

UMA COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE FONTE DE SURTO ATMOSFÉRICO NO ATP

L. S. Marroques¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – Minas Gerais
marroques.lucas@gmail.com

Resumo - Este artigo trata da comparação dos modelos de fonte de impulso atmosférico existentes no software ATP. Essas fontes são do tipo 15 e são usadas na representação de descargas atmosféricas. Diversos estudos necessitam representar o efeito de uma descarga ao atingir um sistema. Como por exemplo, estudos de coordenação de isolamento ou de suportabilidade dielétrica de equipamentos e materiais. O trabalho é desenvolvido no programa ATP/ATPDraw, pois se trata de um problema de transitórios eletromagnéticos. Após um embasamento teórico, simulações comparativas dos modelos serão feitas para se apreciar as diferenças dos resultados e finalmente definir qual o modelo com mais vantagens. O modelo mais vantajoso é o tipo Heidler devido a vantagens de obtenção de parâmetros e de qualidade na reprodução de surtos.

Palavras-Chave - ATP, curva exponencial, fonte de surto, simulação computacional, sobretensão.

A COMPARISON BETWEEN THE MODELS OF SOURCE OF SURGE INSIDE ATP

Abstract - This paper deals with the comparison of models of surge source in ATP software. These sources are of type 15 and are used in the representation of lightning. Several studies need to represent the effect of the discharge on reaching a system. Such as, coordination of insulation studies or dielectric withstand of equipment and materials. Everything is developed in the ATP/ATPDraw program because it is a problem of electromagnetic transients. After a theoretical basis, comparative simulations of the models will be made to appreciate the differences of the results and finally define which model that has more advantages. The most advantageous model is the Heidler type due advantages of obtaining parameters and quality at surge representation.

Keywords - ATP, exponential curve, surge source, computational simulation, overvoltage.

I. INTRODUÇÃO

A descarga atmosférica é um fenômeno da natureza presente na evolução histórica do homem. Foi possivelmente a sua primeira fonte de fogo, que é uma descoberta que possibilitou o avanço da sociedade, mudando radicalmente suas condições de vida.

Devido ao deslumbramento causado pelos efeitos áudio visuais da descarga, que são o relâmpago e o trovão, esse fenômeno sempre foi inserido em inúmeras lendas e mitos de diferentes sociedades. O relâmpago é uma intensa emissão de radiação eletromagnética visível ao olho humano, e o trovão é uma onda sonora causada pelo deslocamento de ar que a descarga provoca.

O fato da descarga atmosférica se tratar de um fenômeno elétrico foi descoberto através de uma experiência feita pelo francês Thomas François Dalibard em 1752. Mas essa experiência foi sugerida pelo norte-americano Benjamin Franklin, que a realizou um mês depois de Thomas, mas sem saber de seu sucesso. Benjamin, a fim de provar a natureza elétrica das descargas, empinou uma pipa durante uma tempestade, e observou faíscas pularem de uma chave amarrada na linha da pipa próximo da extremidade à sua mão [1].



Fig. 1. Descarga atmosférica na cidade de Campinas-SP.

Atualmente, as descargas atmosféricas são assunto de diversos estudos do sistema elétrico. Esse interesse se deve ao fato de elas serem responsáveis pelo aparecimento das maiores sobretensões do sistema elétrico, levando algumas vezes à perda de equipamentos. Além disso, as descargas lideram os motivos de ressarcimento de danos elétricos nas estatísticas das distribuidoras de energia elétrica [2].

Será feita uma abordagem teórica a fim de balizar o entendimento acerca dos surtos atmosféricos e de sua



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

representação nas plataformas computacionais, para comporem as simulações digitais de diversos estudos do sistema elétrico.

Serão abordados os valores definidos em norma para as variáveis das curvas de impulso atmosférico de corrente e de tensão.

Normalmente as fontes são usadas como fontes de corrente, em que seu comportamento é representado através do uso de uma curva exponencial. Há fontes que são representadas por curvas diferentes, uma curva triangular por exemplo. Mas que não apresentam um bom comportamento para essa finalidade.

No ATP essas fontes são chamadas do tipo 15, e são quatro modelos. Elas se diferem quanto ao modo de inserção de dados no modelo e de suas respostas.

