

A utilização de SPICE para solucionar o problema de oscilações numéricas em simulações de sistemas elétricos de potência

Lucas Frizon Bagolin, Juliano Flores Riboli & ¹Leonardo Ulises Iurinic
Departamento de Engenharias e Ciência da Computação
Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Frederico Westphalen, Brasil
¹luiurinic@uri.edu.br

Abstract— ATP-EMTP is a free software used in power system simulation that was consecrated in the scientific community. However, this program can show numerical oscillation problems due the trapezoidal integration method, especially when the interaction of switching devices and power systems are simulated. Numerical oscillations are well managed by other free software called SPICE, which show the limitation of not having polyphasic power system models. In this context, the present work exhibits mean of constructing three-phase sources, three-phase switches and a π equivalent transmission line model for SPICE, using the LTspice version of this program. The interaction of a six-pulse rectifier with a power system is modeled in ATP-EMTP and LTspice and simulation results compared. The ATP-EMTP simulations shows high numerical oscillations while in LTspice the oscillations are not present.

Keywords— ATP-EMTP, Computer simulation, Electric power systems, Numerical oscillations, SPICE.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, os dispositivos baseados em eletrônica de potência se encontram espalhados em todos os níveis que constituem os Sistemas Elétricos de Potência (SEP), desde a geração e transmissão em altas tensões, até a distribuição em baixa tensão. Neste contexto, é importante poder analisar os efeitos causados pelos dispositivos eletrônicos existentes no SEP para poder identificar problemas e soluções, verificar projetos ou prever o desempenho de sistemas, entre outras coisas. Ainda, a grande complexidade que esta análise representa, torna a simulação computacional como a única forma viável para estudar a fundo os SEP [1].

Independentemente do método numérico adotado para realizar as simulações computacionais, estas podem ser classificadas em duas categorias: simulações no domínio da frequência e no domínio do tempo. A simulação no domínio do tempo é interessante em relação ao domínio da frequência por permitir avaliar a dinâmica do sistema simulado, transitórios de alta frequência, não linearidades e interfaces de controle [2]. Os dispositivos baseados em eletrônica de potência são caracterizados por modelos não lineares e que incorporam chaveamentos cíclicos ao longo do tempo. Sendo assim, é fundamental que a simulação no domínio do tempo seja feita utilizando um método de solução confiável. Ainda, quando partes de um SEP devem ser incluídas no estudo, é oportuno que

a ferramenta para simulação disponibilize modelos apropriados para este fim.

Na atualidade existem vários programas de computador desenvolvidos para simular SEP no regime do tempo e da frequência, permitindo também simular dispositivos baseados em eletrônica de potência. Alguns programas populares como SimPowerSystems; EMTP-RV; PSCAD; EMTDC e Micro Tran [3], possuem licenças de custo elevado e, por este motivo, existe grande interesse na utilização de programas gratuitos. O *Alternative Transient Program* (ATP-EMTP) [4] é o único programa gratuito que disponibiliza elementos para simular SEP e, apesar da sua popularidade, este programa é susceptível de apresentar problemas de oscilações numéricas (*chatter* ou *spikes*) quando certos tipos de chaveamentos são simulados sobre indutores e capacitores [1, 5]. Deste modo, o ATP-EMTP apresenta limitações nas análises que envolvam a interação de dispositivos chaveados com elementos indutivos e capacitivos, como por exemplo um SEP.

Devido à problemática das oscilações numéricas no ATP-EMTP e a intenção de utilizar *software* gratuito, surge como proposta deste trabalho usar o programa LTspice para simular elementos de um SEP. O LTspice é uma das várias versões do *Simulated Program with Integrated Circuits Emphasis* (SPICE) [6], desenvolvida originalmente pela empresa Linear Technologies e que atualmente pertence à Analog Devices [7]. A opção de utilizar o LTspice deve-se ao fato deste possuir uma interface gráfica amigável, alto desempenho, a possibilidade de criar novos componentes e a possibilidade de escolher outras técnicas numéricas para simulação de circuitos, as quais apresentam grande estabilidade e resolvem os problemas de oscilações numéricas existentes e inevitáveis no ATP-EMTP [8]. Em contrapartida, devido à ênfase do SPICE em circuitos eletrônicos, as diferentes versões livres ou gratuitas do SPICE não disponibilizam modelos prontos para o estudo e análise de SEP, tais como linhas de transmissão polifásicas, transformadores de potência, fontes trifásicas e outros elementos fundamentais, sendo necessária a criação destes modelos.

