal” do pára-raios. Logo, conforme mostra a equação (8), para as situações estudadas, a pior condição de aterramento, ou seja, 10,0 [p.u.] implica em um pára-raios de 36 [KV].

$$U_n = \{U_{SI} U_{F-F}\} / \{1,732 k_{DI} k_D 60 Hz\} \quad (8)$$

Por outro lado, ainda segundo a equação (8), para as condições de aterramento inferiores a 0,50 [p.u.] vem que os pára-raios de 27 [KV] são adequados, fato que a tua no sentido de comprovar as regras definidas nas equações (1) a (4). Deste modo, tendo em mente os dados lançados na TABELA é possível concluir que os pára-raios com “Tensão Nominal” de 27 [KV], construídos com um sistema de equalização de potencial resistivo, não atuam frente as sobretensões de manobras em sistemas aterrados por resistores entre 0,0 [p.u.] e 10,0 [p.u.] e indutores entre 0,0 [p.u.] e 0,1 [p.u.], calculado conforme equação (8), ou seja, com os dados assumidos $U_{SI} = 1,85$ [p.u.] para um pára-raios de 27 [KV].

O exemplo escolhido, em alguns casos extremamente comum, ressalta o problema da utilização incorreta de um dos “Requisitos Mínimos Necessários ao Desempenho Frente as Solicitações Impostas pelos Sistemas de Potência” e, serve como orientação para que estes casos não venham ocorrer,¹⁶ bem como, demonstra que dependendo das condições do sistema é possível que os pára-raios convencionais venham atuar frente a sobretensões transitórias relacionadas com curtos circuitos e deste modo, pode ser necessário que os mesmos venham a ser especificados frente a esta solicitação.¹⁷

Notas

- 16 - Um ponto que deve ser ressaltado é o relacionado com os ensaios de tensão aplicada e tensão disruptiva em frequência industrial cujos resultados, devem ser somente comparados com dados típicos de ensaios de laboratório e, portanto, principalmente quando resultam em valor superior a tensão nominal, conforme listado nas placas de identificação do pára-raios, não devem ser tomados como base para a aplicação, fato algumas vezes muito comum;
- 17 - Uma boa indicação da adequabilidade da Tensão Nominal de um pára-raios convencional é verificar se este valor multiplicado por 2.0 é superior a solicitação máxima de manobra imposta pelo sistema, atentar que, os critérios de suportabilidade frente a tensões em frequência industrial devem ser também atendidos.

4 - TENSÃO NOMINAL DE UM PÁRA-RAIOS A ÓXIDO METÁLICO

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 a óxido metálico sem centelhadores, é necessário atentar para algumas sutis diferenças que, uma vez ignoradas, podem resultar em erros de aplicação, assim seja:

4.1 - 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 de tensão em frequência industrial que, aplicado ao pára-raios, resulta em comportamento termicamente estável, após um ensaio de ciclo de serviço padrão. Dentro deste contexto, 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” dos pára-raios a óxido metálico sem centelhadores se encontra implícito o conceito de que estes equipamentos podem operar sob tensão igual ou inferior a este limite por um período de tempo indeterminado, fato que, por sua vez, de modo complementar, implica que estes pára-raios não são capazes de operar, de forma contínua, sob tensões superiores a “Máxima Tensão de Operação Contínua”, observação esta que deve ser encarada com reservas pois, conforme evidencia a TABELA 4.1, alguns projetos de pára-raios podem operar, sem danos, na faixa de tensão em frequência industrial entre a “Máxima Tensão de Operação Contínua” 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. (VIII)

Deste modo, geralmente, os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores podem operar sob tensões superiores a sua “Máxima Tensão de Operação Contínua”, desde que, esta operação não possua carácter permanente, portanto, o valor definido pela “Máxima Tensão de Operação Contínua” 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 convencional a carboneto de silício.

