



XXIII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

FI/GDS/16
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO: ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DIFERENTES NÍVEIS ISOCERÂUNICOS: ESTUDO DE CASO PARA AS LINHAS DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE MT

Dirceu de Almeida(*)
ELETRONORTE - BRASIL

RESUMO

A densidade de descargas para o solo por km^2 / ano é um dos parâmetros que mais influenciam no desligamento das linhas de transmissão que ocorrem por *Backflashover*, *Flashover* e por *descarga no meio do vão*. Este índice se apresenta bastante diferenciado entre as regiões e influencia no desempenho das linhas de transmissão.

O critério adotado pelo ONS, para o estabelecimento do padrão de frequência para outros desligamentos não levou em consideração situações regionalizadas que ocorrem na prática. Este trabalho, objetiva mostrar a necessidade de rever este critério exigido pela ANEEL / ONS para as linhas de transmissão, regionalizando-os.

PALAVRAS-CHAVE

Descarga Atmosférica, Linha de Transmissão, Nível Isocerâunico.

1.0 - INTRODUÇÃO

Uma das atividades do ONS, é o estabelecimento de padrões de desempenho para à administração da transmissão da Rede Básica. A densidade de descargas para o solo por unidade de área e por ano (índice isocerâunico) é com certeza, um dos parâmetros que mais influenciam no desempenho das linhas de transmissão.

Este índice se apresenta bastante diferenciado entre as regiões e entende-se que - o critério geral adotado pelo ONS - para o estabelecimento do padrão de frequência para outros desligamentos; que foi baseado em série histórica com a escolha do valor referente ao percentil de 95% das distribuições com expurgo de 5% das funções de Transmissão com pior desempenho, não levou em consideração situações regionalizadas que ocorrem na prática. Este trabalho, objetiva trazer novamente, para discussão este fato, mostrando que os níveis de desempenho exigidos pela ANEEL / ONS para as linhas de transmissão, devem ser revistos e regionalizados.

Para tal, serão apresentadas análises que mostram o quanto um maior nível isocerâunico acarreta na necessidade de uma resistência de pé de torre muito menor, muitas vezes para suportar uma corrente de *Backflashover* praticamente, igual ao de uma linha de transmissão com nível de tensão maior com nível isocerâunico menor.

Também, apresenta uma situação real, para duas linhas de transmissão existentes em Mato Grosso que correm paralela uma a outra com mesmo nível de tensão que, entretanto, apresentam nível de desempenho bastante diferenciados sendo que, a linha de transmissão com melhor desempenho é a que apresenta resistências de pés de torre maiores; o que parece ser um contrassenso.

(*) ELETRONORTE – Av. Arquimedes P. Lima, n° 3.355 – Sala: Pós-Operação. CEP 78.068-305 Cuiabá, MT, Brasil.
Tel: (+55 65) 3317-7159 – Fax: (+55 65) 3317-7157 – Email: dirceu.almeida@eletronorte.gov.br

O trabalho pretende explicar esta diferença de desempenho entre estas linhas de transmissão que estão sujeitas a um mesmo nível isocronônico, mas em condições diferenciadas, mostrando claramente, que criar um indicador de desempenho para linhas de transmissão baseado em série histórica não parece ser a melhor metodologia a ser utilizada.

2.0 - ASPECTOS QUE DEVEM SER CONSIDERADOS NA REALIZAÇÃO DESTE TIPO DE ANÁLISE

Neste artigo, será apresentado resumidamente, os diversos aspectos que foram considerados na análise realizada.

