

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MODELOS DE LINHA DISPONÍVEIS NO ATP EM TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS DE MANOBRA

MATHEUS GARCIA RIBEIRO(1);ÓSIS EDUARDO SILVA LEAL(2);ALBERTO RESENDE DE CONTI(3);FELIPE DE OLIVEIRA SILVA ZANON(4);RAFAEL SILVA DE OLIVEIRA(4);SILVIO GIUSEPPE DI SANTO(5)

ÁGORA ENGENHARIA DE POTÊNCIA(1);UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ(2);UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (3);CEMIG GT(4);ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO(5)

RESUMO

Neste informe técnico, pretende-se avaliar sobretensões provenientes da energização e do religamento tripolar rápido em linhas de transmissão com o uso da ferramenta ATP. Serão considerados os modelos de Bergeron e JMarti, ambos já disponíveis na biblioteca do ATP, e o modelo ULM implementado recentemente via *foreign Models*. Enquanto a comunidade técnica ainda não dispõe do modelo ULM de forma nativa no ATP, busca-se avaliar alternativas para estudos de religamento tripolar, tendo em vista as dificuldades de aplicação do modelo JMarti durante o período de tempo morto.

PALAVRAS-CHAVE

1.0 INTRODUÇÃO

A modelagem de Linhas de Transmissão para estudos de transitórios eletromagnéticos não é recente e, ainda hoje, desperta debates entre engenheiros e pesquisadores. O problema encontra-se na técnica de solução das equações do telegrafista considerando parâmetros variáveis com a frequência. Vários são os modelos disponíveis na literatura que buscam representar o comportamento da linha em estudos de transitórios eletromagnéticos com a maior fidelidade possível e menor esforço computacional. Entretanto, poucos modelos estão disponíveis em simuladores de transitórios eletromagnéticos como os *softwares* ATP, EMTP e PSCAD. O uso de simuladores é recomendado pois facilita a modelagem de redes em cenário mais realístico, contendo diferentes componentes como linhas de transmissão, transformadores, para-raios e cargas, além de facilitar a reprodutibilidade dos resultados.

As análises de transitórios eletromagnéticos para especificações de equipamentos em Leilões da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por razões regulatórias, devem ser realizadas no ATP [1]. Dentre os modelos de linhas disponíveis no ATP, os mais utilizados no Brasil são o modelo Bergeron [2], que assume parâmetros constantes calculados em uma frequência definida pelo usuário, e o modelo JMarti [3] que inclui a dependência dos parâmetros com a frequência no domínio modal. Dentre estes, o modelo JMarti é o mais rigoroso. Todavia, estudos recentes mostram que este modelo, implementado no *software* ATP, não apresenta comportamento satisfatório nas simulações de religamento tripolar rápido [4]. Nesse caso, o modelo apresenta, durante o tempo morto do religamento, um decaimento da carga residual superior ao esperado. Atualmente, um grupo de pesquisadores brasileiros busca a implementação do modelo ULM (*Universal Line Model*) [5] no *software* ATP, que considera a dependência dos parâmetros da linha com a frequência diretamente no domínio das fases. O modelo ULM possibilita inclusive a análise mais acurada de transitórios eletromagnéticos em linhas subterrâneas e representa o estado da arte sobre o assunto.

No Brasil é prática comum a representação da linha com o modelo Bergeron assumindo parâmetros calculados na frequência fundamental (60 Hz). Tal abordagem padroniza os estudos e simplifica a reprodutibilidade dos resultados. No entanto, por não representar a dependência dos parâmetros da linha com a frequência, os picos de tensão transitórios calculados ao longo da linha tendem a ser sobrestimados. Outra abordagem é definir uma frequência específica no cálculo do modelo, buscando representar de forma mais fiel o transitório.

Portanto, neste informe técnico, pretende-se avaliar sobretensões provenientes da energização e do religamento tripolar rápido em uma linha de transmissão com características construtivas comumente utilizadas no Sistema Interligado Nacional (SIN), com comprimentos de 50, 100 e 200 km, em uma rede teste. Todas as simulações serão

realizadas no *software* ATP utilizando os modelos Bergeron, JMarti, ambos já disponíveis na biblioteca do *software* ATP, e o modelo ULM implementado recentemente via *foreign Models*. Nas análises, o modelo ULM é tomado como referência pois representa o estado da arte sobre o assunto. As manobras são realizadas seguindo a metodologia já consolidada nas análises de Projeto Básico em empreendimentos no SIN, com abordagem de chaveamentos estatísticos pelo método de Monte Carlo. Ao final, as distribuições acumuladas das sobretensões obtidas para os diferentes modelos são comparadas, de modo a avaliar o impacto dos resultados obtidos de cada simplificação nos estudos que irão compor os procedimentos de coordenação de isolamento do projeto. Com os estudos realizados, enquanto a comunidade técnica ainda não dispõe do modelo ULM de forma nativa no *software* ATP, busca-se avaliar do ponto de vista das sobretensões transitórias de manobra, especialmente na manobra religamento tripolar, se o uso do modelo Bergeron, definido em uma frequência específica, apresenta resultados mais fidedignos em detrimento ao Bergeron calculado em 60 Hz e ao JMarti. Também é investigado se a técnica de ajuste vetorial [6] aplicada aos parâmetros da linha, é capaz de melhorar a resposta do modelo JMarti em estudos de religamento tripolar.

