



Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT

Modelo e análise do impacto da supercompactação de linhas de transmissão urbanas 138 kV da Copel nas sobretensões transitórias com uso do software ATP.

MURYLLO AMALIO DE SOUZA(1); ULISSES CHEMIN NETTO(2);
COPEL DIS(1);UTFP(2);

RESUMO

Este trabalho apresenta a metodologia e os resultados dos estudos sobre transitórios de manobra e descarga atmosférica aplicados aos arranjos compacto e supercompacto de linhas de transmissão 138 kV da Companhia Paranaense de Energia (Copel). São apresentados os critérios para modelamento dos arranjos no software *Alternative Transients Program (ATP)* e os resultados do comportamento de ambos os arranjos frente a manobra de energização e descarga atmosférica, concluindo que a redução da distância entre fases apresentada pelas linhas supercompactas não altera significativamente os resultados de sobretensão.

PALAVRAS-CHAVE

ATP, compactação, Linhas de transmissão, sobretensão, transitório.

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescimento natural das cidades evidencia dois aspectos importantes e que se transformam em desafios para o atendimento energético à essas áreas: aumento da demanda e redução dos espaços físicos livres. Soma-se a isso, ainda, a crescente exigência dos cidadãos pela observância aos aspectos visuais dos equipamentos urbanos, incluindo linhas e redes de distribuição de energia elétrica. De fato, tal demanda implica na aceitação desses empreendimentos por parte da população.

Nesse cenário, a Companhia Paranaense de Energia (Copel) desenvolveu no início dos anos 1980 um arranjo construtivo para linhas de transmissão de 69, 138 kV (1) e, posteriormente, 230 kV (2) apropriado ao ambiente urbano. O objetivo principal de tais arranjos era desenvolver um padrão construtivo, alternativo à linha de transmissão subterrânea, adequado para ser implantado em regiões urbanizadas apresentando elevada segurança funcional e aspecto visual condizente com as novas demandas da sociedade para a arquitetura do meio urbano (3). A preocupação com a segurança operativa do arranjo é devida ao fato de que tais linhas de transmissão estariam instaladas nas calçadas, bastante próxima dos transeuntes.

A bem-sucedida experiência da Copel com aqueles arranjos culminou com a proposição, em 2013, de um novo padrão construtivo, ainda mais compacto, para as linhas de transmissão em 138 kV (3). De fato, como mencionado em (4), os estudos foram iniciados de forma a verificar se a recapacitação dos arranjos urbanos de 69 kV para 138 kV seria possível, e quais os principais impactos que essa mudança acarretaria. Os estudos concluíram pela possibilidade técnica da redução das distâncias entre fases, mantendo-se a maioria dos materiais já implantados no arranjo em 69 kV, sendo construído um trecho experimental de aproximadamente 1 quilômetro em 2015 (5). Esse novo arranjo foi identificado como arranjo supercompacto.

(*) Rua José Izidoro Biazzetto, n° 158 – Bloco C – CEP 81.200-240 Curitiba, PR, – Brasil
Tel: (+55 41) 3331-2278 – Email: muryllo@copel.com

A Copel possui aproximadamente 500 km de linhas de transmissão em 69 e 138 kV construídas com arranjo compacto urbano no estado do Paraná. Esse comprimento é a soma de todos os trechos em arranjo urbano, seja de linhas de transmissão construídas totalmente em arranjo compacto ou somente o trecho desse arranjo em linhas de transmissão mistas, aquelas construídas parcialmente com arranjo urbano.

Os dados existentes no sistema georreferenciado de linhas da Copel DIS, referente ao primeiro semestre de 2019, mostram que, dos quase 500 km de linhas de transmissão compactas urbanas, 35,7% são de linhas de transmissão em 69 kV, e 64,3% são de linhas de transmissão em 138 kV. As linhas de transmissão totalmente construídas em arranjo urbano somam 176 km de linhas de transmissão, sendo 91 km em 138 kV e 85 km em 69 kV. O comprimento médio de linhas de transmissão totalmente compactas é de 5,35 km para linhas de transmissão em 138 kV e 5 km para as linhas de transmissão em 69 kV, porém apresentando comprimentos de até 11 km para linhas de transmissão totalmente compactas e de até 14 km considerando apenas o trecho compacto de linhas de transmissão mistas. A Figura 1 apresenta a divisão percentual de cada tipo de linha de transmissão compacta urbana existente na Copel.

