

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

ANÁLISES DE TRANSITÓRIOS DE MANOBRA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS CONSIDERANDO DIFERENTES MODELOS COMPUTACIONAIS

MATHEUS GARCIA RIBEIRO; CARLOS EDUARDO DE MORAIS PEREIRA(1)
USP(1)

RESUMO

As discussões em torno da modelagem de Linhas de Transmissão (LTs) com a finalidade de representá-las em estudos de transitórios eletromagnéticos não são recentes, principalmente quando o assunto é a correta consideração da dependência dos parâmetros com a frequência nos programas computacionais. O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma breve contextualização teórica sobre os principais modelos de LTs disponíveis nos programas ATP e EMTP (antigo EMTP-RV) e, com bases em simulações de energização e religamento tripolar de LTs aéreas em circuito simples ou duplo em uma rede simplificada, analisar e comparar os surtos de tensão resultantes.

PALAVRAS-CHAVE

Transitórios eletromagnéticos, coordenação de isolamento, modelos computacionais, linhas de transmissão.

1.0 INTRODUÇÃO

A modelagem de elementos para estudos de transitórios eletromagnéticos possui importância considerável nas análises e especificação de equipamentos.

Durante esta etapa, busca-se representar equipamentos reais por meio de modelos matemáticos que deveriam representar o comportamento daqueles, durante eventos transitórios no sistema elétrico como surtos de manobra e atmosféricos, com a finalidade de especificar os níveis admissíveis dos equipamentos que serão adquiridos.

As discussões em torno da modelagem de linhas de transmissão (LTs) com a finalidade de representar estes elementos em estudos de transitórios eletromagnéticos não são recentes e um dos tópicos com mais publicações relacionadas a este assunto é a correta representação da dependência dos parâmetros com a frequência em programas computacionais.

Tradicionalmente, há modelos que não levam em conta a dependência dos parâmetros com a frequência e são conhecidos como Parâmetros Constantes (PC) ou Bergeron [1], cujos parâmetros e funções de propagação são calculados em uma única frequência e no domínio modal. Geralmente, a frequência de cálculo deste tipo de modelo é a nominal de operação (50 ou 60 Hz), por questões de conservadorismo e facilidade na validação do modelo. Pode-se ainda estimar uma frequência dominante no transitório com base no tempo de propagação da onda viajante e calcular os parâmetros nessa frequência [2].

A utilização do modelo com parâmetros constantes é o que mais vem sendo empregado nos estudos de projeto básico no SIN, que por questões regulatórias define a ferramenta ATP como software de cálculo.

Na mesma ferramenta, ainda há o modelo conhecido por JMarti [3], que leva em conta a dependência dos parâmetros com a frequência no domínio modal, mas possui algumas simplificações no equacionamento.

Atualmente, o modelo que consta como estado da arte para linhas de transmissão em simulações de transitórios eletromagnéticos é derivado do *Universal Line Model* (ULM) [4], que leva em conta a dependência dos parâmetros com a frequência e utiliza equacionamento no domínio de fases. No software EMTP (antigo EMTP-RV), este modelo recebe o nome de *Wideband model* [5].

O presente trabalho tem como objetivo apresentar as bases conceituais e teóricas que embasam estes modelos e em seguida, as principais diferenças nos resultados entre eles do ponto de vista de surtos de manobra em LTs aéreas, buscando capturar os impactos práticos nos máximos valores obtidos para esses surtos e as consequências no procedimento de coordenação de isolamento da linha. Tendo em vista a natureza estatística desse tipo de estudo [6], também é realizada uma análise entre as distribuições de probabilidade obtidas após as simulações.

Para isso serão realizadas análises de energização e religamento tripolar de LTs aéreas em circuito simples e duplo em um sistema simplificado composto apenas por uma impedância de curto-circuito.

Além dessas análises comparativas, serão apresentadas algumas limitações que o modelo JMarti, presente no ATP, apresenta ao realizarmos análises de religamento tripolar.

Além de verificar as diferenças práticas entre distintas modelagens e as limitações do ATP com relação a seu modelo que leva em conta a dependência dos parâmetros com a frequência, espera-se verificar se há prejuízos na utilização obrigatória da ferramenta ATP em estudos de projeto básico pelos agentes transmissores, dadas as limitações de modelos disponíveis na ferramenta em questão.

No primeiro Item do trabalho é feita a introdução sobre o tema. No segundo item é feito um breve apanhado teórico sobre os principais modelos de LTs disponíveis nos programas computacionais atualmente. No terceiro, são apresentadas as metodologias utilizadas nas simulações e comparações entre resultados. No quarto e quinto item são feitas as análises e conclusões do trabalho respectivamente.

2.0 MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM PROGRAMAS DE TRANSITÓRIOS

O cálculo das tensões e correntes ao longo de uma Linha de Transmissão polifásica parte de equações diferenciais bem conhecidas da literatura técnica [6]:

$$\frac{d^2[V]}{dx^2} = [Z(\omega)][Y(\omega)][V] = [\gamma_v]^2[V] \text{ e } \frac{d^2[I]}{dx^2} = [Y(\omega)][Z(\omega)][I] = [\gamma_i]^2[I]$$

Onde:

$[V]$ e $[I]$: Vetores de tensões e correntes de fase na LT;

$[Z(\omega)]$ e $[Y(\omega)]$: Matrizes de fase de impedâncias séries ($R + j\omega L$) e admitâncias shunts ($G = j\omega C$) da LT;

$[\gamma_v]$ e $[\gamma_i]$: Funções de propagação das tensões e correntes de fase.