2.1 Fatores inerentes a construção das linhas de transmissão (materiais, geometria, etc.)

2.1.1. Configurações das torres, dos condutores aéreos e do sistema de aterramento

As linhas de transmissão podem apresentar diferentes configurações para as torres, condutores aéreos, comprimento dos vãos e sistema de aterramento que estabelecem diferentes respostas transitórias quando da ocorrência de descargas atmosféricas, que refletem diretamente nos valores das sobretensões resultantes obtidas. Vários aspectos têm influência na resposta transitória das linhas de transmissão com cabos para-raios atingidas pelas descargas: o ponto de incidência das descargas, as características das correntes de descarga, a impedância equivalente dos cabos para-raios para surtos, o acoplamento eletromagnético entre os condutores fase e os cabos para-raios, a resposta transitória da torre, o efeito das torres adjacentes, a modelagem utilizada para a disrupção da isolação e, principalmente, a resposta transitória do sistema de aterramento.

De todos os aspectos que influenciam no comportamento transitório das linhas de transmissão com cabos para-raios devido ao efeito das descargas atmosféricas; a resposta transitória do sistema de aterramento para as ondas trafegantes de tensão e corrente é o parâmetro de maior importância no resultado final devido a sua influência na sobretensão na estrutura.

Neste trabalho, serão apresentados os dados referentes às configurações geométricas, de condutores fase e cabos para-raios bem como do sistema de aterramento das torres consideradas como típicas, para as linhas de transmissão de Mato Grosso aqui, analisadas (BPRPLT6-01 e BPRPLT6-02).

O modelo de disrupção considerado para a cadeia de isoladores será a curva tensão x tempo apresentada abaixo (vide, Eq. 1):

$$U_{\text{suportável}} = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) \cdot W \quad \text{onde:} \quad \text{Eq. 1}$$

U_{suportável} é a tensão que a cadeia suporta sem romper para um dado tempo de surto (kV);

T é o tempo que dura o surto (0,5 – 16 μs);

W é o comprimento da cadeia (m)

Também, optou-se por trabalhar com a indutância da torre ao invés da impedância de surto da torre (EPRI, 1982) o que simplifica os cálculos sem acarretar grandes imprecisões.

Esta escolha significa representar a resposta de torres de linhas de transmissão a surtos atmosféricos por parâmetros concentrados (circuito de impedâncias e resistências) que é uma vantagem, pois a solução resume-se simplesmente a uma análise de circuitos. Já na modelagem da impedância de surto a solução envolve a manipulação das equações de ondas viajantes. A aplicação desta simplificação é possível, pois é grande o número de incertezas envolvidas na aquisição dos dados neste tipo de estudo, o que não justificaria a complexidade maior.

2.2 Fatores ambientais que influenciam o desempenho das linhas de transmissão

2.2.1. O índice de incidência de descargas atmosféricas para a área que é atravessada pelas linhas de transmissão

Do relatório de densidade de raios por município relativo ao ano de 2013, emitido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, temos (ver Tabela 1):

TABELA 1 – Correlação de extensão da LT no município com nível isocerâunico

EXTENSÃO DAS LT'S NOS MUNICÍPIOS E NÍVEL ISOCERÂUNICO DO ANO DE 2013					
LT'S DO RAMAL LESTE DO MT	RONDONÓPOLIS	SÃO JOSÉ DO POVO	GUIRATINGA	TORIXOREU	RIBEIRÃOZINHO
LT 230 KV B. PEIXE-RONDONÓPOLIS 1	$31,9 \text{ km} - 9,99 \frac{\text{Raios / km}^2}{\text{Ano}}$	$14,2 \text{ km} - 8,22 \frac{\text{Raios / km}^2}{\text{Ano}}$	$109,2 \text{ km} - 9,11 \frac{\text{Raios / km}^2}{\text{Ano}}$	$39 \text{ km} - 7,95 \frac{\text{Raios / km}^2}{\text{Ano}}$	$24,8 \text{ km} - 9,33 \frac{\text{Raios / km}^2}{\text{Ano}}$
LT 230 KV B. PEIXE-RONDONÓPOLIS 2	$29,3 \text{ km} - 9,99 \frac{\text{Raios / km}^2}{\text{Ano}}$	$14,2 \text{ km} - 8,22 \frac{\text{Raios / km}^2}{\text{Ano}}$	$109,2 \text{ km} - 9,11 \frac{\text{Raios / km}^2}{\text{Ano}}$	$39 \text{ km} - 7,95 \frac{\text{Raios / km}^2}{\text{Ano}}$	$24,8 \text{ km} - 9,33 \frac{\text{Raios / km}^2}{\text{Ano}}$