O trabalho apresentado em [9] mostra a potencialidade do LTspice para representar fontes e interruptores trifásicos, bem como linhas de transmissão trifásicas com parâmetros concentrados e acoplados sem a consideração da capacitância. O trabalho também compara as simulações de um chaveamento sobre uma carga indutiva pura utilizando o ATP-EMTP e o

LTspice, demonstrando assim que neste último as oscilações numéricas não existem enquanto que no ATP-EMTP, as oscilações aparecem. Neste contexto, no presente artigo é proposto um modelo π de linha de transmissão trifásica criada para o LTspice levando em consideração o efeito capacitivo, sendo assim, a continuação do trabalho apresentado em [9]. Também são expostos os resultados das simulações feitas em ATP-EMTP e LTspice de um retificador trifásico de 6 pulsos conectado em um SEP, permitindo assim avaliar a existência ou inexistência das oscilações numéricas.

Nas próximas seções serão explicados os modelos propostos desde um ponto de vista teórico e matemático, continuando com a explicação da sua implementação no programa LTspice. Dois estudos de caso são propostos para validar os modelos, finalizando com as respectivas conclusões do trabalho.

II. MODELOS DOS PRINCIPAIS COMPONENTES PARA O ESTUDO E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Os circuitos trifásicos de corrente alternada (CA) senoidal apresentam grandes vantagens técnicas e econômicas para a geração, transmissão e consumo da energia elétrica, sendo deste modo a principal configuração dos SEP [3]. Neste sentido, a presente seção explica os modelos matemáticos para os componentes trifásicos modelados no LTspice e utilizados no estudo de caso.

A. Fonte de tensão trifásica

Uma fonte de tensão trifásica pode ser modelada como a combinação de três fontes monofásicas de CA conectadas em estrela, com mesma amplitude e frequência, mas com uma defasagem de 120° elétricos entre as tensões de cada fase. As três fontes devem formar o centro da estrela mediante a interconexão dos seus terminais negativos, formando um nó acessível para colocar ou não de alguma impedância de neutro.

B. Interruptor trifásico controlado por tempo

O interruptor trifásico consiste em um elemento capaz de controlar a condução ou interrupção de correntes das fases do sistema em um tempo predeterminado, de forma simultânea em todas as fases ou não. É comum que as aberturas de cada fase sejam realizadas em instantes de tempo diferentes, coincidindo com a passagem da corrente por zero [10]. No entanto, para magnificar o possível efeito das oscilações numéricas, no presente trabalho os interruptores abrem obrigatoriamente no tempo programado, sem importar o valor da corrente. Pensando na possibilidade de simular ciclos de desconexão e reconexão de um religador, o modelo proposto é capaz de efetivar quatro ciclos de operação durante a simulação, consistindo cada ciclo em um conjunto de abertura-conexão para um interruptor normalmente fechado e conexão-abertura para um interruptor normalmente aberto.

C. Linha de transmissão com parâmetros concentrados

O modelo de linha de transmissão com parâmetros concentrados mais utilizado nos estudos de SEP é o modelo π , cujo modelo monofásico é apresentado na Fig. 1 [11]. O modelo monofásico pode ser facilmente implementado em qualquer programa para simulação de circuitos elétricos, simplesmente mediante a interconexão da resistência, indutância e capacitâncias da forma mostrada na Fig. 1. Por outro lado, uma

linha trifásica apresenta acoplamentos indutivos, e capacitivos entre os condutores e entre os condutores e a terra, características que dificultam a implementação prática do modelo.

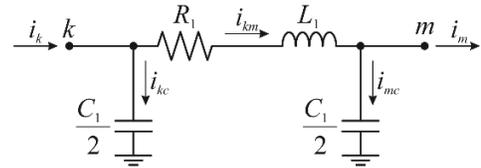


Fig. 1. Modelo π para linha de transmissão monofásica.

As Fig 2 e 3 representam uma linha de transmissão trifásica com retorno por terra, onde os nós k_i indicam as fases do terminal de entrada k e os nós m_i às fases do terminal de saída m . No modelo π , esta linha é representada por uma matriz de impedância série e uma matriz de admitância paralelo. A matriz de impedância série relaciona a diferença de potencial entre os terminais k e m com as correntes que atravessam estes terminais, enquanto que a matriz de admitância em paralelo relaciona as correntes derivadas do efeito capacitivo com as tensões existentes em cada terminal [11]. A partir da matriz de impedância série podem ser derivados os componentes resistivos e indutivos que conectam os terminais k e m . Já, a partir da matriz de admitância paralelo, podem ser determinados os capacitores conectados aos terminais k e m , os quais representam o efeito capacitivo da linha. Por outro lado, as matrizes que representam o modelo π podem ser determinadas pelas equações de Carson e podem ter mais de três linhas e três colunas quando existem condutores de neutro e cabos de guarda [11]. Entretanto, é possível aplicar a redução de Kron para reduzir a dimensão das matrizes a três linhas e três colunas [11], obtendo-se assim um circuito equivalente ao obtido pela combinação das Fig. 2 e 3.

