

Desempenho de Linhas de Distribuição de 138 kV Frente a Descargas Atmosféricas: Um Estudo de Caso de uma Linha Real

CALENZANI, H.T.* , LOPES, I.J.S.**

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil, (e-mail: tassarash@hotmail.com).

** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil, (e-mail: ivanlopes@ufmg.br).

Abstract: This paper aims to achieve a performance study of a 138 kV distribution line against atmospheric discharges. The case under study applies the methodology of the Two-point Method, from the IEEE FLASH software, considering the spans of the line separately. Also, computer simulations, using the ATP software, were performed to evaluate the critical current values of the 138 kV line. It was possible to verify the parameters of importance regarding the line performance, as well as some improvements recommendations.

Resumo: Este artigo tem como objetivo realizar um estudo de desempenho de uma linha de distribuição de 138 kV frente a descargas atmosféricas. O estudo de caso em questão utiliza a metodologia do Método dos Dois Pontos, a partir do software IEEE FLASH, considerando os vãos da linha separadamente. Também são apresentadas simulações computacionais a partir do software ATP, de modo a avaliar os valores de corrente crítica da linha de 138 kV. Com as análises e resultados foi possível verificar os parâmetros de importância em relação ao desempenho da linha, bem como a recomendação de melhorias.

Keywords: Atmospheric discharges; diagnosis; distribution line; lightning performance; methodologies.

Palavras-chaves: Descargas atmosféricas; desempenho; diagnóstico; linha de distribuição; metodologias.

1. INTRODUÇÃO

Devido à grande ampliação das plantas industriais e ao baixo valor dado à fase de planejamento de engenharia, não é raro que expansões dos sistemas elétricos industriais ocorram sem que sejam realizados estudos elétricos. Tais estudos são de essencial importância para o funcionamento do sistema elétrico no curto ou longo prazo, para a segurança das pessoas e dos equipamentos, bem como para o fornecimento contínuo de energia elétrica, fator importantíssimo para se garantir a qualidade da energia elétrica.

As interrupções no processo industrial são comuns em plantas de mineradoras, cujos sistemas elétricos são supridos e compostos, geralmente, por linhas de distribuição que percorrem grandes distâncias, muitas vezes construídas sem o devido planejamento, causando interrupções e prejuízos para as indústrias (CNI, 2016). Uma vez que existem metas de produção a serem cumpridas, observa-se que existe uma motivação de realizar investimentos na área da qualidade de fornecimento de energia das minas de produção, com o objetivo de alcançar o mínimo de interrupções do sistema elétrico. Estes investimentos incluem, dentre outros, uma análise técnica e econômica, a partir da elaboração de estudos elétricos de qualidade de energia e eficiência energética, abrangendo estudos de análise de desempenho de equipamentos, medições e diagnósticos de aterramento, coordenação de isolamento e fluxo de potência.

O estudo de caso analisado neste trabalho é referente a uma linha de distribuição de 138 kV, com 22 estruturas e 9 km de extensão, localizada em uma planta industrial em Minas Gerais, região que possui elevada incidência de descargas e solo de alta resistividade (CEMIG, 1994). Esta linha atualmente apresenta desempenho frente a descargas atmosféricas insatisfatório, corroborando com o dado de que quase 70% dos desligamentos não programados, em linhas aéreas, são provocados pelas descargas atmosféricas (Visacro, 2005).

Para o estudo do desempenho desta linha de distribuição, foi utilizada a metodologia denominada Método dos Dois Pontos, a partir do uso do software IEEE FLASH, versão 2.0 (McDermott, 2010). O programa foi utilizado de uma forma alternativa na qual a estimativa de desempenho da linha foi obtida considerando-se cada um dos 21 vãos da linha separadamente. Adicionalmente, foi feita uma verificação de resultados de corrente crítica a partir de simulações de transitórios eletromagnéticos, causados por descargas atmosféricas incidentes ao longo dos vãos da linha, através do software ATP, versão 6.0 (Hoidalen, 2015).