2.2.2. O comportamento e as características das descargas atmosféricas na área.

Considerou-se que o comportamento estatístico de uma descarga atmosférica na região, segue a distribuição log-normal para os parâmetros amplitude, taxa de crescimento da corrente e local da incidência da descarga (topo da torre, cabos para-raios, etc.) conforme distribuição da CIGRÉ (ver, Eq. 2).

$$P(I) = \frac{1}{1 + (I/31)^{2,6}} \text{ onde } P(I) \text{ é a probabilidade de uma corrente } > I \quad \text{Eq. 2}$$

Na realidade, o valor médio varia de 31 kA a 45 kA, dependendo do local. Foi considerado o valor de 31 kA para a região devido ao desconhecimento do autor, sobre a existência de trabalhos de medição na área analisada.

Para o Brasil, existem trabalhos definindo uma distribuição log-normal como a da equação abaixo (Ver, Eq. 3); que pioraria em muito, o desempenho das linhas de transmissão analisadas.

$$P(I) = \frac{1}{1 + (I/45)^{4,7}} \text{ onde } P(I) \text{ é a probabilidade de uma corrente } > I \quad \text{Eq. 3}$$

2.3 Requisitos legais exigidos pela ANEEL / ONS

O Anexo Técnico do Edital de Leilão bem como, os Procedimentos de Rede estabelecem que a quantidade de desligamentos por descargas atmosféricas deve ser igual ou inferior a dois, por 100 km por ano, para linhas de transmissão com tensão igual a 230 kV com estruturas projetadas com pelo menos, dois cabos para-raios posicionados de tal forma, que a taxa de falha de blindagem seja inferior a $10^2 / 100$ /ano.

3.0 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA AS LINHAS DE TRANSMISSÃO NOS CASOS DE REFERÊNCIA

As simulações realizadas tomaram por base um software desenvolvido em MatLab no formato GUI (interface gráfica de uso amigável) disponibilizado gratuitamente pela "High Voltage Laboratory, School of Electrical & Computer Engineering, Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki".

Basicamente, a metodologia utilizada visa estimar a taxa de *Backflashover* e de *Flashover*, a eficiência da blindagem, etc.; de forma a avaliar o desempenho da linha de transmissão, pelo número de saídas da LT por 100 km e por ano.

Os dados utilizados nas simulações para as linhas de transmissão de 230 kV BPRPLT6-01 e BPRPLT6-02, são apresentados nos próximos subitens.

3.1 Impedância característica (surto) dos condutores fase das linhas de transmissão

BPRPLT6-01 => $Z_0 = 387,3 \Omega$ e BPRPLT6-02 => $Z_0 = 237,3 \Omega$.

4.0 - APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DETECTADO PARA AS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A figura 2, apresentada abaixo, mostra o gráfico de histórico de desligamentos por descargas atmosféricas, para as linhas de transmissão de 230 kV BPRPLT6-02 de extensão 216,5 km e BPRPLT6-01 de extensão 219,1 km.