2.0 MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PARA SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

O cálculo das tensões e correntes ao longo de uma Linha de Transmissão polifásica parte de equações diferenciais já conhecidas na literatura técnica [7], comumente denominadas equações do telegrafista. Tomemos a equação diferencial das tensões, no domínio da frequência, por exemplo:

$$\frac{d^2[V]}{dx^2} = [Z(\omega)][Y(\omega)][V] = [\gamma_v]^2[V], \quad (1)$$

onde $[V]$ é um vetor contendo as tensões de fase na linha, $[Z(\omega)]$ e $[Y(\omega)]$ são as matrizes de impedâncias séries ($R(\omega) + j\omega L(\omega)$) e admitâncias shunts ($G(\omega) + jB(\omega)$) da linha, respectivamente e $[\gamma_v]$ é a função de propagação das tensões de fase. Sabe-se que os parâmetros da linha guardam dependência com a frequência e o fato de o solo não se comportar como um condutor ideal também irá interferir nas matrizes $[Z(\omega)]$ e $[Y(\omega)]$. Para levar em conta o efeito das perdas no solo, em *softwares* de cálculos de transitórios, é comum o uso das correções de Carson no cálculo dos parâmetros, que apesar de suas simplificações, é válido dentro do propósito de estudo do presente informe, uma vez que a relação $\sigma_{solo} \gg \omega \varepsilon_{solo}$ é garantida [8].

É evidente que o desafio na resolução dos problemas envolvendo transitórios eletromagnéticos em linhas está na representação adequada de seus parâmetros de forma a caracterizar adequadamente o comportamento físico da linha. Entre os modelos disponíveis na literatura, os que se destacam por sua maior utilização e disponibilidade em softwares de transitórios eletromagnéticos são: modelo Bergeron [2], o modelo JMarti [3] e o modelo de linha universal (ULM) [5].

O modelo Bergeron considera os parâmetros constantes e artificialmente distribuídos calculados em uma frequência especificada pelo usuário e com desacoplamento modal para linhas polifásicas. O desacoplamento modal é realizado com uso de uma matriz real calculada na frequência definida para o cálculo dos parâmetros [2]. Dentre os três modelos, o modelo Bergeron requer uma quantidade menor de cálculos, considera maiores simplificações e exige menor esforço computacional. Em contrapartida, este é o modelo menos preciso e é recomendado apenas para modelar linhas em zonas distantes de uma área onde ocorre um evento transitório [9]. Entretanto, é um modelo amplamente utilizado em estudos de transitórios de manobra no SIN. Para facilitar a reprodutibilidade dos resultados em outras plataformas, por exemplo o ANAFAS [10], é comum o cálculo dos parâmetros na frequência fundamental (60 Hz). Por outro lado, para estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra, uma alternativa ao uso da frequência fundamental para o cálculo dos parâmetros, é considerar uma frequência específica que estima a frequência natural do transitório, podendo ser calculada como $1/4\tau$, sendo τ o tempo de trânsito de um modo aéreo da linha de transmissão [11].

O modelo JMarti leva em conta a dependência dos parâmetros com a frequência e para linhas polifásicas a solução é realizada no domínio modal, por meio de uma matriz de transformação real e constante, calculada em uma frequência definida pelo usuário. Tal simplificação dificulta o uso do modelo em linhas subterrâneas ou linhas aéreas fortemente assimétricas, cuja matriz de transformação modal guarda forte dependência com a frequência [12]. Dessa maneira, sua precisão é limitada a linhas aéreas simétricas ou quase simétricas, já que os elementos das matrizes de transformação variam pouco ao longo da frequência [13]. No entanto, sua implementação atual no *software* ATP apresenta resposta não adequada em baixas frequências [14], como é o caso do tempo morto durante o religamento tripolar rápido em linhas não compensadas. Conforme foi apresentado em [4], seu decaimento é muito mais acentuado do que o esperado. Ainda em [4] é mostrado que o modelo JMarti disponível no *software* EMTP possui comportamento que condiz com o esperado, o que indica que melhorias implementadas nessa plataforma corrigiram seu comportamento anômalo quanto a estudos em baixa frequência. Cabe destacar que na literatura há um modelo de linha que considera matrizes de transformação real e variante na frequência [15], para ir além dos casos citados. Entretanto, verificou-se que essa estratégia não garante a estabilidade numérica e apresenta dificuldades na síntese das matrizes de transformação para determinadas situações. Dessa forma, houve a motivação de propostas de modelos alternativos que fossem desenvolvidos diretamente no domínio das fases.

Por fim, o modelo ULM resolve as equações do telegrafista diretamente no domínio das fases, evitando simplificações relativas à transformação modal. Esse modelo utiliza o domínio modal apenas como passo intermediário nos cálculos dos parâmetros e mantém o domínio das fases para a resolução das equações do telegrafista [16]. O modelo ULM é o mais geral dos três modelos, pois ele é capaz de representar com acurácia linhas aéreas altamente assimétricas, bem como linhas subterrâneas. Sua robustez, acurácia e eficiência computacional estão em constante melhoria. Atualmente, o modelo ULM está disponibilizado em *softwares* pagos como o PSCAD e EMTP. Recentemente o modelo foi implementado no *software* ATPDraw, em sua versão 7.4 [17], entretanto, ainda requer maiores aprimoramentos para melhorar sua performance e velocidade. Conforme discutido em [17] a metodologia utilizada em [18], baseada em *foreign models*, será uma evolução natural do modelo implementado no ATP, pois oferece maior eficiência computacional. A Tabela 1 sintetiza as principais características dos modelos mencionados.