TABELA 4.1 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MARGENS DE PROJETO PREVISTAS PELAS NORMAS ANSI-CSA E IEC-ABNT				
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. U_{F-T} ** ***
Projeto Real (Média)	Estação Distribuição Encapsulado	1,12	1,08	1,19
		1,48	1,44	1,57
		1,45	1,41	1,54
Projeto Segundo ANSI	Estação Distribuição Encapsulado	1,12	1,08	1,19
		1,37	1,34	1,45
		1,28	1,25	1,36
Projeto Segundo IEC	Estação Distribuição Encapsulado	1,12	1,08	1,19
		1,08	1,05	1,14
		1,12	1,11	1,19

Onde:

* - “Projeto Segundo”, significa “Modelo Computacional”;

** - Os pára-raios podem suportar esta tensão por um intervalo de tempo indeterminado desde que não sejam solicitados por descarga prévia de corrente;

*** - Baseado em $MCOV = 1,06 U_n$;

**** - Pára-raios Encapsulado - Borracha de Silicone ou EPDM.

De uma maneira geral, a definição da “Máxima Tensão de Operação Contínua”, tem como propósito cobrir, entre outros, aspectos relacionados com as margens de segurança devido a tolerâncias de fabricação, perfil de envelhecimento, contingências de sistema e fatores ambientais extremos que, normalmente, podem inclusive não ocorrer ao longo da vida útil do pára-raios.

Deste modo, os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores devem ser especificados de maneira que a sua “Máxima Tensão de Operação Contínua - MCOV” seja sempre superior a “Máxima Tensão de Operação Contínua do Sistema - SMCOV” e, portanto, condições específicas que possam resultar que um número limitado destes pára-raios venham a operar sob condições de tensão ligeiramente superiores a “Máxima Tensão de Operação Contínua”, devido a presença de margens de projeto aparentemente tão conservativas, não são, usualmente, observadas. No entanto, em sistemas efetivamente aterrados este tipo de consideração pode resultar em erros de aplicação, pois é necessário levar em conta, nestes casos, a elevação de tensão devido a faltas, bem como os aspectos pertinentes a proteção do sistema.

4.2 - 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 frequência industrial, definido em norma superior a “Máxima Tensão de Operação Contínua”, 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 em frequência 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” e a “Máxima Tensão de Operação Contínua”, variável, 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 em média tensão são multi-aterrados, o que ocorre em, praticamente, quase todo o mercado norte-americano. Considerando que nestes sistemas as sobretensões em frequência industrial resultantes das faltas fase-terra, apresentam características mais consistentes que, um sistemas providos de outro tipo de aterramento estas normas prevêem uma relação de 1,17 [p.u.] entre a “Tensão Nominal de Ciclo de Operação” e a “Máxima Tensão de Operação Contínua” obtida, em uma série de resultados acumulados ao longo dos anos, em sistemas de distribuição combinados com as tensões de sistemas padronizadas por estas normas.

A estrutura de Tensão Nominal de Ciclo de Operação”, conforme posto nas Normas ANSI-CSA, procura ainda facilitar, na maioria dos casos, a substituição direta de um pára-raios convencional a carboneto de silício por seu equivalente a óxido metálico.

Considerando que a “Tensão Nominal de Ciclo de Operação” e a “Máxima Tensão de Operação Contínua” 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” e da “Máxima Tensão de Operação Contínua”, embora este valor não se constitua em um dos parâmetros utilizados no ensaio.

Segundo este ponto de vista, no caso das Normas IEC-ABNT, o “Ensaio de Ciclo Crítico” é o “Ensaio de Ciclo de Operação Combinado” que, por sua vez, submete o pára-raios a “Tensão Nominal de Ciclo de Operação” bem como, a “Máxima Tensão de Operação Contínua”.

As normas IEC-ABNT, não assumem a possibilidade de que se utilize, nos sistemas em média tensão, somente a prática de multi-aterramento. Deste modo, a estrutura de “Tensão Nominal de Ciclo de Operação” adotadas nestas normas, difere da adotada pelas Normas ANSI-CSA. Além disto, as Normas IEC-ABNT não provêm, de modo formal, a existência de uma relação, normalizada, entre a “Tensão Nominal de Ciclo de Operação” e a “Máxima Tensão de Operação Contínua” que, no entanto, acaba por ser definida pelo conjunto de ensaios e requisitos de desempenho mínimos exigidos.