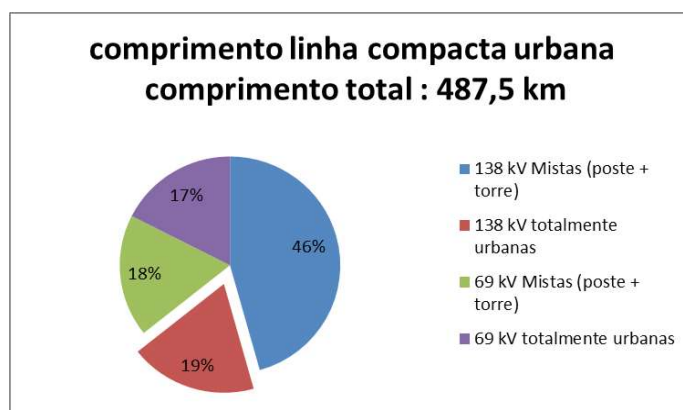


FIGURA 1 – Comparativo do comprimento das linhas em padrão compacto urbano da Copel. Dados de 2019.

A redução da distância entre fases para o novo arranjo de linhas de transmissão trouxe questões importantes a serem respondidas, como, por exemplo, se a alteração da distância entre fases de 1,7 metros para 1,2 metros, em 138 kV, poderia implicar em alterações no comportamento e características das sobretensões devido a transitórios e se esta possível alteração de comportamento poderia traduzir-se em problemas operativos à linha de transmissão construída com esse novo arranjo. Uma forma de observar o comportamento e valores de sobretensão em condições transitórias é através do modelamento dos arranjos no *software* de análise de transitórios *Alternative Transients Program* (ATP).

2.0 - LINHAS DE TRANSMISSÃO COMPACTAS

2.1 Compactação de linhas de transmissão

As linhas de transmissão compactas devem apresentar estruturas de poste único, vão relativamente curtos (entre 30 e 150 metros) construção sem uso de cruzetas, separação entre fases reduzida e adequada à faixa de passagens estreitas ou à construção ao lado de vias de circulação de veículos (4). Essas características tornam as linhas de transmissão compactas aptas a serem instaladas em regiões urbanas. Entre outros benefícios, permitem, dessa forma, que se construam linhas de transmissão com potência similar a uma quantidade maior de linhas de distribuição. De fato, muitas concessionárias também desenvolvem estudos de recapacitação por meio do aumento da tensão de operação da linha de transmissão, tornando-as linhas de transmissão com distâncias reduzidas em relação à outras linhas com a mesma tensão operativa, contudo, com arranjo dos condutores distinto.

A Figura 2 mostra a diferença visual entre as dimensões usuais de uma linha de transmissão em padrão construtivo convencional e uma linha de transmissão construída em padrão compacto, ambas com tensão operativa de 138 kV.

Os arranjos compacto e supercompacto para as linhas de transmissão da Copel possuem as seguintes características:

- Poste de concreto circular com altura máxima de 30 metros e conicidade controlada;
- Isoladores tipo *line post* nas estruturas de suspensão;
- Utilização de condutores CAA 636 MCM ou 795 MCM;
- Utilização de um 5º condutor, aterrado, sob as fases para controle das correntes de falta e redução das tensões de passo e toque.
- Vão médio de 80 metros;

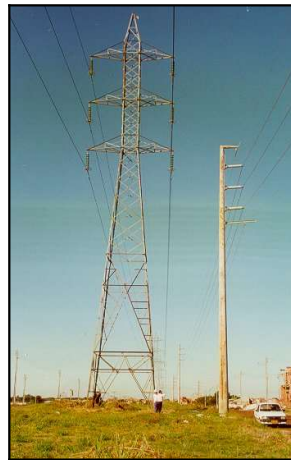


FIGURA 2 – Comparativo das dimensões de dois arranjos 138 kV da Copel, rural (esquerda) e urbano (direita).

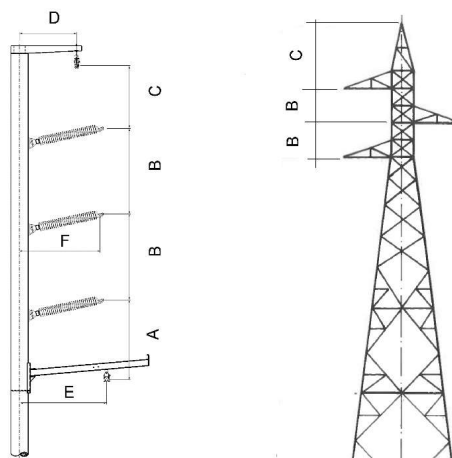
A Tabela 1 mostra as principais distâncias dos arranjos urbanos (convencional e supercompacto) e do arranjo convencional construído com estruturas metálicas.

Tabela 1 – Comparativo dimensional entre arranjos de linhas de transmissão 138 kV.

