

Especificação de para-raios em sistemas de distribuição rural trifásico a dois fios

1st Murilo Neumann Oliveira
Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
murilo.neumann@acad.ufsm.br

2nd Leonardo F. S. dos Santos
Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
Leonardo.santos@acad.ufsm.br

3rd Gustavo Marchesan
Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
marchesan.gustavo@ufsm.br

4th Aécio de Lima Oliveira
Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
aecio.oliveira@ufsm.br

5th Ghendy Cardoso
Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
ghendy@ufsm.br

6th Diego Berlezi Ramos
Centro de Excelência em Energia e
Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
diego.berlezi@gmail.com

Resumo- Nos últimos anos, a zona rural brasileira, vem se industrializando e se automatizando com extrema rapidez. Portanto, necessita-se com maior frequência de uma maior potência, no entanto é inviável economicamente substituir a rede monofásica MRT, por um sistema trifásico que entregue o suficiente para as máquinas atuais operarem corretamente. Este documento visa abordar o dimensionamento de para-raios para uma topologia trifásica alternativa ao MRT que é de baixo custo. A metodologia utilizada neste artigo baseou-se em estudos de dimensionamentos para sistema trifásicos e a inserção dele na realidade do sistema de distribuição trifásico a dois fios.

Palavras-chaves- Descargas atmosféricas; distribuição rural; trifásico a dois fios; Especificação;

I. INTRODUÇÃO

Segundo o censo agropecuário de 2017 do IBGE [1], aproximadamente 41% do território brasileiro corresponde a estabelecimentos agropecuários [1]. Esse número é ainda maior se adicionarmos aqueles que vivem na zona rural, mas não são produtores. O Brasil é o quarto maior produtor de grãos do mundo [2] e o fornecimento de energia elétrica no meio rural foi e ainda é um desafio. Uma energia elétrica forte e de qualidade impulsiona o agronegócio e melhora a qualidade de vida dos produtores rurais.

O sistema de distribuição rural amplamente utilizado, principalmente em regiões com baixa densidade demográfica é o sistema monofilar com retorno por terra (MRT). O MRT possui algumas vantagens entre elas, o baixo custo, visto que não é necessário utilizar cruzetas e ferragens associadas, além de que a rede possui somente um condutor aéreo, o que permite um projeto de construção simplificado.

No entanto, a zona rural brasileira, principalmente a agricultura e a agropecuária estão experienciando um rápido desenvolvimento em sua modernização, logo a demanda energética está sendo expandida. Portanto necessita de sistemas alternativos que supra esta demanda.

O sistema trifásico está presente, em sua maioria, em latifúndios, visto que, suas máquinas são de maior e a capital para investimentos é maior. Porém, o sistema costuma ser monofásico nas pequenas propriedades. O sistema T2F consiste em adaptar o sistema monofásico MRT adicionando, mais um condutor aéreo ao já existente, sendo o terceiro

condutor o próprio solo. Dois transformadores trifásicos, um de isolamento e outro do consumidor, também são necessários. Com este propósito, pretende-se reaproveitar ao máximo as ferragens do MRT já existentes, fruto de investimentos em anos anteriores. Este processo de adaptação é uma solução com custos reduzidos capaz de transformar uma rede monofásica em uma trifásica, que transporta uma potência 3 vezes maior ao consumidor. Em consequência disto, os principais beneficiados são os proprietários de minifúndios, locais que ainda se predomina o uso de energia monofásica e que se busca um desenvolvimento maior com equipamentos e máquinas mais pesadas e por conseguinte de uma maior potência elétrica.

A principal fonte de insatisfação de consumidores são as inúmeras interrupções no fornecimento de energia elétrica. Em [13] é mostrado que apenas no sul do Brasil estudos indicam que em média, mais de 30.000 ocorrências por ano são causadas por descargas atmosféricas. Estas interrupções, além de insatisfação, gera um prejuízo para a concessionária, assim como para toda a comunidade envolvida.

Neste sentido, este artigo visa dimensionar o esquema de proteção contra descargas atmosféricas a ser utilizado no sistema T2F.