Complementarmente, 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 constituídos sem centelhadores devem permanecer energizados sob sua “Tensão Nominal de Ciclo de Operação”, 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” por 10 segundos seguida pela aplicação da “Máxima Tensão de Operação Contínua”, 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 4.1 os pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, projetados segundo os requisitos de estabilidade térmica¹⁸ proposto nas Normas IEC-ABNT, podem apresentar margens de segurança,¹⁹ frente a solicitações a frequência industrial, inferiores, as obtidas quando se adotam os mesmos requisitos propostos nas Normas ANSI-CSA.

Notas

- 18 - 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.
- 19 - Alguns estudos, realizados com o auxílio de modelos computacionais 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 frequência 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 convencionais 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 supostamente semelhantes.

Dentro dos aspectos e definições anteriormente discutidas, a “Tensão de Operação Contínua” de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores é determinado segundo a equação (9).

$$U_{MCOV} \geq 1,25 U_{F-F} / 1,732 \quad (9)$$

onde:

U_{MCOV} - Máxima tensão de operação contínua do pára-raios.

E, deste modo, a “Tensão Nominal” passa a ser definida segundo a equação (10), ou seja.

$$U_n = 1,25 k_{MCOV} U_{F-F} / 1,732 \quad (10)$$

onde:

k_{MCOV} - Quociente entre a tensão nominal e a máxima tensão de operação contínua do pára-raios.

Com respeito a suportabilidade frente a sobretensões em frequência industrial, comparando a TABELA 3.1 com a TABELA 4.1 é possível concluir, pelo menos, a primeira vista, pois é usual nos casos de sistemas em média tensão prever a possibilidade de ocorrência de regimes de falta com caráter permanente, que para sistemas com tensão operação nominal de 15 [KV] os projetos de pára-raios com Tensão de Operação Contínua de 9 [KV], fornecidos no mercado, conforme mostra a equação (11) atendem as solicitações a eles impostas pois, a maior solicitação média em regime permanente 1,43 [p.u.] é inferior a suportabilidade mínima dos pára-raios distribuição e encapsulado, ou seja, 1,63 [p.u.].

$$U_S \text{ 60Hz} = 1,732 K_S \text{ 60Hz } U_n / U_{F-F} \quad (11)$$

onde:

$U_S \text{ 60Hz}$ - Sobretensão em frequência industrial suportável pelo pára-raios [p.u. Sistema];

$K_S \text{ 60Hz}$ - Sobretensão de projeto máxima do pára-raios em [p.u.] da Tensão Nominal.

No entanto, convém atentar que os pára-raios estação de 9 [KV] de “Tensão de Operação Contínua” apresentam suportabilidade frente a sobretensão em frequência industrial, conforme TABELA 4.1, bem como, equação (11), ou seja, 1,26 [p.u.], inferior a de um pára-raios de distribuição equivalente e inferior a menor solicitação imposta pelo sistema conforme TABELA 3.1, ou seja, 1,35 [p.u.].

Logo, segundo o exemplo acima, a substituição aleatória, principalmente de pára-raios que forneçam um nível de proteção muito reduzido, pode resultar em falhas intempestivas, usualmente inexplicáveis.

Dentro deste mesmo raciocínio, um pára-raios com Tensão de Operação Contínua de 21 [KV] é, em tese, virtualmente inadequado para sistemas com tensão de operação de 36,2 [KV] pois, na melhor das hipóteses apresenta uma suportabilidade frente a sobretensões em frequência industrial, segundo a equação (11) da ordem 1,50 [p.u.] inferior a qualquer solicitação imposta por estes sistemas.

À Tensão de Operação Contínua de 21 [KV], corresponde a um pára-raios de 24 [KV] de Tensão Nominal, ou seja, uma tensão inferior ao limite de Tensão Nominal usualmente adotado para os pára-raios para sistemas de 36,2 [KV].