Este artigo está organizado da seguinte forma: o item 2 apresenta sucintamente a metodologia utilizada para a análise de desempenho da linha frente a descargas atmosféricas e a modelagem da linha (estruturas, seus aterramentos, e respectivos vãos); o item 3 apresenta os dados da linha de distribuição em análise; o item 4 mostra os resultados obtidos

e compara com os dados reais de desempenho da linha em estudo observados ao longo de 4 estações chuvosas, de modo a verificar os parâmetros de importância em relação ao desempenho da linha; finalmente, o item 5 apresenta as conclusões, gerando recomendações de melhorias de desempenho para a diminuição de interrupções.

2. METODOLOGIA

Para a análise do desempenho da linha de distribuição frente a descargas atmosféricas, foi utilizado o método dos dois pontos, a partir do software IEEE FLASH. Posteriormente, a partir do software ATP, foram realizadas simulações de forma a verificar os valores de corrente crítica de descarga que causam o desligamento da linha, obtidos com o programa FLASH.

2.1 Método dos dois pontos – IEEE FLASH

O método dos dois pontos consiste em uma solução numérica linearizada, de simples aplicação, baseada em um procedimento de cálculo sem necessitar da utilização de computadores (EPRI, 1982).

Cada um dos passos de cálculo é responsável pela definição de uma grandeza, como coordenadas da linha, nível cerâmico, quantidade de descargas atmosféricas que atingem a linha, aterramentos, cabos, e por fim, o desempenho da linha em relação a descargas atmosféricas diretas e indiretas, bem como as correntes críticas de descarga capazes de provocar o desligamento.

Desta forma, esta aplicação possui de aproximação do resultado final, uma vez que a análise de desempenho de linhas aéreas tem como base diversos dados estatísticos. Entretanto, apresenta resposta consideravelmente boa pela facilidade de utilização, principalmente em conjunto com outros métodos (Assis, 2017).

2.2 Simulações computacionais de transitórios – ATP

Simulações dos transitórios eletromagnéticos envolvendo a incidência de uma descarga atmosférica dependem de ferramentas computacionais com grande poder de processamento. O software ATP é amplamente utilizado em pesquisas envolvendo tais fenômenos.

A metodologia consiste na modelagem da linha em estudo, em parâmetros distribuídos, contemplando as torres, resistências de aterramento, cabos condutores, cabos para-raios e as fontes de descargas atmosféricas.

Estas modelagens apresentam resultados satisfatórios e estão em constante evolução na área de pesquisa de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas, aprimorando as modelagens das fontes, das impedâncias de aterramento e levando em consideração efeitos eletromagnéticos da linha em si.

No presente trabalho, as simulações realizadas no ATP tiveram por objetivo a verificação dos valores de corrente crítica obtidos pelo IEEE FLASH.

3. MODELAGEM DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO

Neste item são descritos, sucintamente, os dados considerados para a metodologia utilizada neste estudo.

Uma vez que o caso é referente a uma linha de distribuição de 138 kV real, foram considerados os seus dados de projeto, bem como os dados obtidos em levantamento *in loco*. A linha possui 9 km de extensão e faz a ligação de uma subestação transformadora de 345-138 kV para uma subestação de 138 kV de um processo industrial. A Figura 1 apresenta uma vista de cima da linha em estudo.

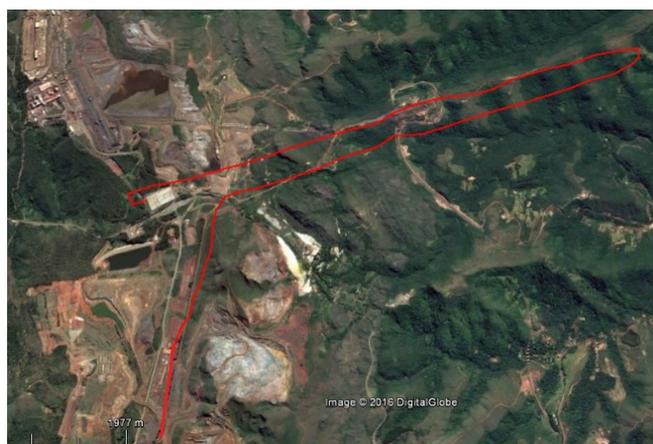


Fig. 1 Vista de cima da linha de distribuição em estudo.