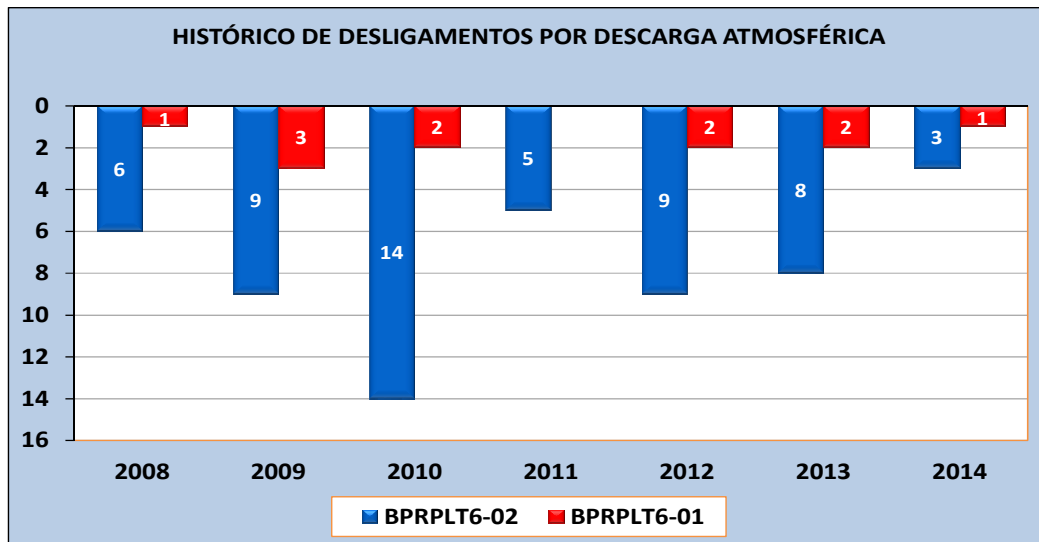


Figura 2 – Histórico de Desligamento das linhas de transmissão BPRPLT6-01 e BPRPLT6-02

Verifica-se da figura acima, desempenhos muito diferentes para as linhas de transmissão apesar de serem paralelas uma a outra e com uma distância entre os eixos das linhas, da ordem de 35 a 45 m. Esta diferença não pode ser justificada apenas pela maior altura das estruturas da LT 230 kV BPRPLT6-02.

Diante do péssimo desempenho da LT 230 kV BPRPLT6-02, diversas ações foram realizadas tais como:

- Levantamentos realizados mostraram uma incidência maior de desligamentos por descarga no trecho entre as torres 1 a 160 (ver, Figura 3) e iniciou-se um trabalho para medição de todas as resistências de aterramento das estruturas neste trecho, com a recuperação da resistência de aterramento não conformes, para condições iguais ou melhores que as de projeto;

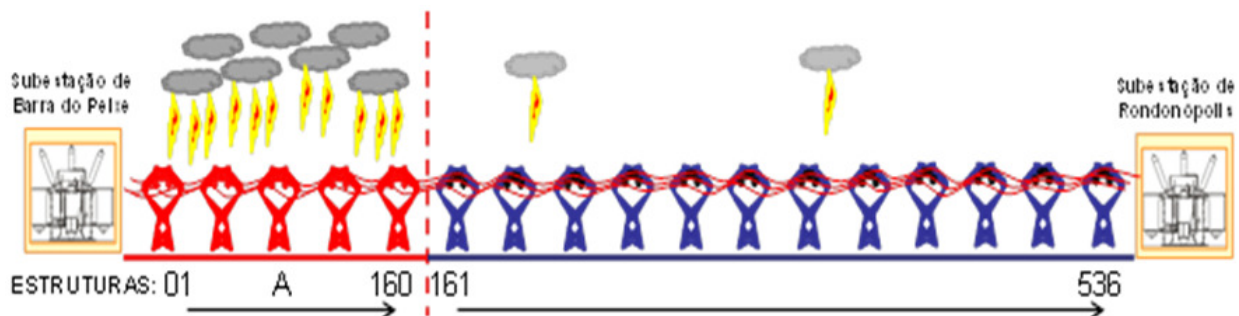


Figura 3 – Levantamento de desligamentos da LT 230 kV BPRPLT6-02 por descarga atmosféricas por trecho.

