

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA PARA DEFINIÇÃO DE ALTERNATIVAS CONVENCIONAIS E NÃO-CONVENCIONAIS DE MELHORIA DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

CARLOS HENRIQUE MELO MOREIRA(1); FERNANDO HENRIQUE SILVEIRA(1); SILVERIO VISACRO FILHO(1); LÍGIA LAMOUNIER BITTENCOURT(1)
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS(1)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise técnico-econômica referente à extensão de cabos contrapeso e uso de cabos *underbuilt* para melhoria de desempenho de LTs típicas de 230 kV e 500 kV frente a descargas. O uso da técnica de cabos *underbuilt* mostrou ser capaz de melhorias de desempenho da ordem de até 88% e 94% para condições de elevado valor de impedância impulsiva de pé-de-torre. Além disso, se apresenta como uma solução economicamente viável para solos com elevados valores de resistividade.

PALAVRAS-CHAVE

Backflashover, Melhoria de desempenho de linhas frente às descargas atmosféricas, Cabos *underbuilt*, Técnica convencionais e técnicas não convencionais.

1.0 INTRODUÇÃO

A incidência direta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão é responsável por grande parte dos desligamentos não programados dos sistemas elétricos. Esses desligamentos promovem a interrupção no fornecimento de energia, resultando em prejuízos para as companhias de energia elétrica e seus consumidores. Nesse contexto, o cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas é de extrema relevância para a engenharia de proteção e projeto ao dar elementos para que intervenções sejam feitas na linha, buscando a adequação de sua taxa de desligamentos a índices de desempenho estipulados pelas agências reguladoras (1-2).

A incidência direta de uma descarga atmosférica nos condutores energizados, nos cabos guarda ou na estrutura da torre de uma linha de transmissão pode resultar na ocorrência dos fenômenos de *flashover* ou *backflashover*, sendo o último mais relevante para linhas de nível de tensão até 500 kV. Sua ocorrência é influenciada pelo aterramento elétrico, sendo este o elemento determinante para reduzir os valores de sobretensão resultante na cadeia de isoladores e, consequentemente, estabelecer o desempenho da linha (1-2).

A técnica mais tradicional utilizada para a melhoria de desempenho de linhas consiste em diminuir o valor da resistência de aterramento de pé-de-torre e, consequentemente, sua impedância impulsiva associada, utilizando cabos contrapeso longos enterrados no solo, resultando na diminuição da sobretensão que surge nas cadeias de isoladores da linha (2-6). Outra técnica convencional consiste na instalação de dispositivos para-raios na linha de transmissão. Esses dispositivos têm a função de limitar a sobretensão resultante na cadeia de isoladores da linha devido à incidência direta de descarga no sistema, evitando que tal sobretensão ultrapasse o valor suportado pela cadeia (7).

Face as dificuldades que surgem em alguns casos para que seja alcançado um valor reduzido de impedância de aterramento de pé-de-torre e aos custos elevados relativos à instalação e manutenção de dispositivos para-raios, técnicas não convencionais têm sido desenvolvidas para melhoria do desempenho de linhas de transmissão. Uma delas consiste na utilização de fios metálicos estaiados conectados entre a torre e o sistema de aterramento de torres autoportantes, atuando como falsos estais (8-10). Esta técnica pode ser utilizada em torres instaladas sobre solos de alta resistividade, onde o fio metálico estaiado é conectado a um novo sistema de aterramento localizado em uma região adjacente com solo de baixo valor de resistividade.

Outra técnica não convencional consiste na instalação de cabos abaixo da fase inferior da torre, chamados cabos *underbuilt* (11-13) objetivando drenar parte da corrente do surto e aumentar o efeito de acoplamento eletromagnético entre os condutores, promovendo a diminuição do valor da sobretensão nas cadeias de isoladores.

Além de respeitar aspectos técnicos, a definição da alternativa de melhoria de desempenho a ser implementada em uma linha precisa atender critérios econômicos que tornem viável sua adoção.

É neste contexto que se insere este trabalho que tem como objetivo realizar uma análise das alternativas de melhoria de desempenho a serem aplicadas em linhas de transmissão segundo uma abordagem técnico-econômica, proporcionando os custos associados para implantação de cada alternativa.

A melhoria de desempenho aplicada se baseia em resultados obtidos pela aplicação de modelagem computacional avançada para o cálculo de sobretensões em linhas de transmissão típicas de 230 kV e 500 kV e a estimativa de seu desempenho com base em modelo de *flashover* aferido experimentalmente. Além disso, considera o levantamento de custos relativos à implementação de cabos contrapeso e cabos *underbuilt* de modo a se avaliar a sua viabilidade econômica, considerando aspectos relativos aos materiais empregados por cada técnica, custo de instalação e manutenção.

Neste trabalho serão apresentados os aspectos técnicos relativos a ambas as soluções, convencionais e não convencionais, para melhoria de desempenho, bem como a comparação entre os resultados providos por cada solução. Além disso, será definida a técnica mais adequada de melhoria de desempenho para linhas de diferentes níveis de tensão analisadas, denotando o estabelecimento de critérios consistentes que delimitem a aplicação de técnicas convencionais e não-convencionais para diferentes casos estudo, buscando a adequação da taxa de desligamentos de linhas segundo os critérios estabelecidos pelas agências reguladoras.

