

Metodologia para dimensionamento de cabos para-raios de linhas de transmissão



<https://doi.org/10.56238/interdiinovationscresce-075>

E-mail: thiagotrezza@id.uff.br

Flávio Rocha Bandeira Garcêz

Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, RJ,
Brasil;
E-mail: flavinho1990@gmail.com

Paulo Roberto Duailibe Monteiro

Doutorado em Engenharia Civil
Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, RJ,
Brasil
E-mail: pauloduailibe@id.uff.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7376-9115>

Thiago Trezza Borges

Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, RJ,
Brasil

RESUMO

Os cabos para-raios de linhas de transmissão são elementos destinados à proteção contra descargas atmosféricas, mas o que determina seu dimensionamento é a corrente a ser escoada durante uma falta para a terra. Este artigo apresenta uma metodologia para se estabelecer, de maneira rápida e precisa, a bitola e os pontos de troca dos cabos para-raios de linhas de transmissão, através da simulação do sistema e análise das correntes de curto circuito monofásicas utilizando como ferramenta o Alternative Transients Program (ATP).

Palavras-chave: Curto-circuito, Linha de transmissão, Cabos para-raios, ATP.

1 INTRODUÇÃO

Em projetos de linhas de transmissão, o dimensionamento correto dos cabos guardas pode apresentar impactos significativos nos custos do empreendimento através do valor do cabo e da adequação da estrutura de forma a suportar o peso e as trações impostas pelo cabo. O dimensionamento utilizando ferramenta computacional proporciona rapidez e precisão nos resultados contribuindo para a redução de custo do projeto do projeto básico, uma vez que é apenas após a definição dos cabos que outras etapas são concluídas, como, por exemplo, o cálculo de esforços mecânicos e as perdas elétricas por indução eletromagnéticas.

O dimensionamento é realizado através da análise das correntes de curto circuito que circulam na ocorrência de uma falta monofásica, muitas das vezes esse defeito se origina da falha de isolamento da cadeia de isoladores, seja por rompimento do dielétrico ou por danos físicos oriundos de vandalismo, então ocorre o contato de uma fase com a torre, esta por sua vez, representa um ponto elétrico ligado aos para-raios e à terra através de aterramento existente no pé da torre. Desta forma, parte da corrente se propaga para a terra através do aterramento na fundação da estrutura e através dos cabos guarda.



O ONS determina que os cabos para-raios devam suportar, sem danos, “à circulação da corrente associada à ocorrência de curto-circuito monofásico franco em qualquer estrutura da LT-CA por duração correspondente ao tempo de atuação da proteção de retaguarda” [1].

O dano pode decorrer do aquecimento ocasionado por estas altas correntes de falta e o tempo de exposição ao qual os cabos ficam submetidos. Os limites de corrente por tempo aos quais os cabos não sofrem prejuízos as suas características elétricas e mecânicas são encontrados na NBR 8449 [2].

Para o dimensionamento e cálculo das correntes de CC, a NBR 8449 [2] determinou uma forma de estimar as correntes, porém sendo um método para apenas um cabo, a metodologia atualmente está defasada devido às capacidades de curto-circuito determinadas pelo ONS para novos projetos. Na década de 1970 houve um estudo [3] que apresentava equações para quantificá-las durante uma eventual falta, o que na época, para a capacidade de processamento dos computadores era uma boa solução, mas ainda assim, não previa uma troca de cabo. Mais recentemente, em 2003 [4] uma metodologia para simulação no EMTP/ATP foi desenvolvida, onde seria possível representar todas as variáveis envolvidas. Uma grande vantagem do método é que o crescente uso de cabos OPGW, que possuem, em seu centro, fibras óticas que são atualmente largamente difundidas para comunicação entre subestações e até mesmo aluguel do canal de comunicação para empresas de TV e Internet por parte das transmissoras, não representa maiores problemas para o cálculo, uma vez que o ATP consegue facilmente com cabos não maciços.