Nota: Os demais itens, tais como; sinais de rompimento de dielétrico, blindagem dos condutores contra descargas, NBI da estrutura e muitos outros, não se mostraram pertinentes.

- Acompanhamentos das ações realizadas mostraram ineficiência na ação, visto que os desligamentos por descargas atmosféricas continuaram persistindo com níveis acima dos exigidos pelos requisitos legais (mais de um desligamento por 100 km). Outras ações foram realizadas visando compensar o excessivo número de desligamentos da LT, atuando em outras causas de desligamentos tais como, a poluição de origem animal através da implementação de dispositivos nas estruturas 1 a 64, conforme pode ser visto na Figura 4.



Figura 4 – Instalação de proteção contra excrementos de aves na cadeia central da torre (mais afetada)

- c. Realização de análise considerando o índice de incidência de descargas atmosféricas para a área que é atravessada pelas linhas de transmissão extraído do relatório de densidade de raios por município relativo ao ano de 2013, emitido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

5.0 - RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES REALIZADAS PARA AS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Neste item, serão apresentadas tabelas com os resultados obtidos para o desempenho das linhas de transmissão de 230 kV BPRPLT6-01 e BPRPLT6-02 considerando resistência de aterramento das estruturas variando entre os valores de 30 a 13 Ω e diferentes valores de tensões disruptivas para as cadeias de isoladores (2 μ s e 6 μ s).

5.1 Simbologia a ser adotada para as tabelas apresentadas (item 5 e subitens relacionados)

Ng – Nível de Descarga por km² por ano;
Ns – Valor de descargas que atingem o cabo para-raios por 100 km por ano;
I_{MSF} – Valor de corrente que provoca falha de blindagem em kA;
 α F – Ângulo perfeito de blindagem em graus;
SFR – Taxa de falha de blindagem por ano;

BFR – Valor de *Backflashover* por 100 km por ano;
I_{BF} – Valor mínimo de corrente que causa *Backflashover* na cadeia de isoladores;
I_c – Valor mínimo de corrente que causa *Flashover* na cadeia de isoladores;
SSFOR – Taxa de falha de blindagem por incidência direta da descarga nas fases por 100 km por ano.

5.2 Análise do desempenho da LT 230 kV BPRPLT6-02 considerando a variação da resistência de aterramento da estrutura e para as tensões disruptiva preconizadas para as cadeias de isoladores conforme IEEE

As tabelas 2 e 3, apresentadas a seguir, são um resumo da análise realizada, para as piores situações encontradas que foram identificadas como sendo para a tensão disruptiva da cadeia de isoladores que ocorre em 2 μ s.

TABELA 2 – Análise de desempenho p/a pior tensão disruptiva de 2 μ s e resistência pé de torre entre 30 a 13 Ω

MODELO ANALISADO	R aterramento torre (Ω)	IBF (kA)	IMSF (kA)		SFR		SSFOR		α F (graus)	Ns	BFR	TAXA SAÍDA P/ DESC. ATMOSFÉRICA
			Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda				
IEEE Std	30	57,60	16,5	16,5	0,022	0,022	0,000732	0,000732	2,76	155	10,00	10,05
IEEE Std	20	70,00	16,5	16,5	0,022	0,022	0,000732	0,000732	2,76	155	4,80	4,85
IEEE Std	15	82,40	16,5	16,5	0,022	0,022	0,000732	0,000732	2,76	155	2,35	2,40
IEEE Std	13	90,00	16,5	16,5	0,022	0,022	0,000732	0,000732	2,76	155	1,54	1,59

SFR, SSFOR, Ns, BFR e Taxa Saída p/ Desc. Atmosférica são dadas por 100 km e por ano.
 Ng = 8 raios / km².ano, I_c = 7,89 kA (2 μ s) e I_c=5,61 kA (μ s) e análise realizada para os condutores da direita e esquerda.