Tabela 1 – Síntese dos principais modelos disponíveis em softwares de simulação.

Modelo	Domínio	Técnica de ajuste	Cálculo dos Parâmetros	Eficiência	Recomendações de uso	Software
Bergeron	Modal	-	Artificialmente Distribuídos e constantes na frequência	Alta	Linhas em zonas distantes de uma área onde ocorre um evento transitório.	ATP EMTP PSCAD
JMarti	Modal	Método de Bode [3]	Distribuídos e variantes na frequência	Médio	Linhas simétricas ou linhas com fraca assimetria.	ATP EMTP PSCAD
ULM	das Fases	Ajuste Vetorial [6]	Distribuídos e variantes na frequência	Baixa	Linhas simétricas, assimétricas e cabos subterrâneos.	ATP ⁽¹⁾ EMTP PSCAD

⁽¹⁾ Disponível em implementação e model no *software* ATPDraw 7.4 [17] ou via *foreign models* diretamente no ATP [18].

3.0 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO E METODOLOGIA

No presente informe técnico pretende-se avaliar o comportamento dos modelos de linha JMarti, Bergeron e ULM. O modelo JMarti foi simulado utilizando os parâmetros obtidos com a rotina *Line Constants* nativa do *software* ATP que utiliza a técnica de Bode para realizar o ajuste das curvas, denominado “JM(ATP)”, e com os parâmetros obtidos por uma rotina implementada pelos autores no Matlab, assumindo $G = 0$ S/km, cujo ajuste é realizado com a técnica de ajuste vetorial [6], denominado “JM(VF)”. O objetivo é avaliar se a resposta do modelo pode ser melhorada por meio do refinamento da estratégia de cálculo e ajuste dos parâmetros da linha. Em ambos os modelos a frequência de 5 kHz foi utilizada para o cálculo da matriz de transformação. O modelo de Bergeron foi simulado com os parâmetros calculados pela rotina *Line Constants* na frequência de 60 Hz, denominado “B_60 Hz”, e calculado na frequência $f_n = 1/4\tau$, onde $\tau = \ell/c$ sendo ℓ o comprimento da linha e c a velocidade da luz, denominado “B_fn”. Por fim, o modelo ULM utilizado, definido como o modelo de referência foi implementado via *foreign models* como proposto em [18]. Os parâmetros do modelo ULM foram obtidos em uma rotina implementada no Matlab que utiliza a técnica de ajuste vetorial para realizar o ajuste.

Com o intuito de avaliar os modelos, foram realizadas simulações de energização e religamento tripolar em uma linha aérea de circuito duplo e tensão nominal de 345 kV e, composta por 12 condutores, sendo 2 condutores por fase espaçados de 45,7 cm, com raio interno de 0,74 cm, raio externo de 2,961 cm e resistência DC de 0,0666 Ω /km, um cabo para-raios (PR1) de aço 3/8” com raio externo de 0,476 cm e resistência DC de 3,87 Ω /km e um cabo para-raios (PR2) OPGW 14,4 mm com raio externo de 0,36 cm e resistência DC de 0,5833 Ω /km. A silhueta da linha e sua geometria são apresentadas na Figura 1.

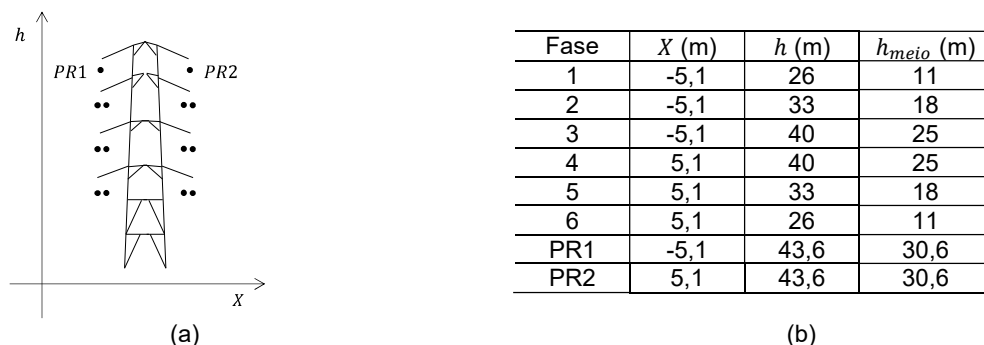


Figura 1 – Linha de transmissão de 345 kV sendo (a) Silhueta da linha e; (b) as coordenadas dos condutores. Em (b) X é a posição horizontal dos condutores, h é altura na torre e h_{meio} representa a altura no meio do vão.

Para aproximar os estudos de um cenário mais realista, a rede IEEE 39 barras (sistema *New England* de transmissão) descrita em [19] e ilustrada na Figura 2 será utilizada. Pequenas modificações foram realizadas na rede para simplificar as simulações, a saber: as máquinas síncronas e seus controladores da rede original foram substituídas por fontes de tensão em série com uma impedância de curto-circuito; os tapes dos transformadores foram mantidos em suas posições centrais, portanto, a inicialização do modelo é distinta daquela apresentada na referência [19] e; o transformador e a respectiva carga da barra 15 foram desligados. A linha a ser estudada é aquela conectada entre as barras 15 e 16 considerando três comprimentos distintos, a saber 50, 100 e 200 km. Todas as linhas, exceto a linha a ser estudada, foram modeladas com o modelo de Bergeron perfeitamente transposto calculado em 60 Hz.