2.0 TÉCNICAS CONVENCIONAIS E NÃO-CONVENCIONAIS DE MELHORIA DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 Redução do Valor da Resistência de Aterramento

O valor da resistência de aterramento em baixa frequência (R_{LF}) e de sua impedância impulsiva (Z_P) associada são parâmetros determinantes no estabelecimento das sobretensões nas cadeias de isoladores das linhas de transmissão decorrentes da incidência direta de descargas no sistema (2-6). Esta sobretensão é resultado da tensão associada à corrente de descarga que se propaga na torre e da tensão refletida no sistema de aterramento. Na maioria das situações, o valor de impedância de aterramento é menor que o valor de impedância de surto da torre, resultando em um coeficiente de reflexão negativo, contribuindo para a redução da tensão resultante na cadeia de isoladores. Desta forma, quanto menor for o valor de impedância do aterramento, menor será o valor da sobretensão sobre as cadeias de isoladores.

Caso a sobretensão resultante nas cadeias de isoladores ultrapasse a suportabilidade elétrica da linha, pode ocorrer o mecanismo de *backflashover* que consiste no estabelecimento de arco elétrico na cadeia de isoladores, entre a parte aterrada do sistema (torre) e a parte energizada (fase) (2-6). A Figura 1 (a) ilustra uma configuração clássica de cabos contrapeso utilizadas em linhas de transmissão.

A técnica de redução do valor da resistência de aterramento para se garantir um desempenho satisfatório da LT é a técnica mais tradicionalmente utilizada, mas nem sempre é de simples implementação a depender das condições do terreno no qual a linha está instalada. Desta forma, várias outras técnicas foram elaboradas, como por exemplo o uso de cabos *underbuilt*. Essa técnica não-convencional é detalhada a seguir.

2.2 Uso de Cabos *Underbuilt*

Os cabos *underbuilt* (UW) são cabos metálicos conectados na estrutura da torre, geralmente abaixo dos condutores fase, objetivando prover um caminho alternativo para a corrente de descarga que se propaga na torre e aumentar o efeito de acoplamento eletromagnético com os condutores fase. Tais efeitos contribuem para diminuir a sobretensão resultante na cadeia de isoladores e, conseqüentemente, resultam na melhoria de desempenho da linha de transmissão frente às descargas atmosféricas (11-14).

Os cabos UW podem ser instalados por toda a extensão da linha de transmissão ou em pequenos trechos com desempenho crítico, conforme ilustrado na Figura 1. Eles são utilizados preferencialmente em torres instaladas em solos com elevado valor de resistividade.

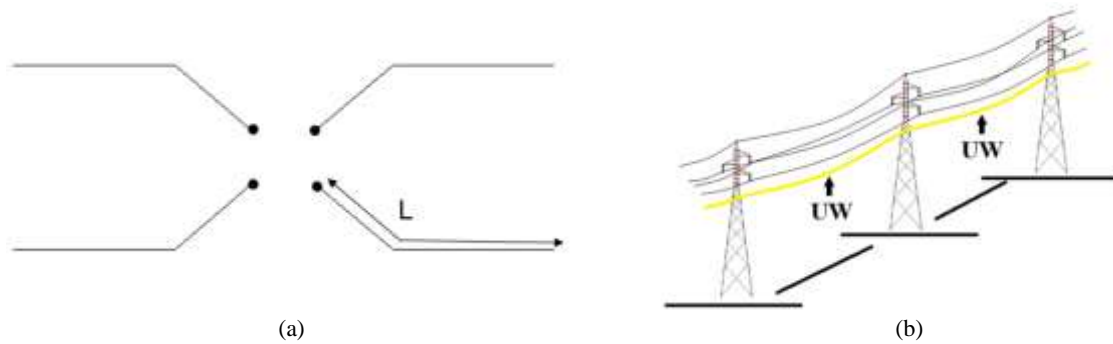


Figura 1 – Representação simplificada: (a) Cabos contrapeso; (b) Cabo *underbuilt* em uma linha de transmissão.

3.0 METODOLOGIA

As avaliações desse trabalho são baseadas em simulações computacionais utilizando o modelo computacional HEM - *Hybrid Electromagnetic Model* (15) para o cálculo das sobretensões resultantes em linhas de transmissão típicas de 230 kV e de 500 kV utilizadas no Brasil, decorrentes da incidência direta de descargas no topo de suas torres, e na utilização do método DE para se estimar a ocorrência de *backflashover* nos isoladores das LTs (2).

A Figura 2 (a) e (b) apresenta uma visão simplificada da geometria das torres utilizadas nas simulações.