O objetivo do trabalho é comparar essas fontes e definir qual que melhor representa as características do surto, considerando além da qualidade de sua resposta, as facilidades da obtenção dos dados necessários.

No decorrer desse trabalho será feita uma abordagem conceitual sobre as definições dos surtos atmosféricos, e também uma proposta de simulação para consolidar o estudo.

Após isso serão apresentados a simulação e os resultados, que formarão uma base para as conclusões finais.

II. A DEFINIÇÃO DOS SURTOS ATMOSFÉRICOS ATRAVÉS DE FORMAS DE ONDA EXPONENCIAIS

Os diversos estudos sobre a modelagem de surtos no sistema elétrico apresentam a utilização de dois tipos de impulsos. O impulso exponencial é utilizado para representar um surto atmosférico. O impulso retangular é utilizado para representar um surto de chaveamento, de diversas operações próprias do sistema elétrico.

Essas representações também podem ser vistas na forma de impulsos de corrente ou de tensão. A normatização estabelece as variáveis existentes nas curvas e também estabelece valores para as mesmas, a fim de padronizar testes e estudos.

A figura 2 representa uma onda de surto.

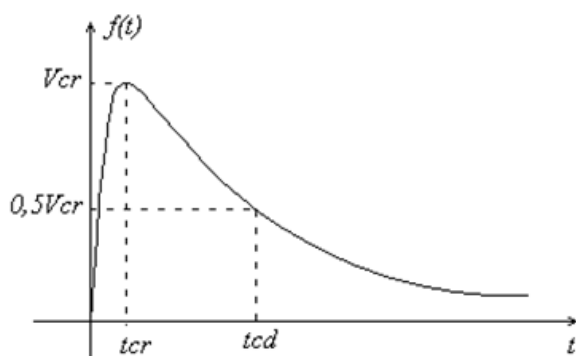


Fig. 2. Onda de surto.

De acordo com a norma IEC 60060-1, para uma onda de tensão, a origem virtual O_1 é o ponto que a linha imaginária que atravessa os pontos de 30 e 90% do valor de pico alcança o eixo do tempo. Para uma onda de corrente, a linha imaginária atravessa os pontos de 10 e 90% do valor de pico

e no cruzamento com o eixo do tempo tem-se a origem virtual. Esses pontos podem ser visualizados nas figuras 3 e 4 [3].

Ainda de acordo com essa norma, o tempo de frente de onda T_1 é, para um surto de tensão, definido como 1,67 vezes o intervalo de tempo entre os instantes de 30 e 90% do valor de pico. E para um surto de corrente, é definido como 1,25 vezes o intervalo de tempo entre os instantes de 10 e 90% do valor de pico.

O tempo de cauda, T_2 , é o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante em que os valores de tensão ou corrente chegarem à metade do valor de pico.

O tempo de frente padrão para uma onda de tensão é de $1,2\mu s$, e o tempo de cauda é de $50\mu s$. As formas de onda padrão para impulsos atmosféricos seguem a teoria de ondas de surto da forma exponencial, como pode ser visto na figura 3.

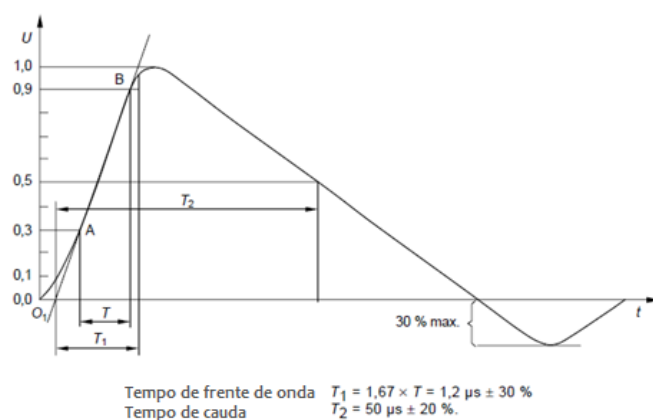


Fig. 3. Forma de onda padrão do surto de tensão ($1,2/50\mu s$).