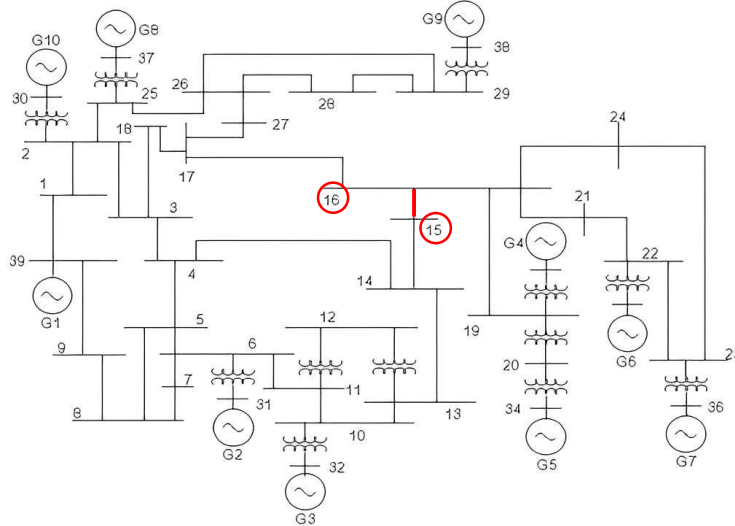


Figura 2 – Rede IEEE 39 barras *New England* de transmissão [20].

A metodologia de simulação e coleta de dados baseou-se nos procedimentos e diretrizes geralmente tomados em estudos de projeto básico no SIN [21]. Portanto, tanto para os estudos de manobras de energização quanto para os estudos de religamento tripolar foram realizadas 200 simulações cujos instantes de tempo para os chaveamentos são sorteados de acordo com uma curva Normal, considerando máxima discrepância entre contatos igual a $\frac{1}{4}$ de ciclo da frequência fundamental em ± 4 desvios padrão. Os chaveamentos foram realizados no terminal conectado na barra 15 supondo que o terminal conectado na barra 16 esteja aberto. Por fim o circuito paralelo foi mantido aberto em ambos os terminais (situação de circuito desligado).

Com as simulações realizadas, são tabeladas as sobretensões médias, desvios padrão e sobretensões máximas no terminal aberto da linha, sendo realizadas comparações entre valores médios e valores máximos. A equação utilizada para os cálculos dos desvios percentuais é dada pela Equação (2).

$$\Delta(\%) = \frac{Valor_{modelo} - Valor_{ULM}}{Valor_{ULM}} \times 100\%, \quad (2)$$

onde o termo $Valor_{modelo}$ refere-se à média das sobretensões ou a sobretensão máxima encontrada dentre os 200 chaveamentos ambas obtidas com o modelo de linha a ser avaliado.

4.0 RESULTADOS

4.1 ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

A Tabela 2 apresenta os desvios percentuais, calculados pela Equação (2), entre os valores máximos de sobretensões dentre as 200 simulações obtidos na terminação aberta da linha para cada modelo. De maneira geral, todos os desvios absolutos calculados não excederam 8%. O modelo com maior desvio foi o “B_fn” para a linha de 50 km ($f_n = 1,5 \text{ kHz}$), o “JM(ATP)” para a linha de 100 km e o “JM(VF)” para a linha de 200 km cujos desvios absolutos são 6,44 %, 7,11 e 4,91%, respectivamente. Para o caso com linha de 50 km de comprimento três modelos apresentaram desvios superiores a 4%, o que indica uma dificuldade dos modelos em representar adequadamente o fenômeno transitório de energização em linhas curtas onde esperam-se oscilações em frequências mais elevadas devido as reflexões nas terminações da linha. Isso está intimamente ligado ao tempo de propagação das reflexões de uma terminação a outra. Na linha de 50 km esse tempo é de aproximadamente 1,67 ms enquanto na linha de 200 km esse tempo é de aproximadamente 6,67 ms, ou seja, as reflexões atingem a terminação oposta 4 vezes mais rápido na linha de 50 km. Os menores desvios foram observados nos modelos “JM(VF)” [-1,63 %] e [-1,17 %] e “B_60Hz” [+1,11%] para os casos de 50 km, 200 km e 100km, respectivamente. Esse resultado indica uma melhora

significativa em estudos de fenômenos de baixa frequência na resposta do modelo JMarti quando se assume $G = 0$ S/km e ajuste realizado pela técnica de ajuste vetorial. Cabe destacar que conclusões fundamentadas apenas nos desvios observados para os valores máximos podem ser precipitadas, pois nas simulações realizadas os instantes de fechamentos das chaves sorteados não são exatamente iguais para todos os modelos. Tal fato mostra a importância de uma análise estatística para melhorar a interpretação dos resultados. Essa constatação é importante especialmente sob a óptica dos procedimentos de coordenação de isolamento de linhas áreas, que podem se basear em métodos estatísticos na definição das sobretensões transitórias.

Tabela 2 – Desvios percentuais dos valores máximos de sobretensões no terminal aberto durante a energização. Em azul, destacam-se os menores desvios e em vermelho os maiores desvios para cada caso analisado.