As grandezas $[V]$ e $[I]$ relacionam-se por meio da matriz de impedâncias características $[Z_c(\omega)]$, que pode ser calculada diretamente das matrizes de impedâncias e admitâncias de fase.

$$[V] = [Z_c(\omega)][I] \quad (1)$$

A solução da equação diferencial para as tensões é dada por:

$$[V] = e^{-[\gamma_v]x}V^+ + e^{[\gamma_v]x}V^- \quad (2)$$

Onde V^+ e V^- são condições de contorno do problema.

Os parâmetros série da LT, resistência e indutância, possuem comportamento dependente com a frequência.

Para a resistência, há o efeito pelicular que altera a distribuição da corrente no condutor conforme a frequência da corrente. Em resumo, quanto maior a frequência, mais próximo da superfície se concentra o fluxo ordenado de cargas elétricas, reduzindo a área efetiva de condução e ocasionando aumento da resistência.

Para LTs aéreas, somente a parcela interna da indutância do condutor é afetada pela frequência. Um aumento da frequência ocasiona redução da indutância interna [6], porém, como esta parcela não é a predominante no cabo, o efeito total é pouco pronunciado.

Por fim, ao considerarmos o efeito do solo como condutor não ideal, é necessário corrigir os parâmetros em função da frequência por meio das Correções de Carson [7]. Novamente, há aumento da resistência e redução da indutância. Para fins práticos, e tendo em vista a faixa de frequências que estamos interessados, podemos desprezar a componente G da matriz de admitâncias shunts e considerar que a capacitância da LT é invariável com a frequência. Tendo isso em vista, o desafio que surgiu ao longo do tempo é a resolução do problema de propagação de ondas em LTs em programas de computador. É evidente que a consideração ou não da dependência dos parâmetros com a frequência altera a complexidade do problema.

Desconsiderando inicialmente a dependência dos parâmetros com a frequência, o algoritmo proposto por Dommel [1] obteve êxito em representar LTs em programas de cálculo de transitórios utilizando matriz de admitâncias nodais. Este modelo é conhecido por Parâmetros Constants (PC) ou modelo de Bergeron, e para LTs polifásicas, utiliza o artifício da decomposição modal na sua representação.

De forma resumida, a decomposição modal, por meio de matrizes de transformação, diagonaliza as equações (1) e (2) que estão no domínio de fases, trazendo-as para o domínio dos modos de propagação, o que torna o método muito mais eficiente do ponto de vista computacional. Ao final do procedimento, as grandezas modais retornam aos valores de fase.

Um ponto importante é com relação a qual frequência de cálculo o modelo de Bergeron deve ser ajustado, ou seja, impedâncias características, perdas e velocidade de propagação calculados.

Comumente, a frequência de cálculo escolhida é igual à nominal de operação, ou seja, 50 ou 60 Hz. Esta escolha facilita na validação do modelo por meio de cálculos comparativos de curto-circuito e fluxo de potência. Entretanto, em transitórios eletromagnéticos, sabemos que há frequências mais elevadas (frequências naturais) superpostas à frequência nominal das fontes de excitação do sistema. Para uma LT aberta, conforme apresentado em [2], podemos estimar a frequência natural de oscilação da LT em questão como $\frac{1}{4\tau}$, em que τ é o tempo de trânsito da linha de transmissão. Por exemplo, para uma LT de 200 km sendo energizada, podemos ajustar o modelo de Bergeron com uma frequência de 375 Hz (adotando velocidade de propagação igual à da luz no vácuo).

Após o modelo proposto por Dommel, diversos trabalhos sugeriram métodos de incluir a dependência dos parâmetros com a frequência em seu equacionamento.

No trabalho proposto por José Marti [3], as impedâncias características e funções de propagação modais são aproximadas por funções racionais reais. Uma simplificação deste modelo é a consideração de uma matriz de transformação modal constante com a frequência. Um valor de frequência típica considerada nos cálculos da matriz é igual a 5 kHz. O modelo em questão está disponível em programas computacionais como o ATP, PSCAD e EMTP e geralmente é conhecido por JMarti.

De acordo com diversos trabalhos posteriores, a utilização de uma matriz independente com a frequência não é ideal para representar LTs aéreas em circuito duplo com formação vertical e para representar LTs subterrâneas. Luís Marti [8] apresentou um modelo semelhante ao JMarti, mas considerando matrizes de transformação modal dependentes com a frequência. Este modelo foi implementado no programa EMTP com nome de FDQ (*Frequency Dependent Q model*), porém, foi substituído pelo modelo conhecido por *Wideband model* [5].

O modelo *Wideband* é considerado como o estado da arte para representação de linhas de transmissão, tanto aéreas quanto subterrâneas. Ele é baseado no modelo ULM (*Universal Line Model*) [4] e não utiliza o equacionamento modal como método, ou seja, sua resolução é feita no domínio de fases.