Atualmente, existem vários estudos [3], [4] e [5] que mostram os parâmetros para o dimensionamento de para-raios em sistemas tipo efetivamente aterrados e não efetivamente aterrados. Neste artigo considera a utilização de para-raios no sistema T2F, haja vista que ainda não há um estudo relacionado a este. Neste contexto, este artigo é de grande relevância para a aplicação de para-raios no sistema T2F.

II. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Os para-raios são equipamentos constituídos de materiais resistivos não lineares em série-paralelo e podem possuir, ou não, um centelhador. Atualmente são feitos principalmente de Oxido de Zinco (ZnO), mas ainda é possível encontrar estes equipamentos em Carboneto de Silício (SiC), principalmente com encapsulamento polimérico e de porcelana.

Centelhadores são equipamentos de proteção dos para-raios ligados em serie com resistores não lineares. Quando ocorre uma sobretensão que supera a tensão de impulso especificada do componente, o centelhador opera conduzindo corrente.

Um arco é gerado entre os seus terminais favorecendo um caminho com baixa impedância para a corrente em direção a terra. No entanto, diferentemente dos para-raios, não limitam as correntes subsequentes as descargas atmosféricas, mas fornecer um caminho de baixa impedância. Neste caso, é considerado uma desvantagem, já que se estabelece um curto-circuito e a proteção contra faltas à terra é sensibilizada. Sabendo disto, os fornecedores estão produzindo cada vez menos para-raios com centelhadores.

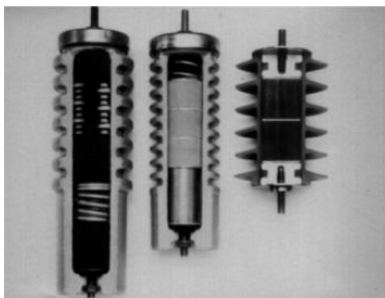


Fig. 1 - Para-raios

III. FALHAS

Se os para-raios forem devidamente fabricados e escolhidos e instalados corretamente estima-se que sua vida útil seja de aproximadamente 15 anos [3]. No entanto devido a imensa exposição a umidade os para-raios, dificilmente, conseguiram operar durante mais de 5 anos sem que falhem. Em [3] a principal causa de falha e erro nos para-raios é devido a umidade no encapsulamento. Um dos motivos para a ocorrência da penetração da umidade é defeito na vedação, assim como desgaste por envelhecimento.

Para-raios com centelhadores que operam com alta umidade no encapsulamento tendem a ter uma variação significativa nas suas características disruptivas [11], logo acentuam o problema da umidade dentro de um para-raios [11]. Hoje em dia estão sendo produzidos, em maior quantidade, para-raios de oxido metálicos sem centelhadores devido a sua simplicidade, visto que são feitos apenas de pastilhas e elementos não lineares dentro de um involucro polimérico ou cerâmico.

Sakshaung [9] mostrou que os para-raios de carboneto de silício são mais prováveis de falharem devido a umidade e contaminação se comparados aos de oxido de zinco. No entanto, os de ZnO possuem maior chance de falhar devido a sobretensões. Isso acontece, visto que, possuem uma resistência não linear mais alta e o surto de sobretensão resulta em maiores desgastes mecânicos e por consequência maiores chances de falhas de operação.

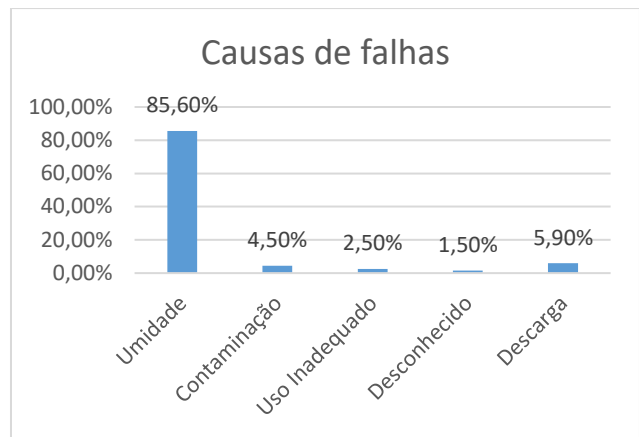


Fig. 2 - Causas de falhas nos para-raios

IV. OPERAÇÃO

O principal objetivo dos para-raios é proteger os demais equipamentos de possíveis sobretensões causadas por descargas atmosféricas, manobras entre outras. Eles direcionam o excesso de energia vinda de uma descarga atmosférica para o solo por meio de um sistema de aterramento.

