

COMPUTAÇÃO PARALELA APLICADA AO CÁLCULO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS: INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHA DE DISTRIBUIÇÃO

JOAO PAULO R. GOMES, WALLACE DO C. BOAVENTURA, JOSÉ O. S. PAULINO

Laboratório de Engenharia de Alta Tensão, Departamento Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais

Avenida Presidente Antônio Carlos, 1627, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

*Emails: joaopaulo.ragomes@gmail.com, wventura@gmail.com,
josvaldo@cpdee.ufmg.br*

Abstract— In this work a study was made on the parallel computing applied to the calculation of electromagnetic transients. For this, the case of the incidence of lightning strike in distribution lines was chosen. A comparison was established between the calculations being solved with parallel and sequential computing. The results show a reduction of 71,3 % in the simulation time using parallel computing.

Keywords— Electromagnetic transients, parallel computing, surge arresters, lightning, power system.

Resumo— Neste trabalho foi feito um estudo sobre a computação paralela aplicada ao cálculo de transitórios eletromagnéticos. Para tanto, escolheu-se o caso da incidência de descargas atmosféricas em linhas de distribuição. Um comparativo foi estabelecido entre o cálculo sendo resolvido com computação paralela e sequencial. Os resultados mostram uma redução de 71,3% no tempo de simulação utilizando computação paralela.

Palavras-chave— Transitórios eletromagnéticos, computação paralela, para-raios, descargas atmosféricas, sistema de potência.

1 Introdução

A computação paralela é uma técnica computacional na qual o cálculo da solução de um problema pode ser dividido em vários núcleos de um computador, cujo processamento acontece simultaneamente. Existem três parâmetros que indicam a necessidade dessa ferramenta computacional: redução de tempo, tamanho e complexidade de um problema (KIRK, 2011). No entanto, para que se aplique essa técnica em qualquer problema, é necessário que o mesmo seja paralelizável; o que se confirma no método proposto por Dommel para cálculo de transitórios eletromagnéticos (DOMMEL, 1969).

A metodologia apresentada por ele define três etapas principais: definir o equivalente Norton para cada um dos elementos da rede; construir um sistema matricial de equações nodais; composto pela matriz de condutância, os vetores de tensões e de correntes instantâneos e atualizar, a cada passo de cálculo, o vetor de correntes históricas, que possui a informação sobre o estado do sistema em um tempo passado.

O método é paralelizável porque utiliza modelos de linhas de transmissão baseados em ondas viajantes e seus respectivos tempos de trânsito (FALCAO, 1992). Isso permite que o sistema de equações que descreve o estado do sistema seja particionado em subsistemas desacoplados. Nos trabalhos a seguir, essa característica é explorada baseando-se em diferentes modelos de computação paralela, hardware, mecanismos e protocolos de comunicação.

Em (BARROS et al., 2013), o transitório decorrente de uma falta trifásica para terra em um grande

sistema é analisado. A computação paralela é realizada fazendo a partição do sistema em até quatro núcleos. A estrutura do software do PSCAD foi utilizada para o projeto elétrico do sistema juntamente com o “Named Pipes” para comunicação entre os subsistemas, originados pela partição do sistema maior. Em um dos casos, a redução de tempo de simulação com a computação paralela, se comparada a sequencial, chegou a 20 vezes.

No trabalho proposto por (DEBNATH, J. K. et al., 2016), o cálculo de transitórios é desenvolvido utilizando a unidade de processamento gráfico, GPU. O sistema matricial que descreve os estados da rede elétrica é solucionado por meio de multiplicações de matrizes neste hardware; o que é feito paralelamente. Os resultados mostraram que o cálculo em paralelo usando GPU é muito mais eficiente que o sequencial.

O software PSCAD/EMTDC, desenvolvido para cálculo de transitórios eletromagnéticos, permite que simulações sejam realizadas utilizando computação paralela. Os modelos disponíveis para esta técnica são Single Program Multiple Data (SPMD) e Multiple Program Multiple Data (MPMD). Neste último, um projeto é dividido em subprojetos menores, os quais podem ser simulados em núcleos diferentes; no outro, um projeto base é utilizado, com entradas diferentes, para formar cenários que podem ser simulados simultaneamente.

Utilizando a plataforma do PSCAD/EMTDC, (SINGH et al., 2013) compara duas simulações de transitórios usando a computação sequencial e paralela. Na primeira, apenas um processador é utilizado; na segunda, o sistema completo é distribuído em até

sete processadores. Este autor mostra que a computação paralela se torna mais interessante que a sequencial quando o tempo de comunicação entre os processadores é muito menor que o tempo de execução das subdivisões dos sistemas em cada processador.