Os modelos explorados no presente artigo serão Bergeron (calculados em 60 Hz e na frequência natural estimada em função do comprimento da LT), JMarti e *Wideband*, com a utilização dos dois primeiros tanto no ATP quanto no EMTP e o último somente no EMTP.

3.0 METODOLOGIA

3.1 MANOBRAS E MODELOS COMPUTACIONAIS

Foram realizadas simulações de energização e religamento tripolar de dois tipos de LTs não transpostas. Uma de 440 kV em circuito simples e a outra de 345 kV em circuito duplo. Foram considerados comprimentos de 50 km e 200 km. O sistema a montante da chave manobrada foi modelado como uma fonte de tensão em série com uma impedância de sequência, garantindo potência de curto-circuito trifásica e monofásica igual a 20 kA. A Figura 1 apresenta o sistema estudado e as características básicas das LTs.

Para a LT de 345 kV em circuito duplo, foram analisadas as condições do circuito paralelo operando em vazio, com os dois terminais abertos (circuito paralelo desligado) e com os dois terminais abertos e aterrados.

As frequências naturais consideradas no ajuste dos modelos de Bergeron nas frequências próprias das LTs de 50 km e 200 km foram 1500 Hz e 375 Hz respectivamente, que é um cálculo que leva em conta um modo aéreo de propagação.

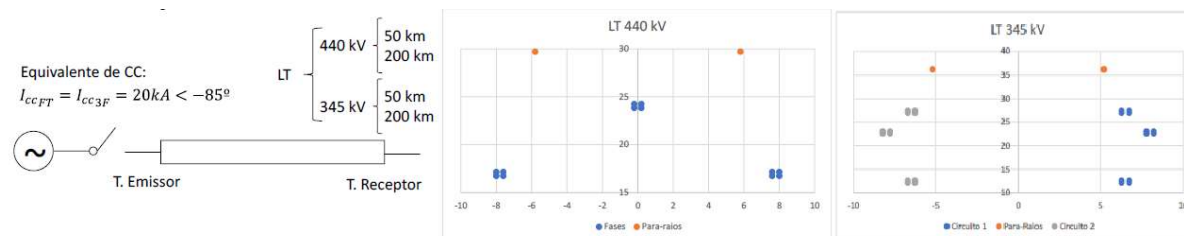


Figura 1 – Sistema estudado

Foram realizados 200 chaveamentos estatísticos, considerando máxima dispersão entre polos do disjuntor igual a meio ciclo (8,33 ms) em uma curva Gaussiana. Os sorteios dos instantes de tempo aleatórios para as manobras foram gerados de forma automática pelas rotinas próprias dos programas computacionais (ATP e EMTP).

A sequência de eventos nas manobras seguiu os padrões adotados em estudos de coordenação de isolamento usualmente apresentados em projetos básicos de Leilões de Transmissão.

Para energização, fecha-se a chave a montante do terminal emissor da LT no instante de tempo de 20 ms.

Para o religamento tripolar, considera-se:

- 1) Aplicação de falta monofásica no ponto central da LT, considerando sua operação prévia em vazio;
- 2) Abertura das três fases do terminal emissor 100 ms após aplicação da falta;
- 3) Extinção da falta monofásica 4 ciclos após abertura do disjuntor;
- 4) Aguardar tempo morto de 500 ms;
- 5) Religamento tripolar da chave no terminal emissor.

Foram monitoradas as sobretensões no terminal emissor, em 25%, 50% e 75% da LT e no terminal receptor.

3.2 COMPARAÇÕES ENTRE RESULTADOS

Após realização de todas as simulações, os resultados foram tabelados para comparação entre valores máximos e médios das mesmas variáveis em diferentes modelos. Para comparações em termos relativos, o modelo *Wideband*

foi definido como referência, logo, a diferença percentual entre modelos, tanto entre valores médios quanto valores máximos, é dada por:

$$\Delta(\%) = \frac{Tensão_{modelo} - Tensão_{wideband}}{Tensão_{wideband}} \times 100\%$$

A título ilustrativo, a Tabela 1 apresenta um exemplo de comparação no terminal emissor durante a energização da LT de 345 kV, com 50 km e circuito paralelo aberto. A coluna “Médios” representa as médias obtidas dentre as 200 simulações para aquele modelo específico. A coluna “Máximos” representa os valores extremos obtidos para o modelo específico.

Tensão (kV)	km	Software	Modelo	C. Paralelo	Médios		Máximos	
					pu	Δ (%)	pu	Δ (%)
345	50	ATP	60 Hz	Aberto	1.2884	1.44	1.4971	4.56
			1500 Hz		1.2760	0.46	1.4725	2.84
			Jmarti		1.2699	-0.01	1.4765	3.12
			60 Hz		1.2822	0.95	1.4273	-0.31
		EMTP	1500 Hz		1.2825	0.97	1.4650	2.32
			Jmarti		1.2804	0.81	1.4774	3.19
			Wideband		1.2701	0	1.4318	0
			Wideband		1.2701	0	1.4318	0

As maiores diferenças entre modelos foram avaliadas sob as seguintes ópticas:

- 1) *Diferenças entre valores máximos* – São comparadas as formas de onda entre modelos ao aplicarmos os mesmos instantes de chaveamento para todos.
Como os resultados máximos de um caso podem ser muito sensíveis aos instantes de chaveamento, ou representar pontos muito fora da distribuição de probabilidades, foi proposta a próxima comparação.
- 2) *Diferenças entre valores médios* – Buscou-se responder a seguinte pergunta:

“Estatisticamente, os valores médios são iguais?”