O problema da simulação utilizando os elementos gráficos do ATPdraw, que é apenas um processador gráfico do ATP, é o tempo envolvido na modelagem e execução da metodologia. Assim, o presente artigo propõe a simulação sem utilizar o ATPdraw, gerando os arquivos para uso direto do ATP através do VBA do Excel ou de um programa desenvolvido em qualquer outra linguagem de programação.

2 METODOLOGIA PARA A SIMULAÇÃO

O início consiste na modelagem da linha, ao utilizar o ATPdraw, isso ocorre de maneira gráfica. Modelar-se a linha considerando o equivalente das subestações, representando-as como fontes ideais associadas a impedâncias, que representarão as características das máquinas e serão ajustadas proporcionalmente de maneira a obter os valores de curto-circuito monofásico entre os barramentos e as malhas de aterramento de acordo com o projeto.

É importante modelar a linha de transmissão (LT) vão-a-vão, pois cada torre da linha é um ponto de interesse, assim, os cabos condutores, para-raios e a geometria da torre devem ser introduzidas através do *Line Constants* (LCC) do ATPdraw. Assim para os diferentes vãos e para as diferentes combinações de cabos guarda existirão diferentes *LCCs*. Entre um *LCC* deve ser modelado o ponto



elétrico da torre, utilizando resistências conectadas as saídas de para-raios do *LCC* e a terra através da resistência de pé de torre.

3 ALGORITMO DE SIMULAÇÃO

Uma vez o modelo inicial da linha estando pronto, inicia-se a simulação e todo o processo pode ser resumido em um algoritmo:

1. O primeiro passo é a modelagem conforme explicado anteriormente.
2. Ajustam-se as características das máquinas até obter os valores de corrente de curto monofásica entre barramento e malha de terra conforme projeto ou indicação do ONS [5] nas subestações.
3. Aplica-se a falta na primeira torre por ambos os lados da LT e verifica-se se os cabos suportam as correntes que circulam por eles. Isso determina o cabo de maior capacidade de carregamento de corrente a ser utilizado.
4. Aplica-se a falta na primeira torre após a troca de cabos para-raios sentido a outra subestação, de forma a verificar se a corrente que retorna à subestação está dentro da capacidade dos cabos de menor capacidade. Caso seja suportável, o *LCC* referente estes cabos pode ser recuado, diminuindo o comprimento total do cabo de capacidade maior. Caso não suporte, avance e verifica se novamente se suporta. Se a alteração dos *LCCs* seguia em um sentido e teve de mudar, analisa-se o ponto de troca do outro lado da LT e repete-se o processo.
5. Ao obter o ponto ideal dos dois lados, a impedância total da LT mudou em relação a inicial, então repete-se os passos 2, 3 e 4 até que não sejam mais alterados os pontos de troca e as subestações possuam seus valores de curto monofásico conforme o projeto.
6. Obtido a modelagem com todas as características ideais, aplica-se a falta monofásica ponto-a-ponto para obter a distribuição de correntes em toda a LT.

Utilizando elementos gráficos, esse processo se torna demorado e repetitivo, visto que se deve mover o *LCC* a ser utilizado, remover o que não atende as especificações, alterar as características da máquina, verificar se o valor corresponde ao desejado, alterar novamente e etc. além de exposição da simulação a erros humanos causados pelo processo repetitivo. Assim, esta é uma excelente ferramenta porém há um custo em tempo relativamente alto.

4 METODOLOGIA PARA PROGRAMAÇÃO

Quando se percebeu que o ATPdraw é apenas um motor gráfico do ATP, uma gama de possibilidades surge do entendimento de que são necessários apenas cartões em ASCII (formato .txt) corretamente construídos, o que qualquer linguagem de programação é capaz de realizar.



Analisando o cartão que é enviado ao ATP pelo ATPdraw durante a simulação e fazendo o uso do ATP *Rule Book* [6] para compreensão de cada comando, nota-se que este pode ser dividido em cinco partes, o comando a ser executado com a definição das constantes para a simulação, as conexões elétricas, as inclusões dos *LCCs*, a caracterização da fonte ideal e os comandos de encerramento.