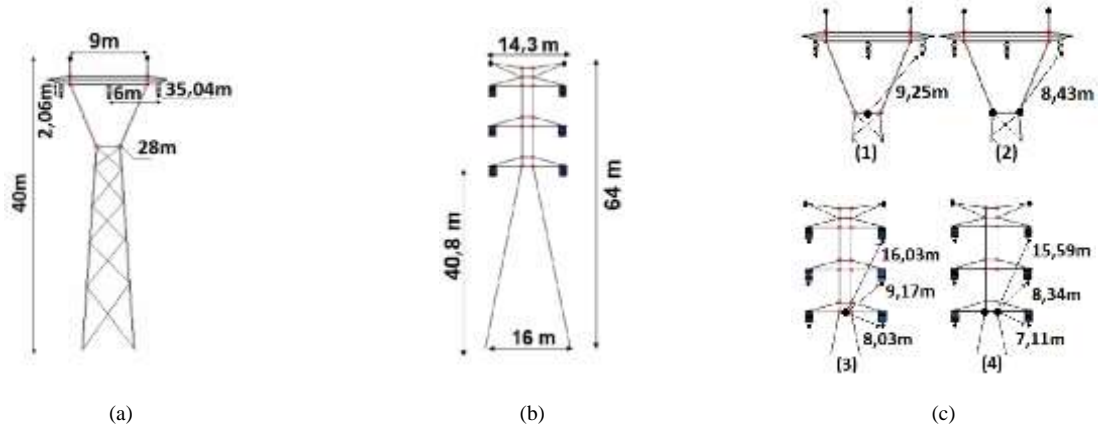


Figura 2 – Representação simplificada da configuração das torres das linhas de transmissão de (a) 230 kV e (b) 500 kV consideradas nas análises desse trabalho. Proposta de posicionamento dos cabos *underbuilt* nas torres das linhas de 230 kV e 500 kV (c).

A linha de 230 kV apresenta CFO (tensão disruptiva de 50%) de 1200 kV e é constituída por torres autoportantes, circuito simples com altura de 40 m. A linha de 500 kV possui CFO de 1800 kV e torres autoportantes, circuito duplo, com altura de 64 m. Ambas as linhas possuem vão médio de 500 m.

A forma de onda da corrente de retorno foi representada pela corrente do tipo duplo pico (16) com parâmetros medianos associados às primeiras descargas negativas descendentes medidas na estação do Morro do Cachimbo (MCS), Brasil, sendo o valor de pico de corrente de 43,3 kA e o tempo de frente Td30 de 4,2 μ s (17). Essa representação de corrente reproduz características importantes das formas de onda de corrente reais medidas: a frente de onda côncava e os picos secundários.

A aplicação do método DE considerando as sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores da LT possibilita o cálculo da corrente crítica, que é definida como o valor mínimo de corrente capaz de levar a ruptura da cadeia de isoladores. A probabilidade de ocorrência de *backflashover* consiste no percentual das correntes de descarga com valor superior ao da corrente crítica, sendo esse cálculo baseado na distribuição cumulativa de picos de correntes das primeiras descargas medidas no Morro do Cachimbo, recentemente publicada em (17).

As simulações consideraram a variação da impedância impulsiva de aterramento na faixa de 10 a 80 Ω , conforme recomendação apresentada em (18), e a instalação de um e dois cabos *underbuilt* nas torres das LTs de modo a prover elementos que caracterizassem o desempenho em função de cada técnica aplicada.

4.0 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Análise de Desempenho da Torre: Aplicação da Técnica de Cabos *Underbuilt*

A Figura 3 apresenta ondas de sobretensão resultantes nas cadeias de isoladores das LTs de 230 kV e 500 kV para impedâncias impulsivas de aterramento Z_P de 20 e 80 Ω e o efeito de se considerar a instalação de cabos *underbuilt* a 28 m (Linha de 230 kV) e 40,8 m (Linha de 500 kV) de altura, conforme esquema de instalação indicado na Figura 2 (c), mostrando os efeitos benéficos na diminuição dessas sobretensões. Simulações adicionais para faixa de Z_P entre 10 e 80 Ω indicaram que a instalação de 1 cabo *underbuilt* resultou na redução de 18 % a 27 % e 16 % a 32 % nos valores de pico de sobretensão nas cadeias de isoladores das LTs de 230 kV e 500 kV, respectivamente. Já o uso de 2 cabos *underbuilt*, proporcionou redução de 27 % a 38 % e 22% a 42% nas sobretensões dessas linhas.

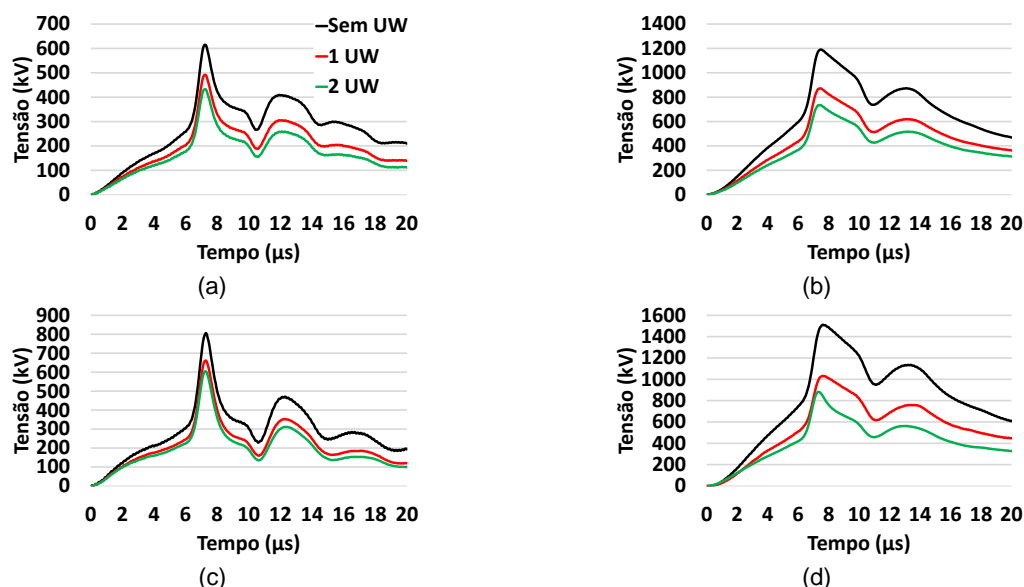


Figura 3 – Sobretensão na cadeia de isoladores das LTs de 230 kV ((a) e (b)) e de 500 kV ((c) e (d)) com cabos *underbuilt* instalados na altura de 28 m e 40,8 m, respectivamente. Impedância impulsiva de pé de torre Z_P : 20 Ω (a) e (c); 80 Ω : (b) e (d).

