

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

ANÁLISES DE SOBRETENSÕES DE MANOBRA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEAS 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. O presente trabalho tem como objetivo apresentar comparações entre diferentes modelos de linhas de transmissão considerando análises de transitórios de manobra em sistemas formados por LTs subterrâneas e híbridas (aérea e subterrânea). Foram considerados modelos com parâmetros constantes dos softwares ATP e EMTP (antigo EMTP-RV) e o modelo Wideband, disponível no EMTP, que leva em conta a dependência dos parâmetros elétricos da LT com a frequência. Foram estudadas configurações em circuitos simples e duplo em uma rede teste com 39 barras.

PALAVRAS-CHAVE

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

1.0 INTRODUÇÃO

A utilização de cabos isolados na construção de linhas de transmissão (LTs) subterrâneas e subaquáticas é uma prática consolidada no setor elétrico ao redor do mundo, entretanto, fatores como a conexão de geradores *offshore* e requisitos socioambientais em novos projetos de transmissão têm contribuído para o aumento do emprego deste tipo de linha de transmissão.

No Brasil, especificamente, tem-se visto nos últimos leilões de transmissão diversos lotes contendo linhas subterrâneas de energia, motivados principalmente pela necessidade no reforço das redes de transmissão em áreas urbanas densamente povoadas. No Leilão 01/2020 por exemplo, foram ofertados 126 km de LTs subterrâneas, divididos em três lotes, com conexão na malha de 345 kV da Região Metropolitana de São Paulo. Estas LTs, em conjunto com as novas subestações licitadas somam um custo estimado de R\$ 3 bi [1].

Durante o procedimento de coordenação de isolamento dos cabos isolados que compõem estes tipos de linha de transmissão bem como os equipamentos nas subestações terminais, são elaborados diversos estudos para caracterizar os valores máximos dos surtos de manobra possíveis durante a operação destes ativos, como energização, rejeição de cargas e eliminação de faltas.

Uma etapa de suma importância é a modelagem adequada da LT subterrânea, levando em conta os esquemas de transposição e aterramento das blindagens e os dados geométricos dos cabos e constantes elétricas e magnéticas que são levados em conta na rotina de cálculo *Cable Constants* [2], bem difundida na engenharia.

Além disso, a modelagem computacional de linhas de transmissão é um assunto bastante amplo na literatura técnica e tem influência direta nos resultados das simulações.

Há modelos que não levam em conta a dependência dos parâmetros com a frequência e são conhecidos como Parâmetros Constantes (PC) ou Bergeron [3], 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.

Este tipo de modelo 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.

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 diferenças nos resultados entre os modelos de Bergeron e *Wideband* do ponto de vista de surtos de manobra em LTs subterrâneas, buscando capturar os impactos práticos nos máximos valores obtidos para esses surtos e as consequências no procedimento de coordenação de isolamento do sistema.

Para isso, será considerada a rede teste IEEE 39 barras apresentada na Brochura Técnica 736 do CIGRE [8] para comparações. Serão realizadas diversas manobras para as seguintes configurações, em circuitos simples e duplo:

- LT de 345 kV totalmente subterrânea;
- LT de 345 kV híbrida (aérea e subterrânea).

Os modelos com parâmetros constantes serão obtidos tanto no ATP quanto no EMTP, permitindo também a comparação entre ferramentas.

Vale comentar que no ATP, o modelo disponível para representação da dependência dos parâmetros com a frequência é o JMarti [6], que não leva em conta a dependência da matriz de transformação modal com a frequência, algo importante na representação de cabos isolados. Em trabalho proposto por Luis Martí [7], é proposto um modelo que leva isso em conta. Este modelo foi implementado no EMTP apenas, porém foi substituído pelo *Wideband*.

Além de verificar as diferenças práticas entre distintas modelagens, espera-se verificar se há prejuízos na utilização obrigatória da ferramenta ATP em estudos de projeto básico pelos agentes transmissores.

No primeiro Item do trabalho é feita a introdução sobre o tema. No segundo Item é apresentada a modelagem empregada, descrição do sistema teste e configurações estudadas. No terceiro, é apresentada a metodologia utilizada nas simulações e comparações entre resultados. No quarto e quinto item são feitas as análises e conclusões do trabalho respectivamente.