Ao dominar a construção de cada parte, a etapa de modelagem consiste em criar as *LCCs* necessárias para a simulação e o trabalho então se resume a gerar os arquivos de texto, nomeando os pontos de conexão adequadamente, de forma que ao executa-lo no ATP seja fácil encontrar o ponto, as correntes e determinar em qual sentido elas caminham e em seguida importar os valores obtidos do cartão de saída e tabela-los.

5 ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso foi utilizada uma LT fictícia. Como hipótese, foi utilizada a ideia de que a LT em estudo foi gerada a partir do seccionamento de uma linha antiga, onde os cabos para raios existentes são dois alumoweld 7#9.

O objetivo deste estudo é trocar a menor quantidade possível de cabo, uma vez que o cabo CAA é consideravelmente mais caro que o cabo alumoweld 7#9, quanto menos Dotterel for utilizado, menor o custo do projeto.

Para os casos em estudo, os dados da LT utilizada são:

- Tensão: 440 kV
- Feixe: 4 x CAA Grosbeak por fase com 40 cm de espaçamento entre subcondutores
- Comprimento da LT: 84,2 km
- Comprimento do vão na saída das SEs: 100 m
- Vão básico: 400 m
- Resistência de pé de torre: 20 ohms
- Malhas de aterramento: 1 ohm
- Capacidade de curto-circuito monofásico no barramento das SEs: 50 kA
- Tempo de eliminação de falta: 250 ms
- Resistividade da terra: 1000 ohms*metro

Os dados das posições geométricas das fases na estrutura são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Disposição geométrica dos cabos.

	HORIZONTAL	VTOWER	VMID
FASE A	0,0	25,03	16,00
FASE B	-9,0	20,23	11,20
FASE C	9,0	20,23	11,00
GUARDA A	-7,2	31,88	22,85



GUARDA B	7,2	31,88	22,58
-----------------	-----	-------	-------

Os cabos a serem utilizados como para-raios encontram-se na Tabela 2.

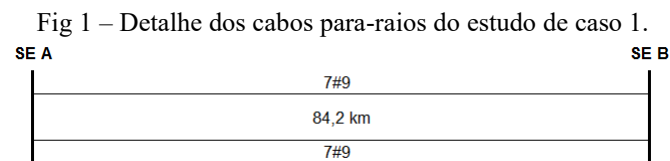
Tabela 2 – Cabos para-raios e capacidades de corrente

Cabo	Capacidade de corrente (kA)	Resistencia CC a 20° C
CAA DOTTEREL	26,0	0,3221
ALUMOWELD 7#9	7,4	2,0429

Com estes dados é possível realizar o dimensionamento e verificar o comportamento da LT de acordo com a combinação de cabos utilizada. Assim, são avaliados três casos:

5.1 A. CASO 1

Neste caso, a LT contará apenas com o cabo alumoweld 7#9, de ponta a ponta, conforme Figura 1.



A LT neste caso possui simetria dos cabos para-raios da esquerda e da direita, assim a corrente que circula por um deles é igual a que circula pelo outro.

Existe a simetria também quanto aos lados da LT, as duas SEs possuem o mesmo nível de curto-circuito nos barramentos e a LT é suficientemente grande para seja possível obter pontos de transição para os cabos para-raios, assim o que acontece a um lado da LT, acontece também do outro. Os níveis de curto-circuito são:

- Nível de curto-circuito no barramento da Subestação (SE): 50 kA
- 1º vão a partir da SE:
 - Corrente de curto: 49,38 kA
 - Corrente máxima no 7#9: 17,79 kA

Neste ponto já é possível observar que, para este nível de curto-circuito, o cabo alumoweld 7#9 não atende as correntes que circulam. No caso de uma eventual falta ele aquecerá a uma temperatura superior ao limite estipulado pela norma.

Ao aplicar uma falta em cada estrutura é possível mapear a corrente de falta que circula da fase para a estrutura, onde ela então se divide entre os para-raios e o que desce pela estrutura.



A Figura 2 mostra a distância em quilômetros da SE A e os valores de curto monofásicos para estes pontos. Em outras palavras, como exemplo, na estrutura situada a 20 km da SE A, a corrente de curto monofásica nela é próximo a 20 kA. A corrente de falta mínima foi 15,68 kA, em falta a 42,1 km de distância da SE A.