A Tabela 1 apresenta os valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de *backflashover* (BFOR(%)) para cada condição simulada com base na aplicação do método DE.

Tabela 1 – Valores de corrente crítica e de probabilidade de ocorrência de *backflashover* para as linhas de 230 e 500 kV.

Z_P (Ω)	230 kV				500 kV			
	Situação	I_c (kA)*	BFOR (%)	Variação (%)**	Situação	I_c (kA)*	BFOR (%)	Variação (%)**
10	Sem UW	172,6	0,16	-	Sem UW	197,8	0,06	-
	1 UW	215,7	0,03	-81%	1 UW	237,4	0,015	-76%
	2 UW	245,0	0,01	-93%	2 UW	258,3	0,007	-88%
20	Sem UW	116,6	1,75	-	Sem UW	139,1	0,65	-
	1 UW	152,4	0,37	-79%	1 UW	190,9	0,08	-88%
	2 UW	176,8	0,14	-92%	2 UW	211,9	0,04	-94%
40	Sem UW	75,4	11,87	-	Sem UW	88,8	6,33	-
	1 UW	102,1	3,40	-71%	1 UW	127,6	1,07	-83%
	2 UW	120,8	1,45	-88%	2 UW	152,0	0,38	-94%
80	Sem UW	49,5	38,73	-	Sem UW	57,5	27,26	-
	1 UW	69,0	16,10	-58%	1 UW	85,4	7,44	-73%
	2 UW	82,3	8,59	-78%	2 UW	102,5	3,34	-88%

*Valor determinado considerando o efeito da tensão de serviço da linha.

**Variação percentual relacionada a BFOR(%).

Os resultados indicam aumento dos valores de corrente crítica I_c e, consequentemente, na redução do valor de probabilidade de ocorrência de *backflashover* (BFOR(%)) considerando a aplicação da técnica de cabos *underbuilt*.

O aumento do valor da corrente crítica, considerando um ou dois cabos UW instalados nas linhas de transmissão, é maior para os casos com elevados valores de impedância de aterramento Z_P . A análise em termos do percentual de ocorrência de *backflashover* revela reduções de 81% a 58% e de 93% a 78% para o uso de 1 e 2 cabos *underbuilt*, respectivamente, para a LT de 230 kV. Já para a linha de 500 kV, reduções entre de 88% e 73% e entre 94% e 88% são observadas.

Além disso, observa-se que o efeito de se instalar um cabo *underbuilt* corresponde, aproximadamente, a se reduzir o valor da impedância impulsiva de aterramento à 55% de seu valor original, enquanto o uso de dois cabos *underbuilt* nas LTs corresponde, aproximadamente, a diminuir o valor da impedância de aterramento à 45%. Este comportamento tem impacto significativo no desempenho de LTs de 230 kV e 500 kV.

4.2 Compreendendo a Melhoria de Desempenho das LTs pelo Uso da Técnica de Cabos Underbuilt

A melhoria de desempenho da linha pela instalação de cabos *underbuilt* está associada aos mecanismos de acoplamento eletromagnético e de divergência de corrente pelo sistema que contribuem para a diminuição da sobretensão resultante na cadeia de isoladores. A fim de se mensurar a influência de cada um desses mecanismos, simulações complementares foram realizadas considerando a instalação de um cabo *underbuilt* ortogonal à linha de transmissão, de modo a levar ao desacoplamento eletromagnético entre o cabo *underbuilt* e os condutores fase, sendo mantido o efeito de divergência de corrente. Procedeu-se ao cálculo das correntes críticas associadas às sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores sob esta condição. Tais correntes críticas foram comparadas com as correntes críticas indicadas na Tabela 1 para o caso de um cabo *underbuilt* instalado paralelo aos condutores fase e cabos para-raios. A Figura 4 apresenta a contribuição percentual dos efeitos de acoplamento eletromagnético e divergência da corrente no estabelecimento do valor final de corrente crítica para a LT de 230 kV.

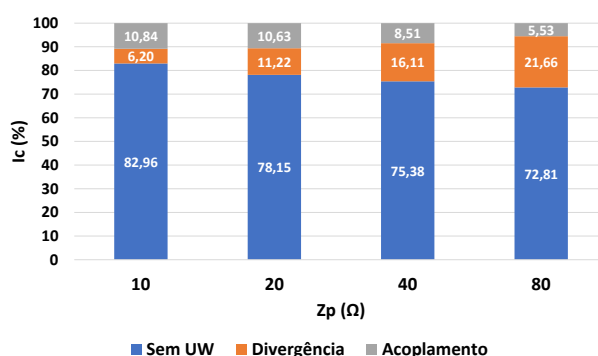


Figura 4 – Contribuição percentual dos efeitos de acoplamento eletromagnético e divergência da corrente no valor da corrente crítica relativa ao uso de 1 cabo UW na LT de 230 kV.

A Figura 4 indica o comportamento distinto desses efeitos com o valor da impedância impulsiva de pé-de-torre da linha: observa-se a diminuição da contribuição do efeito de acoplamento eletromagnético e o aumento da contribuição do efeito de divergência da corrente com o aumento do valor de Z_p . Para Z_p igual a 10 Ω, tais contribuições são de aproximadamente 11% e 6%. Já para Z_p igual a 80 Ω, as contribuições relativas são de aproximadamente 6% e 22%.