De forma geral, possui máxima tensão operativa de 145 kV, NBI de 650 kV, 22 estruturas metálicas de quatro tipos distintos, sendo 15 de suspensão e 7 de ancoragem, 9 isoladores/cadeia, possui vãos variáveis entre 126 e 622 metros e resistências de aterramento entre 28 e 200 Ohms.

São utilizados condutores LINNET, sendo um condutor por fase, e um cabo para-raios de 9,52 mm, com altura variável entre 11,5 e 29,5 metros ao longo da extensão da linha. A Figura 2 apresenta a Estrutura 19 da linha em estudo.

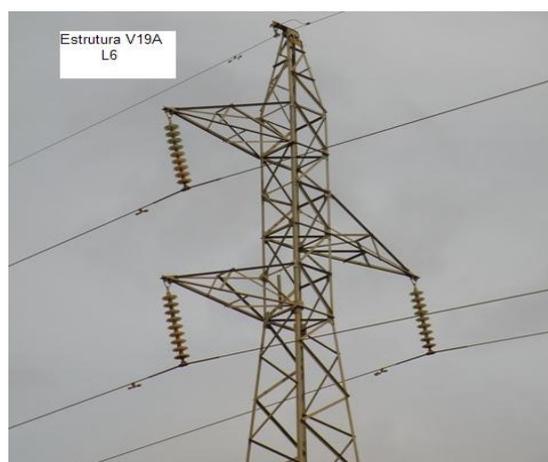


Fig. 2 Estrutura 19 da linha de distribuição em estudo.

Seu percurso atual tem como motivo a reutilização de estruturas de linhas antigas, passando por áreas industriais já desativadas. Esta região possui um índice cerâmico médio de 75 dias de trovoadas por ano.

Os dados da linha foram obtidos em seu projeto elétrico e foram obtidos em campo os valores de resistência de pé de torre de cada uma das estruturas. Em seu projeto original, foi definido um desempenho de aproximadamente 12,4 desligamentos/100km/ano, chegando a um valor de 1,1 desligamentos por ano da linha em questão (CEMIG, 2001).

Atualmente, de acordo com o monitoramento realizado pela indústria, o número de desligamentos está muito superior ao previsto em projeto, com aproximadamente 5,5 desligamentos por ano (61 desligamentos/100km/ano), monitorado nos últimos 4 anos, gerando paradas de processos e, conseqüentemente, perdas financeiras. Por este motivo, esta linha foi escolhida para o estudo apresentado a seguir.

3.1 Modelagem IEEE FLASH

Para a aplicação desta metodologia, são necessários os seguintes dados de entrada:

- Número de descargas atmosféricas para a terra por km² por ano da região.
- Vão entre as estruturas.
- Dados geométricos dos condutores – Diâmetro, espaçamento entre fases, altura do solo.
- Dados geométricos das estruturas – Altura e diâmetro.
- Dados geométricos dos condutores – Diâmetro, altura e flecha.
- Resistência de aterramento das estruturas.

A Figura 3 apresenta os tipos de estruturas da linha e a Tabela 1 seus dados geométricos.

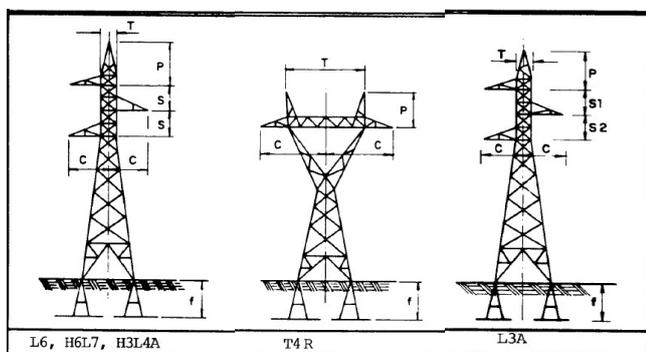


Fig. 3 Tipos de Estruturas e Dados Geométricos da Linha.