Os trabalhos supracitados indicam que as análises que envolvem os sistemas elétricos de energia são excelentes campos de aplicação para a integração entre a computação paralela e cálculo de transitórios. Primeiro, devido a grande quantidade de componentes a serem integrados à solução do cálculo; segundo, o fato de que, para alguns deles, a modelagem é complexa, pois envolve não linearidades; terceiro, por existirem estudos nos quais há grande quantidade de cenários.

Considerando esse contexto, este trabalho propõe um estudo de caso, envolvendo a incidência de descargas atmosféricas em uma linha de distribuição, na qual existe a presença de para-raios nas fases da mesma. Nesse estudo, serão avaliados vários cenários, sendo que os mesmos serão projetados para simulações executadas de forma sequencial e paralela. Um comparativo entre os tempos de simulação das mesmas será apresentado. Além disso, para ilustrar o cálculo de transitórios eletromagnéticos realizado, gráficos com tensões fase-neutro juntamente com a distribuição de energia dos para-raios serão mostrados.

2 Análise da incidência de descarga atmosférica em linhas aéreas com computação paralela

A incidência de descargas atmosféricas em linhas de distribuição aérea é uma das principais causas de desligamentos da rede elétrica, aproximadamente 40% dos casos. Estudos envolvendo as mesmas mostram que as características da forma de onda (amplitude, tempo de frente, tempo de meia-onda) são parâmetros que influenciam na intensidade das sobrentensões causadas pelas mesmas (SOUZA, 2011).

As análises que envolvem a incidência de descargas atmosféricas em linhas aéreas são de suma importância para projetos de coordenação de isolamento, suportabilidade de equipamentos da rede, proteção e desempenho da linha em sistemas de transmissão ou distribuição.

As pesquisas em torno do tema forneceram várias propostas para solucionar os problemas causados pela incidência de descargas nas redes elétricas. Por exemplo: blindagem; cadeia de isoladores; melhoria do aterramento; a instalação de dispositivos dissipadores de surto, conhecido como para-raios. Este último sendo um dos mais comentados, atualmente (BHATTARAI, 2009).

A aplicação de para-raios em linhas aéreas de energia contribui para melhorar o desempenho das mesmas frente a descargas, garantido, com isso, maior confiabilidade aos sistemas de energia. Para tal intento, estudos considerando o aterramento da rede

elétrica; as características das descargas atmosféricas incidentes; a suportabilidade da cadeia de isoladores; o local, a quantidade e a absorção de energia dos para-raios no circuito devem ser conduzidos.

A análise da incidência de uma descarga atmosférica em uma linha de distribuição é um excelente estudo de caso para se verificar os benefícios da aplicação de computação paralela em cálculo de transitórios eletromagnéticos. A seguir apresentam-se algumas justificativas:

- Para uma análise com incidência de descarga é necessário um passo de cálculo muito pequeno, já que o evento ocorre em microssegundos; o que exige maior esforço computacional.
- Por ser um sinal de alta frequência, a descarga faz com que os modelos dos componentes elétricos da rede sejam mais complexos, computacionalmente falando.
- Os parâmetros que caracterizam a descarga são variáveis (amplitude, tempos de frente e meia onda) em cada evento de incidência na rede. Do ponto de vista de uma análise estatística, é necessário que haja variações dos mesmos.
- A natureza não linear de alguns componentes presentes nas redes elétricas, como o para-raios. Isto implica em maior esforço computacional. Em muitos modelos, a solução é feita aplicando o método de Newton Raphson, a cada passo de cálculo, para cada componente.
- A análise pode envolver muitos componentes do sistema de energia.

Por causa das razões supracitadas, escolheu-se a incidência de uma descarga atmosférica em uma linha de distribuição para fazer um comparativo entre a computação paralela e sequencial sendo aplicadas ao cálculo de transitórios E, com isso, avaliar os benefícios da utilização daquela em relação a esta última técnica computacional.

No tópico a seguir é apresentada a metodologia do trabalho.

3 Metodologia

Neste trabalho será feita a aplicação de computação paralela ao cálculo de transitórios eletromagnéticos. Para tal intento, foi escolhido o caso da incidência de uma descarga atmosférica em uma linha de distribuição com para-raios.