A equação (1) mostra a matriz de impedância série, onde $R_{ii} + jX_{ii}$ são as impedâncias próprias das fases $i = 1, 2$ e 3 e, $R_{ij} + jX_{ij}$ são as impedâncias mútuas entre as fases i e j . Os elementos R_{ij} são números reais que aparecem ao considerar o retorno por terra da corrente segundo as equações de Carson. Também é possível que, depois de realizar a redução de Kron, os parâmetros mútuos reais e imaginários resultem em valores negativos. A equação (2) mostra a matriz de admitância paralelo, onde jB_{ii} são as susceptâncias próprias por fase e jB_{ij} são as susceptâncias mútuas entre fases.

$$Z_{serie} = \begin{bmatrix} R_{11} + jX_{11} & R_{12} + jX_{12} & R_{13} + jX_{13} \\ R_{12} + jX_{12} & R_{22} + jX_{22} & R_{23} + jX_{23} \\ R_{13} + jX_{13} & R_{23} + jX_{23} & R_{33} + jX_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y_{paralelo} = \begin{bmatrix} jB_{11} & -jB_{12} & -jB_{13} \\ -jB_{12} & jB_{22} & -jB_{23} \\ -jB_{13} & -jB_{23} & jB_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

O efeito da matriz de admitância paralelo (2), pode ser reproduzido mediante o circuito de capacitores mostrado na Fig. 3 que deve ser conectado nos terminais k e m da linha de transmissão mostrada na Fig. 2. Para determinar os valores dos

capacitores indicados na Fig. 3, as operações mostradas em (3) e (4) devem ser realizadas.

$$C_i = \left(B_{ii} - \sum_{j=1}^3 B_{ij} \right) / \omega \quad (3)$$

$$C_{ij} = \frac{B_{ij}}{\omega} \quad (4)$$

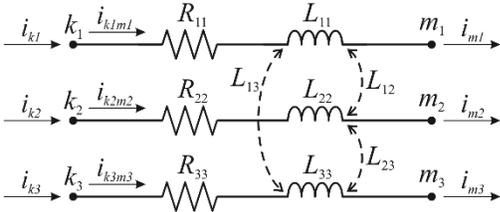


Fig. 2. Elementos representados pela matriz de impedância série da linha de transmissão, nos terminais k e m são conectados os capacitores da Fig. 3.

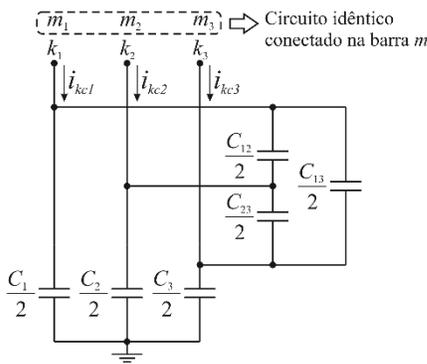


Fig. 3. Capacitores representados pela matriz de admitância em paralelo.

III. MODELAGEM DE COMPONENTES UTILIZANDO LTSPICE

O programa LTspice disponibiliza métodos para criação de novos blocos ou elementos denominados sub-circuitos, os quais servem para representar circuitos inteiros com suas entradas, saídas e parâmetros de funcionamento. Para a criação de um sub-circuito são requeridas três etapas fundamentais: a construção do sub-circuito; a criação de um símbolo e a associação do símbolo ao sub-circuito. A construção do componente pode ser feita mediante a interface gráfica ou por meio da programação na linguagem do SPICE, sendo permitida unicamente a utilização dos elementos já existentes nas bibliotecas do programa para a montagem deste sub-circuito.

Algumas diretivas próprias do LTspice são fundamentais na criação dos modelos, por conseguinte, estas são citadas e definidas abaixo:

- **.PARAM:** permite a criação de variáveis definidas pelo usuário e é utilizada basicamente em todas as modelagens a fim de associar um valor a cada variável. O nome da variável no circuito precisa estar entre chaves para que a expressão seja substituída pelo valor a ser atribuído pela diretiva **.PARAM**.

- **.MODEL:** define as características de determinados componente, um exemplo seria o estabelecimento das resistências associadas a um interruptor em cada estado, ligado ou desligado.

O arquivo que contém o conjunto de informações sobre as diretivas, modelos e parâmetros, bem como a lista dos componentes que formam o circuito junto com uma lista dos nós aos quais estes estão conectados, é denominado *netlist*.