Tabela 1. Dados Geométricos das Estruturas da Linha – IEEE FLASH

Estruturas	Dimensões (mm)				
	T	P	S	C	f
L6	800	3030	1860	2900	2350
H6L7	900	3400	1860	3200	2350
L3A	1100	4380	1920	2500	2500
H3L4A	1300	4580	1860	3470	3470
T4R	5000	2250	-	-	-

Na presente análise, optou-se por modelar cada um dos 21 vãos da linha de distribuição de forma distinta. Os dados principais utilizados para cada um dos vãos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados de Modelagem da Linha – IEEE FLASH

Estrutura	Vão	Tipo de Torre	Formato	Altura (m)	Comprim. (m)	Aterram. (Ohms)
1	1-2	H3L4A	WAIST	11.5	211	50
2	2-3	L6	CONE	14.5	440	30
3	3-4	H6L7	CONE	11.5	416	80
4	4-5	L6	CONE	14.5	622	48
5	5-6	L6	CONE	14.5	595	39
6	6-7	H6L7	CONE	16	408	135
7	7-8	H6L7	CONE	17.5	400	60
8	8-9	L3A	CONE	11.5	400	70
9	9-10	L6	CONE	16	294	150
10	10-11	T4R	CONE	11.25	414	100
11	11-12	T4R	CONE	12.75	322	88
12	12-13	L6	CONE	20.5	400	95
13	13-14	L6	CONE	20.5	400	200
14	14-15	H6L7	CONE	22	400	35
15	15-16	H3L4A	WAIST	11.5	400	50
16	16-17	L6	CONE	25	500	60
17	17-18	L6	CONE	29.5	439	28
18	18-19	H6L7	CONE	25	588	45
19	19-20	L6	CONE	29.5	538	32
20	20-21	L6	CONE	29.5	415	140
21	21-22	L3A	CONE	29.5	282	60
22	22-SE	H3L4A	WAIST	11.5	126	60

Foram considerados condutores LINNET, sendo um condutor por fase, e um cabo para-raios 9,52 mm, com alturas conforme tipos de torre e dados geométricos acima informados. As demais informações estão na Tabela 3.

Tabela 3. Dados dos Condutores e Cabos Para-raios – IEEE FLASH

Cabos	Tipo	Código / Classe	Bitola	Diâmetro (mm)	Resistência (Ω/km)
Condutores	CAA	LINNET	170,5 mm ²	18,31	0,1901
Para-raios	Aço Galv.	HS	5/16"	7,94	4,58

Foram consideradas 9 descargas atmosféricas para a terra por km² por ano na região, de acordo com o índice cerâmico apresentado no mapa de densidade de descargas atmosféricas do ONS (ONS, 2015).

3.2 Modelagem ATP

Para a modelagem no ATP, optou-se por modelar cada torre da linha em estudo. A Figura 4 representa o modelo típico utilizado para a modelagem de cada torre.

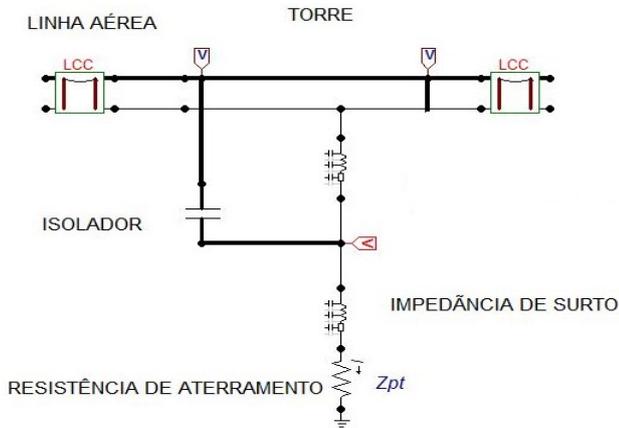


Fig. 4 Modelagem dos Vãos da Linha no ATP.

Os modelos LCC são do tipo Bergeron, de frequência 60 Hz, resistividade de 1000 Ohm.m e sem transposição conforme projeto. Demais dados considerados estão descritos no item 3.1. Foi considerado a cadeia de 9 isoladores com 0,05 μ F e impedância de surto de 170 Ohms para as torres.

Os valores das resistências de aterramento estão de acordo com a Tabela 1. A Figura 5 apresenta de forma resumida a modelagem da linha de distribuição.