Para isso, os modelos foram comparados dois a dois por meio de testes de hipótese com nível de significância de 95% [9]:

$$H_0: Média_{modelo_1} = Média_{modelo_2}$$

$$H_1: Média_{modelo_1} \neq Média_{modelo_2}$$

Ao rejeitarmos a hipótese nula (H_0), há indícios de que os modelos comparados são diferentes. No presente artigo, somente distribuições tidas como Normais foram consideradas nos testes, portanto, antes de realizar os testes de hipótese de comparação entre médias, os histogramas de cada resultado foram avaliados pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov* para verificar a normalidade da distribuição. Caso a normalidade não seja constatada, aquela variável é desconsiderada. Importante comentar que nos casos onde a normalidade é respeitada, a forma de comparação entre médias somente é definida após avaliar a igualdade estatística entre os estimadores das variâncias, conforme recomendado em [9].

4.0 RESULTADOS

4.1 ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

A Figura 2 apresenta os perfis de diferenças entre resultados ao longo da LT de 440 kV para todos os modelos. Em todos os casos, notamos que os modelos de Bergeron calculados em 60 Hz são aqueles que sobrestimam os resultados. Interessante notar que para o caso de LT mais curta, as diferenças entre médias e entre extremos não ultrapassam 6%. Entretanto, para LT com 200 km, a diferença entre valores máximos alcança quase 20%.

A Figura 3 apresenta conteúdo análogo para a LT de 345 kV. Os gráficos obtidos referem-se à condição de manobra em que o circuito paralelo se encontra desligado, tido como caso mais crítico. A principal diferença que visualizamos é que mesmo para a LT com comprimento menor, os modelos de Bergeron calculados em 60 Hz apresentam maiores discrepâncias tanto em valores médios quanto máximos. Não é escopo do presente artigo, mas isso pode estar relacionado às interações entre os modos predominantes no circuito paralelo com o circuito manobrado.

A Tabela 2 apresenta a comparação estatística entre modelos para a manobra da LT de 440 kV com 200 km, cuja diferença entre médias é de 9,27% (term. Receptor). Valores preenchidos com traço (-) na diagonal superior da tabela referem-se a médias diferentes. Fica evidente que os modelos de Bergeron calculados em 60 Hz possuem médias diferentes dos demais modelos, que em teoria são mais precisos. Interessante notar que os modelos calculados em uma frequência específica podem ser considerados iguais ao modelo de referência, do ponto de vista estatístico.

Tabela 2 – Comparação estatística entre modelos

	kV	L (km)	Config.	Local	Δ méd. (%)	Δ máx. (%)
	440	200	CS	Receptor	9.27	4.98
Modelo 2						
	ATP 60 Hz	ATP fn	ATP JMarti	EMTP 60 Hz	EMTP fn	EMTP JMarti
Modelo 1	ATP 60 Hz	-	-	Iguais	-	-
	ATP fn	-	-	-	Iguais	Iguais
	ATP JMarti	-	-	-	-	Iguais
	EMTP 60 Hz	-	-	-	-	-
	EMTP fn	-	-	-	Iguais	Iguais
	EMTP JMarti	-	-	-	-	Iguais
	EMTP wdb	-	-	-	-	-