Padrão	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)	E (m)	F (m)
Convencional Torre	-	1,6	3,3	-	-	2,8
Convencional Compacta	1,5	1,7	1,2	1,1	1,7	1,6
Supercompacta	1,3	1,2	1,0	0,7	1,0	1,1

FIGURA 3 – Distância entre fases dos padrões compacto (esquerda) e convencional torre

A Figura 3 acima mostra a localização de cada distância mencionadas na Tabela 1, sendo observar que, embora a distância B do arranjo indicada na Tabela 1 seja de 1,6 metro, a entre os condutores é, na verdade, de aproximadamente 5,8 metros entre as fases da da direita, ou 3,2 metros entre as duas fases da sendo, portanto, maior que a distância dos compactos urbanos.



urbano
 (direita).

uma das
 possível
 de torre
 distância

esquerda e
 arranjos

3.0 - TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM LINHAS COMPACTAS



O período de desenvolvimento de linhas de transmissão iniciou-se na metade dos anos 1950 (4) e a partir desse desenvolvimento foram construídas diversas linhas de extra-alta tensão, 345kV e acima, ao redor do mundo. A existência dessas linhas exigiu o aprofundamento dos estudos de coordenação de isolamento devido aos surtos de manobra. Algumas soluções foram aplicadas com sucesso para a redução dos picos de tensão devido a manobras, como, por exemplo, a utilização de resistores de pré-inserção e a utilização de para-raios de óxido metálico. O bom desempenho dessas soluções incentivou as empresas a reduzirem cada vez mais as distâncias entre as fases dos arranjos para linhas de extra alta tensão caracterizando-as com distâncias típicas de linhas de transmissão em 115-240 kV. Outro ponto observado por Chisholm (4), foi que as empresas também passaram a aumentar a capacidade de transmissão de potência ativa das linhas, usualmente através do aumento de tensão, criando linhas de transmissão com razão de compactação cada vez maior e resultando em arranjos mais adequados à espaços reduzidos.

Outro desafio que surgiu a partir da compactação de linhas de transmissão foi a sua performance diante de descargas atmosféricas devido, principalmente, às pequenas distâncias entre fases, como apontado em (4), também contornado a partir do uso de para-raios de óxido metálico.

Há casos, no entanto, que a utilização dos resistores de pré-inserção ou dos para raios-não é viável. Nesses casos é importante o estudo do comportamento do arranjo sob as condições de surto de manobra e descarga atmosférica.

3.1 Transitórios Eletromagnéticos devido a Manobra de Energização e Descargas Atmosféricas

Os transitórios devido a Manobra de Energização são transitórios eletromagnéticos de frente de onda lenta, desse modo sua frequência está acima da frequência fundamental, na faixa de 10^4 Hertz, Já os transitórios devido a descargas atmosféricas são transitórios com faixa de frequência muito maiores do que as frequências observadas em manobras, estando localizadas na faixa de 10^6 Hertz.

Ambos os transitórios eletromagnéticos mencionados causam no sistema elétrico de potência sobretensões os estudos de transitórios buscam determinar a amplitude dessas sobretensões e verificar se sua ocorrência pode ou não ocasionar uma ruptura da capacidade dielétrica dos elementos de isolamento das linhas de transmissão.

4.0 - MODELAMENTO NO SOFTWARE ATP

4.1 Modelo para estudo de energização

A caracterização de linhas de transmissão no ATP é facilitada pelo uso do ATPDraw, pois já existe um modelo predefinido que possibilita informar as características físicas da linha de transmissão em estudo. Trata-se do programa LCC (6), o qual permite a utilização dos dados pelo Programa *Line Constants* do ATP. Os dados de entrada são constituídos basicamente a partir da configuração geométrica das torres/estruturas de transmissão e características físicas dos cabos condutores. Também são dados de entrada a resistividade do solo, a frequência fundamental do sistema de potência e o comprimento da linha de transmissão. Além desses dados, o usuário deve escolher um modelo que melhor represente a linha de transmissão para o estudo que pretende desenvolver. Estão disponíveis os modelos PI, Bergeron, JMartin, Semlyen e Noda. O usuário também pode optar pelo cálculo do efeito pelicular pelo próprio ATP. Neste caso, os dados de resistência a serem informados devem ser em corrente contínua.

Com relação ao modelo de linha de transmissão a ser adotado nesta pesquisa, deve-se tecer algumas considerações como a extensão da ordem de 10 km, um comprimento usual para linhas de transmissão em padrão urbano da Copel. CIGRE (8) indica que para estudos de transitórios de frente lenta, como surtos de manobra, não é necessária a representação dos condutores para-raios, embora no presente trabalho a entrada de dados considerou também as informações do cabo para-raios e auxiliar da linha de transmissão a ser analisada.

Linhas com comprimento de 10 km são consideradas, na literatura de estudos de transitórios, eletricamente curtas, que são aquelas que tem comprimento de até 80 km (9). Para linhas curtas, em geral, a literatura sugere o uso do modelo PI, sendo possível até o uso de modelo PI acoplado para estudos de transitórios, de modo a ser

possível o estudo de maiores frequências. Entretanto, mesmo com o uso do modelo PI “modificado”, o estudo restringe-se à apenas uma frequência determinada.