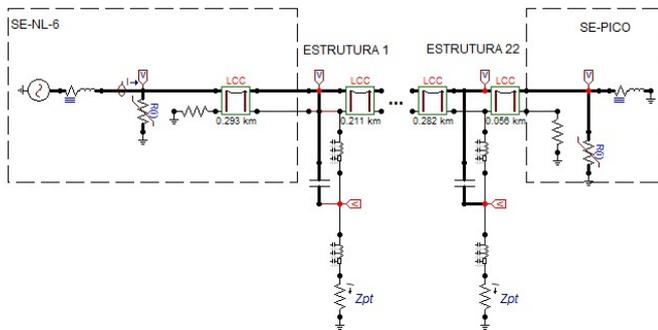


Fig. 5 Modelagem da Linha no ATP.

No ATP estão disponíveis diferentes tipos de formas de onda (Souza, 2019). Para a modelagem das descargas atmosféricas, foi utilizada uma fonte Heidler, com tempo de frente e cauda normalizados e estabelecidos de acordo com a NBR 6939 (ABNT, 2018).

- Tempo de frente (tf): 1.2E-6 s.
- Tempo de cauda (th): 5E-5 s.

Os valores de tempo de frente e de cauda das ondas das descargas atmosféricas variam de acordo com a sua amplitude (Paulino, 2010). Nesta análise, optou-se por manter os valores normalizados. Não se considerou descargas subsequentes. A Figura 6 apresenta a onda simulada.

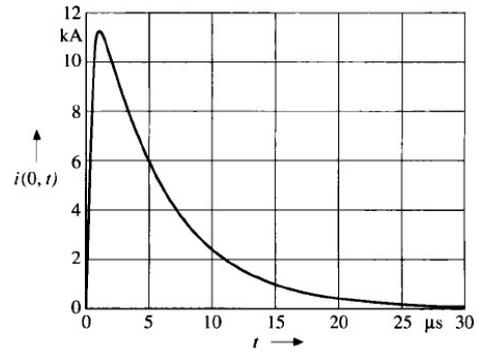


Fig. 6 Forma de Onda de Descarga Atmosférica Tipo Heidler.

4. RESULTADOS

A partir da modelagem com o IEEE FLASH, com a metodologia descrita no item 3.1, foram obtidos os seguintes resultados de desempenho da linha de distribuição de 138 kV em estudo, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados de Desempenho – IEEE FLASH

Estrut.	Vão	Desc. Indireta: Deslig. /100 km /Ano	Desc. Direta: Deslig. /100 km /Ano	Desc. Indireta: Deslig. /Ano	Desc. Direta: Deslig. /Ano	Corrente Crítica (kA)
1	1-2	10.70	0.00	0.023	0.000	67.3
2	2-3	25.52	0.00	0.112	0.000	28.8
3	3-4	28.25	0.00	0.118	0.000	41.0
4	4-5	24.69	0.00	0.154	0.000	43.3
5	5-6	39.53	0.00	0.235	0.000	18.8
6	6-7	43.84	0.00	0.179	0.000	36.3
7	7-8	34.74	0.00	0.139	0.000	33.1
8	8-9	40.14	0.00	0.161	0.000	19.9
9	9-10	45.39	0.00	0.133	0.000	30.9
10	10-11	32.34	0.00	0.134	0.000	32.1
11	11-12	29.17	0.00	0.094	0.000	34.3
12	12-13	60.92	0.00	0.244	0.000	19.0
13	13-14	43.26	0.00	0.173	0.000	57.7
14	14-15	20.98	0.00	0.084	0.000	44.4
15	15-16	22.20	0.00	0.089	0.000	37.0
16	16-17	27.87	0.00	0.139	0.000	62.2
17	17-18	23.57	0.00	0.103	0.000	46.0
18	18-19	26.05	0.00	0.153	0.000	53.5
19	19-20	53.39	0.00	0.287	0.000	20.8
20	20-21	60.65	0.00	0.252	0.000	38.6
21	21-22	32.05	0.00	0.090	0.000	45.3
Total				3.10		

Conforme se pode observar, o número de desligamentos por descargas diretas foi nulo, uma vez que a linha em estudo possui um cabo para-raios protegendo efetivamente as fases em toda a sua extensão. Em linhas de 138 kV, providas de cabos para-raios, o risco de ocorrer uma falha de blindagem é muito reduzido com o correto posicionamento dos cabos para-raios em relação aos cabos condutores (Assis, 2019).