5.3 Análise do desempenho da LT 230 kV BPRPLT6-01 considerando a variação da resistência de aterramento da estrutura e para as tensões disruptiva preconizadas pelo IEEE (2 μ s e 6 μ s)

TABELA 3 – Análise de desempenho p/a pior tensão disruptiva de 2 µs e resistência pé de torre entre 30 a 10 Ω

MODELO ANALISADO	R aterramento torre (Ω)	IBF (kA)	IMSF (kA)		SFR		SSFOR		αF (graus)	Ns	BFR	TAXA SAÍDA P/ DESC. ATMOSFÉRICA
			Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda				
IEEE Std	30	47,60	9,95	9,95	0,0141	0,0141	0,000195	0,000195	12,00	141	16,60	16,61
IEEE Std	20	57,90	9,95	9,95	0,0141	0,0141	0,000195	0,000195	12,00	141	8,97	8,98
IEEE Std	15	68,10	9,95	9,95	0,0141	0,0141	0,000195	0,000195	12,00	141	4,90	4,91
IEEE Std	10	88,40	9,95	9,95	0,0141	0,0141	0,000195	0,000195	12,00	141	1,53	1,54

SFR, SSFOR, Ns, BFR e Taxa Saída p/ Desc. Atmosférica são dadas por 100 km e por ano.
Ng = 8 raios / km2.ano, Ic = 7,89 kA (2 µs) e Ic=5,61 kA (µs) e análise realizada para os condutores da direita e esquerda.

6.0 - CONCLUSÃO

As simulações mostram que a LT 230 kV BPRPLT6-02 teria um desempenho de 2,5 saídas / (100 km . ano) se a resistência de aterramento da estrutura fosse de até 20 Ω com um índice de incidência de descargas atmosféricas para a área da ordem de 4 raios / (km² . ano); o que significaria cerca de 70 kA para a corrente de *Backflashover*.

Esta consideração esta bem aquém, dos resultados apresentados no relatório de densidade de raios por município relativo ao ano de 2013 emitido pelo INPE, que indica algo em torno de 8 a 9 raios / (km² . ano) para a área.

Para se conseguir um desempenho como exigido pelos requisitos legais - 2,5 saídas / (100 km . ano) – seria necessário corrigir a resistência de aterramento da estrutura para cerca de 13 Ω.

Assim, supondo que o nível isocerâunico seja uniforme ao longo da LT (8 raios por km² por ano) e que a recuperação da mesma – seja realizada para as condições de projeto quando construída (1997) - pode-se concluir, que o número de desligamentos da LT por 100 km por ano, passará a ser aproximadamente:

$$\text{Saídas da LT} = \frac{(0,64 * 2) + (0,138 * 2,5) + (0, * 10) + (0,021 * 17)}{0,64 + 0,138 + 0,163 + 0,021} = 3,75 \text{ saídas por 100 km por ano}$$

Este número é bem distante do desempenho exigido pelos requisitos legais e nos leva a uma conclusão relativamente óbvia, que o critério atualmente adotado pelo ONS, para o estabelecimento do padrão de frequência para outros desligamentos para linhas de transmissão deveria levar em consideração situações regionalizadas como o nível isocerâunico da região atravessada pela linha de transmissão.

Constata-se também, que o desempenho da LT 230 kV BPRPLT6-01 deveria ser pior que o da LT 230 kV BPRPLT6-02; inclusive, possuindo resistência de aterramento de estruturas com valores maiores conforme medições realizadas em campo.

Não existe uma explicação óbvia para isto, porém - uma possibilidade – seria o fato da LT 230 kV BPRPLT6-02 estar blindando a LT 230 kV BPRPLT6-01 (ver, Figura 5), visto que possui uma altura relativamente maior e uma distância entre os eixos destas linhas de transmissão serem, relativamente pequenas, situando-se entre 35 a 40 m.