Considerando os padrões usualmente adotados em sistemas de média tensão que, por vezes, resultam na utilização de pára-raios com Tensão Nominal de 27 [KV], segundo a equação (9), corresponde uma suportabilidade frente a sobretensões em frequência industrial de aproximadamente 1,69 [p.u.], fato que permite atender sistemas aterrados por resistores e indutores entre 0,0 [p.u.] e 10,0 [p.u.] e indutores entre 0,0 e 0,1 [p.u.].

Segundo a regra básica simplificada, ou seja, equação (3) para sistemas multi-aterrados a “Tensão Nominal Mínima” de pára-raios, adequada a um sistema em 36,2 [KV], conforme também abordado e passível de confirmação pelas TABELAS 3.1 e TABELA 4.1, é 30 [KV].

Conforme mostra ainda a TABELA 4.1, e que se constitui em fato de grande relevância, a suportabilidade mínima frente a sobretensão em frequência industrial que um pára-raios necessita apresentar, para estar de acordo com as Normas IEC, pode ser inferior a que o mesmo necessita para estar de acordo com a Norma ANSI. Este aspecto implica na hipótese de existência de pára-raios de mesma “Tensão de Operação Contínua” e desempenho distinto fato que, dependendo das condições assumidas durante os processos de aplicação dos pára-raios no campo, pode resultar em falhas intempestivas, de origem aparentemente inexplicável.

5 - OS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES E AS PRÁTICAS DE NORMA

Aplicando as regras para a escolha da tensão nominal de um pára-raios, segundo as equações (3) e (4), relativas a sistemas multi-aterrados ou isolados às equações (6), (7) e (11) é possível obter as equações (12) e (13), relativas a pára-raios convencionais a carboneto de silício e (14), relativa a pára-raios a óxido metálico sem centelhadores, utilizadas respectivamente na obtenção da TABELA 5.1 e da TABELA 5.2.

$$K_S \text{ 60Hz} = \{0,687 \rightarrow 0,550\} U \text{ 60 Hz} \quad (12)$$

$$K_{SI} = U_I / U \text{ 60 Hz} \quad (13)$$

$$K_S \text{ 60 Hz} = \{0,687 \rightarrow 0,550\} U \text{ 60 Hz} \quad (14)$$

onde:

U 60 Hz - Sobretensão a frequência industrial em [p.u.], (Calculada ou Medida);

U_I - Sobretensão sob impulso de manobra em [p.u.], (Calculada ou Medida);

k_S 60 Hz - Sobretensão a frequência industrial em [p.u.] da Tensão nominal do pára-raios;

k_{SI} - Sobretensão sob pulso de manobra em [p.u.] da Tensão Disruptiva a Frequência Industrial do pára-raios.

Nos cálculos de α , obtidos segundo equação (15), lançados na TABELA 5.1, a linha superior é relativa a sistemas com aterramento resistivo e linha inferior é relativa a sistemas com aterramento indutivo, foi utilizado nos pára-raios para os sistemas de 15 [KV] um coeficiente **k_{DI}** igual a 0,70, compatível com um pára-raios sem equalização de potencial. Já nos pára-raios para sistemas de 36,2 [KV] foi utilizado um coeficiente **k_{DI}** igual a 0,95, compatível com um pára-raios com equalização de potencial resistiva.

$$\alpha = k_{SI} k_S \text{ 60 Hz} / k_{DI} \quad (15)$$

É particularmente óbvio que os valores de α lançados na TABELA 5.1 são tremendamente dependentes do valor do coeficiente k_{DI} que é uma característica inerente do projeto dos centelhadores do pára-raios e de sua distribuição no inferior do invólucro.