A. Modelagem das Fontes Trifásicas de Tensão e Corrente

Para modelar a fonte de tensão trifásica foram utilizadas três fontes monofásicas independentes de tensão alternada, como se mostra na Fig 4. Neste modelo foram definidos certos atributos que permitem a modificação de parâmetros por parte de um usuário, sendo estes: a tensão de pico; frequência; defasagem inicial e o número de ciclos em que a fonte irá funcionar. Ainda, foram feitos dois blocos para representar dois tipos de fontes: fonte equilibrada e fonte desequilibrada. No primeiro componente é possível variar independentemente a defasagem e o módulo de cada fase. Observando a Fig 4, é possível notar que o terminal negativo da fonte trifásica é formado pelos nós an, bn e cn, enquanto que o terminal positivo é composto pelos nós ap, bp e cp. Os terminais negativos são comumente conectados à referência do circuito de forma direta ou através de uma impedância, formando assim uma fonte em estrela com ou sem impedância de neutro. Para modelar uma fonte trifásica de corrente, só é necessário substituir as fontes de tensão por fontes de corrente.

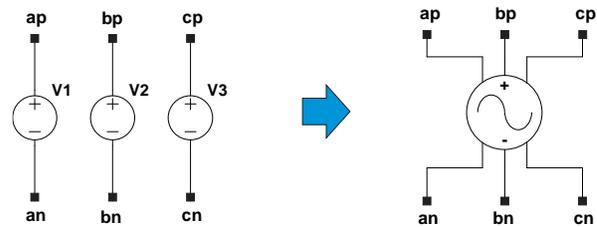


Fig. 4. Implementação da fonte de tensão trifásica no LTspice.

B. Interruptor controlado por tempo

O LTspice disponibiliza interruptores controlados por tensão denominados *switches*, sendo necessária uma adaptação para que possam ser controlados por tempo. Conforme ilustra a Fig 5, são utilizados três *switches* controlados por tensão e, nesse caso, oito fontes de tensão independentes ligadas em série para reproduzir os ciclos de abertura e fechamento do interruptor. Usando a diretiva **.MODEL**, é possível definir uma resistência desprezível para o estado ligado e uma resistência muito grande para o estado desligado de todos os *switches*. O limiar de tensão para a ativação (fechar) de cada *switch* foi escolhido arbitrariamente em 1 V (no LTspice, o *switch* é normalmente aberto como padrão). O controle do interruptor é feito a partir das fontes de tensão conectadas em série que reproduzem degraus de 2 V e -2 V através da função *pulse*, sendo que o parâmetro *Tdelay* de cada fonte indica o início do degrau e deve ser definido pelo usuário. Para explicar o funcionamento do interruptor controlado por tempo, será apresentado o seguinte exemplo baseado nas informações da Fig 5.

1) Exemplo explicativo

Os parâmetros Tc12, Tc13, Tc14, Top2, Top3 e Top4 são configurados com um valor muito alto ou zero, deste modo, as tensões das fontes V3 a V8, serão sempre nulas e não influenciarão no funcionamento do circuito. Os parâmetros Tc11 e Top1 são definidos com os valores t_1 e t_2 ($t_2 > t_1$), respectivamente. Deste modo, a tensão no terminal Control passará a valer 2 V a partir do instante t_1 , fechando assim os contatos dos *switches* nesse instante. Em t_2 , a fonte V2 é ativada com um degrau de -2 V, cancelando desta forma a tensão no nó Control e abrindo novamente os *switches*.

Percebe-se que com o número de fontes apresentado na Fig 5 é possível interagir com até quatro operações de fechamento e abertura, sendo que a combinação de fontes em série permite aumentar o número de operações. Contudo, como os três *switches* são operados pela mesma tensão de controle, as três fases são ligadas ou desligadas ao mesmo tempo, sem importar o valor de corrente que esteja atravessando os elementos. Os pontos de conexão do modelo segundo a Fig 5 são os nós ap, bp e cp como sendo as entradas e S01, S02 e S03 como sendo as saídas.

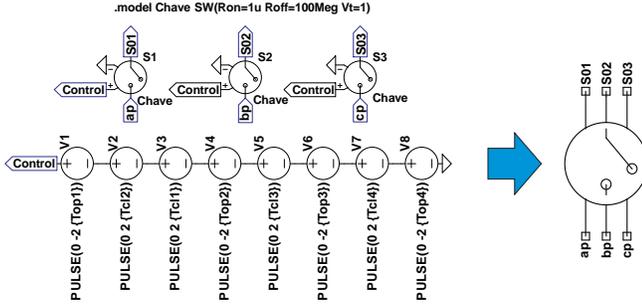


Fig. 5. Implementação do interruptor trifásico no LTspice.

C. Modelo tipo π da linha de transmissão trifásica

O objetivo deste modelo consiste em reproduzir os efeitos das matrizes apresentadas em (1) e (2) mediante a conexão de elementos disponíveis no LTspice. Deste modo, a Fig. 6 mostra o circuito utilizado no programa e a Fig. 7 as diretivas utilizadas. As impedâncias próprias de cada fase são modeladas com um resistor e um indutor conectados em série, cujos valores coincidem com os respectivos valores de resistência e indutância na diagonal da matriz (1).