A quantidade de corrente que desce pelo aterramento das estruturas ao longo da LT é apresentada na Figura 3.

Fig 2 – Curva de nível de curto monofásico em cada ponto da LT – caso 1

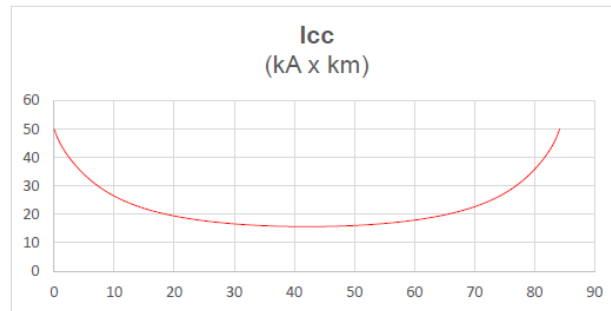
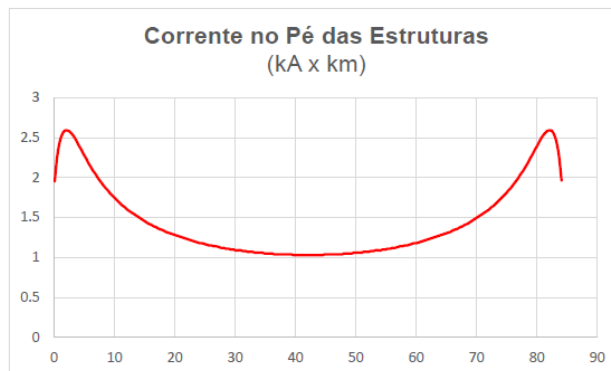


Fig 3 – Curva de nível corrente no pé de torre em cada ponto da LT – caso 1



Próximo as SEs a corrente que desce pelo aterramento é maior, entretanto representa percentualmente um valor menor que no meio da LT. Por não haver transição de cabos para-raios, a curva, após os picos das extremidades, não apresenta saltos.

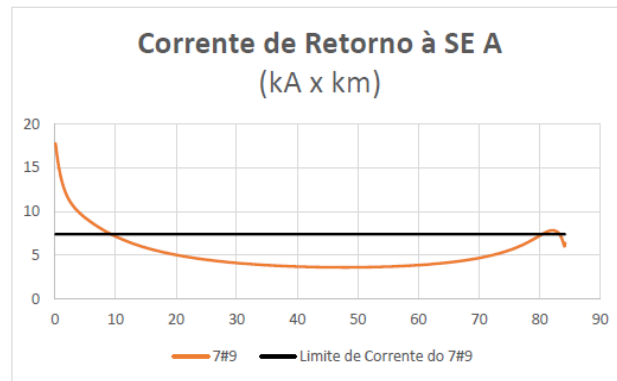
A análise da corrente nos cabos para-raios, para maior clareza, é dividida pelo sentido que a ela segue. Na Figura 4, o sentido adotado é o da corrente para a SE A.

Na Figura 4 está representado o valor da corrente que, após a falta monofásica, retorna sentido a SE A. Está representado também o limite da corrente no cabo alumoweld 7#9, para que sejam mais claramente visíveis os pontos onde as correntes são superiores ao permitido.

Assim, pode-se observar que todos os pontos onde a curva de corrente no cabo é superior à curva limite aponta que o cabo não suporta as correntes circulantes. Pela simetria, sabe-se que a curva de corrente para a SE B tem o mesmo formato.



Fig. 4 – Corrente no para-raios – caso 1.



Para este caso fica claro que a capacidade de corrente dos cabos adotados não atende as necessidades da LT. Em todos os pontos onde há a superação do limite de corrente indica que haveria superaquecimento do cabo que poderia acarretar dano parcial ou até permanente dos cabos para-raios.

5.2 B. CASO 2

Neste caso, a LT contará com os cabos CAA Dotterel nas proximidades das SEs e quando for possível, realiza a transição para dois cabos alumoweld 7#9, conforme Figura 5.

Fig. 5 – Detalhe dos cabos para-raios do estudo de caso 2.