O tempo de frente de onda de um surto padrão é de $8\mu s$, e o tempo de cauda de $20\mu s$. Como pode ser visto na figura 4.

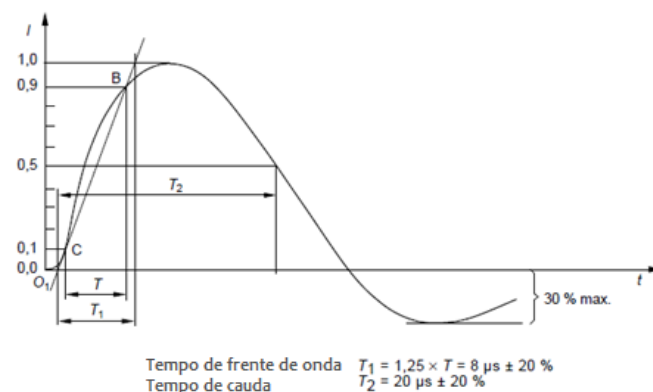


Fig. 4. Forma de onda padrão do surto de corrente ($8/20\mu s$).

Como se trata de um fenômeno da natureza não é possível estabelecer regras universais para os tempos de frente de onda e de cauda. Mas há um comportamento válido para a maioria desses eventos. A maior parte desses eventos elétricos apresenta tempos de frente de onda menores que tempos de cauda em uma proporção de duas ou mais vezes. Na verdade o processo de normatização das formas de onda é apropriado às possibilidades técnicas apresentadas pelos diversos laboratórios de ensaios.

São definidos então valores para impulsos de corrente exponenciais; em relação a tempo, valores de pico, polaridade reversa, energia e tolerâncias dos limites. Como o principal interesse desse artigo é a modelagem de surtos atmosféricos, representados através de curvas exponenciais, os parâmetros destas serão abordados.

As normas IEC 60099-4 e IEC 60060-1 se diferem nos limites de cada variável. Observado nas tabelas I e II.

Tabela I – Impulsos exponenciais padrões da norma IEC 60060-1

Forma de Onda	Tempo de Frente	Tempo de Cauda	Valor de Pico	Polaridade Reversa
1/20	1µs±10%	20µs±10%	± 10%	20%
4/10	4µs±10%	10µs±10%	± 10%	20%
8/20	8µs±10%	20µs ± 10%	± 10%	20%
30/80	30µs±10%	80µs±10%	± 10%	20%

Tabela II – Impulsos exponenciais padrões da norma IEC 60099-4

Forma de Onda	Tempo de Frente	Tempo de Cauda	Valor de Pico	Polaridade Reversa
1/20; 20kA	0,9µs ≤ T _f ≤ 1,1µs	20µs	± 5%	-
4/10; 100kA	3,5µs < T _f < 4,5µs	9µs < T < 11µs	± 10%	20%
8/20; 20kA	7µs ≤ T _f ≤ 9 µs	20µs ± 10%	± 10%	-
30/80; 40kA	25µs < T _f < 35 µs	70µs ≤ T ≤ 90µs	± 10%	20%

Para ambas as normas, as formas de onda dos surtos são as mesmas. As diferenças estão apenas nos valores de tolerâncias. A norma IEC 60060-1 possui um valor fixo de 10% para mais ou para menos, para os tempos de frente de onda e os tempos de cauda. A norma IEC 60099-4 não possui o mesmo valor de tolerância para todas as formas.

As diferenças não implicam em mudanças a serem inseridas nas simulações.

III. OS MODELOS DE FONTES DE CORRENTE PARA REPRESENTAR A DESCARGA ATMOSFÉRICA

Como já foi dito, existem quatro fontes diferentes do tipo 15 no software ATP para representar um surto atmosférico. As fontes são a Dupla exponencial, a fonte Heidler, a Standler e a Cigré, todas podem ser escolhidas como fontes de tensão ou corrente.

Para implementar-se uma fonte do tipo Dupla Exponencial no ATP devem ser inseridos alguns valores para definir a descarga, indicados por α , β e A . Para se encontrar tais valores devem ser resolvidas algumas equações descritas abaixo.