No entanto, considerando que os valores utilizados, segundo FIGURA 3.2 apresentam um certo grau de representatividade é possível concluir que a “Tensão Disruptiva em Frequência Industrial” não é uma “Característica de Proteção” e, portanto não deve ser como tal, bem como, que, **“em primeira instância, o valor mínimo de 1,50 para o “Quociente Entre a Tensão Disruptiva a Frequência Industrial e a Tensão Nominal” é adequado”** pois cobre boa parte das solicitações resultantes de faltas fase-terra em sistemas de média tensão.

TABELA 5.1 - SOBRETENSÕES ESPERADAS EM REGIME E EM MANOBRA APÓS UM CURTO MONOFÁSICO EM UM SISTEMA CONFORME FIGURA 3.1 E EQUAÇÃO (12) E (13)							
TENSÃO (MÓDULO) (p.u)							
Aterramento Zn (p.u.)	Fator	15,0 [KV]			36,2 [KV]		
		Res.*	Ind.*	α^{**}	Res.*	Ind.*	α^{**}
0,0	k_{SI}	1,00	1,00	1,06→1,33	1,68	1,68	0,97→1,21
	k_S 60 Hz	0,74→0,93	0,74→0,93	1,06→1,33	0,90→1,13	0,88→1,10	0,97→1,20
0,1	k_{SI}	--	--		1,67	1,69	0,97→1,21
	k_S 60 Hz	--	--		0,90→1,13	0,89→1,12	1,05→1,22
0,2	k_{SI}	--	--		1,87	2,00	1,08→1,36
	k_S 60 Hz	--	--		0,92→1,15	0,90→1,13	1,16→1,45
0,3	k_{SI}	--	--		--	2,05	--
	k_S 60 Hz	--	--		--	0,91→1,14	1,18→1,47
0,4	k_{SI}	--	--		--	2,08	--
	k_S 60 Hz	--	--		--	0,91→1,14	1,20→1,51
0,5	k_{SI}	1,00	1,00	1,06→1,33	1,89	2,10	1,09→1,37
	k_S 60 Hz	0,74→0,93	0,74→0,93	1,06→1,33	0,92→1,15	0,92→1,15	1,22→1,53
1,0	k_{SI}	1,00	1,00	1,06→1,33	1,13	1,26	1,09→1,37
	k_S 60 Hz	0,74→0,93	0,74→0,93	1,06→1,33	0,92→1,15	0,94→1,18	1,24→1,54
2,0	k_{SI}	--	--		--	1,18	--
	k_S 60 Hz	--	--		--	1,02→1,27	1,26→1,58
3,0	k_{SI}	--	--		--	1,14	--
	k_S 60 Hz	--	--		--	1,06→1,33	1,27→1,62
5,0	k_{SI}	1,00	1,00	1,06→1,33	1,13	1,09	1,09→1,37
	k_S 60 Hz	0,74→0,93	0,78→0,98	1,11→1,40	0,92→1,15	1,13→1,41	1,29→1,62
10,0	k_{SI}	1,00	1,00	1,06→1,33	1,13	1,09	1,09→1,37
	k_S 60 Hz	0,74→0,93	0,78→0,98	1,11→1,40	0,92→1,15	1,21→1,51	1,39→1,74

Onde:

* - o maior valor corresponde ao pára-raios de menor tensão nominal passível de ser utilizado no sistema.

** - O valor de α (Mínimo \rightarrow Máximo) foi obtido com o auxílio da equação (15) e, em tese representa o “Menor Quociente entre a Tensão Disruptiva a Frequência Industrial e a Tensão Nominal” pois, conforme definido os fatores k_{SI} e k_S 60 Hz representam, em termos mínimos, as relações de suportabilidade entre Sobretensão sob Impulso de Manobra, Sobretensão em frequência industrial e Tensão Nominal do pára-raios.