2.0 MODELAGEM COMPUTACIONAL

2.1 REDE ELÉTRICA EQUIVALENTE

Conforme mencionado no Item 1, foi utilizada a rede IEEE 39 barras (sistema *New England* de transmissão) descrita em [8]. O sistema em questão foi modelado e validado nos programas ATP e EMTP.

Algumas modificações foram realizadas, a saber:

- As máquinas síncronas e seus controladores do modelo 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;
- O transformador e a respectiva carga da barra 15 foram desconsiderados.

A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático da rede modelada e comparações de curto-circuito e fluxo de potência entre os modelos computacionais. São verificadas diferenças pouco significativas para as mesmas variáveis nos diferentes modelos, trazendo segurança às análises de transitórios eletromagnéticos a serem descritas posteriormente. O cálculo percentual das diferenças é realizado da seguinte forma:

$$Dif = \frac{Valor_{EMTP} - Valor_{ATP}}{Valor_{ATP}} \times 100\%$$

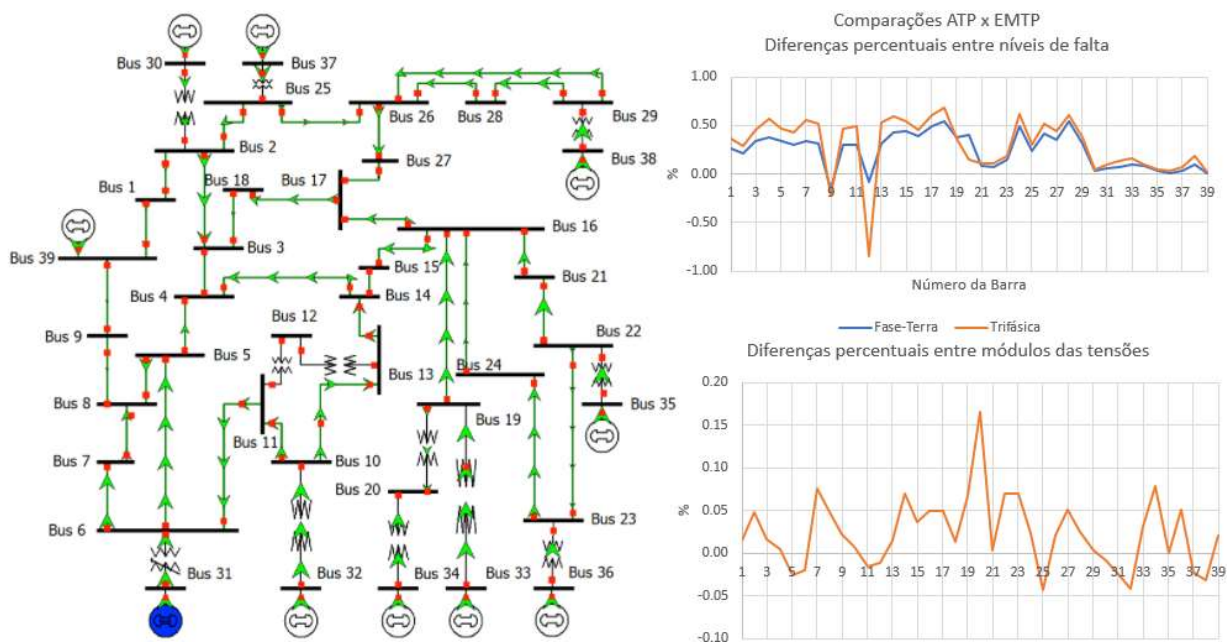


Figura 1 – Rede modelada no ATP e EMTP (Esquerda) [9] e comparações entre modelos nos diferentes programas. Diferenças percentuais entre níveis de falta (direita superior)
Diferenças percentuais entre módulos das tensões após simulação de fluxo de potência (direita inferior)

A Figura 2 apresenta diferenças entre tensões nas barras 14 e 15 dos diferentes modelos em uma simulação no domínio do tempo. Observa-se para a barra 15, por exemplo, uma diferença máxima de aproximadamente 150 V. Considerando a tensão nominal das barras, que é de 345 kV, esta diferença representa algo em torno de 0,05%.