SE A			SE B
Dotterel		7#9	Dotterel
20,9 km		42,4 km	20,9 km
Dotterel		7#9	Dotterel

A LT neste caso possui simetria dos cabos para-raios da esquerda e da direita, assim a corrente que circula por um deles é igual a que circula pelo outro.

Existe a simetria também quanto aos lados da LT. As duas SEs possuem o mesmo nível de curto-circuito nos barramentos e a LT é suficientemente grande para que seja possível obter pontos de transição para os cabos para-raios, assim o que acontece a um lado da LT, acontece também do outro.

- Nível de curto-circuito no barramento das SEs: 50 kA
- 1º vão a partir da SE:
 - Corrente de curto: 49,68 kA
 - Corrente máxima no Dotterel: 16,92 kA
 - Corrente que desce pela torre: 1,7kA

Neste ponto já é possível observar que, para este nível de curto-circuito, o cabo CAA Dotterel atende as correntes que circulam. No caso de uma eventual falta ele não aquecerá a uma temperatura superior ao limite estipulado pela norma.



Notável também que 68,12 % da corrente de falta neste ponto retornam a SE A, 3,42 % descem para a terra pela estrutura e o restante segue para a SE B.

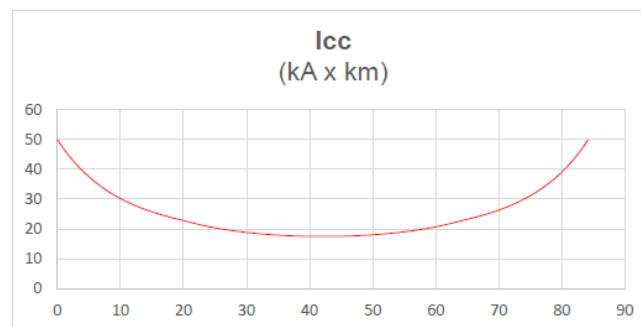
- Ponto de Transição
 - Transição 2 x Dotterel – 2 x 7#9:
 - Corrente de curto: 22,14 kA
 - Corrente máxima no 7#9: 7,35 kA
 - Corrente que desce pela torre: 0,81 kA

O curto é dado na estrutura seguinte à que realiza a transição e observa-se o retorno pelos cabos de menor capacidade. Assim vê-se pelos valores que a transição ocorre num local adequado, onde não há folga para que se aproxime a transição de cabos da SE A.

Ao aplicar uma falta em cada estrutura é possível mapear a corrente de falta que circula da fase para a estrutura, onde ela então se divide entre os para-raios e o que desce pela estrutura.

A Figura 6 apresenta a distância em quilômetros da SE A e os valores de curto monofásicos para estes pontos. Em outras palavras, como exemplo, na estrutura situada a 20 km da SE A, a corrente de curto monofásica nela será superior a 20 kA. Mesmo com a troca de cabos a curva se mantém suave, isso demonstra que a impedância da LT é vista como um todo para a falta e a curva se ajusta para a impedância total da LT. A corrente de falta mínima foi 17,5 kA, em falta a 42,1 km de distância da SE.

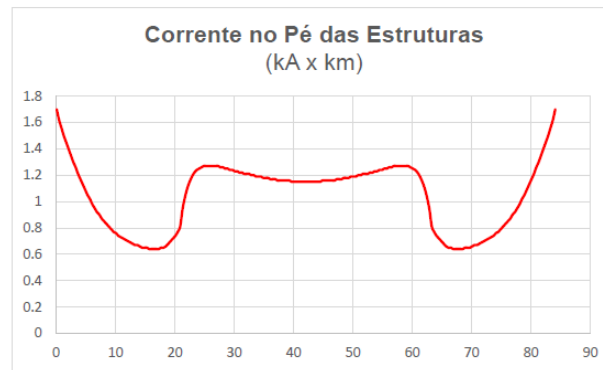
Fig. 6 – Curva de nível de curto monofásico em cada ponto da LT – caso 2



A Figura 7 mostra a quantidade de corrente que desce pelo aterramento das estruturas ao longo da LT. Próximo as SEs a corrente que desce pelo aterramento é maior, entretanto representa percentualmente um valor menor que no meio da LT.