Normalmente, uma rede elétrica opera com valores de tensão em regime permanente, o que não implica em desgastes prematuros nos para-raios. Por outro lado, de acordo com a figura 3, quando a tensão aumenta, ou seja, ocorre algum distúrbio externo, a resistência não linear diminui com o aumento da tensão. Assim, como analisado na figura 3, o para-raios não estará operando como se fosse um circuito aberto e a corrente iria para a terra já que a resistência seria baixa. Porém, caso esta corrente supere o máximo suportado pelo para-raios, o equipamento é danificado.

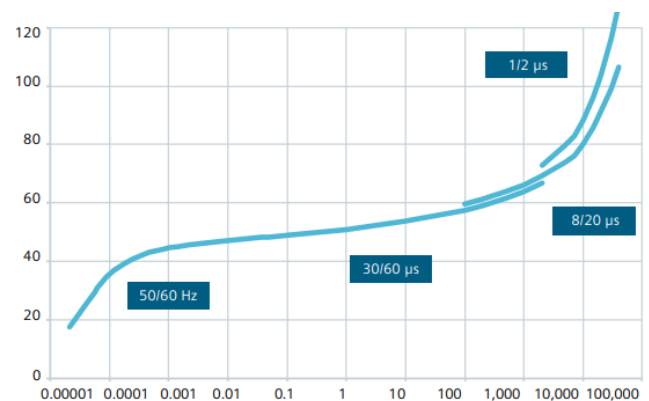


Fig. 3 - Curva Tensão - Corrente de um para-raio

V. DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento de um para-raios é necessário se atentar principalmente aos seguintes parâmetros:

- Tensão máxima de operação contínua (MCOV);
- Corrente de descarga nominal;
- Níveis de proteção;
- Zona de proteção;

A. Tensão máxima de operação contínua

O primeiro passo para o dimensionamento de um para-raios é determinar a tensão de operação contínua do sistema.

Normalmente é utilizado, por exemplo, um sistema com neutro solidamente aterrado, portanto para cálculo da tensão tem-se (1):

$$U_c = \frac{U_s}{\sqrt{3}} * 1,05 \quad (1)$$

No entanto, o sistema T2F consiste em duas fases aéreas mais a terra como fase, conforme mostra a figura 4. Note que neste caso não existe tensão fase-neutro, mas sim entre linhas.

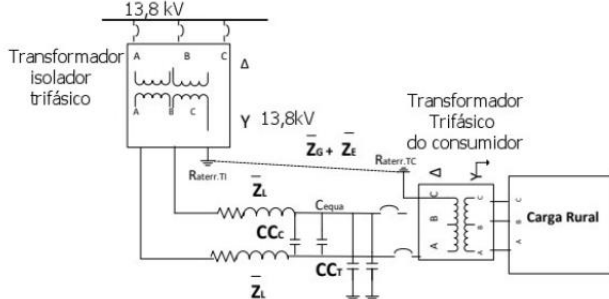


Fig. 4 - Diagrama Trifásico do protótipo do T2F

Logo, para o sistema T2F, em específico, a tensão de operação contínua, U_c , é maior ou igual a tensão de linha do sistema multiplicado por um fator de segurança padrão de 5% conforme equação a seguir.

$$U_c \geq U_s * 1,05 \quad (2)$$

Ressalta-se que os para-raios não devem estar submetidos ao seu valor nominal de tensão indefinidamente, sendo o período limite de tempo definido pelo fabricante, que de acordo com a norma ABNT, NBR-16050, é de 10 segundos, no máximo.