ℓ (km)	B 60Hz	B fn (f_n)	JM(ATP)	JM(VF)
50	-4,18 %	-6,44 % (1,500 kHz)	-4,57 %	-1,63 %
100	+1,11 %	+1,85 % (0,475 kHz)	+2,02 %	+4,91 %
200	+1,38 %	-4,27 % (0,375 kHz)	-7,11 %	-1,17 %

A Tabela 3 é equivalente à Tabela 2, porém são mostrados os desvios calculados com a média das sobretensões obtidas após os 200 casos simulados. Os resultados confirmam a melhoria na resposta do modelo JMarti com o ajuste realizado com a técnica de ajuste vetorial e $G = 0$ S/km, “JM(VF)”, haja vista que os desvios são inferiores a 1%. Cabe destacar que os desvios para o modelo JMarti nativo, “JM(ATP)”, também são inferiores a 1%. Tal fato evidencia a robustez do modelo JMarti mesmo em estudos de linhas aéreas em circuito duplo como é o caso da linha estudada. Também pode-se notar que o uso de uma frequência cujo período é próximo de 4 vezes o tempo de trânsito da linha, assumindo linha sem perdas, pode melhorar significativamente a resposta do modelo Bergeron em estudos de manobra de energização.

Tabela 3 – Desvios percentuais dos valores médios de sobretensões no terminal aberto durante a energização.

ℓ (km)	B 60Hz	B fn (f_n)	JM(ATP)	JM(VF)
50	+3,20 %	-0,25 % (1,500 kHz)	-0,45 %	-0,07 %
100	+0,45 %	+1,56 % (0,475 kHz)	-0,86 %	-0,53 %
200	+4,04 %	-0,47 % (0,375 kHz)	-0,66 %	-0,91 %

Com base nos resultados obtidos, é interessante notar que o uso do modelo de Bergeron calculado em 60 Hz não necessariamente apresentará sobretensões mais elevadas, como pode ser visto no caso da linha de 100 km, quando o modelo “B_fn” calculado assumindo $f_n = 0,750$ kHz apresenta maiores valores médio e máximo nas sobretensões calculadas. Além disso, para o caso com linha de 50 km, o valor máximo obtido com o modelo “B_60Hz” é 4,18 % menor que o valor obtido com o modelo de referência.

Uma forma de comparar a equivalência entre modelos é considerar que as distribuições das sobretensões calculadas respeitam uma distribuição do tipo Normal e, a partir disso, realizar um teste de hipótese entre os modelos para verificar se estatisticamente as médias podem ser consideradas iguais [13]. A Figura 3 apresenta as funções densidade de probabilidade calculadas com os dados estatísticos provenientes de cada modelo simulado e os respectivos testes de hipóteses, considerando significância de 5%. Verifica-se a impossibilidade de generalizar as considerações acerca do modelo de Bergeron, uma vez que nas manobras considerando comprimento de 100 km, há equivalência entre o modelo “B_60Hz” os modelos mais rigorosos, mas não há equivalência do modelo “B_fn” com os modelos mais rigorosos. Por outro lado, em todas as condições estudadas, os modelos JMarti mostraram-se equivalentes ao modelo ULM.

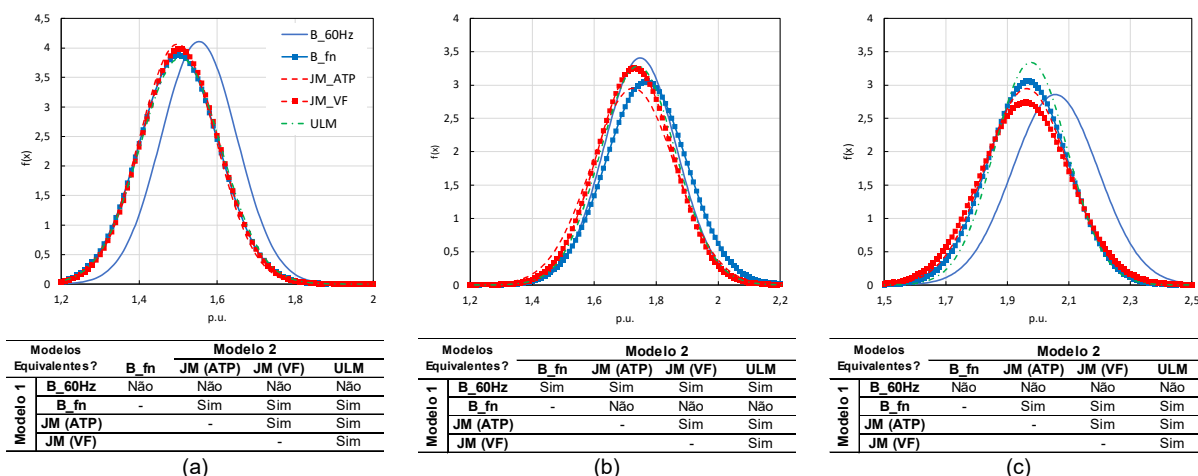


Figura 3 – Funções densidade de probabilidade calculadas e respectivos testes ‘de hipóteses para análises de energização de linha assumindo (a) $\ell = 50$ km; (b) $\ell = 100$ km e; (c) $\ell = 200$ km.

4.2 RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Conforme comentado previamente, o modelo JMarti implementado atualmente no ATP não responde de maneira satisfatória em estudos de fenômenos com baixas frequências (próximas a zero) [4], tornando-o não recomendável para análises de religamento tripolar de linhas de transmissão não compensadas, uma vez que durante o tempo morto do religamento, há predominantemente excitação de componente DC. Dessa forma, é fundamental verificar se os modelos JM(VF) e ULM responderão de maneira satisfatória na condição citada. A Figura 4, ilustra a resposta dos modelos JM(ATP), JM(VF) e do ULM. Nota-se que a resposta do modelo JM(ATP) apresenta uma maior atenuação na tensão durante o tempo morto, resultado condizente com aqueles mostrados em [4]. Por outro lado, a resposta dos modelos JM(VF) e ULM condiz com o esperado, ou seja, praticamente não apresenta decaimento da tensão armazenada na linha. Isso confirma, que modificações na etapa de cálculo e ajuste dos parâmetros da linha é suficientemente capaz de resolver o comportamento anômalo do modelo JMarti, disponibilizado na biblioteca do *software* ATP, em estudos envolvendo fenômenos semelhantes ao religamento tripolar.