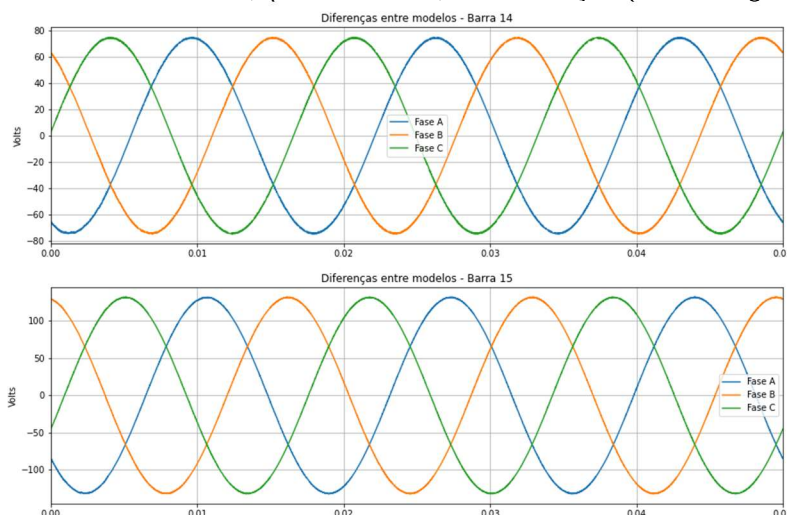


Figura 2 – Comparação entre modelos (ATP x EMTP) no tempo para barras 14 e 15

2.2 LINHA DE TRANSMISSÃO EM ESTUDO

Em todas as análises apresentadas neste trabalho, a LT em estudo foi conectada entre as barras 15 e 16 da rede apresentada na Figura 1.

O comprimento da LT analisada foi fixado em 30 km, sendo compatível com a linha já conectada ao modelo original. Neste comprimento, também foram avaliadas configurações híbridas, onde há trechos aéreos e trechos subterrâneos, conforme indicado na Figura 3.

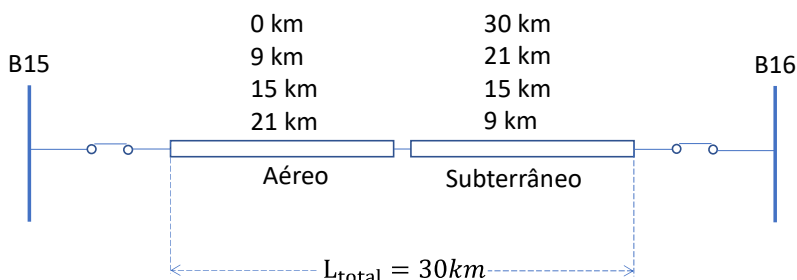


Figura 3 – Linha de Transmissão e composições avaliadas

2.2.1 TRECHO AÉREO

Os trechos aéreos foram modelados conforme dados apresentados na Tabela 1, necessários para entrada nas rotinas *Line Constants* com respectivos cálculos dos parâmetros de cada modelo. Adotou-se resistência do solo igual a 600 Ω m e frequência de cálculo igual a 60 Hz para o modelo de Bergeron.

Tabela 1 – Configuração dos trechos aéreos considerados.

LT aérea 345 kV - Circ. Simples - 2 condutores por fase									LT aérea 345 kV - Circ. Duplo - 2 condutores por fase								
Cond.	Rdc (Ω /km)	T/D (1)	Dext (cm)	X (m)	Y (m)	Yvão (m) (2)	dcond (cm) (3)		Cond.	Rdc (Ω /km)	T/D (1)	Dext (cm)	X (m)	Y (m)	Yvão (m) (2)	dcond (cm) (3)	
A	0.0808	0.316	2.8143	-10.6	30	17	45		A	0.0808	0.316	2.8143	6.5	30.3	23.3	45	
B	0.0808	0.316	2.8143	0	30	17	45		B	0.0808	0.316	2.8143	8	25.9	18.9	45	
C	0.0808	0.316	2.8143	10.6	30	17	45		C	0.0808	0.316	2.8143	6.5	15.5	8.5	45	
PR_1	4.0305	0.5	0.9525	-7.55	36.7	24.7	-		A	0.0808	0.316	2.8143	-6.5	30.3	23.3	45	
PR_2	4.0305	0.5	0.9525	7.55	36.7	24.7	-		B	0.0808	0.316	2.8143	-8	25.9	18.9	45	
									C	0.0808	0.316	2.8143	-6.5	15.5	8.5	45	
									PR_1	4.0305	0.5	2.8143	5.2	38.3	34.8	-	
									PR_2	4.0305	0.5	2.8143	-5.2	38.3	34.8	-	