Como condições iniciais pode se adotar que β é muito maior que α , logo X será muito menor do que 1. Logo, deve-se estipular um valor baixo maior que zero para X .

Então se inicia um processo iterativo até se alcançar a resposta desejada para um dado valor de erro. Ao fim desse processo, os valores das variáveis devem ser inseridos no modelo da fonte. Esse modelo depende dos valores de pico da descarga e dos tempos de crista e de cauda.

A função que representa essa fonte é mostrada no equacionamento que se segue [4]:

$$f(t) = A(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

$$\frac{d(f(t))}{dt} = A(-\alpha e^{-\alpha t_{cr}} + \beta e^{-\beta t_{cr}}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{e^{-\beta t_{cr}}}{e^{-\alpha t_{cr}}} = \frac{\alpha}{\beta} = X \quad (3)$$

$$\ln(X) = -\beta t_{cr} + X\beta t_{cr} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\ln(X)}{(X-1)t_{cr}} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\ln(0,5)}{t_{cr}-t_{cd}} \quad (6)$$

$$A = \frac{V_{cr}}{(e^{-\alpha t_{cr}} - e^{-\beta t_{cr}})} \cong \frac{V_{cr}}{e^{-\alpha t_{cr}}} \quad (7)$$

Quando a relação entre o tempo de cauda e o tempo de crista é superior a três, os parâmetros encontrados para a curva são precisos e capazes de representá-la adequadamente. Do contrário, tais valores não são precisos, existindo um erro em pelo menos um desses valores. Ou seja, para representar uma onda da forma padrão de corrente, 8/20µs, o uso desse tipo de fonte não é uma boa opção.

A fonte Heidler é descrita através de uma função diferente da Dupla exponencial. Ela possui três parâmetros para sua definição: A , que é o valor de pico da curva; T_f , que é o tempo de frente de onda, dado em segundos; e t , que é o tempo em segundos em que a amplitude do surto caiu para 37% do valor de pico, a sua curva é definida pela equação 8.

$$f(t) = A \cdot \left(\left(\frac{t}{T_f} \right)^{\frac{n}{1 + \left(\frac{t}{T_f} \right)^n}} \cdot e^{-\frac{t}{t}} \right) \quad (8)$$

Como os valores conhecidos de uma descarga são os tempos de frente de onda, de cauda e o pico de corrente ou tensão, dois parâmetros para esse tipo de fonte de surto já estão definidos. O valor de t não corresponde ao tempo de cauda, já que este é o tempo para que a amplitude da curva seja de metade de seu valor máximo, mas os dois valores são próximos. A forma mais prática de se determinar t , é fazer simulações sucessivas, tendo como valor inicial o tempo de cauda, até que a forma obtida represente adequadamente a descarga desejada [5] e [6].

Onde n é um fator de influência de taxa de crescimento da função, que aumenta proporcionalmente com declividade da onda do surto.

A fonte do tipo Standler é obtida a partir de uma função próxima da fonte anterior, mas as variáveis representam parâmetros diferentes: t_c é o tempo de cauda; Amp é uma constante; e n é um expoente [7].

Esse tipo de onda apresenta uma forma de parametrização mais complexa que o tipo Hidler, já que apenas o dado de

tempo de cauda é inserido diretamente nesse modelo de fonte.

A fonte do tipo Cigré apresenta como variáveis A, que é sua amplitude, T_f , que é o tempo de frente de onda, T_h , que é o tempo de cauda, S_{max} , que é a máxima taxa de aumento, amperes por segundo, no caso de uma fonte de corrente, e volts por segundo, no caso de uma fonte de tensão.

Como as variáveis que definem um surto são os valores de pico e os tempos de crista, ou frente de onda, e de cauda, não é comum ter-se a taxa de variação da curva como dado inicial da simulação. Isso faz com que a obtenção dos parâmetros para esse tipo de fonte seja mais complexa.

A escolha de uma entre as quatro fontes deve ser pautada na comparação entre as mesmas. Para isso todas as fontes serão implementadas para dois tipos de surtos, as fontes serão ligadas em série a uma impedância e a um medidor de corrente.

As próximas figuras apresentam o esquema de ligação das fontes.