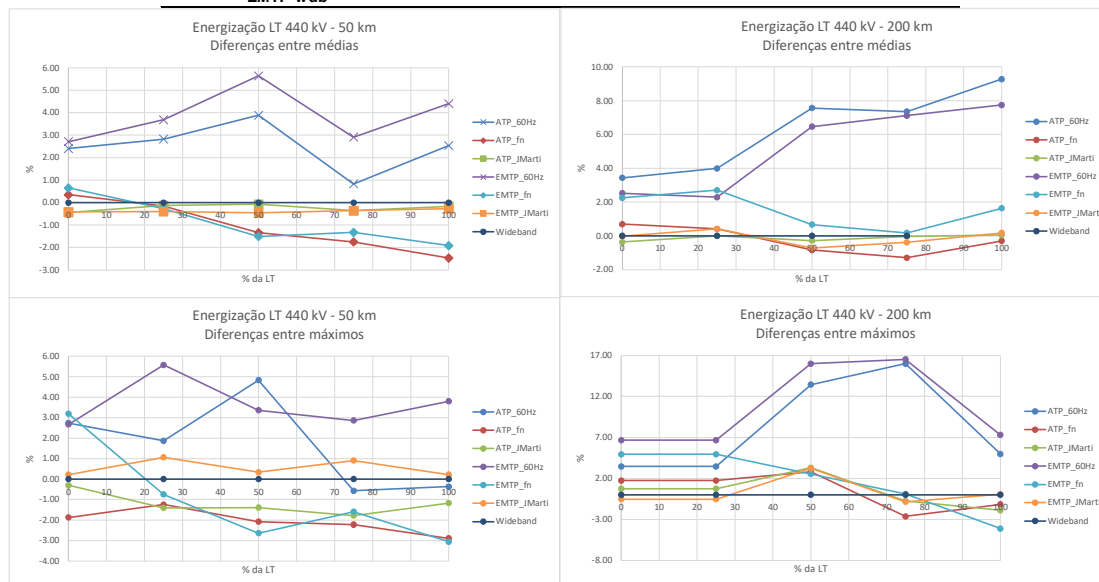


Figura 2 – Perfis de diferenças para LT de 440 kV (fn: frequência natural)

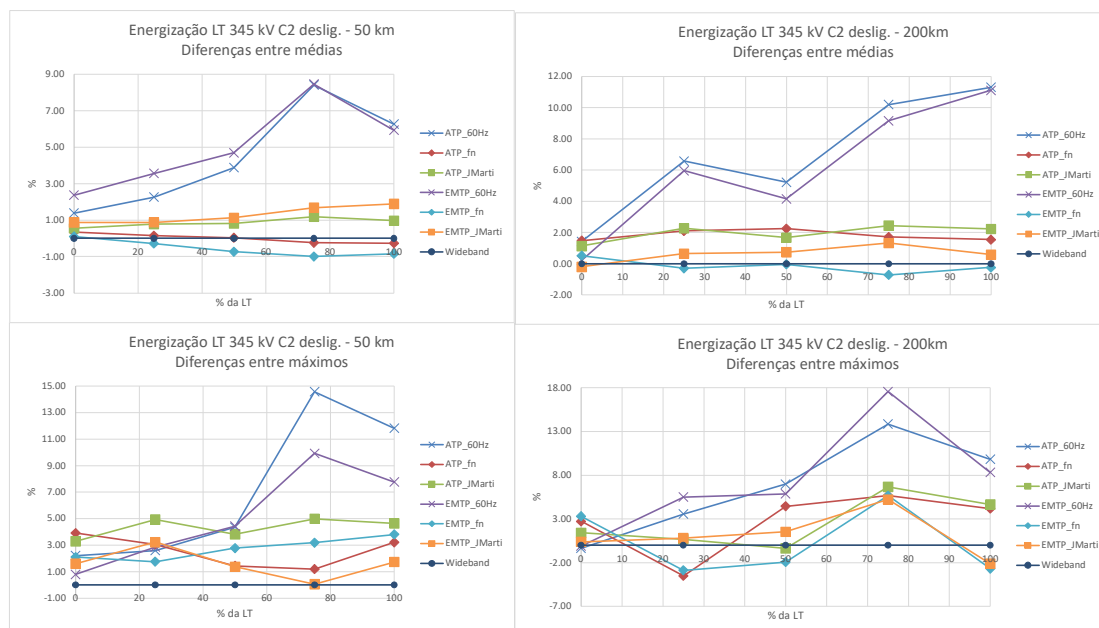


Figura 3 – Perfis de diferenças para LT de 345 kV (fn: frequência natural)

Por fim, a Figura 4 apresenta a comparação entre diferentes modelos para a energização de LT 345 kV com 200 km monitorando a tensão em 75% da linha. É possível observar comportamento muito semelhante entre modelos *Wideband*, JMarti e Bergeron calculado em 375 Hz e uma componente de alta frequência menos amortecida no modelo de Bergeron calculado em 60 Hz. Do lado direito, observamos as maiores diferenças para cada instante de tempo quando comparamos o modelo de referência com o modelo de Bergeron em 60 Hz.

4.1 RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LT

Durante o tempo morto do religamento tripolar de uma linha de transmissão, a LT permanece com tensão praticamente constante (carga armazenada como componente DC). O decaimento desta componente depende principalmente de fatores atmosféricos e climatológicos ao longo da linha [6], podendo demorar de segundos a minutos. Como o tempo morto para o religamento tripolar rápido é consideravelmente menor que este intervalo de tempo, é bastante aceitável considerar a tensão constante na LT desligada [2]. A Figura 5 apresenta o comportamento do modelo JMarti no ATP durante o tempo morto do religamento para o caso da LT de 440 kV. Observa-se claramente o decaimento acentuado da carga residual. Vale comentar que tentou-se ajustar os parâmetros da rotina de *fitting* do modelo no ATP, como a condutância (G) e frequência inicial de ajuste, além de inserir condutâncias externas ao longo da LT para tentar manter a carga residual constante. A Figura 5 também apresenta possíveis consequências disso, com erros numéricos facilmente visualizados.