Figura 7 – Curva de nível corrente no pé de torre em cada ponto da LT – caso 2



O comportamento da curva demonstra que, diferente da curva de nível de curto monofásico em cada ponto da LT, a corrente que desce para o aterramento das estruturas é pontualmente sensível à alteração da impedância dos para-raios. No meio da linha, no trecho onde os cabos para-raios possuem uma impedância maior, a torre tende a absorver uma corrente maior, devido a maior resistência equivalente vista daquele ponto.

Assim como no caso 1, a corrente é mais alta nas extremidades devido ao alto nível de curto. Comparando percentualmente vê-se que na extremidade é absorvido 1,7 kA de 49,68 kA, o que representa cerca de 3,42 % e a 40 km da SE A desce 1,15 kA de 17,58 kA, cerca de 6,57 %.

A análise da corrente nos cabos, para maior clareza, é dividida pelo sentido que a ela segue. Na Figura 10, o sentido adotado é o da corrente para a SE A. Devido à simetria entre os para raios do lado esquerdo e direito da linha, a representação dos dois lados é igual, eliminando a necessidade de um gráfico para cada lado.

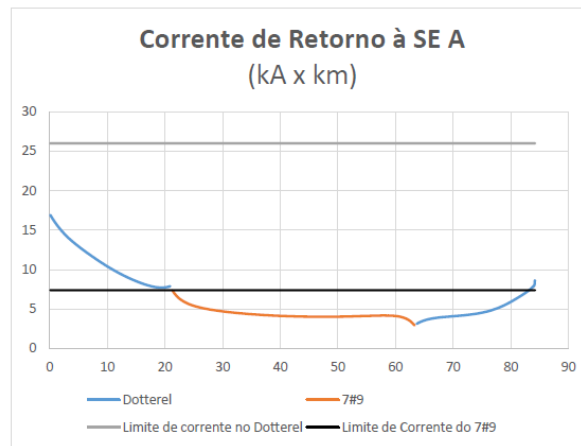
Na Figura 8, está representado o valor da corrente que, após a falta monofásica, retorna sentido a SE A. Está representado também o limite da corrente no cabo alumoweld 7#9 e do CAA Dotterel, para que sejam mais claramente visíveis os pontos onde as correntes são superiores ao permitido.

Pode-se observar ainda que o CAA Dotterel possui uma grande folga na saída da SE A e fica bem longe de seu limite.

O trecho onde é utilizado o cabo alumoweld 7#9 se inicia onde não há folga, o cabo está bem próximo do seu limite. Pela simetria, as curvas de corrente para a SE B têm o mesmo formato.



Figura 8 – Corrente que retorna a SE A nos para-raios – caso 2.



Para este caso fica claro que a capacidade de corrente dos cabos adotados atende as necessidades da LT. Não há pontos onde haveria aquecimento prejudicial dos cabos. O cabo CAA Dotterel é utilizado em quatro trechos de 20,9 km, totalizado assim 83,6 km.

5.3 C. CASO 3

Neste caso, a LT contará com os cabos CAA Dotterel nas proximidades das SEs e quando for possível, realiza a transição de um dos cabos para o alumoweld 7#9. Quando for possível novamente haverá a troca do segundo CAA Dotterel por outro alumoweld 7#9. Foi realizado o mesmo processo para o outro lado da LT, conforme Figura 9.

Fig. 9 – Detalhe dos cabos para-raios do estudo de caso 3.