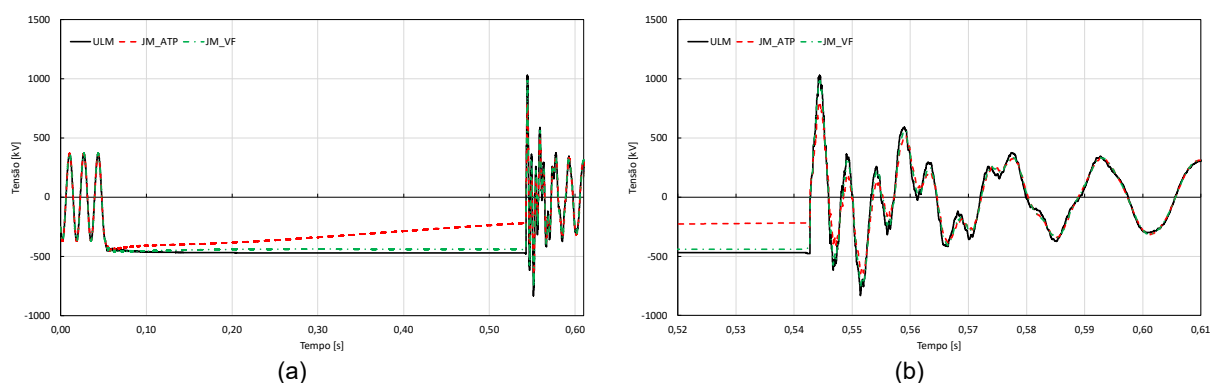


Figura 4 – Resposta dos modelos no religamento tripolar (a) perfil de tensão no transitório para todo o período simulado e; (b) perfil de tensão transitório no religamento.

De maneira análoga às Tabelas 2 e 3, as Tabelas 4 e 5 apresentam as comparações entre valores máximos e médios das sobretensões, respectivamente, para os estudos de religamento tripolar. Conforme esperado, os resultados obtidos com o uso do modelo JM(ATP) apresentam menores sobretensões se comparados aos demais, uma vez que a carga residual armazenada no instante do religamento é inferior ao esperado. Para os demais modelos, de forma semelhante ao que foi verificado na condição de energização de linha, os desvios encontram-se em uma faixa cujo valor absoluto é inferior a 8%.

Considerando inicialmente somente o modelo de Bergeron, tem-se avaliações análogas ao que foi concluído nas análises de energização de linha, ou seja, não é possível generalizar a expectativa quanto ao desempenho deste modelo, pois pode-se notar que não necessariamente o uso da frequência de cálculo igual a 60 Hz irá sobrestimar as sobretensões transitórias. Apesar disso, no caso do religamento tripolar, verifica-se que o modelo calculado em 60 Hz sempre apresenta sobretensões superiores ao “B_{fn}”.

Tabela 4 – Desvios percentuais dos valores máximos de sobretensões no terminal aberto no religamento tripolar.

ℓ (km)	B _{60Hz}	B _{fn} (f_n)	JM(ATP)	JM(VF)
50	+2,70 %	+0,88 % (1,500 kHz)	-6,91 %	+2,32 %
100	+1,91 %	-1,79 % (0,475 kHz)	-21,18 %	-0,42 %
200	+0,16 %	-3,85 % (0,375 kHz)	-23,75 %	-5,66 %

Tabela 5 – Desvios percentuais dos valores médios de sobretensões no terminal aberto no religamento tripolar.

ℓ (km)	B _{60Hz}	B _{fn} (f_n)	JM(ATP)	JM(VF)
50	-2,65 %	-5,98 % (1,500 kHz)	-10,44 %	-4,30 %
100	-1,03 %	-7,29 % (0,475 kHz)	-15,27 %	-6,16 %
200	+1,37 %	+0,03 % (0,375 kHz)	-20,50 %	+1,65 %

Finalmente, considerando as análises e comparações estatísticas entre as médias dos modelos, nota-se comportamento mais errático que a condição de energização. Por exemplo, o modelo de Bergeron calculado em 60 Hz é equivalente ao modelo ULM em todas as condições estudadas, enquanto os demais não são, conforme pode ser visto na Figura 5.