5.0 CONDIÇÕES NECESSÁRIAS PARA SE OBTER DESEMPENHO IDEAL DA LINHA

Segundo o ONS, no Brasil as linhas de 230 kV e 500 kV devem respeitar a taxa limite de 2 e 1 desligamentos por 100 km de linha por ano, respectivamente, para que as empresas transmissoras não sofram multas e penalidades.

Tradicionalmente, a taxa de desligamentos de linhas de transmissão é calculada pela Equação 1, na qual FV corresponde ao fator de vão utilizado para se considerar o efeito das descargas atmosféricas que incidem ao longo do vão (19), NL é a taxa de incidência de descargas por 100 km de linha por ano e $\%I > I_c$ é o percentual das correntes de descarga com valor superior ao da corrente crítica. Segundo os desenvolvimentos apresentados em (19), o valor do fator de vão depende de inúmeros parâmetros, dentre eles, o nível de tensão da linha. Neste trabalho serão adotados os fatores 0,6 e 0,4 para as LTs de 230 kV e 500 kV, respectivamente, segundo recomendação de (19).

$$(1) \text{ Taxa de desligamentos} = FV * NL * (\%I > I_c)$$

Considerando os parâmetros geométricos das linhas avaliadas neste trabalho, a fórmula de atratividade recomendada no IEEE Std 1243 (3) e admitindo o valor de N_g igual a 5 descargas/km²/ano, estima-se taxas de incidência de 132 descargas/100 km/ano para a LT de 230 kV e de 177 descargas/100 km/ano para a LT de 500 kV.

Com base nos valores de percentual de corrente crítica apresentados na Tabela 1, calculou-se a taxa de desligamentos das linhas em função do valor de Z_p considerando a aplicação da técnica do cabo *underbuilt*, conforme ilustrado na Figura 5. Tal taxa considera que toda a extensão da LT seria caracterizada pelo valor específico de Z_p indicado nos gráficos.

A interseção entre o valor limite de desligamentos de cada LT e as curvas de desempenho, revelam os valores máximos de impedância impulsiva de pé-de-torre necessários para se obter o desempenho almejado, considerando ou não a instalação de cabos *underbuilt*. Esses valores estão indicados na Tabela 2.

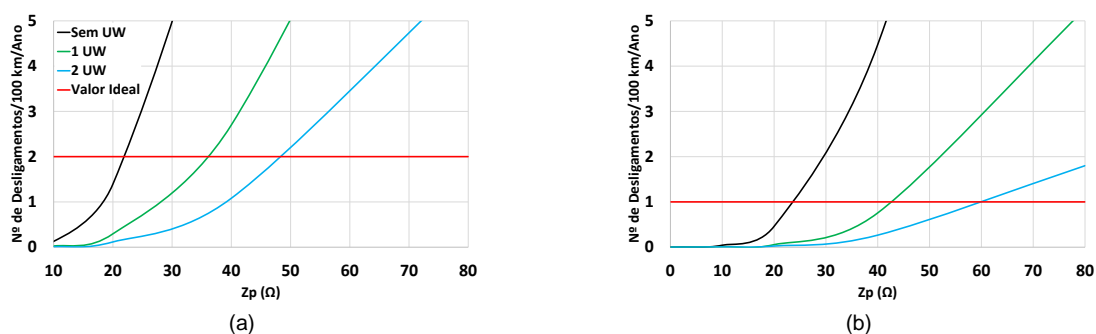


Figura 5 – Taxa de desligamentos em função da impedância de pé-de-torre para LTs de 230 kV (a) e de 500 kV (b).

Tabela 2 – Valor de impedância de aterramento Z_P para se obter o valor de desligamentos almejado para as situações sem e com cabos UW instalados nas linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV.

Caso	230 kV		500 kV	
	Desligamentos/100km/Ano	Z_P (Ω)	Desligamentos/100km/Ano	Z_P (Ω)
Sem UW	2	21,9	1	24,8
1 UW	2	36,7	1	42,8
2 UW	2	49,4	1	60,2

A instalação dos cabos *underbuilt* permite a consideração de valores de Z_P maiores para que seja obtido o desempenho almejado das LTs. Para a linha de 230 kV, os valores de Z_P limites são de 21,9 Ω , 36,7 Ω e 49,4 Ω , considerando a ausência de cabos *underbuilt*, o uso de 1 cabo *underbuilt* e o uso de 2 cabos *underbuilt*, respectivamente. Já para a LT de 500 kV, tais valores são 24,8 Ω , 42,8 Ω , e 60,2 Ω , respectivamente.

6.0 ANÁLISE ECONOMICA DAS TÉCNICAS DE MELHORIA DE DESEMPENHO

6.1 Introdução

Considerando como base o Banco de Preços de Referência da ANEEL (20) de março do ano de 2021 e os dados de desempenho calculados na seção 4, nesta seção desenvolve-se a análise técnico-econômica das alternativas de melhoria de desempenho apresentadas neste trabalho. O Banco de Preços de Referência da ANEEL apresenta informações sobre custos de materiais e de execução dos serviços como a instalação de cabos contrapeso e cabos para-raios, sendo utilizado como referência para a estimativa de custos referentes à melhoria de aterramento e instalação de cabos *underbuilt* necessários para se alcançar desempenho ótimo das LTs em estudo neste trabalho. A Tabela 3 apresenta os custos relativos a materiais e instalação referentes ao aterramento elétrico e cabo *underbuilt*. É importante denotar que, segundo a ANEEL, deve-se considerar o custo de instalação como sendo de 53,72% do custo de materiais.