A parte real da impedância mútua tem o efeito de gerar uma queda de tensão em uma fase, diretamente proporcional à corrente de outra fase. Por este motivo, foram usadas fontes de tensão dependentes de corrente para reproduzir este efeito, sendo que o ganho configurado para cada fonte é igual à componente real da impedância mútua da matriz (1). Por exemplo, conforme a Fig. 6, para reproduzir o parâmetro R_{12} da matriz (1) são utilizadas as fontes H21 e H12. A primeira lê a corrente que passa por H12 e multiplica esta corrente por R_{12} , gerando assim uma queda de tensão na fase 1, diretamente proporcional à corrente que passa pela fase 2. O análogo pode acontecer com a fonte H12, que reproduz a queda de potencial na fase 2 devido à corrente que atravessa a fase 1.

No LTspice é possível definir um fator de acoplamento entre indutores denominado com a letra k . Sendo assim, a parte

imaginária das impedâncias mútuas da linha de transmissão, representada na matriz (1), pode ser inserida no modelo da Fig 6 utilizando um fator de acoplamento k_{ij} . Este fator representa o acoplamento indutivo entre as fases i e j e é determinado mediante a seguinte expressão [12]:

$$k_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{X_i X_j}} \quad (5)$$

As admitâncias entre fases e entre cada fase e a terra estão presentes nos terminais de início e fim da linha de transmissão, conforme foi explicado na seção II.C.

Como se mostra na Fig 7, todos os parâmetros do modelo proposto são multiplicados por uma constante D que representa o comprimento da linha de transmissão e deve ser definida pelo usuário. Para determinar os valores das indutâncias e capacitâncias em Henry e Farad, o usuário também deve fornecer a frequência para calcular estes parâmetros.

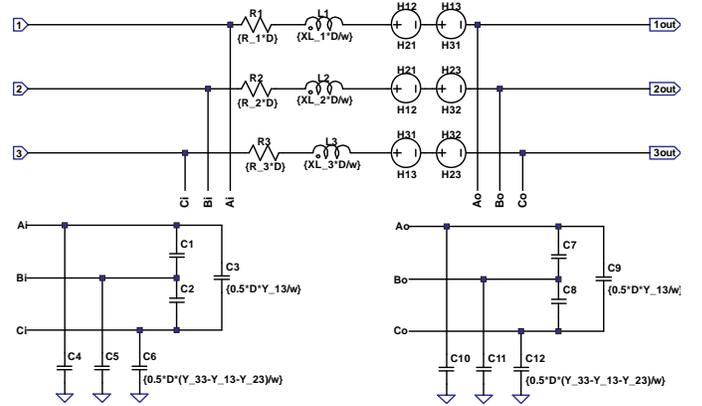


Fig. 6. Implementação do modelo PI para linha de transmissão trifásica no LTspice. Os nós 1, 2, 3, 1out, 2out e 3out são os pontos para conexão do modelo.

| Frequência para calcular as reatâncias | Impedância mútua: parte real | Admitância shunt fase-terra em uS (uMho) |
|--|--|--|
| .param freq_0=(freq) | [Ohm] | .param Y_11=(Y11) |
| .param w=2*pi*freq_0 | .param R_12=(R12) | .param Y_22=(Y22) |
| .param w=2*pi*freq_0 | .param R_13=(R13) | .param Y_33=(Y33) |
| .param w=2*pi*freq_0 | .param R_23=(R23) | |
| Comprimento da linha (Km) | Impedância mútua: parte imaginária [Ohm] | Admitância shunt fase-fase em uS (uMho) |
| .param D=(Dist) | O fator de acoplamento k é calculado a partir de M | (colocar o valor absoluto, o - é considerado no cálculo da capacitância) |
| .param R_1=(R1) | .param M_12=(M12) k1 L1 L2 (M12/sqrt(XL1*XL2)) | .param Y_12=(Y12) |
| .param R_2=(R2) | .param M_13=(M13) k2 L1 L3 (M13/sqrt(XL1*XL3)) | .param Y_13=(Y13) |
| .param R_3=(R3) | .param M_23=(M23) k3 L2 L3 (M23/sqrt(XL2*XL3)) | .param Y_23=(Y23) |
| .param XL_1=XL1 | .param XL_2=XL2 | |
| .param XL_3=XL3 | | |

Fig. 7. Parâmetros para implementação do modelo PI da Fig. 6.

IV. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

A seguir serão apresentados dois estudos de caso: o primeiro para validar os modelos realizados no LTspice e o segundo para demonstrar a capacidade do LTspice para evitar as oscilações numéricas. Todas as simulações foram no domínio do tempo com uma duração de 200 ms.