Porém, o número de desligamentos devido a descargas indiretas, foi de valor elevado, em torno de 3,1 desligamentos por ano. Este valor estimado é alto assim como o valor obtido a partir do monitoramento da linha nas últimas 4 estações chuvosas, de 5,5 desligamentos por ano. Vale lembrar que a

estimativa de desempenho feita não leva em consideração descargas laterais e possíveis desligamentos causados por tensões induzidas.

É possível observar, pela análise de desempenho da linha a partir dos vãos individuais, que alguns deles são responsáveis pelo maior número de desligamentos. Esta análise é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Distribuição dos desligamentos ao longo dos vãos da linha – IEEE FLASH

Estrut.	Vão	Deslig./Ano	Porcentagem Desligamentos
1	1-2	0.023	0.73%
2	2-3	0.112	3.63%
3	3-4	0.118	3.80%
4	4-5	0.154	4.96%
5	5-6	0.235	7.60%
6	6-7	0.179	5.78%
7	7-8	0.139	4.49%
8	8-9	0.161	5.19%
9	9-10	0.133	4.31%
10	10-11	0.134	4.33%
11	11-12	0.094	3.03%
12	12-13	0.244	7.87%
13	13-14	0.173	5.59%
14	14-15	0.084	2.71%
15	15-16	0.089	2.87%
16	16-17	0.139	4.50%
17	17-18	0.103	3.34%
18	18-19	0.153	4.95%
19	19-20	0.287	9.28%
20	20-21	0.252	8.13%
21	21-22	0.090	2.92%
22	22-SE	0.000	0.0%

Observa-se que os vãos em destaque, correspondentes a um terço do total da linha, são responsáveis por parte significativa do número de desligamentos, correspondendo a 49,5% do total. A Figura 6 apresenta graficamente este resultado.

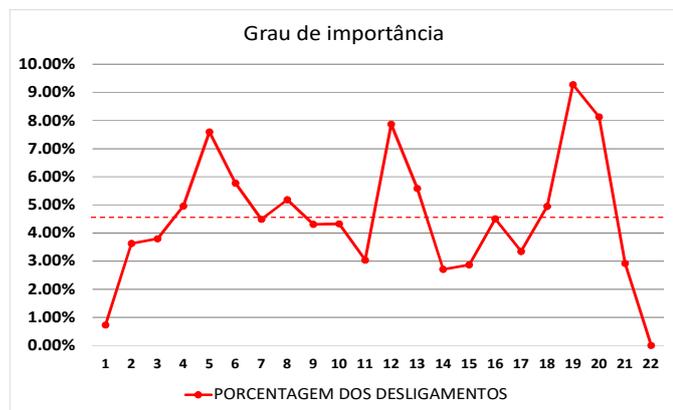


Fig. 6 Porcentagem de desligamentos dos vãos. A linha tracejada apresenta a média dos valores.

De forma a avaliar o motivo do maior número de desligamentos nestes vãos específicos, foram analisados os parâmetros que afetam o desempenho de linhas, tais como

valores de aterramento e comprimento dos vãos (IEEE, 2010).

É possível observar que os valores de aterramento dos vãos 3-4, 6-7, 8-14 e 20-21, em torno de 100 Ohms, são maiores que a média geral da linha, de 70 Ohms, o que leva a um desempenho pior, como pode ser visto na Figura 7. Os comprimentos dos vãos entre as estruturas 4-7 e 18-21 são maiores que o restante da linha, média de 500 m por vão, conforme mostra a Figura 8.

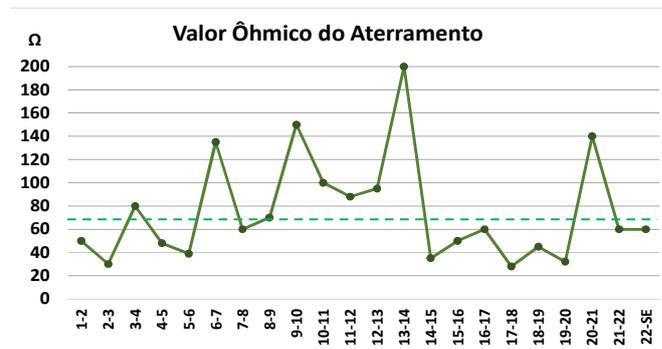


Fig. 7 Valor Ôhmico do aterramento dos vãos. A linha tracejada apresenta a média dos valores.