Para o estudo em uma faixa de frequências, o modelo mais adequado, de acordo com a literatura (10) é o modelo J Marti. Os detalhes para a seleção e parametrização desse modelo está detalhado no artigo (11).

A Figura 4 apresenta o modelo desenvolvido no ATPDraw para avaliação das sobretensões de manobra.

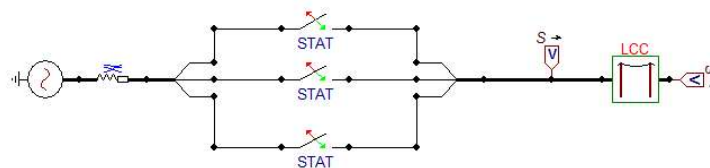


FIGURA 4 – Resultado do modelamento em ATPDraw

Como descrito no artigo (11), o modelo também foi implementado considerando a linha isolada do sistema, além de ter um dos seus terminais em aberto. Com isso, busca-se os maiores valores de sobretensão que este arranjo pode alcançar. A fonte de tensão foi ajustada para um valor fase-fase de 138 kV, e as características espaciais do trecho de linha são informadas na Tabela 1. Os condutores utilizados foram CAA 636 para as fases e CAA 4/0 para cabo para-raios e auxiliar. A resistividade do solo considerada foi de 300 ohm.m. Também foi aplicado um ajuste de flecha para determinar a altura dos condutores no meio do vão, considerando vão típico de 80 metros e tração nos condutores fase igual a 20 % do limite de resistência a tração do cabo, conforme a NBR 5422/85. Para as flechas dos cabos para-raios e auxiliar utilizou-se a igualdade de flecha com os condutores das fases, embora não tenha sido considerado que os condutores estivessem em temperatura de operação.

4.2 Modelo para estudo de descarga atmosférica

O modelo para estudo de descarga atmosférica no ATP passa pelo modelamento detalhado das linhas de transmissão, o que incluiu todas as características físicas, como estruturas e sistema de aterramento (12). A seguir são apresentados os parâmetros adotados para modelar os principais elementos da linha de transmissão.

a. Estruturas

As estruturas das linhas de transmissão compactas urbanas são fabricadas em concreto. Embora haja a presença de uma armadura metálica com função estrutural, nesta pesquisa foi considerado que essa armadura metálica não participa da condução de corrente em casos de falta. Assim, foi modelado apenas o condutor de descida que liga os condutores para-raios e auxiliar e as ferragens ao sistema de aterramento. A modelagem utilizou a metodologia apresentada por CIGRE (19), através da equação (1), aplicável para raios dos condutores muito menores que a sua altura na estrutura em relação ao solo e para torres baixas:

$$Z = 60(\ln(h/r) - 1) \quad (1)$$

Onde h é a altura da torre, e r é o raio da base do cilindro, em metros. Considerando que o raio do condutor de descida é de 0,00489 m, e a altura de 12 metros, a impedância de surto resultante é de 408 ohms. A mesma metodologia foi aplicada para os condutores que fazem a ligação elétrica entre as ferragens, considerando seus comprimentos e seus diâmetros reais.

b. Sistema de aterramento

O sistema de aterramento é constituído por todos os condutores que conectam os cabos para raio e auxiliar ao aterramento da estrutura. A resistência de aterramento foi modelada como uma resistência concentrada, cujo valor foi ajustado conforme a metodologia apresentada por Alipio & Visacro (13). De acordo com (13), dependendo da configuração do sistema de aterramento, há diferentes fatores multiplicativos a serem aplicados aos valores de resistência de aterramento (impedância de baixa frequência) para adequá-las à condição de falta de alta frequência. As linhas urbanas da Copel apresentam sistema de aterramento formado por três hastes de aço cobreado com 6 metros de comprimento, instaladas em linha com distância de 6 metros entre elas. Maiores detalhes sobre o



sistema de aterramento podem ser observados no artigo (14). Já os demais condutores de conexão entre as ferragens aterradas, suas impedâncias foram modeladas de maneira idêntica ao apresentado para a estrutura (item a), considerando seus comprimentos apresentados na Tabela 1 (valores de A até E). O condutor é o CA 1/0 Poppy, com raio de 0,00468 m, com dois condutores conectados em paralelo.

c. Isoladores

Os isoladores foram modelados a partir de sua curva de suportabilidade V_{xt} , a qual associa a tensão aplicada e o tempo limite que o isolador a suporta (15), com base na equação apresentada por IEEE (23) e considerando o comprimento de um isolador tipo *linepost* 138 kV, de aproximadamente 1,2 metro. A comparação da sobretensão gerada pela descarga a longo do tempo é feita com a curva de suportabilidade para verificação da violação do limite do isolador.

d. Condutores

Os condutores em si são modelados da mesma forma que mencionado para as análises de sobretensão de energização, ou seja, através da inclusão de seus dados construtivos e das distâncias físicas do arranjo através do modelo LCC do ATPDraw. Para esse caso, também, está sendo utilizado o modelo JMARTI pra a linha de transmissão devido ao fato de o fenômeno ser de alta frequência.

e. Fonte de descarga atmosférica.