B. Sobretensão Temporária

Uma das possíveis causas para sobretensões e que tem maior potencial de destruição são as descargas atmosféricas. Para o correto dimensionamento de um para-raios é necessário levar em conta que mesmo no ápice desta sobretensão a tensão do para-raios ainda será maior que a sobretensão temporário – TOV, ou seja,

$$U_r \geq TOV \quad (3)$$

$$TOV = \frac{U_s}{\sqrt{3}} * kd \quad (4)$$

O fator de aterramento kd é dado pela tabela I. Esta tabela mostra que quando melhor for o aterramento do sistema menor é o fator de aterramento e menor será a sobretensão temporária. No sistema T2F, o aterramento será solidamente aterrado com um kd aproximado de 1,4.

Sistema	Aterramento	kd
Três fios não aterrados	Não	1,732
Compensação de falta à terra	Não	1,732
Aterramento de baixa impedância	Sim	1,4
Estrela multi-aterrada de quatro fios	Sim	1,25

Tabela I - Fator de aterramento com relação ao sistema

É importante especificar corretamente a tensão nominal do para-raios, visto que a seleção correta e adequada em função das características do sistema, faz com que se reduza os custos de aquisição.

C. Corrente de Descarga Nominal

Esse parâmetro é o responsável por classificar as classes de para-raios. Primeiramente, precisa-se atentar ao fato de o para-raios estar sendo utilizado como elemento de proteção contra descargas atmosféricas, conseqüentemente deve-se atentar aos dados tensão residual com onda de 8/20 μ s (que é a descarga atmosférica), disponível no DATASHEET do equipamento.

A corrente máxima que pode circular nos resistores não lineares dos para-raios sem danificá-los é calculada por meio da equação (5). Com base na corrente máxima consegue-se estimar a corrente de descarga nominal.

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{2 * U_{fo} - U_{pl}}{Z} \quad (5)$$

Onde:

U_{fo} é o nível de isolamento para impulso atmosférico

U_{pl} é a tensão residual do para-raios para impulso atmosférico

Z é a impedância de surto

Uma das características que define um para-raios é a corrente de descarga nominal, conseqüentemente as concessionárias brasileiras começaram a adotar um padrão na escolha da corrente de descarga, no caso da distribuição seria uma corrente de 10kA.

É mostrado em [8] um estudo onde foi utilizado o método do Monte Carlo com o objetivo de estudar a distribuição estatística dos parâmetros, por exemplo, os valores de pico e tempo de frente da corrente de descarga. Os dados coletados baseiam-se nas torres instrumentadas de diferentes alturas e utilizando dois tipos de distribuição de parâmetros para descargas existentes na literatura (log-normal). O estudo demonstrou que depende de fatores como a altura da torre utilizada para medição dos parâmetros da descarga atmosférica na distribuição da corrente de pico e do raio de atração adotado no cálculo. Este estudo melhora, principalmente, em regiões montanhosas, além de que essa pesquisa deve ser levada em conta no estudo de descargas atmosféricas em linhas aéreas.

E. Níveis de Proteção

Os níveis de proteção estão relacionados com os equipamentos a serem protegidos, do grau de importância e custo, assim como sua respectiva suportabilidade, mais especificamente, o nível básico de isolamento (BIL) do equipamento. O nível de proteção contra impulsos atmosféricos U_{pl} pode ser obtido em (6).

$$U_{pl} < \frac{BIL}{1,4} \quad (6)$$

F. Zona de proteção

Quando ocorre uma descarga atmosférica em um cabo, ou na sua proximidade, surge uma sobretensão e uma sobrecorrente. Portanto, para não danificar os equipamentos de rede é necessário alocar vários para-raios que não devem ficar muito distantes entre si. De modo a evitar alocação de

para-raios em excesso e garantir o nível adequado de proteção, utiliza-se a equação (7). A máxima distância (x) em que um para-raios deve ser instalado dependendo do equipamento a ser protegido.

$$x = \left(\frac{BIL}{1,15} - U_{pl} \right) * \frac{c}{2s} \quad (7)$$

Onde c é a velocidade da luz em metros por segundo.