A. Descrição dos estudos de caso

A Fig. 8 esquematiza o SEP utilizado nos estudos de caso, sendo que cada caso consiste na simulação de uma carga diferente conectada ao sistema. O sistema elétrico equivalente é constituído por uma fonte trifásica equilibrada de 60 Hz, com tensão eficaz de linha de 308 V, impedâncias de sequência positiva e negativa iguais a $(0,02+j0,03) \Omega$ e impedância de sequência zero igual a $(0,059+j0,088) \Omega$. Os valores das

impedâncias de sequência positiva, negativa e zero foram escolhidos para representar o equivalente de Thévenin no terminal secundário de um transformador de distribuição, visando reproduzir valores típicos de correntes de falta. O interruptor trifásico S_1 energiza a linha de transmissão no instante de 10 ms após o início da simulação e desconecta a mesma em 160 ms.

A linha de transmissão consiste em uma configuração típica de linha aérea de baixa tensão, com disposição vertical de condutores e com um comprimento de 300 m. Como a linha possui neutro, foi aplicada a redução de Kron às matrizes de impedância e admitância para obter matrizes de três linhas e três colunas, as quais poderão ser representadas com os circuitos das Fig. 2 e 3. As matrizes que representam a linha foram obtidas de [13] e são as seguintes:

$$Z_{serie} = \begin{bmatrix} 0,831 + j0,705 & 0,212 + j0,416 & 0,203 + j0,374 \\ 0,212 + j0,416 & 0,801 + j0,739 & 0,189 + j0,442 \\ 0,203 + j0,374 & 0,189 + j0,442 & 0,785 + j0,759 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}, \quad (6)$$

$$Y_{paralelo} = \begin{bmatrix} j4,515 & -j1,391 & -j0,682 \\ -j1,391 & j4,550 & -j1,542 \\ -j0,682 & -j1,542 & j4,039 \end{bmatrix} \frac{\mu S}{km}, \quad (7)$$

Para o primeiro estudo de caso foi utilizada uma carga resistiva conectada em estrela com neutro solidamente aterrado. As resistências das fases A, B e C são iguais a 90 Ω , 40 Ω e 60 Ω , respectivamente. Para o segundo estudo de caso foi utilizado um retificador trifásico de seis pulsos não controlado, alimentando uma carga resistiva de 96,8 Ω . Salienta-se que os diodos utilizados nos modelos realizados em LTspice e ATP-EMTP são diodos ideais. O primeiro estudo de caso serve para validar os modelos implementados no LTspice mediante a sua comparação com os resultados da simulação do mesmo sistema modelado em ATP-EMTP. O segundo estudo de caso demonstra a capacidade do LTspice para eliminar as oscilações numéricas.

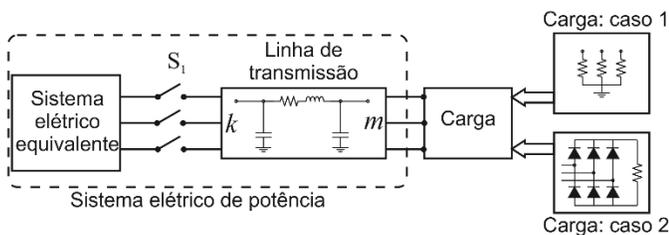


Fig. 8. Desenho esquemático do sistema elétrico utilizado nos estudos de caso.

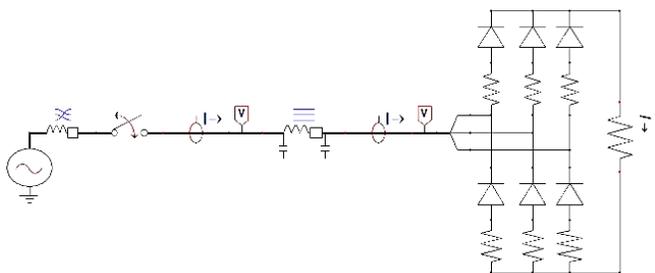


Fig. 9. Modelo do retificador implementado no ATPdraw: as resistências em série com os diodos foram colocadas para permitir a convergência da simulação e possuem valores desprezíveis.

B. Resultados do caso 1

A seguir são apresentadas as tensões e correntes da fase A no ponto de conexão da carga com a linha de transmissão. As Fig. 10 e 11 apresentam as tensões e correntes em função do tempo, obtidas com os programas LTspice e ATP-EMTP, respectivamente. Em ambas as figuras, é possível ver a sobreposição dos resultados, indicando que os modelos desenvolvidos no LTspice funcionam de forma equivalente aos modelos próprios do ATP-EMTP. Ainda, a pesar da conexão e desconexão da linha de transmissão realizadas com o interruptor S_1 , em nenhum programa foram verificadas oscilações numéricas. É necessário salientar que as tensões e correntes na carga resultaram assimétricas por causa do desequilíbrio da carga trifásica. Os resultados obtidos com ambos os programas para as fases B e C são análogos aos obtidos para a fase A.