Nos cálculos de β , obtidos segundo a equação (16), lançados na TABELA 5.2, relativo somente as condições de aterramento indutivo, tanto nos pára-raios para os sistemas de 15 [KV] quando nos pára-raios para sistemas de 36,2 [KV], foi utilizado um coeficiente k_{MCOV} igual a **1,17**, compatível com um pára-raios projetado segundo as Normas ANSI - CSA e que resulta em uma menor solicitação, pois é conveniente atentar que o inverso de 0,80 é 1,25.

$$\beta = k_S \text{ 60 Hz } k_{MCOV} \quad (16)$$

TABELA 5.2 - SOBRETENSÕES ESPERADAS EM REGIME APÓS UM CURTO MONOFÁSICO EM UM SISTEMA CONFORME FIGURA 3.1 E EQUAÇÃO (14)							
TENSÃO (MÓDULO) (p.u.)							
Aterramento Zn (p.u.)	Fator	15,0 [KV]			36,2 [KV]		
		Res.*	Ind.*	β^*	Res.*	Ind.*	β^*
0,0	k_S 60 Hz	0,74 \rightarrow 0,93	0,74 \rightarrow 0,93	0,87 \rightarrow 1,09	0,90 \rightarrow 1,13	0,88 \rightarrow 1,10	1,03 \rightarrow 1,29
0,1	k_S 60 Hz	-.-	-.-	-.-	0,90 \rightarrow 1,13	0,89 \rightarrow 1,12	1,04 \rightarrow 1,31
0,2	k_S 60 Hz	-.-	-.-	-.-	0,92 \rightarrow 1,15	0,90 \rightarrow 1,13	1,05 \rightarrow 1,32
0,3	k_S 60 Hz	-.-	-.-	-.-	-.-	0,91 \rightarrow 1,14	1,06 \rightarrow 1,33
0,4	k_S 60 Hz	-.-	-.-	-.-	-.-	0,91 \rightarrow 1,14	1,06 \rightarrow 1,33
0,5	k_S 60 Hz	0,74 \rightarrow 0,93	0,74 \rightarrow 0,93	0,87 \rightarrow 1,09	0,92 \rightarrow 1,15	0,92 \rightarrow 1,15	1,08 \rightarrow 1,35
1,0	k_S 60 Hz	0,74 \rightarrow 0,93	0,74 \rightarrow 0,93	0,87 \rightarrow 1,09	0,92 \rightarrow 1,15	0,94 \rightarrow 1,18	1,10 \rightarrow 1,38
2,0	k_S 60 Hz	-.-	-.-	-.-	-.-	1,02 \rightarrow 1,27	1,19 \rightarrow 1,49
5,0	k_S 60 Hz	-.-	-.-	-.-	-.-	1,06 \rightarrow 1,33	1,24 \rightarrow 1,56
10,0	k_S 60 Hz	0,74 \rightarrow 0,93	0,78 \rightarrow 0,98	0,91 \rightarrow 1,15	0,92 \rightarrow 1,15	1,21 \rightarrow 1,51	1,42 \rightarrow 1,77

Onde:

* - O valor de β (Mínimo \rightarrow Máximo) foi obtido com o auxílio da equação (16), e, em tese representa o “Menor Quociente entre a Tensão em Frequência Industrial e a Tensão Operação Contínua” do pára-raios.

Comparando os resultados mostrados na TABELA 4.1 e na TABELA 5.2 é possível concluir que, em primeira instancia, os limites de projeto fixados pelas Normas IEC - ABNT são inferiores a grande parte das solicitações imposta pelo sistema estudado.

Dentro deste contexto, os limites fixados por estas normas podem não se constituir em bons parâmetros de projeto de um pára-raios a óxido metálico e neste caso deve ser sempre relevado a experiência do fabricante que obviamente não vai se ater a limites tão reduzidos. Novamente, fica patente o fato, aparentemente notório, que os **“Ensaio de Tipo não são Equivalentes a Ensaio de Desenvolvimento de produto”** e que caso sejam utilizados como tal podem ocorrer no campo uma série de problemas, no mínimo interessante, e a luz do senso comum usualmente inexplicáveis.