Tabela 3 – Valor de custo dos materiais e valor de custo de instalação retirados do Banco de Preços de Referência da ANEEL para as linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV. (Data do Banco de Dados: 03/2021)

Alternativa de melhoria de desempenho	Item	230 kV		500 kV	
		Custo (R\$/km) - Material	Custo - Instalação	Custo (R\$/km) - Material	Custo Instalação
Cabo <i>Underbuilt</i>	Cabo Bantam CAA 5,04 mm	R\$ 1.717,20	R\$ 922,48	R\$ 1.717,20	R\$ 922,48
	Equipamento de Suspensão*	R\$ 290,12	R\$ 155,85	R\$ 278,77	R\$ 149,75
	Equipamento de Ancoragem*	R\$ 16,91	R\$ 9,08	R\$ 13,44	R\$ 7,22
	Equipamento de Amortecedores*	R\$ 186,25	R\$ 100,05	R\$ 186,25	R\$ 100,05
Aterramento Elétrico	Cabo contrapeso	R\$ 4.305,37	R\$ 2.312,85	R\$ 4.305,37	R\$ 2.312,85

*Corresponde à estrutura de Aço Autoportante Convencional

6.2 Estudo de Caso

O estudo de caso proposto consiste na análise técnico-econômica para se obter 2 e 1 desligamentos/100 km/ano exigido pelo ONS para as LTs de 230 kV e 500 kV, respectivamente. O estudo consiste na análise de desempenho para uma única torre das LTs de 230 kV e 500 kV com comprimento de cabo contrapeso (Figura 1(a)) de 50 m e vão de 500 m, sendo considerado três valores diferentes para a resistividade do solo (10.000 Ω .m, 12.000 Ω .m e 16.000 Ω .m). Os valores de Z_P correspondentes para cada situação são apresentados na Tabela 4, juntamente com a taxa de desligamento associada a cada condição de solo, sendo considerado o valor de N_g igual a 5 descargas/km²/ano e FV de 0,6 e 0,4 para as LTs de 230 kV e 500 kV, respectivamente. Vale destacar que as simulações computacionais consideram a variação dos parâmetros do solo com a frequência, conforme recomendado pelo CIGRE (21-22).

Os valores indicados na Tabela 4 são muito superiores aos limites de 2 e 1 desligamento/100 km/ano exigido pelo ONS para as LTs de 230 kV e 500 kV, respectivamente. Considerando os valores de Z_P limites indicados na Tabela 2 que garantem o desempenho ótimo das LTs, determinou-se o comprimento L necessário de cabos contrapeso para que tal valor de Z_P fosse obtido para cada resistividade do solo avaliada. Os custos referentes à extensão dos cabos contrapeso e instalação dos cabos *underbuilt* para cada solo são apresentados nas Tabelas 5 e 6 para as LTs de 230 kV e 500 kV, respectivamente.

Tabela 4 – Valor de impedância de aterramento das torres em análise e sua taxa de desligamento correspondente.

ρ ($\Omega \cdot m$)	Z_P (Ω) contrapeso 50 m	Taxa de desligamentos (100 km/ano)	
		LT 230 kV	LT 500 kV
10.000	61,6	20,6	11,7
12.000	69,1	24,5	15,2
16.000	81,9	30,8	21,1

Tabela 5 – Custos referentes a cada alternativa de melhoria de desempenho aplicada para a LT de 230 kV.

ρ ($\Omega \cdot m$)	Solução	Aterramento			UW	Custo Solução
		Delta L (m)	Z_P Almejado (Ω)	Custo Total	Custo Total	
10.000	Aterramento	115,68	21,9	R\$ 3.062,27	R\$ -	R\$ 3.062,27
	Aterramento + 1 UW	42,06	36,7	R\$ 1.113,58	R\$ 3.400,00	R\$ 4.513,58
	Aterramento + 2 UW	15,65	49,4	R\$ 414,25	R\$ 6.800,00	R\$ 7.214,25
12.000	Aterramento	141,61	21,9	R\$ 3.748,75	R\$ -	R\$ 3.748,75
	Aterramento + 1 UW	55,65	36,7	R\$ 1.473,31	R\$ 3.400,00	R\$ 4.873,31
	Aterramento + 2 UW	25,00	49,4	R\$ 661,89	R\$ 6.800,00	R\$ 7.461,89
16.000	Aterramento	187,98	21,9	R\$ 4.976,39	R\$ -	R\$ 4.976,39
	Aterramento + 1 UW	80,01	36,7	R\$ 2.118,10	R\$ 3.400,00	R\$ 5.518,10
	Aterramento + 2 UW	41,80	49,4	R\$ 1.106,59	R\$ 6.800,00	R\$ 7.906,59

Tabela 6 – Custos referentes a cada alternativa de melhoria de desempenho aplicada para a LT de 500 kV.