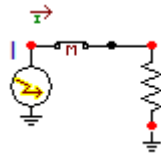


Fig. 5. Representação da fonte Dupla exponencial.

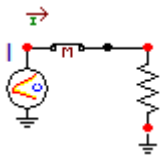


Fig. 6. Representação da fonte Cigré.

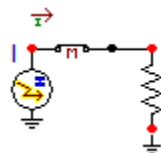


Fig. 7. Representação da fonte Hidler.

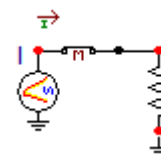


Fig. 8. Representação da fonte Standler.

IV. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para se realizar uma análise comparativa das quatro fontes todas serão parametrizadas, primeiramente, para uma onda de surto de 1,2/50 μ s, e para outra onda de 8/20 μ s, ambas de 20kA.

Ou seja, para o primeiro tipo de surto a curva deve alcançar o valor de 20kA em 1,2 μ s e o valor de 10kA em 50 μ s. Já para o segundo tipo de surto o valor máximo deve ser alcançado em 8 μ s, e metade desse valor, 10kA, em 20 μ s.

Primeiramente, serão mostradas as curvas referentes ao surto de 1,2/50 μ s.

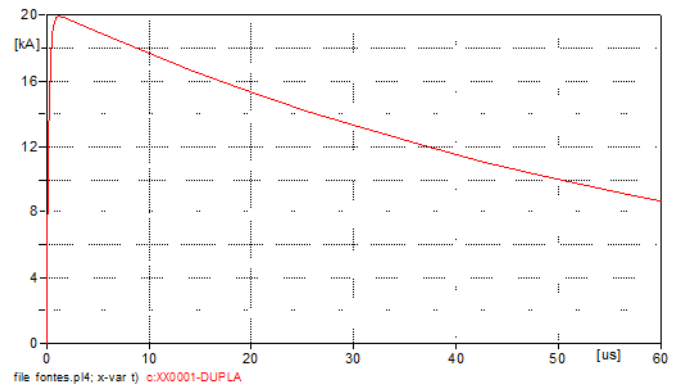


Fig. 9. Forma de onda de surto de corrente para a fonte do tipo Dupla Exponencial (1,2/50 μ s).

A fonte Dupla exponencial apresentou adequadamente o valor de pico no tempo de crista correto e no tempo de cauda apresentou o valor de 10kA.

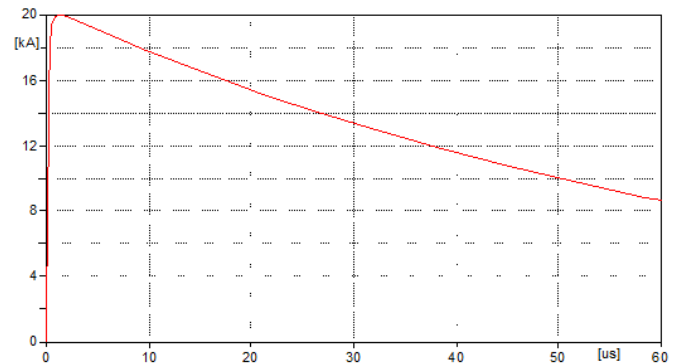


Fig. 10. Forma de onda de surto de corrente para a fonte do tipo Hidler (1,2/50 μ s).

A fonte Hidler apresentou adequadamente o valor de pico no tempo de crista correto e no tempo de cauda apresentou o valor de 10kA.

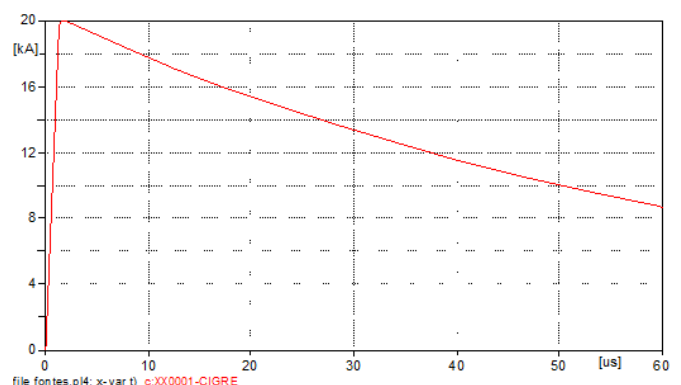


Fig. 11. Forma de onda de surto de corrente para a fonte do tipo Cigré (1,2/50 μ s).