(1) Relação espessura/diâmetro do condutor

(2) Altura no meio do vão

(3) Distância entre condutores do bundle

2.2.2 TRECHO SUBTERRÂNEO

A linha de transmissão do trecho subterrâneo é formada por cabos com condutores de alumínio de 1200 mm². Os dados reais do cabo foram apresentados por um fornecedor durante etapa de projeto de uma LT subterrânea real. Tanto o modelo de Bergeron quanto o modelo *Wideband* baseiam os cálculos dos parâmetros da LT nas equações propostas por Ametani [10], que são a base das rotinas *Cable Constants* [2] dos softwares de simulação. Essas equações consideram o cabo com suas camadas como condutores tubulares, porém, os aspectos construtivos de cabos de alta tensão possuem algumas particularidades que precisam ser levadas em conta na modelagem computacional.

De modo a contemplar essas particularidades construtivas e adequá-las à rotina de cálculo desses programas, foi desenvolvido um código em Python que recebe os dados construtivos e geometria do cabo e método de instalação e fornece os parâmetros para entrada no programa de simulação de transitórios.

Toda a metodologia utilizada nesse código, as respectivas referências bibliográficas e testes de validação são apresentados em [11]. O código, de uso livre, está disponível em [12].

De forma resumida, são realizadas as seguintes adequações:

- 1) Adequação da resistividade do núcleo levando em conta os fatores de efeito pelicular e de proximidade presentes na norma IEC 60287-1-1 [13];
- 2) Adequação da permissividade elétrica da camada isolante principal (XLPE) levando em conta as camadas semicondutoras entre núcleo e isolamento (blindagem do condutor) e entre isolamento e blindagem metálica (blindagem da isolamento) do cabo [14];
- 3) Adequação do raio da blindagem metálica, levando em conta seus aspectos construtivos (blindagem metálica de fios, fitas ou composição das duas e respectivos materiais) [14].

A Tabela 2 apresenta os dados construtivos do cabo e os parâmetros para modelagem. A Tabela 3 apresenta as configurações estudadas para circuito simples e duplo.



Tabela 2 – Dados construtivos do cabo de 1200 mm² e parâmetros modificados para *Cable Constants*.

Dados do cabo (1200 mm ²)					
Condutor (Núcleo) - 90°C			Blindagem do condutor (1ª cam. Semi-condutora)		
Material	Alumínio		Espessura	2.22	mm
Diâmetro Interno	0.0	mm	Isolação		
Diâmetro Externo	41.5	mm	Material	XLPE	
Resistividade elétrica	2,8264E-8	ρ.m	Espessura	26.5	mm
Coef. de temperatura a 20°C	0.00403	1/K	Perm. Elétrica relativa	2.5	
Construção	4 Segmentos		Blindagem da isolação (2ª cam. Semi-condutora)		
ks	0.25		Espessura	2.4	mm
kp	0.15		Blindagem Metálica - 77,2 °C		
Capa externa			Construção		
Material	Polietileno		Resistividade elétrica	1,7241E-8	ρ.m
Espessura	6.45	mm	a 20°C	0,00393	1/K
Perm. Elétrica relativa	2.5		Número de fios	56	
			Espessura dos fios	2.6	mm
			Length of Lay	850	mm

Entrada Cable Constants		
	Núcleo	Sheath
Rin (m)	0	0.05187
Rout (m)	0.02075	0.05277
ρ (Ωm)	3.81E-08	2.11E-08
μ	1	1
μ _{ins}	1	1
ε _{ins}	2.99	2.5

Tabela 3 – Configurações estudadas.

LT subterrânea - Circ. Simples					
Circuito 1					
Cabo 1		Cabo 2		Cabo 3	
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
-0.4	1.5	0	1.5	0.4	1.5

LT subterrânea - Circ. Duplo											
Circuito 1						Circuito 2					
Cabo 1		Cabo 2		Cabo 3		Cabo 1		Cabo 2		Cabo 3	
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
-0.35	2.1	-0.35	2.45	-0.35	2.8	0.35	2.1	0.35	2.45	0.35	2.8

O sistema de aterramento considerado para as blindagens metálicas da LT subterrânea foi o *cross-bonding*, quando esses condutores são aterrados nas extremidades de cada ciclo de transposição. No modelo estudado, os ciclos completos de transposição possuem 3 quilômetros de extensão. Para os casos de circuito duplo, um circuito foi transposto em uma sequência e seu par na sequência contrária.