ρ ($\Omega \cdot m$)	Solução	Aterramento			UW	Custo Solução
		Delta L (m)	Z_P Almejado (Ω)	Custo Total	Custo Total	
10.000	Aterramento	93,81	24,8	R\$ 2.483,50	R\$ -	R\$ 2.483,50
	Aterramento + 1 UW	27,29	42,8	R\$ 722,34	R\$ 3.380,00	R\$ 4.102,34
	2 UW	2,42	60,2	R\$ 64,08	R\$ 6.760,00	R\$ 6.824,08
12.000	Aterramento	116,01	24,8	R\$ 3.071,19	R\$ -	R\$ 3.071,19
	Aterramento + 1 UW	38,49	42,8	R\$ 1.018,92	R\$ 3.380,00	R\$ 4.398,92
	2 UW	9,71	60,2	R\$ 257,13	R\$ 6.760,00	R\$ 7.017,13
16.000	Aterramento	155,73	24,8	R\$ 4.122,63	R\$ -	R\$ 4.122,63
	Aterramento + 1 UW	58,59	42,8	R\$ 1.550,99	R\$ 3.380,00	R\$ 4.930,99
	Aterramento + 2 UW	22,83	60,2	R\$ 604,30	R\$ 6.760,00	R\$ 7.364,30

Todas as soluções apresentadas possuem modificação no aterramento, pois a simples instalação de um ou dois cabos UW, mantendo-se a configuração original de aterramento, não resultou no desempenho almejado. No entanto, o uso de cabos UW promoveu uma redução significativa do comprimento adicional de cabos contrapeso necessários para se obter o desempenho desejado para as linhas. Vale ressaltar que os cabos UW foram instalados nos vãos adjacentes da torre em questão.

As duas tabelas mostram que o custo total da técnica de cabos UW é fixo e não depende do valor de resistividade do solo. Desta forma, o aumento da resistividade do solo resultou no aumento do comprimento do cabo contrapeso complementar e, consequentemente, no seu custo total associado. As tabelas mostram que as soluções que utilizam um ou dois cabos UW apresentaram custos maiores em relação a técnica de Aterramento, resultando em um intervalo de elevação de custos de 11% a 47% para um UW e de 59% a 136% para dois UW considerando a LT de 230 kV e de 20% a 65% e de 79% a 175% para um e dois UW, respectivamente, considerando a LT de 500 kV.

O uso da técnica de cabos UW apresentou maiores custos para todas as situações. Entretanto, para as duas LTs em análise, o aumento da resistividade do solo levou a custos da mesma ordem para a aplicação das técnicas de instalação de um UW (Aterramento + 1 UW) e modificação apenas do aterramento. Por exemplo, para o caso da LT de 230 kV e resistividade do solo igual a 16.000 $\Omega \cdot m$, a diferença entre os custos dessas duas técnicas foi de apenas 11%. Desta forma, observa-se que a curva de custos da técnica de Aterramento apresenta um maior crescimento que a curva de custos da técnica de um UW (Aterramento + 1 UW), mostrando que para solos com elevados valores de resistividade o uso de cabos UW se apresenta como uma solução técnica e economicamente viável. Além disso, por permitir uma menor intervenção nos aterramentos elétricos, a aplicação da técnica de cabos *underbuilt* pode ser preferível para aqueles casos em que a extensão dos cabos contrapeso é dificultada por questões relativas ao terreno no qual o sistema de aterramentos está instalado.

7.0 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação técnico-econômica de alternativas convencionais e não-convencionais para a melhoria de desempenho de linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV frente a descargas atmosféricas. Mais especificamente, foram avaliadas as alternativas de extensão do comprimento dos cabos contrapeso (de modo a reduzir o valor da impedância impulsiva de pé-de-torre) e instalação de cabos *underbuilt* abaixo da fase inferior de tais linhas. Simulações computacionais utilizando o modelo HEM para o cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores das LTs e o método DE para a avaliação da ocorrência de *backflashover* deram suporte às análises aqui apresentadas. A avaliação de desempenho dessas linhas considerou os parâmetros estatísticos atualizados das correntes de descargas medidas na estação do Morro do Cachimbo, Brasil.

Os resultados mostram que para Z_p igual a 40 Ω e 80 Ω houve uma redução na probabilidade de ocorrência de *backflashover* de 71% e 58%, respectivamente, para um cabo UW e de 88% e 78%, respectivamente, para dois UW para a LT de 230 kV. Já para a LT de 500 kV a redução foi de 83% e 73% para um UW e de 94% e 88% para dois UW. O uso de dois cabos UW resultou em uma melhoria de desempenho, aproximadamente, igual a redução do valor da impedância de aterramento para aproximadamente metade de seu valor original.

O uso do Banco de Preços da ANEEL possibilitou verificar a viabilidade econômica das soluções analisadas. O uso da técnica de cabos UW apresentou custos mais elevados para todas as situações em análise. Entretanto, a curva de custos da técnica de Aterramento tem um crescimento mais elevado com o aumento da resistividade do solo em relação a curva da técnica de um UW (Aterramento + 1 UW), apresentando para a LT de 230 kV e resistividade do solo de 16.000 $\Omega.m$ uma diferença de custos de apenas 11%. Desta forma, para solos com elevados valores de resistividade, a técnica de uso de cabos UW se apresenta como uma solução tecnicamente e economicamente viável.