O sistema elétrico em estudo é composto por uma subestação, um alimentador e uma fonte de corrente modelando a descarga atmosférica. A modelagem completa do sistema foi feita na plataforma do software PSCAD/EMTDC. A seguir, a mesma é apresentada detalhadamente.

A subestação foi modelada com uma fonte trifásica na frequência de 60 Hz, potência 100MVA, 168

kV. Um transformador 25MVA (168kV/34,5kV) é conectado a esta fonte.

O alimentador é multiaterrado e foi dividido em 20 subseções de 50 metros de comprimento, sendo cada uma delas compostas por uma linha aérea trifásica com neutro. A resistência de aterramento é 90 ohms. A geometria da mesma é apresentada na tabela 1, a seguir:

Tabela 1. Geometria da Linha

Condutor	Conexão de fase	X (a partir do centro da torre) (m)	Y (a partir do centro da torre) (m)
1	1	-1.1	10
2	2	0	10
3	3	1.1	10
Neutro	Conexão de fase	X (a partir do centro da torre) [m]	Y (a partir do centro da torre) [m]
1	4	0	11

A posição do neutro neste caso é similar ao cabo guarda em sistemas de transmissão.

A linha de distribuição com quatro cabos aéreos foi modelada utilizando o modelo “Universal Line Model”, o qual leva em conta a natureza distribuída e dependência dos parâmetros da linha com a frequência. Além do efeito pelicular e de proximidade (PSCAD, 2016).

A cada seção de 50 metros de comprimento, têm três para-raios de 40kV nominal, tipo “ABB metal-oxide”, num total de 63. Para modelar esse dispositivo, utilizou-se o modelo MOSA MWR (“Metal Oxide Surge Arrester Wide Range Model”) proposto por (BRITO, 2018). A curva de comportamento não linear do componente é dada na tabela a seguir:

Tabela 2. Característica IxV do Para-raios.

Corrente (kA)	Tensão (pu)
0.00001	0.63
0.000016	0.65
0.25	0.72
0.5	0.74
1	0.77
2	0.86
4	0.91
8	0.97
10	1.00
15	1.06
20	1.10

A descarga atmosférica é modelada com uma fonte de corrente, cuja saída é um sinal com amplitude da ordem de kA, tempo de frente e meia onda da ordem de microssegundos. A figura 1 ilustra o perfil do sinal de corrente e suas características.

No estudo proposto, a corrente de descarga será projetada para ter variações em seus parâmetros característicos. Um conjunto de 280 cenários foi

estabelecido. A tabela 3 mostra os valores escolhidos.

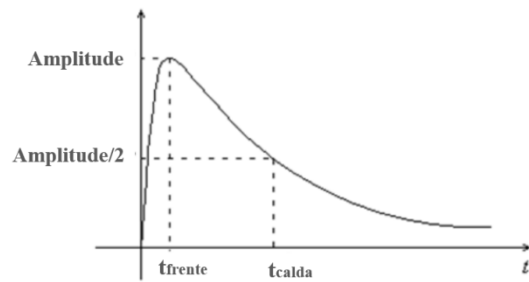


Figura 1. Corrente de descarga.

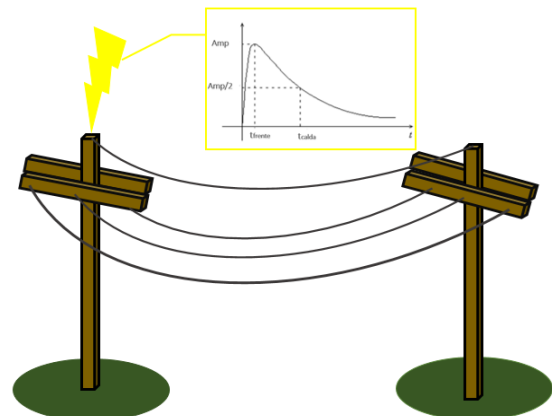


Figura 2. Incidência da descarga na rede elétrica.

Tabela 3. Parâmetros Característicos da Corrente.