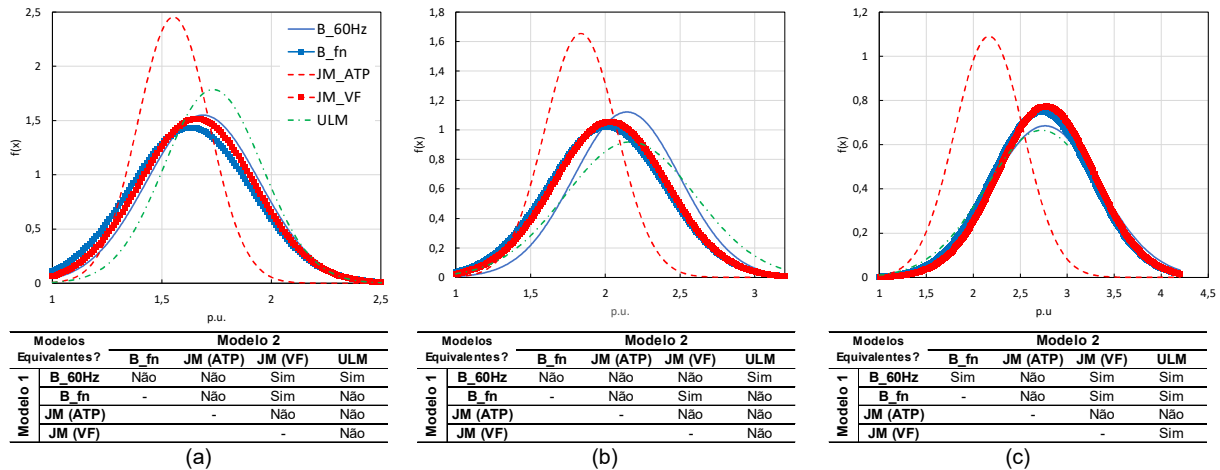


Figura 5 – Funções densidade de probabilidade calculadas e respectivos testes de hipóteses para análises de religamento tripolar, assumindo (a) $\ell = 50 \text{ km}$; (b) $\ell = 100 \text{ km}$ e; (c) $\ell = 200 \text{ km}$.

5.0 CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

O presente informe técnico trouxe comparações entre o comportamento de diferentes modelos computacionais de linhas de transmissão durante transitórios de manobra. Foram considerados modelos disponíveis nativamente no *software* ATP, assim como modelos customizados. Para tanto, lançou-se mão do modelo de Bergeron calculado na frequência nominal do sistema “B_60 Hz”; Bergeron calculado na frequência natural do modo aéreo “B_fn”; modelo nativo JMarti do ATP “JM (ATP)”; modelo melhorado JMarti “JM (VF)” e modelo ULM implementado via *foreign models*, sendo este último a referência.

Considerando a rede IEEE 39 barras para os testes, foram realizadas comparações entre máximas e médias sobretensões, sendo que neste último caso, foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos, ao comparar as médias das sobretensões calculadas entre modelos por meio de testes de hipótese. Nesses testes, verificou-se a igualdade entre estimadores de variância para testar a igualdade das médias.

No cenário de energização de linha, os desvios absolutos não excederam 8% para os casos estudados, comparando tanto sobretensões médias quanto máximas. Com relação ao modelo JMarti, constatou-se que tanto a versão atualmente implementada no ATP quanto aquela que considera a melhoria proposta pelos autores no ajuste dos parâmetros do modelo, mostraram-se equivalentes ao modelo ULM. Com relação ao modelo de Bergeron, verificou-se que não é possível generalizar seu comportamento a priori, uma vez que foram verificadas situações cujas sobretensões calculadas com o modelo em frequência específica, foram superiores àquelas verificadas com o modelo calculado em 60 Hz. Além disso, nem sempre o modelo calculado em frequência própria mostra-se equivalente ao modelo ULM.

Nas análises de religamento tripolar, verifica-se que o uso do modelo JMarti com os parâmetros dados pela rotina *Line Constants*, nativa do ATP, não é recomendável, pois esse modelo não representa adequadamente o comportamento da tensão residual da linha de transmissão. A atenuação acentuada da tensão residual durante o tempo morto observada no JM(ATP) produz como consequência sobretensões muito menores àquelas realmente observáveis neste tipo de manobra. Por outro lado, as melhorias implementadas no cálculo dos parâmetros do modelo JMarti foi capaz de melhorar sua resposta. Como esperado o modelo ULM também representa adequadamente o comportamento da tensão residual durante o tempo morto.

Por fim, de maneira análoga às conclusões alcançadas para as análises de energização de linha, não é possível afirmar que o modelo de Bergeron calculado em 60 Hz sempre apresentará resultados mais conservadores, pois foi possível verificar condições que as sobretensões calculadas com esse modelo foram inferiores à referência, além disso, em todas as condições estudadas, observou-se equivalência deste modelo com o ULM.

6.0 REFERÊNCIAS

- [1] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Procedimentos de rede, ONS, www.ons.org.br.
- [2] DOMMEL, H. (1969). Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-88, no. 4, pp. 388-399.
- [3] MARTI, J. R. (1982). Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-101, no.1, pp. 147-157.
- [4] RIBEIRO, M. G., PEREIRA, C. E. M. (2022). Análises de Transitórios de Manobra em Linhas de Transmissão Aéreas Considerando Diferentes Modelos Computacionais. XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro.
- [5] MORCHED, A.; GUSTAVSEN B.; TARTIBI M. (1999). A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables. in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 3, pp. 1032-1038.