Vale denotar a necessidade de atualização constante dos valores dos custos empregados nesse trabalho de modo a manter a análise econômica ajustada com as condições de custo de material e instalação praticadas no Brasil.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) S. Visacro, "Direct strokes to transmission lines: Considerations on the mechanisms of overvoltage formation and their influence on the lightning performance of lines.," *Journal of Lightning Research*, vol. 1, pp. 60-68, 2007.
- (2) A. R. Hileman, *Insulation coordination for power systems*, CRC Press, 1999.
- (3) IEEE Std. 1243, *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*, 1997.
- (4) Working Group 01 (Lightning), Study Committee 33, "CIGRE guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," 1991.
- (5) EPRI, *Transmission line reference book, 345 kV and above*, 2 edition ed., Pittsfield, Mass: Electric Power Research Institute, 1982.
- (6) S. Visacro and F. H. Silveira, "Lightning performance of transmission lines: Methodology to design grounding electrodes to ensure an expected outage rate," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, pp. 237-245, Feb 2015.
- (7) S. Visacro, F. H. Silveira, B. Pereira, & R. M. Gomes, (2020). Constraints on the use of surge arresters for improving the backflashover rate of transmission lines. *Electric Power Systems Research*, 180, 106064. March 2020
- (8) S. Visacro, M. A. Felipe, R. Z. Oliveira, "Non-Conventional Methodology to Improve the Lightning Performance of Transmission Lines", *Proceedings of GROUND'2002 – International Conference on Grounding and Earthing & Workshop on Atmospheric Electricity*, pp. 267-270, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 2002.
- (9) S. Visacro, A. Soares Jr "Enhance of Lightning Performance of Transmission Lines Through Non-Conventional Grounding Practices", *Proceedings of GROUND'2004– International Conference on Grounding and Earthing & First International Conference on Lightning Physics and Effects*, pp. 257-261, Belo Horizonte, Brazil, Nov. 2004.
- (10) S. Visacro, A. J. Soares, R. Oliveira, M. Felipe, A. Silva & M. H. Vale (2004, September). Non-conventional measures for improvement of lightning performance of transmission lines. *In Proc. 27th Int. Conf. Light. Protection*, pp. 684-687.
- (11) S. Visacro, F. H. Silveira, & A. De Conti (2011). The use of underbuilt wires to improve the lightning performance of transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(1), 205-213.
- (12) S. Visacro, F. H. Silveira, M. H. M. Vale, & G. D. Pomar (2021). Improvement of the lightning performance of transmission lines by combining conventional and non-conventional measures. *Electric Power Systems Research*, 195, 107134.
- (13) C. Moreira, F. H. Silveira, F. Visacro (2021) application of underbuilt wires on self-sustained towers to improve the lightning performance of transmission lines with different voltage levels. *GROUND2020/21 & 9 th LPE International Conference on Grounding & Lightning Physics and Effects* Junho 02-04, 2021, pp. 197-202.
- (14) R. J. Harrington, & M. Mueen (1996). A simple approach to improve lightning performance of an uprated substation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3), 1633-1639.
- (15) S. Visacro and A. Soares, "HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, nº 2, pp. 1026-1208, April 2005.
- (16) A. De Conti and S. Visacro, Analytical representation of single and double-peaked lightning current waveforms, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 49, No. 2, pp. 448-451, May 2007.
- (17) F.H. Silveira, and S. Visacro, "Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 62, no. 4, pp. 1186 - 1191, Aug. 2020.
- (18) S. Visacro, F.H. Silveira, "Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 31, No.4, pp. 1524-1532, Dec. 2016.
- (19) R.M. Gomes, F.H. Silveira, S. Visacro, Influence of the Distribution of Lightning Strikes along the Span of Transmission Lines on their Backflashover Rate: The Span Factor. *IEEE Trans. Power Del.*, DOI 10.1109/TPWRD.2021.3086406, 2021.
- (20) ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica - Base de Preços de Referência ANEEL - Ref.03/2021.
- (21) Cigre Brochure 839, *Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines - New Aspects*, Junho, 2021
- (22) R. Alipio, S. Visacro, " Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171, Oct. 2014.

DADOS BIOGRÁFICOS



Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2017). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência 2012 - 2017 Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Brasil. 2020 Mestrado em andamento em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Brasil. Orientador: Fernando Henrique Silveira

(2) **FERNANDO HENRIQUE SILVEIRA**
 Fernando Silveira possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFMG. É professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG e pesquisador do LRC. Atua principalmente na análise de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, modelagem computacional dos efeitos de descargas, eletromagnetismo aplicado e proteção de SEP. É autor ou coautor de mais de 40 artigos em periódicos e mais de 100 artigos em congressos internacionais e nacionais. É membro sênior do IEEE, membro do CIGRE e secretário do grupo internacional B2/C4.76 Lightning & Grounding Considerations For Overhead Line Rebuilding and Refurbishing Projects.

(3) **SILVERIO VISACRO FILHO**
 Silvério Visacro (1956 – Belo Horizonte) tem graduação, mestrado e doutorado (1992) em Eng. Elétrica. Prof. Titular do Depto Eng. Elétrica da UFMG, é pesquisador e consultor nas áreas de Descargas Atmosféricas, Aterramentos Elétricos e Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas. Autor de 2 livros, 4 capítulos de livro e mais de 400 artigos nesses temas. É IEEE Fellow e teve muitas distinções (p.ex. “IEEE Kanda Award 2016”, “ICLP Karl Berger Award 2016” e inclusão nos 2% de cientistas de maior influência no mundo -pesquisa da Univ. Stanford de 2020). Convenor: CIGRE WGs C4.06 e C4.33.

(4) **LÍGIA LAMOUNIER BITTENCOURT**
 Lígia Lamounier Bittencourt Técnica em Eletrotécnica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2011-2013) Graduanda em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Minas Gerais (2016- cursando)