A literatura indica que há diferentes formas de modelar a fonte de descarga atmosférica. No ATP estão disponíveis diferentes tipos de fontes de surto. O trabalho (12) mostra que uma fonte adequada para a representação é a fonte Hidler, através de uma associação de 7 diferentes funções, mas que também é possível obter resultados adequados através de uma fonte triangular com tempo de frente de onda de 1,2 μ s e de cauda de 50 μ s. Neste trabalho optou-se pela fonte Hidler disponível no ATP, considerando uma fonte 1/5 μ s como sugerido em (15), e com corrente de pico de 31 kA, que é um valor normalmente sugerido na literatura (20), baseado nos dados obtidos no Monte San Salvatore. Também foi incluída em paralelo uma resistência de 400 Ω que simula a impedância do caminho da descarga (22).

f. Chave estatística

Devido ao comportamento estatístico apresentado pelos disjuntores no momento do seu fechamento, o modelo inclui chaves estatísticas disponibilizadas pelo ATP; As chaves foram configuradas para apresentarem o tempo de fechamento com distribuição normal, com desvio padrão de 1 ciclo (0,01667 s).

Embora se tenha adotado o comprimento típico das linhas de transmissão de padrão urbano 138 kV da Copel, em essência, e como recomendado em Erro: Origem da referência não encontrada, é suficiente modelar detalhadamente apenas 3 ou 4 vãos para cada lado do ponto de interesse e deve ser representado o restante com comprimento o suficiente para evitar reflexões que possam alterar a sobretensão no ponto de interesse. O aspecto visual do modelamento no ATPDraw é mostrado na Figura 5 abaixo:

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

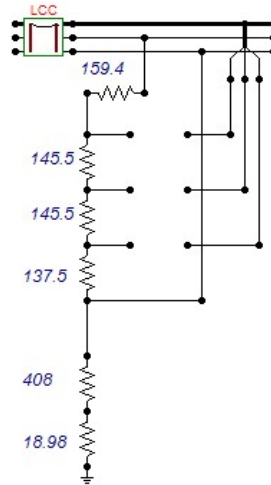


FIGURA 5 – Vão típico do modelamento em ATPDraw pra descargas atmosféricas indicando as impedancias de surto dos condutores da estrutura.

5.0 - RESULTADOS

5.1 Sobretensão de energização

Com base nas características típicas das linhas de transmissão compactas em padrão urbano da Copel, foram delimitados os seguintes parâmetros: comprimentos entre 5 e 20 km, totalmente em padrão compacto (convencional ou supercompacto) e sem sistemas de controle de sobretensão. Os resultados não se mostraram aderentes à uma distribuição normal. Para dados paramétricos, ou seja, aderentes à distribuição normal, seria possível aplicar algumas ferramentas para análise de médias ou variância, como *t student* e ANOVA (17), respectivamente, e com isso obter cenários generalizados para todas as análises (18). Entretanto, como pode ser observado no exemplo da Figura 6 abaixo, os dados não são paramétricos, condição essa também comprovada através da análise de aderência Kolmogorov-Smirnov (17) obtida pelo *software* estatístico SPSS, em sua versão de avaliação, para os resultados de todos os cenários estudados. Assim, a análise estatística dos resultados da modelagem de sobretensão de energização se resume à análise de probabilidade de ocorrência a partir dos histogramas de distribuição de frequências para obter os valores mais prováveis de sobretensão, além dos valores máximos obtidos pelo ATP. Os valores máximos são os valores de interesse para análise da suportabilidade dos isoladores, pois representa a situação de maior solicitação elétrica do conjunto.

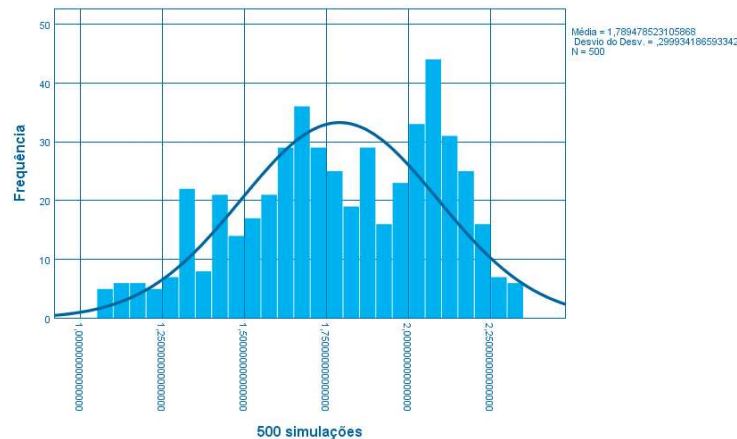


Figura 6 – Exemplo de Histograma dos resultados obtidos no ATP, mostrando a não aderência dos dados à distribuição normal.