A fonte Cigré apresentou adequadamente o valor de pico porém com um tempo de crista de 1,621 μ s e no tempo de cauda apresentou o valor de 10kA.

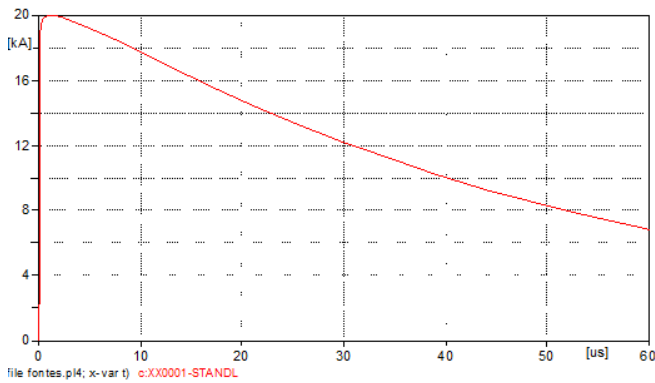


Fig. 12. Forma de onda de surto de corrente para a fonte do tipo Standler (1,2/50 μ s).

A fonte Standler apresentou adequadamente o valor de pico no tempo de crista correto e no tempo de cauda apresentou o valor de 8,274kA.

A figura 13 mostra as curvas em um mesmo gráfico para melhor compreensão.

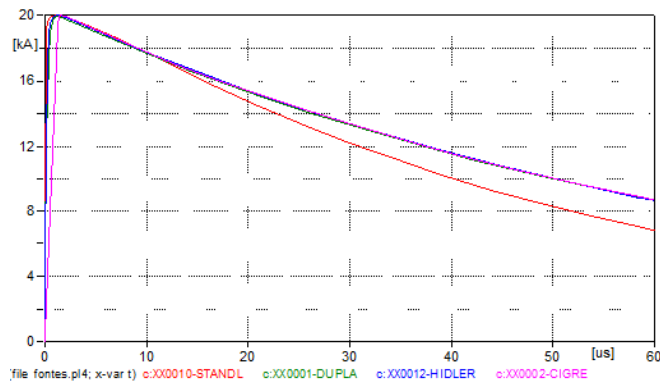


Fig. 13. Formas de onda de surtos de corrente (1,2/50 μ s).

A curva em rosa é da fonte Cigré, a curva em vermelho da fonte Standler, a curva verde da Dupla exponencial e a curva azul da fonte Hidler, as curvas das fontes Cigré, Dupla exponencial e Hidler, são superpostas para esse tipo de surto, sendo visíveis apenas a curva em azul do tipo Hidler, e em vermelho, do tipo Standler.

Todas as curvas apresentam um valor de 20kA, a curva Cigré tem um tempo de pico maior do que o especificado, teve uma taxa de crescimento inferior ao resultado desejado, e a curva Standler tem apresentou no tempo de cauda um valor inferior a 10kA, ou seja, teve um decaimento muito rápido.

Para esse surto, as curvas Dupla exponencial e Hidler são muito próximas e podem ser consideradas adequadas para simulação da descarga.

Agora serão mostrados os resultados para a simulação do surto de 8/20 μ s.

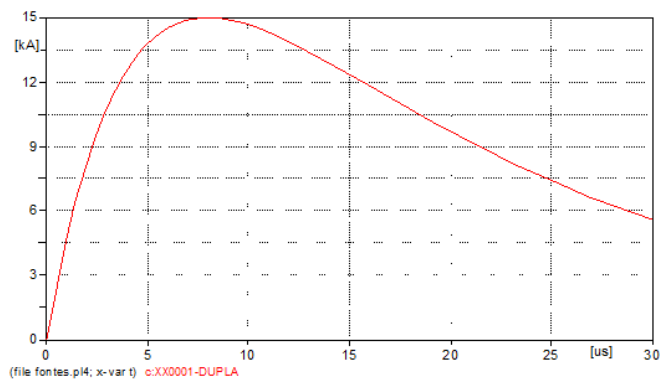


Fig. 14. Forma de onda de surto de corrente para a fonte do tipo Dupla Exponencial (8/20 μ s).