Os pontos de instalações, assim como, o número de para-raios instalados é consequência de outras variáveis além da máxima distância. Por exemplo, depende da topografia local, histórico da rede, características construtivas, histórico das descargas atmosféricas na região tipos de equipamentos de redes e sua importância para o sistema elétrico. Sabe-se da existência de tantas variáveis, portanto, conclui-se que os locais de instalação dos para-raios são complexos e conseqüentemente, estudos exaustivos devem ser conduzidos.

VI. ESTUDO DE CASO

Para o dimensionamento dos para-raios de uma rede experimental tipo T2F utilizou-se as normas da CPFL, ou seja:

- GED - 3225 – Para-raios de distribuição (involucro polimérico) - especificação [6];
- GED - 3667 - Projeto de rede de distribuição – cálculo elétrico [7];

As normas exigem que algumas condições sejam satisfeitas, tais como: a tensão nominal de um para-raios e sua relação com a tensão residual máxima (Tabela 1), sobretensões e o MCOV e que os valores garantidos pelo fabricante não deve ultrapassar e a (5).os valores indicados na tabela. A CPFL considera que a corrente de descarga nominal é de 10kA, com forma de onda 8/20 μ s, ressalte aos valores de tensão nominal que deve ser dividido por raiz de três.

U_r (kVef)	MCOV (kVef)	TOV/1000s (kVef)	U_{res} kVpico		
			Impulso Ingrime	Atm.	Impulso Manobra
3	2,55	3,1	12	10	7,8
12	10,2	12,3	48	40	31,2
21	17	21,5	84	70	54,6
27	22	28,2	108	90	70,2

Tabela 1 – Valores normalizados disponibilizados pela CPFL

Dois estudos de casos serão apresentados. O primeiro considera uma rede já existente, solidamente aterrado, a três fios aéreos. O segundo caso é específico para o sistema T2F.

A. Caso I – Um sistema de 13,8kV solidamente aterrado com fator de aterramento de 1,4

A equação (1) determina o valor tensão de operação continua.

$$U_c = \frac{13,8kV}{\sqrt{3}} * 1,05 = 10kV \quad (8)$$

Em seguida calcula-se a tensão nominal que o para-raios deve suportar através da (3), ou seja:

$$U_r = \frac{13,8kV}{\sqrt{3}} * 1,4 = 11,15kV \quad (9)$$

Em seguida, compara-se os valores com as especificações dos fabricantes, tabela 3.

Com os resultados das equações (8) e (9) e com as especificações do para raio da tabela 3 e seguindo as normas da CPFL vista na tabela 2, se escolhe um para raio. Analisando a tabela 3, no caso I um para raio adequado é o com 12kVrms de tensão nominal

U_c	U_r	Tensão residual U_{res}		
Tensão de operação continua	Tensão nominal	Corrente devido a descargas atmosféricas – onda 8/20 μ s		
kVrms	kVrms	5kA	10kA	20kA
8,4	10	31	33	37,4
10,2	12	37,3	39,6	44,7
12,7	15	46,7	49,5	56
17	21	65,3	69,3	78

Tabela 2 – Especificações PBP - Balestro

B. Caso II – Um sistema T2F de 13,8kV

O sistema T2F é um pouco diferente do sistema tradicional [10], visto que, dois dos três condutores são aéreos enquanto o terceiro e a própria terra. Logo não é necessário calcular a transformação de tensão de fase para linha que seria dividir a tensão U_s por raiz de 3 como no primeiro caso. Portanto, utiliza-se a equação (2)

$$U_c = 13,8kV * 1,05 = 14,5kV \quad (10)$$

E a equação (3)

$$U_r = 13,8kV * 1,4 = 19,32kV \quad (11)$$

Novamente, com os resultados das equações (10) e (11) assim como o auxílio das tabelas 2 e 3, um para-raios adequado é o com tensão nominal 21kVrms.