3.0 METODOLOGIA

3.1 MANOBRAS

Foram realizadas simulações de energização pelos dois terminais da linha em estudo. No caso dos sistemas híbridos, também foram analisadas manobras de religamento tripolar, considerando a ocorrência de falta monofásica no trecho **aéreo**.

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 do trecho aéreo da LT;
- 2) Abertura das três fases do terminal B15 100 ms após aplicação da falta;
- 3) Abertura das três fases do terminal B16 20 ms após abertura do primeiro terminal;
- 4) Extinção da falta monofásica 4 ciclos após abertura do disjuntor;
- 5) Aguardar tempo morto de 500 ms;
- 6) Religamento tripolar da chave em análise.

Foram monitoradas as sobretensões nos terminais B15 e B16, no ponto central do trecho aéreo e na transição entre trechos (quando sistema híbrido) e nos núcleos e blindagens dos trechos subterrâneos a cada 1 quilômetro, onde ocorre a transposição dos núcleos.

No caso de simulações com circuito duplo, também foram exploradas as condições do circuito paralelo ligado, aberto nas extremidades e aterrado nas extremidades (desconectado da rede).

3.1 COMPARAÇÕES ENTRE RESULTADOS

De posse das simulações citadas anteriormente, foram levantados perfis das máximas sobretensões nos modelos em análise ao longo da LT. Os casos de destaque são apresentados no Item a seguir.

4.0 RESULTADOS

4.1 ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

A Figura 4 apresenta os perfis de sobretensões nos núcleos para algumas configurações durante a manobra de energização de linha. Fica convencionado que o quilômetro 0 refere-se ao terminal B15.

É possível observar que as maiores discrepâncias entre modelos ocorrem no terminal B15. A Tabela 4 apresenta comparações entre os diferentes resultados para este terminal, considerando o modelo *Wideband* como referência.

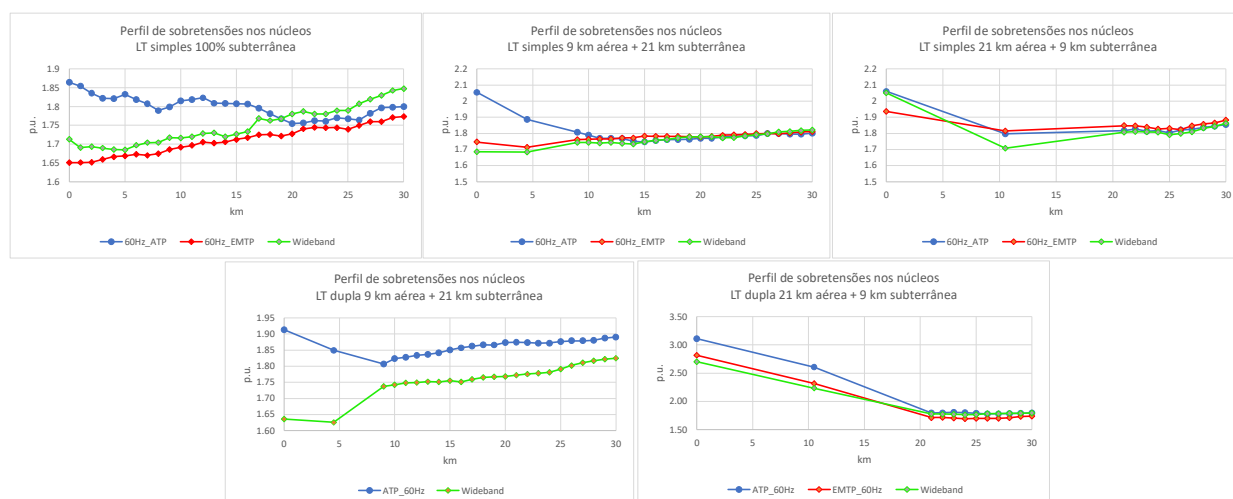


Figura 4 – Perfis de sobretensões máximas ao longo da LT estudada para diferentes configurações
Manobra de energização

Tabela 4 – Comparações entre máximos valores no terminal B15.