A fonte Dupla exponencial apresentou um valor de pico de 15kA, no tempo de crista correto e no tempo de cauda apresentou o valor de 9,679kA.

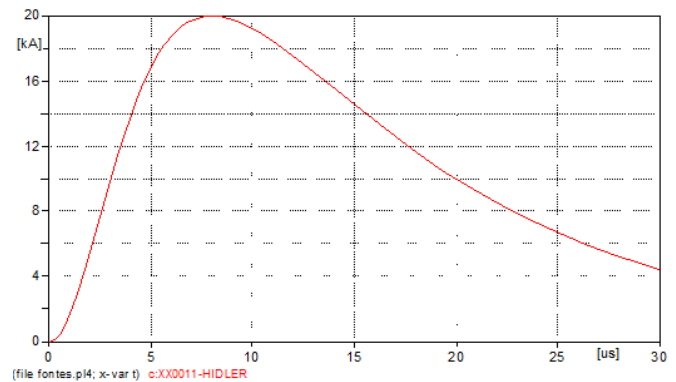


Fig. 15. Forma de onda de surto de corrente para a fonte do tipo Hidler (8/20 μ s).

A fonte Hidler apresentou adequadamente o valor de pico no tempo de crista correto e no tempo de cauda apresentou o valor de 10kA.

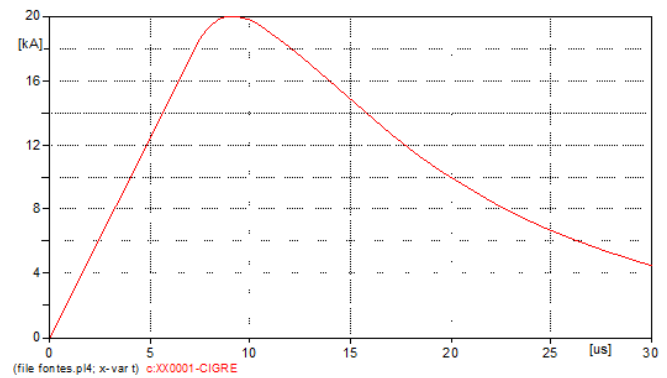


Fig. 16. Forma de onda de surto de corrente para a fonte do tipo Cigré (8/20 μ s).

A fonte Cigré apresentou adequadamente o valor de pico num tempo de crista de 9,128 μ s e no tempo de cauda apresentou o valor de 10kA.

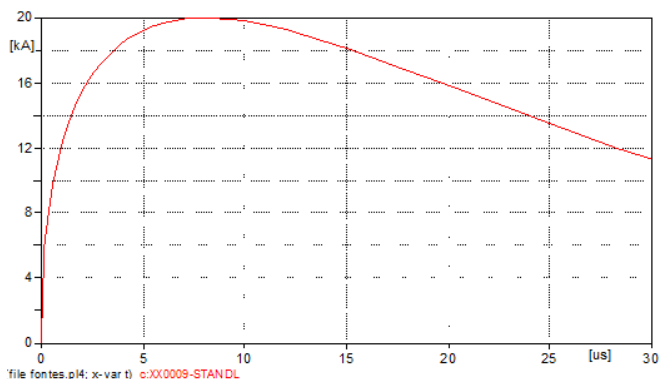


Fig. 17. Forma de onda de surto de corrente para a fonte do tipo Standler ($8/20\mu\text{s}$).

A fonte Standler apresentou adequadamente o valor de pico no tempo de crista correto e no tempo de cauda apresentou o valor de 15,828kA.

A figura 18 mostra as curvas em um mesmo gráfico para melhor compreensão.