Por exemplo, para um raio mediano de 45 kA, teríamos um raio de atração de:

$$\text{BPRPLT6-02} \Rightarrow 14 * H^{0,6} = 14 * 41,2^{0,6} = 130,3 \text{ metros}$$

$$\text{BPRPLT6-01} \Rightarrow 14 * H^{0,6} = 14 * 32,5^{0,6} = 113,0 \text{ metros}$$

Como a probabilidade das descargas atmosféricas excederem o valor de 45 kA é da ordem de 27,5 % conforme curva de probabilidade de Andreson – Eriksson (50%, se considerássemos as medições do Morro do Cachimbo), temos que; para a situação encontrada da LT BPRPLT6-02 (Ns=155) - 43 descargas excederão o valor de 45 kA - ou seja, quase 20 raios / (100 km . ano).

Destas, pelo menos 8 raios / (100 km .ano) devem exceder o valor de 70 kA; o que nos leva a uma diferença entre os raios de atração em cerca de 39 % em relação ao caso anterior.

$$\text{BPRPLT6-02} \Rightarrow 19.5 * H^{0.6} = 19.5 * 41.2^{0.6} = 181,4 \text{ metros}$$

$$\text{BPRPLT6-01} \Rightarrow 19.5 * H^{0.6} = 19.5 * 32.5^{0.6} = 157,3 \text{ metros}$$

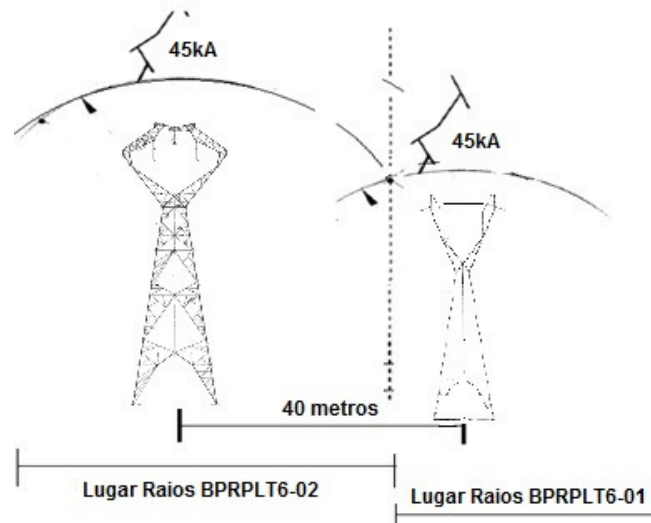


Figura 5 – Possibilidade de blindagem da LT 230 kV BPRPLT6-01 pela LT 230 kV BPRPLT6-02

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ONS - *Procedimentos de rede, Submódulo 2.4 - Padrões de desempenho da Rede Básica e requisitos mínimos para suas instalações.*
- (2) Mikropoulos, P. N., Tsovilis, T. E., & Zlitidis, D. E. (2010) - *Software development for the evaluation of the lightning performance of overhead transmission lines. Paper presented at the Proceedings of the Universities Power Engineering Conference, 2010*
- (3) Kalifa, M. - *High Voltage Engineering, Segunda Edição, EUA, 2009*
- (4) Electric Power research Institute (EPRI) - *Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above, Segunda Edição, EUA, 1982*
- (5) Prado, B. C. B., *Painel Interno de Melhorias da OMT - Eletronorte, 2011*

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Dirceu de Almeida, nascido em 1961 em Bela Vista do Paraíso/ PR, obteve o grau de engenheiro eletricitista pela Universidade Federal do MT (UFMT) em 1987, especializou-se em Sistemas de Energia pela UFMT-UFU em 2007 e em Proteção de Sistemas Elétricos pela UNIFEI em 2012. Trabalhou em estudos de engenharia na Engevix, Marte Engenharia, CEMAT e, desde 2005, exerce atividades no Centro de Operação de Sistemas Elétricos do Mato Grosso da Eletronorte.