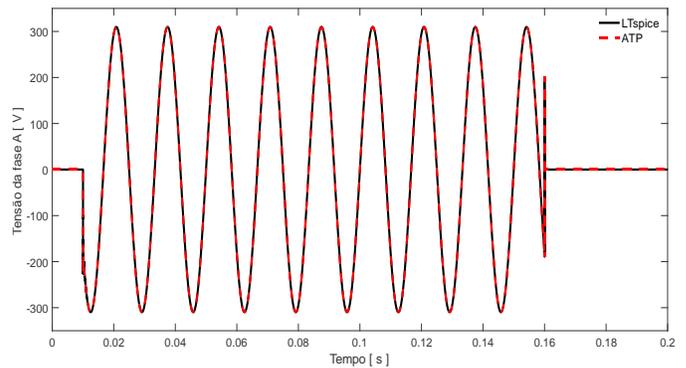


Fig. 10. Tensões na fase A no ponto de conexão da carga, obtidas com LTspice e ATP-EMTP.

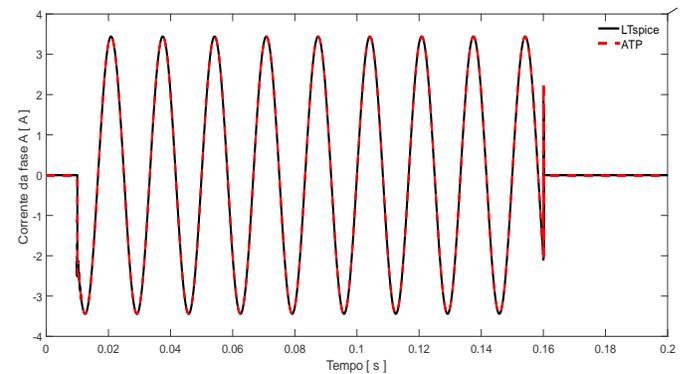


Fig. 11. Correntes na fase A da carga, obtidas com LTspice e ATP-EMTP.

C. Resultados do caso 2

As Fig. 12 e 13 mostram as tensões e correntes da fase A no ponto de conexão da carga com o SEP, resultantes das simulações em LTspice e ATP-EMTP, respectivamente. As figuras mostram claramente que a simulação no LTspice produziu os resultados esperados, mostrando seis transitórios de tensão em cada ciclo devido à comutação dos diodos e um comportamento típico da corrente para o retificador de seis pulsos com carga resistiva. Por outro lado, os resultados obtidos com o ATP-EMTP mostram tensões e correntes que passam de valores positivos para negativos em cada intervalo de integração, bem como picos de alta tensão. Estes resultados não representam ao sistema real e são devidos à existência de

oscilações numéricas. O efeito das oscilações numéricas torna os resultados da simulação impossíveis de serem interpretados e utilizados.

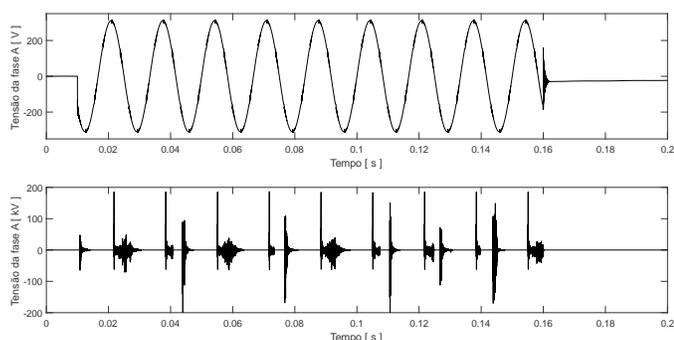


Fig. 12. Tensões na fase A da carga obtidas com LTspice (superior) e ATP-EMTP (inferior)

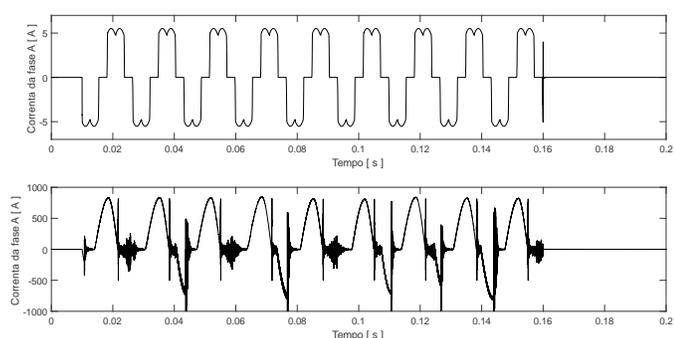


Fig. 13. Correntes na fase A da carga obtidas com LTspice (superior) e ATP-EMTP (inferior)