Assim, as tabelas abaixo resumem os dados obtidos pelo ATP, considerando uma linha de 10 quilômetros de comprimento:

Tabela 2 – Valores de sobretensão de energização.

Arranjo	Nº de Simulações	Valor mais frequente (pu)	Frequência	Valor máximo (pu)
Compacto convencional	100	1,89	14 %	2,30
	300	2,10	11 %	2,45
	500	2,09	11 %	2,59
Supercompacto	100	2,07	22 %	2,48
	300	2,10	11 %	2,47
	500	2,07	9%	2,32

Também foi verificado o impacto do comprimento das linhas em relação à sobretensão, demonstrado no gráfico abaixo, considerando os dados de 300 simulações para ambos os arranjos.

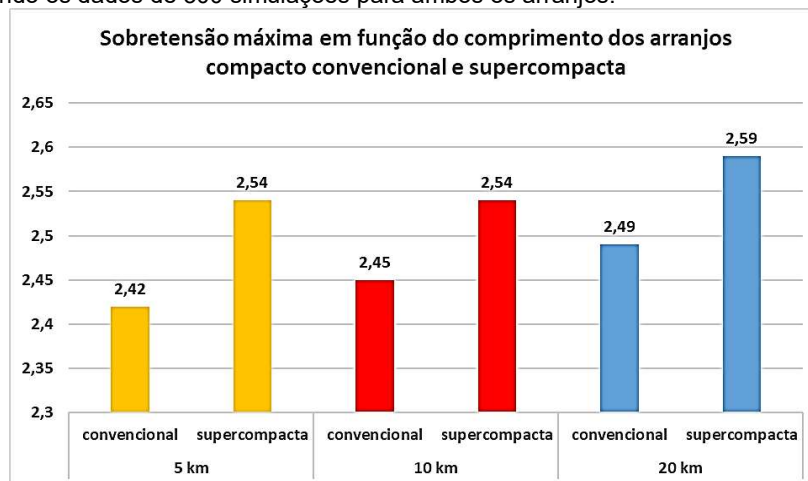


Figura 7 – Gráfico comparativo da sobretensão de energização em função do comprimento das linhas

Na Tabela 2 é possível observar que os valores máximos das sobretensões observadas para o arranjo supercompacto são próximos dos valores máximos observados no arranjo compacto convencional.

Já na Figura 7 observamos o impacto do comprimento para 300 simulações em cada cenário e observa-se que a compactação tem papel importante quando há variação de comprimento, ou seja, observa-se que há um aumento da sobretensão em função da compactação, porém não se observa um aumento significativo da sobretensão em função do comprimento.

Os surtos de manobra são analisados através do parâmetro BSL (*Basic Switching Level*), o qual determina a suportabilidade do equipamento. Entretanto, esse parâmetro não é usualmente aplicado para linhas abaixo de 230kV. Com o objetivo de ser possível comparar os valores obtidos com uma métrica, neste trabalho utilizou-se a regra empírica apresentada por (24), a qual relaciona o BSL à 83% do Nível Básico de isolamento, que é, neste caso, 650kV. Assim, o BSL, neste caso, seria de 6,77 pu e não seria ultrapassado em nenhum dos casos estudados. Os valores estão, também, aderentes aos valores indicados em (21) e (24), os quais indicam que sobretensões de energização entre 2 e 3 pu são típicas para linhas de transmissão.

5.2 Sobretensão devido a descargas atmosféricas

Já para as análises de sobretensão devido a descargas atmosféricas, foram traçados os gráficos apresentados na Figura 8. Foi considerada uma linha de transmissão de comprimento típico igual a 5 km, com incidência da descarga atmosférica no meio da linha e no meio do vão, no cabo para-raios. A Figura 8 também mostra as curvas de suportabilidade dos isoladores, na linha tracejada.