Amplitude (kA)	Tempo de frente (us)	Tempo de calda (us)
10	0.5	50
20	1	75
30	2	100
40	3	150
50	4	x
60	5	x
70	6	x
80	x	x
90	x	x
100	x	x
Variações dos parâmetros		
10	7	4
Cenários	10x7x4	280

Estes cenários estabelecem um conjunto de entradas para um projeto cuja topologia não se modifica. Baseado nisso, o modelo de programação paralela SPMD foi escolhido para se analisar a aplicação de computação paralela ao cálculo de transitórios. Um computador com oito núcleos foi utilizado para as simulações. Os cenários foram divididos em sete núcleos do computador, sendo 40 cenários para cada

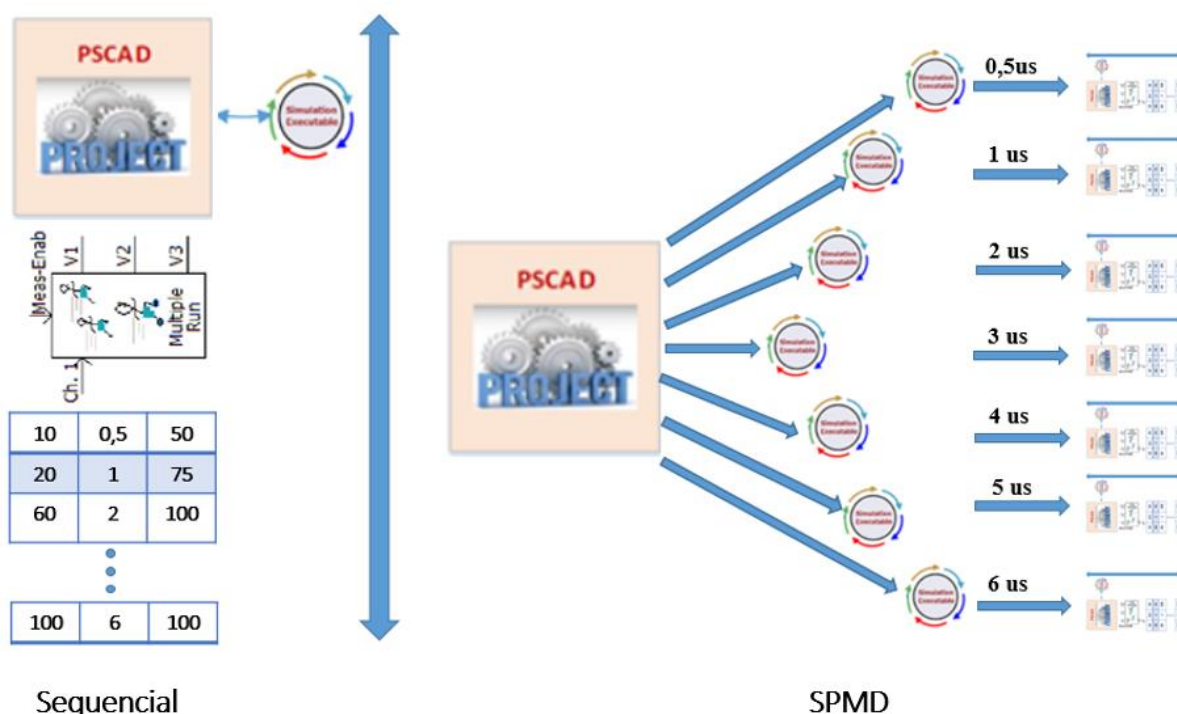


Figura 3. Modelos de programação computacionais implementados. Sequencial x SPMD.

um. A interface gráfica do software necessita de um dos núcleos para o processamento da mesma.

A simulação em paralelo foi conduzida de tal forma que os sete núcleos fossem utilizados simultaneamente. Uma ferramenta de automação do software PSCAD, denominada “Multiple Run”, foi programada para fazer a variação automatizada dos parâmetros da corrente de descarga que incide na rede. Por meio deste dispositivo, foram implementados 40 cenários em cada núcleo. A figura 3 apresenta uma ilustração dos modelos de programação implementados no trabalho.

Uma simulação executada sequencialmente também foi conduzida, na qual todos os cenários foram simulados em um único núcleo.

Ao final das simulações, um comparativo entre os tempos de simulação utilizando computação paralela e sequencial foi estabelecido. Gráficos com a distribuição de energia dos para-raios e tensões fase-neutro foram escolhidos para ilustrar o estudo.

O passo de cálculo utilizado na simulação foi de 10 ns. O tempo de duração da simulação foi de 4ms, com início a partir do regime permanente.

As simulações foram executadas em um computador Dell, modelo XPS 8700, processador Intel core i7, oito núcleos, (3,40 GHz). A versão do software PSCAD/EMTDC é a profissional, 4.6.2.