- [6] GUSTAVSEN B.; SEMLYEN A. (1999). Rational approximation of Frequency domain response by vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1052-1061.
- [7] ZANETTA JR., L. C. (2006). *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. 1ª ed., São Paulo: Livraria da Física.
- [8] LIMA G. S.; DE CONTI A. (2016). Extension of a modal-domain transmission line model to include frequency-dependent ground parameters. *Electric Power Systems Research*, vol. 138, 2016, pp. 120-130.
- [9] RAMOS-LEAÑOS, O., IRACHETA. (2010). R. Wide-band line model implementation in Matlab for EMT Analysis, North American Power Symposium 2010, Arlington, TX, USA, pp. 1-8.
- [10] CEPEL. (2023). Análise de faltas simultâneas – ANAFAS. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/anafas-2/>.
- [11] BICKFORD, J. B., MULLINEUX, N., & REED, J. R. (1976). *Computation of power-system transients*. London: IEE Monograph Series, n. 18.
- [12] AMETANI A.; OHNO T.; NAGAOKA N. (2015). *Cable System Transients: Theory, Modeling and Simulation*.
- [13] WEDEPOHL, L. M.; NGUYEN; H. V., IRWIN; G. D. (1996). Frequency-dependent transformation matrices for untransposed transmission lines using Newton-Raphson method, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 3, p. 1538-1546.
- [14] BAÑUELOS-CABRAL, E.S., GUTIÉRREZ-ROBLES, J.A., GARCÍA-SÁNCHEZ, J.L. *et al.* (2019) Accuracy enhancement of the JMarti model by using real poles through vector fitting. *Electr Eng* 101, 635–646.
- [15] MARTI, L. (1988). Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 3, p. 1099–1110.
- [16] GUSTAVSEN, B. (2017). Optimal Time Delay Extraction for Transmission Line Modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 32, n. 1, p. 45-54.
- [17] ATPDraw. (2023). ATPDraw Home. ATPDraw. Disponível em: <https://www.atpdraw.net/downloads.php>
- [18] ZANON, F. O.S., LEAL, O. E.S., DE CONTI, A. (2021). Implementation of the universal line model in the alternative transients program, EPSR.
- [19] CIGRE WG C4.503. (2018). TB 736: Power System Test Cases for EMT-Type Simulation Studies.
- [20] ILLINOIS CENTER FOR A SMARTER ELECTRIC GRID (ICSEG). (2023). IEEE 39-Bus System. Disponível em: <https://icseg.itl.illinois.edu/ieee-39-bus-system/>.
- [21] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. (2019). Diretrizes para a elaboração de projetos básicos para empreendimentos de transmissão – estudos elétricos, especificação das instalações, de equipamentos e de linhas de transmissão.
- [22] MORETTIN, Pedro Alberto e BUSSAB, Wilton de Oliveira. (2004). *Estatística básica*. São Paulo: Saraiva.

DADOS BIOGRÁFICOS

- (1) **MATHEUS GARCIA RIBEIRO**
Graduado em Engenharia de Energia e Automação Elétricas pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2014) e pós-graduando na área de Sistemas de Potência na mesma Instituição com pesquisa relativa à modelagem de Linhas de Transmissão Subterrâneas para estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra. Possui experiência em estudos elétricos em regime permanente e transitórios eletromagnéticos para especificação de equipamentos e avaliação da performance de sistemas. Atualmente é consultor independente na área de estudos elétricos e fundador da Ágora Engenharia de Potência, com experiência prévia na Hitachi Energy, FIGENER Engenheiros Associados e ISA CTEEP (departamento de Estudos e Planejamento da Expansão).
- (2) **ÓSIS EDUARDO SILVA LEAL**
Engenheiro eletricista, graduado pela Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológica Santo Agostinho - Montes Claros/MG, com Mestrado e Doutorado em Sistema de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Possui experiência em desenvolvimento e acompanhamento de projetos e processos licitatórios, experiência em assessoria técnico judicial e perícia judicial. Atualmente é Professor pesquisador na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, campus Pato Branco.
- (3) **ALBERTO RESENDE DE CONTI**
Alberto De Conti possui graduação (1999), mestrado (2001) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), onde é atualmente professor associado. Atua nas áreas de transitórios eletromagnéticos, descargas atmosféricas, proteção elétrica e compatibilidade eletromagnética. É autor de mais de 150 artigos publicados em periódicos científicos ou apresentados em congressos científicos e de dois capítulos de livro. É orientador de doutorado e mestrado no PPGEE/UFMG, bolsista de produtividade nível 1-D do CNPq e bolsista do programa PPM da FAPEMIG. É membro do Cigré-Brasil, atuando como secretário do WG 4.57, e membro sênior do IEEE.
- (4) **FELIPE DE OLIVEIRA SILVA ZANON**
Graduado em Engenharia Elétrica pelo CEFET-MG (2017) e Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração Engenharia de Potência pela UFMG (2019), com pesquisa relativa à modelagem de Linhas de Transmissão Aéreas através do modelo ULM no ATP. Possui experiência em estudos elétricos em regime permanente e transitórios eletromagnéticos. Atualmente é Engenheiro de Planejamento do Sistema Elétrico na Cemig GT.
- (5) **RAFAEL SILVA DE OLIVEIRA**
Rafael Silva de Oliveira, graduado em engenharia industrial elétrica pelo CEFET-MG em 2010 e mestrado em engenharia elétrica pelo UFMG em 2017. Trabalha como engenheiro de planejamento elétrico de geração e transmissão na Cemig GT desde 2017. Possui experiência na área de estudos envolvendo fluxo de potência, transitórios eletromecânicos e transitórios eletromagnéticos.
- (6) **SILVIO GIUSEPPE DI SANTO**
Possui graduação em Engenharia Elétrica pela UNESP (2007), Mestrado (2010), Doutorado (2012) e Livre-docência (2022), todos em Engenharia Elétrica, na área de Sistemas de Potência, pela POLI - USP. Atualmente é Professor Associado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo no Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica (PEA). Atua na área de Sistemas Elétricos de Potência, desenvolvendo pesquisas em qualidade de energia elétrica, integração e análise de sistemas em HVDC e HVAC, localização de faltas em linhas de transmissão e distribuição, integração e análise de Geração Distribuída (GD) no âmbito de redes elétricas inteligentes (Smart Grids).