V. CONCLUSÕES

A simulação computacional de circuitos elétricos no domínio do tempo forma parte das principais ferramentas para estudos e projetos em eletrônica de potência. A utilização de *software* livre e/ou gratuito é muito interessante, por permitir um intercâmbio de conhecimentos dinâmico e econômico entre todos os pesquisadores, facilitando assim a transmissão e reprodução de resultados científicos. Sendo assim, o presente trabalho explorou a possibilidade de utilizar o programa LTspice para estudos de SEP, especialmente na interação do SEP com dispositivos de eletrônica de potência.

Os resultados do trabalho mostram que existem formas de representar componentes polifásicos básicos dos SEP utilizando o LTspice, tais como fontes de tensão ou corrente, interruptores e linhas de transmissão com parâmetros concentrados. Ainda, as comparações dos resultados de simulações entre ATP-EMTP e LTspice, mostraram que o LTspice possibilita a redução e controle das oscilações numéricas, o que muitas vezes é impossível de fazer no ATP-EMTP devido a impossibilidade de alterar o método de integração numérica no mesmo.

Salienta-se ainda que a principal limitação do modelo de linha de transmissão proposto para o LTspice, é a impossibilidade de considerar a todas as indutâncias mútuas como sendo negativas. Isto deve-se à impossibilidade de ter fatores de acoplamento indutivo negativos entre três indutores de forma simultânea, já que se trata de uma configuração fisicamente impossível de indutores e que não pode ser interpretada pelo LTspice. Uma possível solução para este problema consiste na combinação apropriada de fontes dependentes e indutores, opção que, por não formar parte dos objetivos do presente trabalho, pretende ser estudada em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos especialmente a Cantarelli & Vissotto Engenharia pela contribuição técnica para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Watson and J. Arrillaga, *Electromagnetic Transients Simulation*. London: IET, 2003.
- [2] J. A. Martinez-Velasco, G. A. Capolino and H. Henao, "ATP: a suitable tool for the simulation of power converters and drives," [Proceedings] 1992 IEEE Workshop on Computers in Power Electronics, Berkeley, CA, USA, 1992, pp. 87-100.
- [3] S. Hay, A. Ferguson, "A review of power system modelling platforms and capabilities. Modelling Requirements for GB Power System Resilience during the transition to Low Carbon Energy". IET report for the Council of Science and Technology, 2015.
- [4] ATP Canadian Users Group, 2 de Junho de 2018. [online]. Disponível em: <<http://www.ece.mtu.edu/atp/>>. [Acesso em: 2 de Junho de 2018].
- [5] L. F. R. Ferreira, B. D. Bonatto, J. R. Cogo, N. C. de Jesus, H. W. Dommel and J. R. Martí, "Comparative Solutions of Numerical Oscillations in the Trapezoidal Method used by EMT-based Programs". [Proceedings] The 12th International Conference on Power System Transients – IPST 2015. Cavtat, Croacia.
- [6] W. L. Nagel, "SPICE 2: a computer program to simulate semiconductor circuits". EECs Department University of California, Berkeley Technical Report No. UCB/ERL M520 1975.
- [7] Analog Devices. [online]. Disponível em: <<http://www.analog.com/>>. [Acesso em: 30 de Junho de 2018].
- [8] M. Engelhardt, "SPICE Differentiation". *LT Journal of Analog Innovation*. Vol. 24, No. 4; p.10-16, 2015.[online]. Disponível em: <<http://cds.linear.com/docs/en/lt-journal/LTJournal-V24N4-2015-01.pdf>>. [Acesso em: 27 de Junho de 2018].
- [9] J. F. Riboli, L. U. Iurinic, "Modelagem de componentes trifásicos utilizando a plataforma ltspice para evitar oscilações numéricas", [Proceedings] 2017 International Congress of Management, Technology and Innovation, Erechim, RS, Brasil, 2017.
- [10] ATP Canadian Users Group, 1998. "ATP Rule Book". Can/Am EMT User Group. [S.l.]: [s.n.].
- [11] W. H. Kersting. *Distribution system modeling and analysis*, 2nd ed., Las Cruces: CRC Press, 2006.
- [12] W. H. Hayt, Jr.; J. E. Kemmerly and S. B. Durbin, *Análise de Circuitos em Engenharia*. McGraw Hill/Bookman, Porto Alegre, 8^{ed} edição. 2003.
D. R. Meija de Lima. "Desenvolvimento de modelos de redes de baixa tensão para estudos de fluxo de potência", Monografia, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.