4 Resultados e discussão

Neste trabalho foram realizadas simulações envolvendo a incidência de uma descarga atmosférica

direta em uma linha de distribuição. A simulação executada em apenas um núcleo, sequencialmente, teve duração de 817 minutos e 57 segundos; já a simulação executada paralelamente durou 235 minutos. **Isso significa uma redução de 71,3% no tempo de simulação, devido à aplicação de computação paralela neste estudo de caso.**

As figuras 4, 5 e 6 apresentam as sobretensões geradas pela incidência da descarga atmosférica na rede elétrica. As subseções de 50 metros desde a subestação até o final da rede foram denominadas vãos. Sendo que o vão 11 é o ponto onde incide a descarga. A figura 7 apresenta a distribuição de energia nos para-raios do alimentador durante a incidência da descarga.

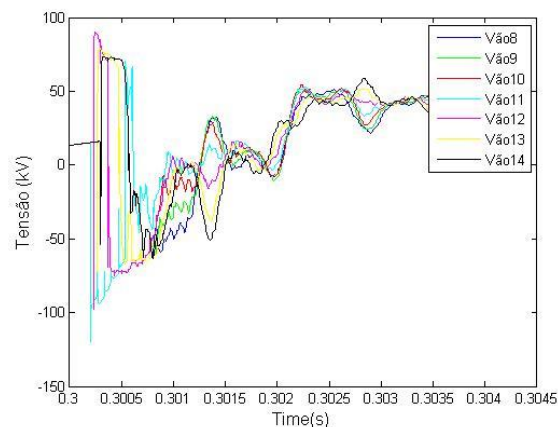


Figura 4. Tensão fase A-neutro nos vãos 8 a 14 do alimentador da rede.

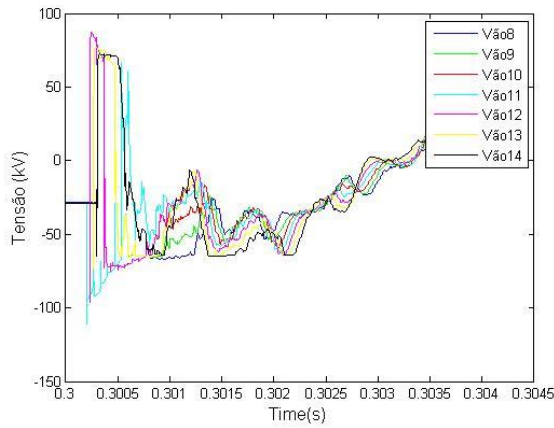


Figura 5. Tensão fase B-neutro nos vãos 8 a 14 do alimentador da rede.

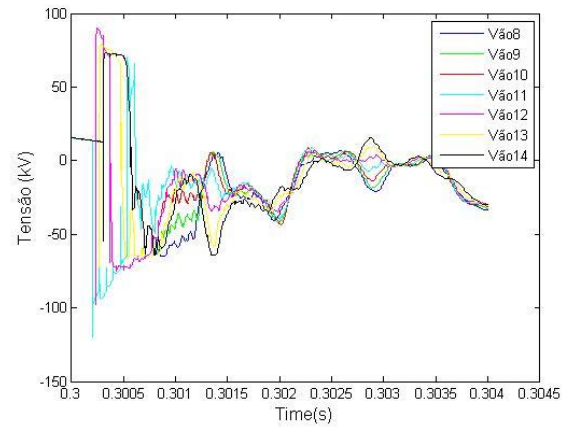


Figura 6 Tensão fase C-neutro nos vãos 8 a 14 do alimentador da rede.

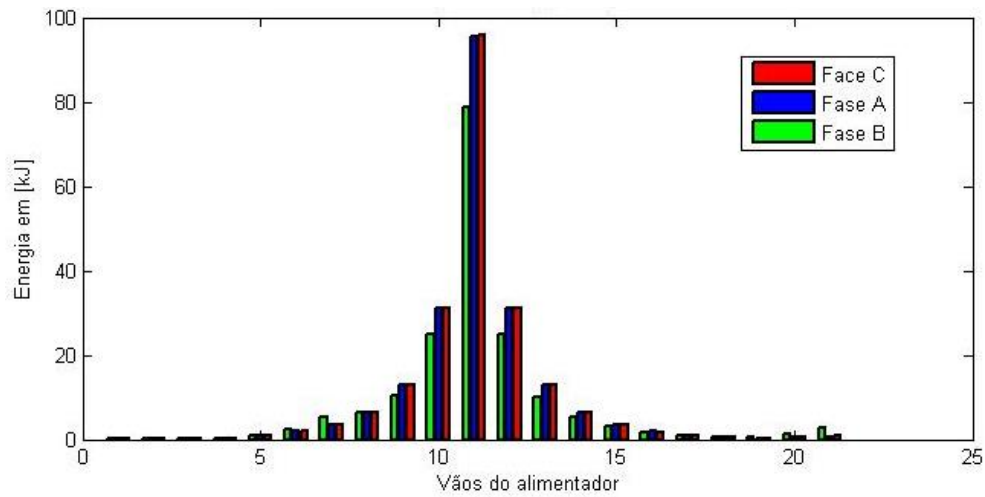


Figura 7. Distribuição de energia nos para-raios do alimentador.