Em termos gerais, parece razoável supor que os procedimentos adotados pelas Normas ANSI-CSA, quando de sistemas em média tensão, permite substituir diretamente um pára-raios convencional a carboneto de silício por seu equivalente, em termos de “Tensão nominal” a óxido metálico. É óbvio que o mesmo pode ocorrer com pára-raios fabricados segundo as Normas IEC-ABNT, Basta para tanto que o fabricante tenha o cuidado de não projetar o seu pára-raios para atender tão somente os limites pré-fixados por estas mesmas normas.

Considerando ainda o coeficiente k_{MCOV} iguala 1,17 [p.u.] vem que a expressão (10) fica:

$$U_n = 03,84 U_{F-F} \quad (17)$$

De modo geral é possível considerar a expressão (17) com compatível com sistemas efetivamente aterrados.

Dentro deste contexto, a regra utilizada para a determinação da tensão nominal de um pára-raios para sistemas efetivamente aterrados independente da tecnologia de construção do pára-raios e, como decorrência deste fato, **k_{MCOV} igual a 1,17, ou seja, “Quociente Entre a Tensão Nominal e a Máxima Tensão de Operação Contínua”, conforme Normas ANSI-CSA fica permanente definido.**²⁰

Notas:

20 - Utilizar uma relação k_{MCOV} igual a 1,25 [p.u.], compatível com alguns pára-raios a óxido metálico sem centelhadores fabricados e comercializados no mercado nacional implica em trabalhar com a relação mostrada na expressão (18), neste caso, é conveniente ressaltar que manutenção de uma “Margem de Segurança” entre a “Tensão Nominal do Pára-raios” e a “Máxima SobreTensão Sustentada” aplicada ao mesmo da ordem de 1,25 [p.u.], conforme sugerido pelas Normas ANSI-CSA, implica em colher um pára-raios a óxido metálico datado de tensão nominal superior ao usualmente adotado.

$$U_{MCOV} > = 1,164 U_{F-F} / 1,732 \quad (18)$$

o que por sua vez implica na expressão (19):

$$U_n = 1,64 k_{MCOV} U_{F-F} / 1,732 \quad (19)$$

Tendo em mente que as solicitações impostas pelos sistemas isolados são, normalmente, superiores a as impostas pelos sistemas efetivamente aterrados é recomendável utilizar a expressão (20) na determinação da tensão nominal de um pára-raios a óxido metálico sem centelhadores adequados a estes sistemas. Isto permite, em tese, cobrir, de um modo simplificado, possíveis solicitações, principalmente em termos de sobretensões, que normalmente não são objeto de estudos e de definições por parte de um usuário comum.²¹

$$U_n = 1,05 U_{F-F} \quad (20)$$

Notas:

21 - Isto permite pelos menos em tese padronizar uma única regra para especificação de pára-raios convencionais e a óxido metálico para sistemas de média tensão.

Deste modo, com respeito ao sistema em média tensão, independentemente da tecnologia utilizada no pára-raios é possível utilizar as regras definidas pelas equações (3) e (4). É recomendado ainda tomar um cuidado todo especial neste caso ao se utilizar pára-raios a óxido metálico do tipo estação.

6 - CONCLUSÕES

Segundo demonstrado caso as regras definidas pelas equações (1) a (4) e, suas correspondentes (9), (10), (17) e (18) forem observadas, aparentemente, não são esperados problemas relacionados com a definição da Tensão Nominal dos pára-raios quer a óxido metálico e, por conseguinte, com sua operação no campo.²²

Notas:

22 - Esta observação não é válida para os Sistemas de Atendimento a Localidades Situadas ao Longo da Linha de Transmissão conforme proposto pela ELETRONORTE, ou em outras palavras a pára-raios instalados “Entre Fases”. Nestes casos devem ser utilizadas a expressão (2) adequada a pára-raios convencionais e as expressões (9) e (10) ou, alternativamente (18) e (19) adequada a pára-raios a óxido metálico se centelhadores. [IX]

Os resultados apresentados são relativos a dois sistemas reais, um em 15 [KV] e outro 36,2 [KV] e, portanto, dotados de características extremamente particulares logo, os dados da TABELA 3.1 apesar de quando manipulados conduzirem a resultados bastante coerente com as regras praticas usualmente utilizadas em sistemas de média tensão, devem ser considerados, preferencialmente, de maneira orientativa.