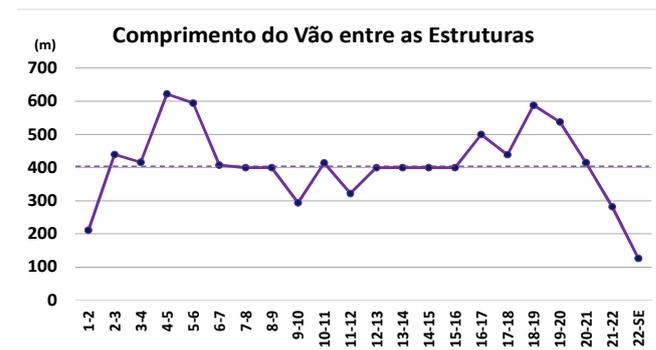


Fig. 8 Comprimento do vão entre as estruturas. A linha tracejada apresenta a média dos valores.

Além da estimativa de desempenho de linha por descargas diretas e indiretas, o software IEEE FLASH apresenta o valor de corrente crítica de descarga atmosférica em que ocorre desligamento da linha, ou seja, o valor de corrente que produz uma sobretensão maior que o NBI (650 kV). Estes valores são apresentados na Figura 9.

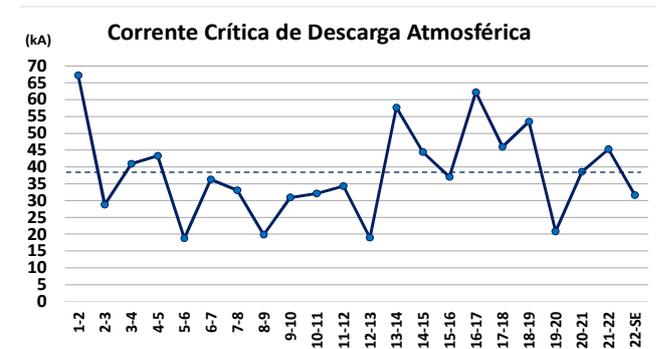


Fig. 9 Valores de corrente crítica do IEEE FLASH. A linha tracejada apresenta a média dos valores.

A verificação dos valores de corrente crítica obtidos com o FLASH foi realizada a partir da modelagem da linha no ATP, com a metodologia descrita em 3.2. Aqui, a título de ilustração, optou-se por apresentar a análise de ocorrência de uma descarga atmosférica nos três vãos com os maiores valores percentuais de desligamentos: 5-6, 12-13 e 19-20. As sobretensões obtidas pela aplicação de uma descarga atmosférica com as correntes críticas obtidas no cabo para-raios são apresentadas na Figura 10.

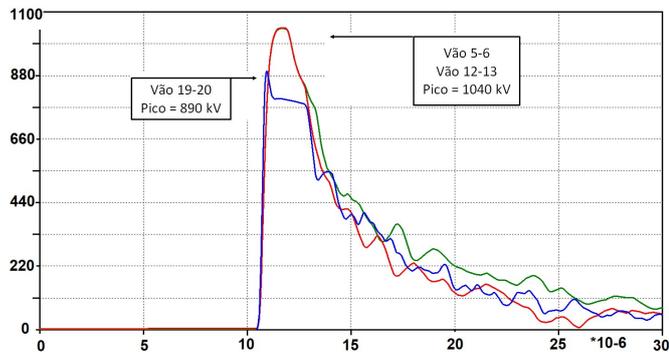


Fig. 10 Sobretensão nos vãos a partir da aplicação das correntes críticas obtidas no IEEE FLASH.

É possível observar que, para os três casos, ocorrem picos de tensão entre 890 kV e 1040 kV, superiores ao nível de isolamento da linha (650 kV), ocorrendo desligamentos. Desta forma, comprova-se o resultado informado no IEEE FLASH dos valores de corrente crítica para a linha em estudo considerada a partir dos seus vãos individuais.