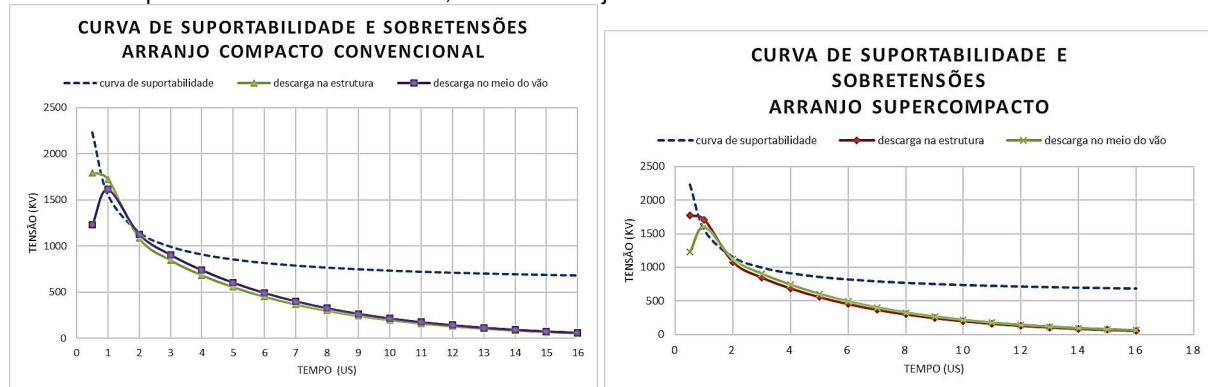


Figura 8 – Gráfico comparativo entre suportabilidade do isolador *linepost* 138 kV (linha pontilhada) com as sobretensões observadas no arranjo convencional (esquerda) e supercompacto (direita)

A Figura 8 mostra que os valores de sobretensão estão bastante próximos da suportabilidade do isolador no tempo de 1 μ s, sendo, portanto, um ponto de atenção para esses arranjos. Também se observa valores muito próximos entre os diferentes arranjos; A Tabela 3 compara os resultados para o caso de descarga atmosférica:

Tabela 3 – comparação entre os valores obtidos para arranjo convencional e supercompacto de linhas compactas.

Tempo (μ s)	Sobretensão arranjo convencional (kV)	Sobretensão arranjo supercompacto (kV)	Dif(%)	Tempo (μ s)	Sobretensão arranjo convencional (kV)	Sobretensão arranjo supercompacto (kV)	Dif (%)
0,5	1227,9	1227,1	0,06%	9	265,5	264,9	0,20%
1	1613,2	1602,4	0,67%	10	215,8	215,4	0,20%
2	1126,4	1119,0	0,66%	11	175,3	174,9	0,20%
3	905,2	903,4	0,20%	12	142,2	141,9	0,18%
4	738,4	738,1	0,05%	13	115,2	115,0	0,14%
5	602,7	602,4	0,05%	14	93,2	93,1	0,08%
6	491,6	491,2	0,09%	15	75,3	75,3	0,00%
7	400,7	400,1	0,14%	16	60,7	60,8	-0,10%
8	326,3	325,7	0,17%				

6.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os estudos de sobretensões devido a transitórios eletromagnéticos de surto de manobra e descargas atmosféricas em um arranjo supercompacto para linhas de transmissão em 138 kV da Copel.

Para o surto de manobra observou-se que os dados de sobretensão máxima são muito próximos para os dois arranjos estudados, concluindo-se que a redução da distância entre fases de 1,7 m para 1,2 m não afeta esse parâmetro significativamente. Entretanto, observa-se que o comprimento da linha influencia diretamente nos valores de sobretensão para o cenário adotado neste artigo. Ainda assim, os valores máximos encontrados estão próximos aos valores mencionados na literatura como típicos em linha compactas (21) e não violam a suportabilidade dos isoladores para nenhum dos arranjos. São observadas pequena variação entre dados apresentados na Tabela 2 e na Figura 7 devido ao comportamento estatístico da simulação, visto que foram realizadas duas simulações para obtenção dos dados.

Com relação às sobretensões devido a descargas atmosféricas, também se verificou que a redução de distância entre fases não implica em valores significativamente diferentes. Para o cenário analisado, ambos os arranjos tiveram resultados semelhantes. Observa-se, entretanto, que a suportabilidade dos isoladores está no limite, o que implica que em ocorrências de descarga atmosféricas com valores superiores a 31 kA há significativa probabilidade de violação da suportabilidade dos isoladores, sendo necessário um estudo de uso de para-raios. No caso de redução do comprimento dos isoladores também seria necessária a elaboração de um estudo de aplicação de para-raios.