SE A					SE B
	Dotterel	Dotterel	7#9	Dotterel	Dotterel
	2.1 km	13.6 km	52.8 km	13.6 km	2.1 km
	Dotterel	7#9	7#9	7#9	Dotterel

A LT neste caso, não possui simetria completa dos cabos para-raios da esquerda e da direita, assim a corrente que circula por um deles não é igual a que circula pelo outro. Existe a simetria quanto aos lados da LT, as duas SEs possuem o mesmo nível de curto-circuito nos barramentos e a LT é suficientemente grande para que seja possível obter pontos de transição para os cabos para-raios, assim o que acontece a um lado da LT, acontece também do outro

- Nível de curto-circuito no barramento das SEs: 50 kA
- 1º vão a partir da SE:
 - Corrente de curto: 49,67 kA
 - Corrente máxima no Dotterel: 17,04 kA
 - Corrente que desce pela torre: 1,71 kA



Neste ponto é possível observar que, para este nível de curto-circuito, o cabo CAA Dotterel atende as correntes que circulam. No caso de uma eventual falta ele não aquecerá a uma temperatura superior ao limite estipulado pela norma.

Notável também que 68,61 % da corrente de falta neste ponto retornam a SE A, 3,44 % descem para a terra pela estrutura e o restante segue para a SE B.

- Ponto de Transição
 - Transição 2 x Dotterel – Dotterel + 7#9:
Corrente de curto:42,42 kA
Corrente máxima no 7#9:7,24 kA
Corrente máxima no Dotterel:23,41 kA
Corrente que desce pela torre: 1,51 kA

O curto é dado na estrutura seguinte à que realiza a transição e verifica-se o retorno pelos cabos de menor capacidade. Assim vê-se pelos valores que a transição ocorre num local adequado, onde não há folga para que se aproxime a transição de cabos da SE A.

- Transição Dotterel + 7#9 - 2 x 7#9:
Corrente de curto:42,42 kA
Corrente máxima no 7#9:7,24 kA
Corrente que desce pela torre: 1,51 kA

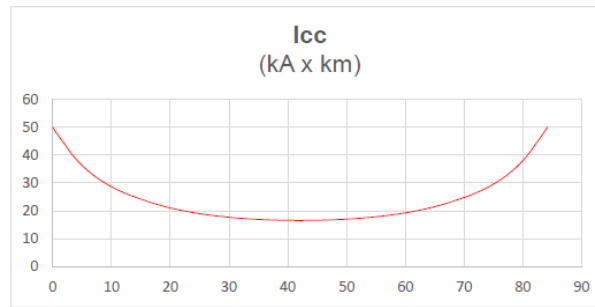
Pela simetria que a linha possui, as transições de 2 x 7#9 – Dotterel + 7#9 e Dotterel + 7#9 – 2 x Dotterel possuem valores iguais aos demonstrados anteriormente. Em todas as transições, os cabos envolvidos trabalham próximo ao seu limite, o que representa uma maior eficiência financeira e técnica.

Ao aplicar uma falta em cada estrutura é possível mapear a corrente de falta que circula da fase para a estrutura, onde ela então se divide entre os para-raios e o que desce pela estrutura.

A Figura 10 apresenta a curva do valor de curto monofásico em cada ponto da LT. De maneira semelhante ao caso 2, à curva de falta pela distância da SE A não sofre com picos ou saltos causados por trechos com diferentes impedâncias. A corrente de falta mínima foi 16,56 kA, em falta a 42,1 km de distância da SE A.

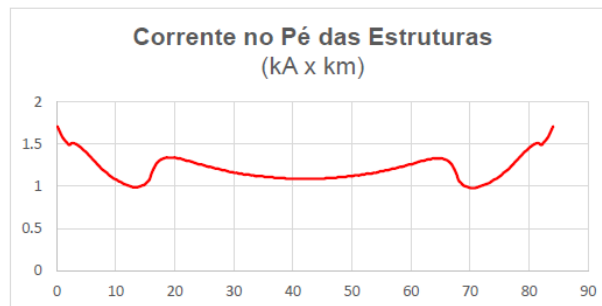


Fig. 10 – Curva de nível de curto monofásico em cada ponto da LT – caso 3.



Na Figura 11, fica claro que a torre, sempre que a impedância total dos cabos aumenta, passa a absorver uma corrente percentualmente maior em relação à corrente total de falta monofásica. Neste caso a corrente absorvida pela estrutura não é chega a ser muito menor que 1 kA, o que representa um pequeno alívio para os cabos.

Figura 11 – Curva de nível corrente no pé de torre em cada ponto da LT – caso 3.