5. CONCLUSÕES

Com o estudo realizado considerando cada vão de linha, e utilizando dados reais de projeto, verificou-se o peso (grau de importância) dos desligamentos, tornando possível visualizar áreas com desempenho abaixo do esperado e, também, os motivos que levaram aos desligamentos. Neste caso específico, estes parâmetros foram os valores de resistência de aterramento e o comprimento do vão entre as estruturas.

Foi realizada uma verificação dos valores de corrente crítica obtidos com o objetivo de comprovar as modelagens e verificar pontos de melhorias para futuros estudos, também usando outras metodologias discutidas atualmente, como a de Monte Carlo (Assis, 2017) ou análise das tensões induzidas por descargas que incidem nas proximidades das linhas (Boaventura, 2019).

Foram verificados os parâmetros mais importantes para análise referentes a desempenho de linhas em relação a descargas atmosféricas: as resistências de aterramento, as alturas das estruturas, os vãos entre as estruturas, os cabos, dentre outros.

Concluiu-se que, com a modelagem no ATP, poderão ser realizados novos estudos, como análises considerando a inclusão de para-raios, alterações de resistências de aterramento e outras formas de melhoria do desempenho de linhas, com objetivo de produção de uma ferramenta de diagnóstico de linhas de distribuição para as indústrias.

- ABNT. (2018). ABNT NBR 6939:2018: Coordenação do isolamento - Procedimento. *ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas*.
- Assis, S.C., Boaventura, W.C., Paulino, J.O.S. (2017). Lightning performance of transmission lines: Comparison IEEE Flash and Monte Carlo Method. *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 15, n. 2, p. 269-274.
- Assis, S.C., Boaventura, W.C., Paulino, J.O.S., Motta, I.L.M., Sousa, W.E., Piantini, A., Dellalibera, A.A., Ribeiro, E.J.O., Franco, J.L., Nogueira, M.M. (2019). Discussão de Técnicas de Melhoria do Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas. Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS. *XXV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 10-13 de novembro de 2019, Belo Horizonte-MG.
- Boaventura, W.C., Paulino, J.O.S., Barbosa, C.F., Lopes, I.J.S., Guimarães, M.F., Cardoso, E.N. (2019). Avaliação do desempenho frente a descargas atmosféricas de linhas aéreas de 69 e 138 kV construídas em solos de alta resistividade e considerando as tensões induzidas. Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS. *XXV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 10-13 de novembro de 2019, Belo Horizonte-MG.
- CEMIG. (1994). Resistividade média dos solos de Minas Gerais. 02.118-COPDEN-0346, no 21233176. [S.I.].
- CEMIG. (2001). Características da Linha LT Rio Acima 2 – Mina do Pico. Leme Engenharia. Documento 30805-LEME-009, Revisão E.
- CNI. (2016). Confederação Nacional da Indústria. *Dois terços da indústria têm prejuízos com falhas de fornecimento de energia elétrica*. Sondagem Especial: Indústria e energia. Indicadores CNI, Ano 17, Número 1, Março de 2016. ISSN 2317-7330.
- EPRI. (1982). *Transmission Line Reference Book. 345 kV and above*. 2nd Edition. Electric Power Research Institute, Palo Alto.
- Hoidalen, H. K. (2015). Alternative Transients Program 6.0. EMTP-ATP-ATPDraw.
- IEEE. (2011). IEEE Std 1410: Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. *IEEE Standards Board*.
- McDermott, T. E. (2010). A new version of the IEEE Flash Program. *IEEE PES Transmission and Distribution (T&D) Conference*, New Orleans.
- ONS. (2015). Mapa de Densidade de Descargas Atmosféricas (Período de Apuração: 1998-2013). *Operador Nacional do Sistema Elétrico*.
- Paulino, J.O.S., Barbosa, C.F., Lopes, I.J.S., Boaventura, W.C. (2010). An Approximate Formula for the Peak Value of Lightning-Induced Voltages in Overhead Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, p. Issue 2, 843-851.
- Visacro, S. F. (2005). *Descargas atmosféricas. Uma abordagem de engenharia*. Artliber Editora, São Paulo.