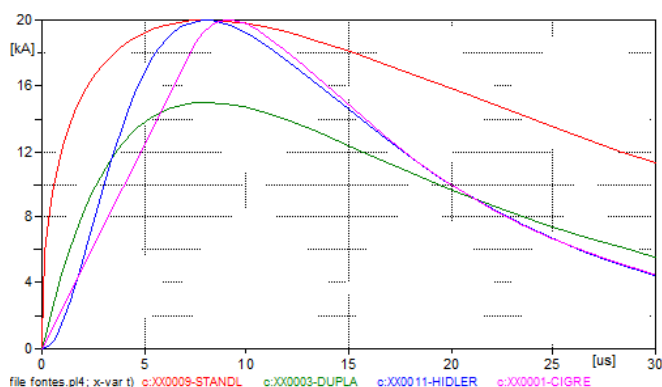


Fig. 18. Formas de onda de surtos de corrente ($8/20\mu\text{s}$).

O valor de pico só não é respeitado para a fonte Dupla exponencial, já as demais fontes alcançam o valor de 20kA. A utilização de tal fonte, com um valor de pico diferente do especificado implica em grandes diferenças nos resultados quando a mesma integra um sistema em uma simulação.

O tempo de pico para as curvas Hidler e Standler é de $8\mu\text{s}$, para a curva Cigré é maior, ou seja apresentou uma taxa de crescimento baixa. No tempo de cauda a curva Standler apresentou uma taxa de decaimento baixa, resultando num valor superior a 10kA.

A não ser para surtos cuja relação entre o tempo de cauda e tempo de pico é menor que três, para os quais a fonte Dupla exponencial não é adequada, é possível utilizar-se qualquer uma das fontes. Como os resultados apresentam o mesmo valor de pico, não sendo encontradas diferenças apreciáveis nos valores de sobretensão causados pela descarga.

Até que as curvas alcancem o valor de pico elas apresentam diferenças entre si. Esse intervalo da curva define a quantidade de energia a ser absorvida pelos para-raios. Logo há uma diferença de energia para os tipos de fonte, mas como a descarga atmosférica se trata de um fenômeno da natureza, não há previsão para o seu valor.

V. CONCLUSÕES

Sendo assim, as vantagens existentes entre as fontes são apenas para a inserção dos parâmetros, e para as condições de sua aplicação, visto que para algumas formas de onda não é recomendável o uso da fonte Dupla exponencial.

A fonte Hidler possui as vantagens de obter parâmetros de uma forma mais simples, de não ter restrições quanto ao tipo de forma de onda e de ser capaz de representar adequadamente o surto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. R. S. Lira, “Monitoramento de Para-raios de Óxido de Zinco com base na Medição da Corrente de Fuga Total”. *Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande*, Campina Grande, julho 2012.
- [2] A. Meister, “Modelagem de varistores de óxido de zinco para estudos de coordenação de isolamento”. *Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília*, Brasília, dezembro 2005.
- [3] ATP Rule Book - *Can/Am EMTP User Group*, USA, 1997.
- [4] S. Wanderley; P. Miguel, “Comparação dos modelos de para-raios utilizados para simulação no ATP” – *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XXI SNPTEE 2003 – 23 a 26 de outubro de 2011*.
- [5] S. Neiva, “Avaliação do efeito da distância de separação entre para-raios e equipamentos protegidos” – *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XXI SNPTEE 2003 – 23 a 26 de outubro de 2011*.
- [6] IEC 60060-1– *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements – Second edition – 1989-11 – International Electrotechnical Commission – Geneva – 1989*.
- [7] IEC 60099-4 – *Surge Arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems – edition 2.2 – 2009-05 – International Electrotechnical Commission – Geneva – 2009*.

DADOS BIOGRÁFICOS

Lucas Silveira Marroques, nascido em 21/09/1990 em Uberlândia-MG, é engenheiro eletricista (2012) pela Universidade Federal de Uberlândia, mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2015). Atualmente é analista de infraestrutura desempenhando suas atividades no Ministério da Integração Nacional. Possui experiência em estudos da expansão do sistema de transmissão e em estudos para a obtenção de pareceres de acesso da geração eólica à rede básica. Suas áreas de interesse são: Dinâmica de Sistemas Elétricos, Fluxo de carga, Estabilidades Transitória e de Tensão, Qualidade da Energia Elétrica, Transitórios Eletromagnéticos, Energia Eólica e Fotovoltaica.