Conclui-se, de um modo geral, que a redução da distância entre fases do arranjo compacto convencional para o arranjo supercompacto não implica em significativo aumento da sobretensão devido a manobra e descarga atmosférica, sendo que os dois arranjos se comportam de modo semelhante.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) PROSDÓCIMO, N., MARTIN, C., Diretrizes para projeto de Linhas Aéreas Compactas Urbanas. XII SNPTEE, 1993, Recife/PE.
- (2) HOFFMANN, J. N., SOUZA, R. L., PROSDÓCIMO, N., MOREIRA, I.S., Linha de Transmissão Urbana Compacta Experimental em 230 kV. XVII SNPTEE, 2003, Uberlândia/MG.
- (3) SOUZA, M. A., HOFFMANN, J. N., Reisolamento de linhas compactas de 69 kV para 138 kV (LT supercompacta). XXII SNPTEE, 2013, Brasília-DF.
- (4) CHISHOLM, W. A., ANDERSON, J. G., PHILLIPS, A., CHAN, J., *Lightning performance of compact lines*. X SIPDA International Symposium on Lightning Protection, 2009, Curitiba-PR, Brazil.
- (5) SOUZA, M.A., CASAGRANDE, F.L.R., Projeto, implantação e operação de LDAT 138 kV em padrão urbano supercompacto. Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2016, Curitiba-PR.
- (6) AMON FILHO, J., PEREIRA, M. P., Novos desenvolvimentos dos programas ATP/EMTP e ATPDraw. XVI SNPTEE, 2001, Campinas-SP.
- (7) PRIKLER, L. HØIDALEN, H. K., *ATPDraw Version 3.5 for Windows. User's Manual*, 2002.
- (8) CIGRE, Brochura 39 *Guidelines for representation of network elements when calculating transients*. 2000.
- (9) CIGRE, Brochura 694. *Ground Potential Rise at Overhead AC Transmission Line Structures during Power Frequency Faults*. 2017.
- (10) WATSON, N., ARRILAGA, J. *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation. 1st Edition*. London. *Institution of Engineering and Technology*, 2003.
- (11) SOUZA, M. A., NETTO, U. C., Estudo de sobretensão de energização em linhas de transmissão compactas urbanas de 138 kV com uso do programa ATPDraw. XXIII SENDI, Fortaleza-CE, 2018.
- (12) ASSIS, S.C. BOAVENTURA, W.C., PAULINO, J.O.S., *Lightning performance of transmission lines: Comparison IEEE Flash and Monte Carlo Method*. IEEE Latin America Transactions, Vol. 15, n. 2, 2017.p. 269-274.
- (13) ALÍPIO, R., VISACRO, S., *Impulse Efficiency of Grounding Electrodes: Effect of Frequency-Dependent Soil Parameters*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, n. 2, April 2014.
- (14) HOFFMANN, J.N., WIEDMER, R. S., BUBNIAK, M. J., MOREIRA, I.S. *Urban overhead transmission lines of compact design for 69, 138 and 230 kV*. CIGRE Session, 2010, Paris, France.
- (15) CHISHOLM, W. A., *New Challenges in Lightning Impulse Flashover Modeling of Air Gaps and Insulators*. IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol. 26, n. 2, 2010. P. 14-25.
- (16) MARIANO, J. A. S., SCROEDER, M. A., NASCIMENTO, L. C., SALES, W. S., ASSIS, S. C., *A software application for lightning performance assessment of overhead transmission lines using monte carlo method*. GROUND 2012, International Conference on Grounding and Earthing. Bonito, Brazil, 2012.
- (17) FIELD, A. *Descobrimos a estatística usando o SPSS*. 2ª edição. ArtMed, Porto Alegre, 2009.
- (18) MESTAS, P., TAVARES, M. C., *Relevant Parameters in a Statistical Analysis – Application to Transmission Line Energization*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, n. 6, December 2014.
- (19) CIGRE Working Group C4.301. *Technical Brochure 440 “Use of surge arresters for lightning protection of transmission lines*. (December 2010. p. 49).
- (20) VISACRO, S. F. *Descargas atmosféricas. Uma abordagem de engenharia*. Artliber Editora. São Paulo, 2005.
- (21) EPRI. *Transmission Line Reference Book. 115-138 kV Compact Line Design*. Electric Power Research Institute, 1978. Palo Alto, USA.



- (22) FEKETE, K., NIKOLOVSKI, S., KNEZEVIĆ, G., STOJKOV, M., KOVAČ, Z. *Simulation of lightning transients o 110 kV overhead-cable transmission line using ATP-EMTP*. MELECON 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. 2010.
- (23) IEEE. *Modeling guidelines for fast front transients*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, n. 1, January 1996.
- (24) HEDMAN, D. E., Coordenação de isolamento. 2ª Edição. Edições UFSM. Santa Maria, 1983.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Muryllo Amalio de Souza trabalha na divisão de projetos de linhas de distribuição de alta tensão 69 e 138 kV da Copel Distribuição S.A. Concluiu a graduação em Engenharia Elétrica em 2004 pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPr) e cursa, atualmente, mestrado no Programa de Pós Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE) da UTFPr. É sócio do Cigré, atuando principalmente no comitê de Estudos B2 (linhas aéreas). Participa ativamente de eventos, com trabalhos, como SNPTEE, SENDI, ERIAC e CIGRE SESSION, e publicações em (T&D World, Revista Brasileira de Energia, Scielo/Tecpar)

Ulisses Chemin Netto é graduado em Engenharia Industrial Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) em 2003, titulado como Mestre em Engenharia Elétrica e Doutor em Ciências, na sub-área de Sistemas Elétricos de Potência, pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP) em 2008 e 2012, respectivamente. Foi pesquisador de pós-doutorado em 2013 junto ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), da EESC/USP. Atualmente é Professor Adjunto na UTFPR (Campus Curitiba) junto ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT). Nessa instituição atua, ainda, no Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE) como docente permanente. Sua área de atuação principal são os Sistemas Elétricos de Potência.