Com respeito aos pára-raios convencionais os dados demonstram que quando normalmente ocorrem erros de especificação os mesmos são oriundos da falta, ou às vezes excesso porem, com pouca consistência, de conhecimento sobre os projetos e normas sobre os pára-raios.

A análise expedita das regras e da TABELA 3.1 permite concluir que caso a prática usual seja respeitada, pelo menos em termos de tensão nominal os pára-raios convencionais e a óxido metálico, projetados segundo as Normas ANSI-CSA,²³ atendem os requisitos impostos pelos sistemas.

Notas:

23 - Isto não implica em afirmar que não existam pára-raios a óxido metálico sem centelhadores para sistemas de distribuição de, média tensão projetados segundo as Normas IEC-ABNT eficientes. No entanto, uma série de cuidados extras devem ser tornados nestes casos pois os limites de solicitação impostos por estas normas podem conduzir a pára-raios dotados de um baixo perfil de suportabilidade frente a sobretensões em frequência industrial. Cabe neste caso ao fabricante definir este limite e, considerando que **“ENSAIOS DE TIPO NÃO SÃO ENSAIOS DE DESENVOLVIMENTO”** é esperado que tais problemas não venham a ocorrer na prática.

Com respeito aos pára-raios a óxido metálico projetados sem centelhadores os dados utilizados demonstram que alguns cuidados extras devem ser tomados quando da especificação da “Tensão Nominal” ou da “Tensão de Operação Contínua” dos mesmos. Aparentemente a estrutura adotada pelas Normas ANSI permitem a substituição direta de um pára-raios convencional por um equivalente a óxido metálico e, deste modo, os critérios simplificados são também por sua vez validos, fato em parte demonstrado pelos exemplos discutidos. A escolha de um equipamento ativo, e os pára-raios a óxido metálico o são, pode dependendo do caso, exigir uma maior quantidade informações e, deste modo, por exemplo, dados sobre a proteção, e estudos de transitórios podem influenciar e subsidiar as especificações técnicas fato que pode vir a modificar os procedimentos tradicionalmente utilizados.

7 - BIBLIOGRAFIA

- [1] - I - ANSI C-62.1; IEEE Standard for Surge Arresters for Alternating Power Systems; 1984.
- [2] - II - ANSI C-62.11; IEEE Standard for Metal Oxide Surge Arresters for Alternating Current P Circuits; 1986.
- [3] - III - IEC 99.1; Non Linear Resistor - Type Gapped Surge Arresters for A.C. Systems; 1991.
- [4] - IV - IEC 99.4; Metal Oxide Surge Arresters Without Gaps for A.C. Systems; 1992.
- [5] - V - ABNT CE-37, PROJETO 3:37.1; Pára-raios a Resistor não Linear a Carboneto de Silício SIC para Circuitos de potência de Corrente Alternada; 1989.
- [6] - VI - ABNT CE-37, PROJETO 3:37.7; Pára-raios a Resistor não Linear a Óxido Metálico se Centelhadores para Circuitos de Potência de Corrente Alternada; 1991.
- [7] - VII - ABNT CE-37, PROJETO 3:37.11; Pára-raios a Resistor não Linear a Óxido Metálico se Centelhadores para Circuitos de Potência de Corrente Alternada; 1992.
- [8] - VIII - MARTINEZ.M.L.B; Pára-raios para sistema de média tensão Características Técnicas e Aplicação a Sistemas de Potência; Dissertação de mestrado; orientador Prof. João Roberto Cogo. EFEI –Escola Federal de Engenharia de Itajubá – 1993.
- [9] - IX - D’AJUZ. Et alli; Linhas de transmissão com Cabos Pára-raios Energizados – Uma Solução Econômica para o Suprimento a Comunidades Isoladas; XIIº SNPTEE, Outubro 1993, Recife, Pernambuco.