Dessa forma, a utilização do modelo JMarti no ATP nas análises de religamento tripolar torna-se questionável, devendo apresentar resultados de sobretensões menores aos realmente observáveis. Para a LT de 440 kV com 50 km por exemplo, as máximas diferenças para valores médios e máximos foi de -11,18% e -16,56% respectivamente, de modo que a ordem de grandeza das sobretensões originadas no religamento tripolar com o modelo JMarti no ATP são semelhantes às manobras de energização, o que representa um prejuízo na determinação da coordenação de isolamento da linha. Dessa forma, para as comparações no presente trabalho, este modelo foi desconsiderado. Importante comentar que o modelo ajustado no EMTP não apresenta este comportamento, mantendo a carga armazenada praticamente constante durante todo o tempo morto, conforme Figura 6.

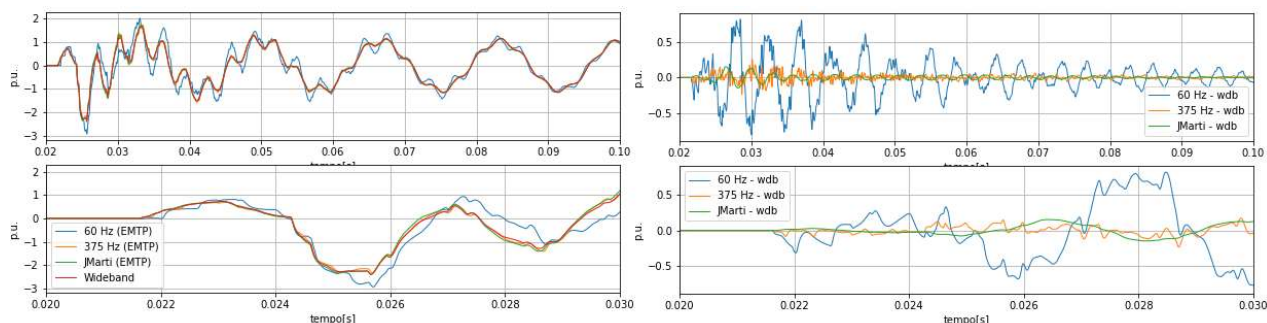


Figura 4 – Energização de LT de 345 kV com 200 km. Comparações entre diferentes modelos (esquerda) Diferenças entre modelos com *Widedband* a cada instante de tempo (direita) – Ponto monitorado: 75% da LT

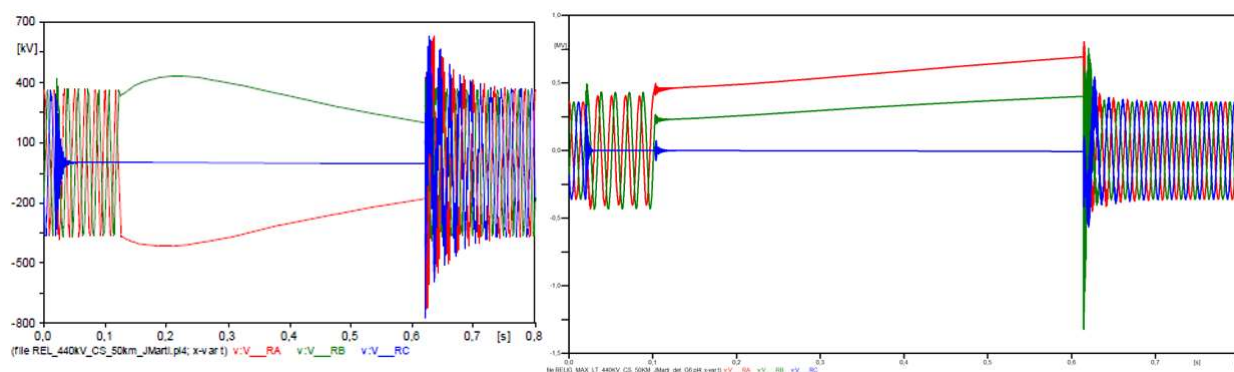


Figura 5 – Comportamento do modelo JMarti no ATP durante o tempo morto do religamento tripolar Parâmetros padrão da rotina de ajuste (esquerda) e Erros numéricos ao tentar estabilizar a carga residual (direita)

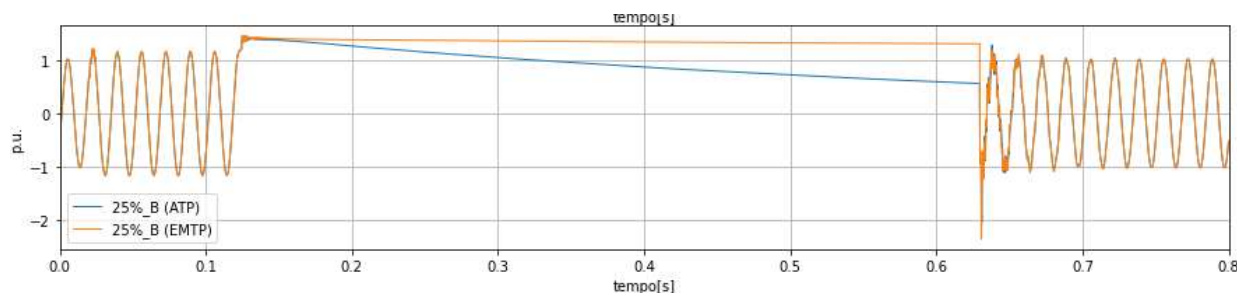


Figura 6 – Tempo morto nos modelos JMarti no ATP (azul) e no EMTP (alaranjado)

De modo a obtermos uma condição um pouco mais realista, as comparações para o caso de religamento tripolar na LT de 345 kV com 200 km considerou para-raios terminais na Linha de Transmissão. A Figura 7 apresenta a curva considerada para estes equipamentos. A Figura 8 apresenta as comparações entre modelos, de forma análoga à Figura 4. Notam-se diferenças ainda maiores quando comparamos o modelo de Bergeron calculado em 60 Hz com o modelo *Wideband*, alcançando diferenças de até 1 p.u.. É interessante pontuar que as maiores diferenças verificadas na Figura 6 ocorrem na fase que estava com carga residual nula.