A redução no tempo de simulação do cálculo de transitórios mostrou um dos benefícios da aplicação de computação paralela a este tipo de problema. Esses resultados indicam para os profissionais da área uma excelente ferramenta computacional para tornar o trabalho deles mais rápido e robusto. Isto, porque permite que um maior número de análises de problemas seja feito em um tempo muito menor que o realizado em um modelo de programação sequencial.

Outro aspecto que merece ser comentado, embora não tenha sido o foco deste trabalho, diz respeito à alocação de memória durante o processo de armazenamento de dados dos medidores da simulação. A princípio, o projeto tinha como objetivo armazenar os dados de todas as tensões fase-neutro e fase-terra nos vãos do alimentador; o que não foi possível por problemas com alocação de memória; conforme o retorno dado pelo software.

O experimento foi realizado nos núcleos de apenas uma máquina. No entanto, este trabalho também poderia ser realizado utilizando um sistema distribuído em vários computadores. Neste caso, os problemas com memória poderiam ser amenizados.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo de caso envolvendo a incidência de descarga atmosférica em uma rede de distribuição. Isto foi feito com o intuito de se evidenciar os benefícios da aplicação da computação paralela ao cálculo de transitórios eletromagnéticos. Um comparativo entre os tempos de simulação para o cálculo utilizando computação sequencial e paralela mostrou que esta última forneceu uma redução de 71,3% no tempo de execução quando comparada com a outra.

Destacaram-se, ainda, os problemas com alocação de memória para o armazenamento de dados dos medidores de sinais de tensão em vários pontos do sistema.

Novas pesquisas têm sido realizadas pelos autores, cujo objetivo é a utilização de vários computadores para a aplicação de computação paralela ao cálculo de transitórios. Acredita-se que nesse tipo de arquitetura os problemas com memória sejam amenizados.

Agradecimentos

Agradecemos a Capes, Fapemig e CNPq pelo apoio prestado neste projeto.

Referências Bibliográficas

- BARROS, H. M.; Filho, R.N.F.; Santos, M. G.; Soares, C.F.T..” Efficient Application of Parallel Processing with Standard Tools for Electromagnetic Transients Simulation.” Proc. IPST 2013, Vancouver, Canada, July 2013.
- BHATTARAI, R.; Harid, N.; Griffiths, H.; Haddad, A.(2009) Application of Surge Arresters for Lightning Protection of 33 kV Wood Pole Distribution Lines. International Conference of Electricity Distribution, June 2009.
- BRITO, V. S.; Lira, G. R. S.; Costa, E. G.; Maia, M. J. A. (2018) “A Wide-Range Model for Metal-Oxide Surge Arrester.” IEEE Transactions on Power Delivery, February, 2018.
- DEBNATH, J. K. et al. Graphics-Processing-Unit-Based Acceleration of Electromagnetic Transients Simulation. IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 31, NO. 5, October 2016.
- DOMMEL, H. W. (1969) “Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multi-phase networks.” Transactions on Power Apparatus and Systems, 88 (2), pp. 734–41.
- FALCAO, D.; Kaszkurewicz, E.; Almeida, H. L. (1992) “Application of Parallel Processing Techniques to the Simulation of Power System Electromagnetic Transients.” IEEE PES, New York.
- KIRK, D. B.; Hwu, W. W (2011). “Programando para processadores paralelos: Uma abordagem prática a programação de GPU.” Editora Campus/Elsevier. Rio de Janeiro, 2011.
- PSCAD/EMTDC version 4.6, User Guide , Manitoba HVDC Research Centre, junho 2017.
- SINGH, R.; Gole, A. M.; Graham, P; Muller, J. C.; Jayasekera, B.; Muthumuni, D. (2013) “Using Local Grid and Multi-core Computing in Electromagnetic Transients Simulation.” IPST International Conference Power System Transients, Vancouver, Canada, 2013.
- SOUZA, R. S. (2011) Desempenho de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas indiretas: análise de sensibilidade das diferentes modelagens. Dissertação. (Dissertação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.