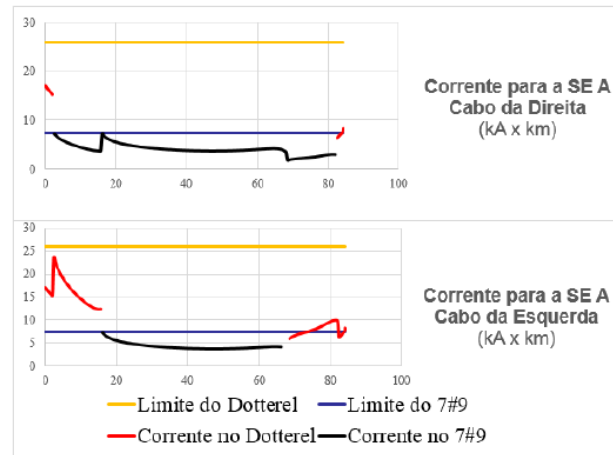
A análise da corrente nos cabos para-raios, para maior clareza, é demonstrado em dois gráficos que juntos representam o que ocorre nos dois cabos, para que seja bem visível o comportamento dos cabos da direita e esquerda.

A Figura 12 mostra dois grupos de curvas, o que está acima é referente aos cabos que ficam à direita da estrutura enquanto, e os de baixo são dos cabos à esquerda. É interessante analisar o comportamento das curvas simultaneamente e observar o impacto que um lado causa ao outro.

Na saída da SE A, há dois cabos para-raios CAA Dotterel e as curvas dos dois são iguais, quando é realizada a transição para o alumoweld 7#9 à direita da estrutura o lado esquerdo tem em seu nível de curto-circuito um pico, aproximando-o de sua capacidade máxima.



Fig. 12 – Corrente que retorna a SE A nos para-raios – caso 3.



No ponto da segunda transição há a descontinuidade do lado esquerdo, o pico neste ponto ocorre do lado direito e leva os dois cabos 7#9 à seu aproveitamento total, e daí as curvas seguem iguais até a próxima transição. Pela simetria, sabe-se que as curva de corrente para a SE B tem o mesmo formato.

Para este caso fica claro que a capacidade de corrente dos cabos adotados atende as necessidades da LT de maneira bem otimizada. Não há pontos onde haveria o aquecimento prejudicial dos cabos. São utilizados dois cabos CAA Dotterel em dois trechos de 2,1 km e um em dois trechos de 13,6 km, totalizando 31,4 km.

6 CONCLUSÃO

Foi apresentada uma metodologia para dimensionamento de cabos para-raios de linha de transmissão consistindo em, através da modelagem e simulação, avaliar as correntes de curto conforme a norma brasileira (NBR) 8449, buscando o ponto de transição dos para-raios de forma a garantir que não haja pontos de superaquecimento e se consiga uma economia substancial em cabos.

O dimensionamento dos cabos para-raios através do uso do ATP ofereceu uma boa alternativa aos métodos de cálculos. Apresentou um certo tempo entre modelar o sistema, simular e tabelar as correntes que circulam durante uma falta, entretanto a confiabilidade atribuída ao método é muito elevada devido às considerações das mais diversas variáveis.



REFERÊNCIAS

ONS. Requisitos mínimos para linhas de transmissão. Relatório Técnico Submódulo 2.4 dos Procedimentos de Rede, Operador Nacional do Sistema, 2016.

ABNT. Dimensionamento de cabos para-raios para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Relatório Técnico NBR 8449, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.

Conrad F. Desieno, Peter P. Marchenko and Gregory S. Vassell. “*General Equations for Fault currents in Transmission Line Ground Wires*”. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, 1970.

Marco Polo Pereira e Flávio Luciano A. de Souza, “Dimensionamento de Cabos OPGW Através de Simulações com o ATP, com Base em Correntes de Curto-Circuito e Condições da Rede Elétrica”, XVII SNPTEE, 2003.

ONS. “Diretrizes e critérios para estudos elétricos 23.3 dos Procedimentos de Rede” Operador Nacional do Sistema, 2016.

EMTP User Group, ATP-EMTP Rule Book, 1987.