Novamente, notamos similaridades entre os comportamentos dos modelos de Bergeron calculado em 375 Hz, JMarti (EMTP) e o modelo de referência (*Wideband*).

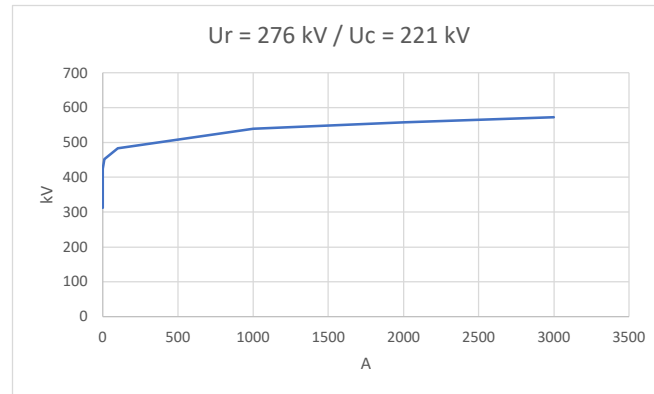


Figura 7 – Curva considerada para os para-raios terminais nos casos de religamento tripolar da LT de 345 kV

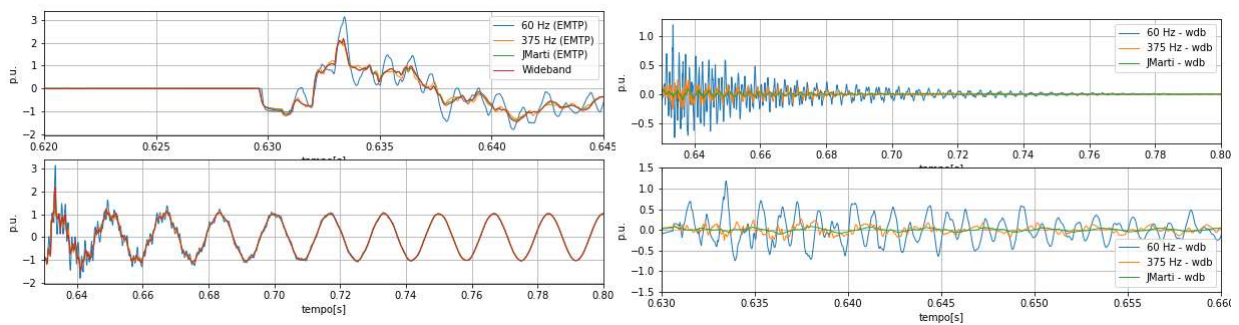


Figura 8 – Religamento tripolar de LT de 345 kV com 200 km e para-raios terminais. Comparações entre diferentes modelos (esquerda) e diferenças entre modelos e *Wideband* a cada instante de tempo (direita) – Ponto monitorado: 25% da LT

A Tabela 3 apresenta as comparações estatísticas entre modelos para o religamento tripolar da LT 345 kV de 200 km com para-raios terminais. Novamente, nota-se que o modelo de Bergeron calculado em 60 Hz não apresenta igualdade de média com outros modelos mais precisos. Novamente, considerando esse modelo calculado em uma frequência estimada, nota-se semelhança com modelos mais precisos como o *Wideband*. Por fim, interessante notar que apesar de a LT de 345 kV possuir circuito duplo com arranjo vertical, o modelo de JMarti (factível de ser utilizado no EMTP apenas) apresenta equivalência de médias quando comparado ao modelo de referência.

Tabela 3 – Comparação estatística entre modelos

	kV	L (km)	Config.	Local	Δ méd. (%) (1)	Δ máx. (%) (2)
	345	200	CD	25%	9.41	26.69
	Modelo 2					
	ATP 60 Hz	ATP fn	EMTP 60 Hz	EMTP fn	EMTP JMarti	EMTP wdb
Modelo 1	ATP 60 Hz	-	Iguais	-	-	-
	ATP fn	-	-	Iguais	Iguais	Iguais
	EMTP 60 Hz	-	-	-	-	-
	EMTP fn	-	-	-	Iguais	-
	EMTP JMarti	-	-	-	-	Iguais
	EMTP wdb	-	-	-	-	-

(1) Máxima diferença entre médias

(2) Máxima diferença entre valores máximos

5.0 CONCLUSÕES

Considerando uma rede relativamente simplificada, o presente trabalho trouxe comparações entre comportamentos de diferentes modelos computacionais de Linhas de Transmissão disponíveis em programas de simulação disponíveis no mercado. Foram feitas comparações utilizando o ATP e o EMTP (antigo EMTP-RV).