VII. RESULTADOS E DISCUSSOES

Comparando ambos os sistemas, percebe-se que a única diferença significativa é a respeito dos valores das tensões de linha e de fase. Este fato implica na divisão, ou não, por raiz de três nas equações (8), (9), (10) e (11).

Como é observado a partir dos resultados obtidos através dos estudos de casos, obteve-se valores das tensões de operação continua e da tensão nominal maiores para o sistema tradicional do que para a topologia proposta T2F, assim espera-se um custo maior para o para raio do caso II, devido a sua maior tensão nominal e conseqüentemente maiores parâmetros. Por outro lado, a maior tensão vista na topologia 2 representa uma potência maior na linha de distribuição e por conseguinte uma maior potência entregue para o consumidor. Portanto, caso optemos por utilizar do para raio escolhido na topologia 1 no sistema proposto, caso

ocorra uma sobretensão, o para raio pode se deteriorar e por ventura a linha de distribuição pode ser danificado.

VIII. CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi a verificação da necessidade de um estudo mais profundo e detalhado dos parâmetros dos para raios a serem utilizados no sistema de distribuição T2F. Esta verificação foi realizada através de estudos de dimensionamento de para raios em sistemas tradicionais, apenas modificando a realidade para ao do sistema proposto. Por fim foi feita uma análise comparativa entre as duas situações e seus valores de tensões calculados.

Ao analisar o sistema tradicional e o sistema trifásico a dois fios conclui-se que, a tensão nominal obtida para o T2F é maior devido ao fato de que no sistema em questão a terra é uma das fases do sistema, portanto a tensão de fase é a tensão de linha diferentemente dos sistemas tradicionais.

REFERÊNCIAS:

- [1] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFICA E ESTADISTICA. Censo agropecuário: Resultados definitivos - Brasil, 2017
- [2] Brasil é o 4º maior produtor de grãos, atrás da China, EUA e Índia, diz estudo. G1, 1 jun. 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2021/06/01/brasil-e-o-4o-maior-produtor-de-graos-atras-da-china-eua-e-india-diz-estudo.ghtml>> Acesso em 9 julho 22
- [3] Para raios em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão, Franco Engenharia, 2003 – Brasil.
- [4] Siemens Industry Inc., “Medium-voltage surge arresters product guide” USA, Siemens Industry Inc, Article No. EMHP-C10018-00-4AUS, 2017, pp. 10-14.
- [5] ABB, “ABB Surge Arresters — Buyer’s Guide”, ABB, Edição 6, 2008.
- [6] CPFL ENERGIA. GED-3225: Para raios de distribuição (involucro polimérico) - especificação. Campinas, São Paulo.
- [7] CPFL ENERGIA. GED-3667: Projeto de rede de distribuição - calculo elétrico. Campinas, São Paulo
- [8] A. Borghetti, C. A. Nucci, M. Paolone, “Estimation of the Statistical Distributions of Lightning Current Parameters at Ground Level From the Data Recorded by Instrumented Towers”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004
- [9] Sakshaug, E. C., Burke, J. and Kresge, J. (1989). “Metal oxide arresters on distribution systems: fundamental considerations”, Power Delivery, IEEE Transactions on 4(4): 2076– 2089.
- [10] P. R. O. Borges, “Repotencialização de sistemas de distribuição rurais monofásicos por meio de dois cabos aéreos e o solo como a terceira”. Orientador: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.2017.166 tese de Doutorado - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- [11] R. C. Álvares, “Diagnostico de Falhas em Para raios utilizando termográfica”, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- [12] Balestro. Para raios de Oxido de Zinco Polimérico tipo PBP. Disponível em:<https://balestro.com.br/wp-content/uploads/2020/01/Para-raios-Oxido-Zinco-Polim-silicone-PBP.pdf>
- [13] V. L. Coelho, “Análise do desempenho de redes aéreas de distribuição de média tensão frente à ação das descargas atmosféricas”, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.