Para tanto, lançou-se mão do modelo de Bergeron calculado na frequência nominal do sistema (60 Hz), calculado em uma frequência estimada no comprimento da LT (frequência natural de um modo aéreo), modelo JMarti e modelo *Wideband*, sendo este último a referência de comparação.

Além de comparações no tempo, também foi apresentada uma análise estatística dos resultados obtidos, ao compararmos as médias calculadas entre modelos por meio de um teste de hipótese.

Importante comentar sobre os cuidados adotados antes da realização do teste de hipótese, como identificar a distribuição de probabilidades obtida (este trabalho somente testou distribuições Normais) e verificar a igualdade entre estimadores de variância para testar a igualdade das médias.

Nas análises de energização, notamos que para LT curta (50 km) as diferenças entre máximas discrepâncias entre médias e entre valores máximos são menores quando comparadas à LT longa (200 km). Porém, há aumento substancial na LT em circuito duplo.

Nas análises de religamento tripolar, nota-se que o uso do modelo JMarti no ATP é questionável, pois existe decaimento acentuado da carga residual da LT durante o tempo morto, o que deverá proporcionar sobretensões muito menores àquelas realmente observáveis neste tipo de manobra, o que prejudica o procedimento de coordenação de isolamento da Linha de Transmissão. Assim, ao utilizarmos esse programa, só há a possibilidade de utilização do modelo de Bergeron, que não leva em conta a dependência dos parâmetros com a frequência.

Vale comentar que foram feitas algumas tentativas de alterar os parâmetros da rotina de ajuste do modelo JMarti no ATP. Conforme Figura 5, a depender dos ajustes tentados, erros numéricos consideráveis podem ocorrer.

Com base nos resultados apresentados neste trabalho, uma alternativa é utilizar o modelo de Bergeron calculado em uma frequência específica, como $\frac{1}{4\tau}$, onde τ é o tempo de propagação de um modo aéreo da LT. Nota-se que ao analisarmos a diferença entre o modelo de referência com o modelo de Bergeron nessas condições, os comportamentos dos modelos são um pouco mais semelhantes.

Nos casos avaliados, também se nota pouca diferença entre a modelagem por JMarti com o *Wideband*, mesmo no caso de manobra de LT em circuito duplo com arranjo vertical, cuja dependência das matrizes de transformação modal com a frequência tende a ser maior.

Apesar do artifício de estimar uma frequência natural de oscilação da LT e utilizá-la para ajustar o modelo de Bergeron na análise se mostrar aceitável, fica claro que há uma deficiência no modelo disponível no ATP ao considerar a dependência dos parâmetros com a frequência, sendo não recomendável a utilização do modelo JMarti em estudos de transitórios de manobra em linhas de transmissão, em especial no religamento tripolar, cujos valores de sobretensões costumam definir a coordenação de isolamento de LTs aéreas.

Tanto no domínio modal quanto no domínio de fases, há modelos melhorados em outros programas, como EMTP (antigo EMTP-RV), DigSilent e PSCAD. Não há dúvidas quanto à funcionalidade do ATP, porém, por que não repensarmos na possibilidade de utilizar outros programas em estudos elétricos no nosso Sistema Interligado?

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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.
- [2] BICKFORD, J. B., MULLINEUX, N., & REED, J. R. (1976). Computation of power-system transients. London: IEE Monograph Series, n; 18.
- [3] J. R. Marti (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, Jan. 1982.
- [4] A. Morched, B. Gustavsen and M. Tartibi (1999). A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables. In IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14. 3, pp. 1032-1038.
- [5] I. Kocar and J. Mahseredjian (2016). Accurate Frequency Dependent Cable Model for Electromagnetic Transients. In IEEE Transactions on power Delivery, vol. 31, no. 3, pp. 1281-1288.
- [6] ZANETTA, L. (2003). Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, 1ª ed., São Paulo: Edusp.
- [7] CARSON, J. R. (1926). Wave propagation in overhead wires with ground return. The Bell System Technical Journal, vol. 5, no. 4, pp. 539-554.
- [8] L. Marti (1988). Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices. In IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 3, pp. 1099-1110.
- [9] Bussab, Wilton de O., 1940 – Estatística básica / Wilton de O. Bussab, Pedro A. Morettin - 5. Ed. – São Paulo: Saraiva, 2004.

DADOS BIOGRÁFICOS



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 na área de estudos elétricos da Hitachi ABB Power Grids, com experiência prévia na FIGENER Engenheiros Associados (departamento de Engenharia Elétrica) e ISA CTEEP (departamento de Estudos e Planejamento da Expansão).

(2) CARLOS EDUARDO DE MORAIS PEREIRA
Possui graduação em engenharia de eletricidade pela Universidade de São Paulo (1996), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1999) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2003). Desde 2004 é Professor Doutor da Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão da Energia Elétrica, Distribuição da Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: linhas de transmissão, localização de faltas em linhas de transmissão, desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas, aplicação de pára-raios ZnO, estudos de redes em regime permanente e transitório e coordenação do isolamento.