Configuração		Máximas sobretensões (p.u.)			Desvios (%)	
		ATP	EMTP	Wideband	ATP	EMTP
		60 Hz	60 Hz		60 Hz	60 Hz
Simples	100% subterrânea	1.86	1.71	1.65	12.7	3.6
	9 km aérea + 21 km subterrânea	2.05	1.75	1.69	21.3	3.6
	21 km aérea + 9 km subterrânea	2.06	1.94	2.05	0.5	-5.4
Duplo	9 km aérea + 21 km subterrânea	1.91	-	1.64	16.5	-
	21 km aérea + 9 km subterrânea	3.11	2.82	2.7	15.2	4.4

A Figura 5 apresenta comparações entre modelos para os mesmos instantes de chaveamento na manobra de energização para um caso com pouca diferença entre resultados (esquerda) e outro com diferenças mais significativas (direita). É possível notar que o modelo de Bergeron calculado no ATP apresenta componentes de maior frequência se comparados aos demais. Pode-se notar também que os modelos utilizados no EMTP não possuem diferenças significativas entre seus resultados máximos, apesar da natureza de cada um. Por fim, pode-se notar na Figura 4 (lado direito) que o modelo calculado no ATP apresenta um atraso um pouco maior para propagação da onda no terminal aberto, mesmo considerando instantes idênticos de fechamento das chaves.

Por fim, de posse da Tabela 4, notamos sobretensões elevadas no terminal B15 para a LT híbrida com parte aérea predominante. Esses resultados ocorrem quando a manobra é realizada pelo terminal oposto, cuja origem é subterrânea. Uma explicação que se mostra factível para isto é que a propagação do surto oriundo do trecho subterrâneo ao encontrar a descontinuidade dada pelo meio aéreo, cuja impedância característica é maior, ocasiona amplificação do surto de manobra [15].

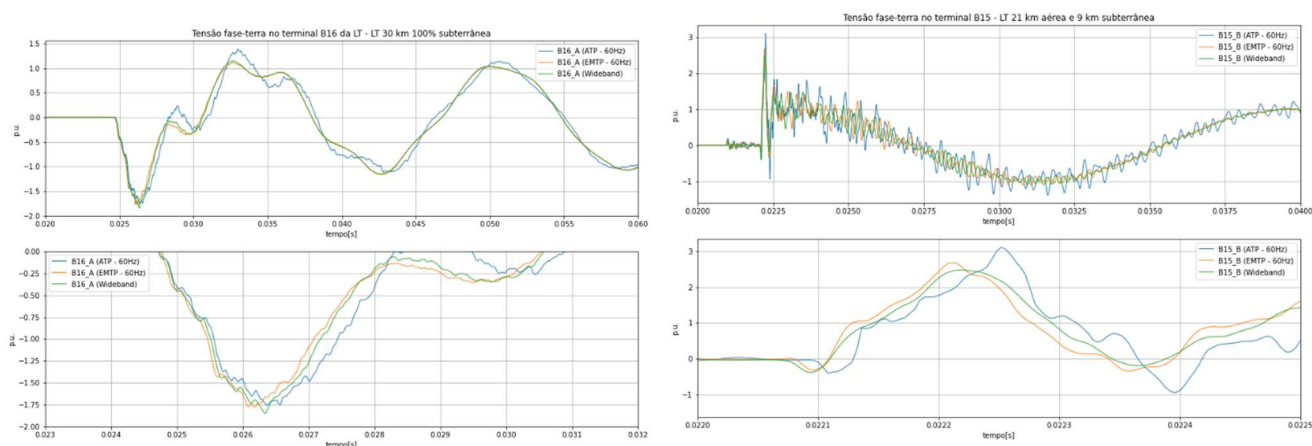


Figura 5 – Comparações entre modelos na manobra de energização considerando os mesmos instantes de chaveamento.

Esquerda: Terminal B16 com manobra pelo terminal oposto para instantes críticos no modelo Wideband.

Direita: Terminal B15 com manobra pelo terminal oposto para instantes críticos no modelo ATP.

4.1 RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Conforme já mencionado no Item 3, também foram realizadas análises de religamento tripolar de LT quando há ocorrência de falta monofásica no trecho aéreo do sistema. A Figura 6 apresenta perfis de tensões nos núcleos para este tipo de manobra e o perfil nas blindagens para uma configuração em análise. De forma análoga à Tabela 4, a Tabela 5 apresenta as comparações entre resultados para o terminal B15, onde há maior discrepância entre modelos.

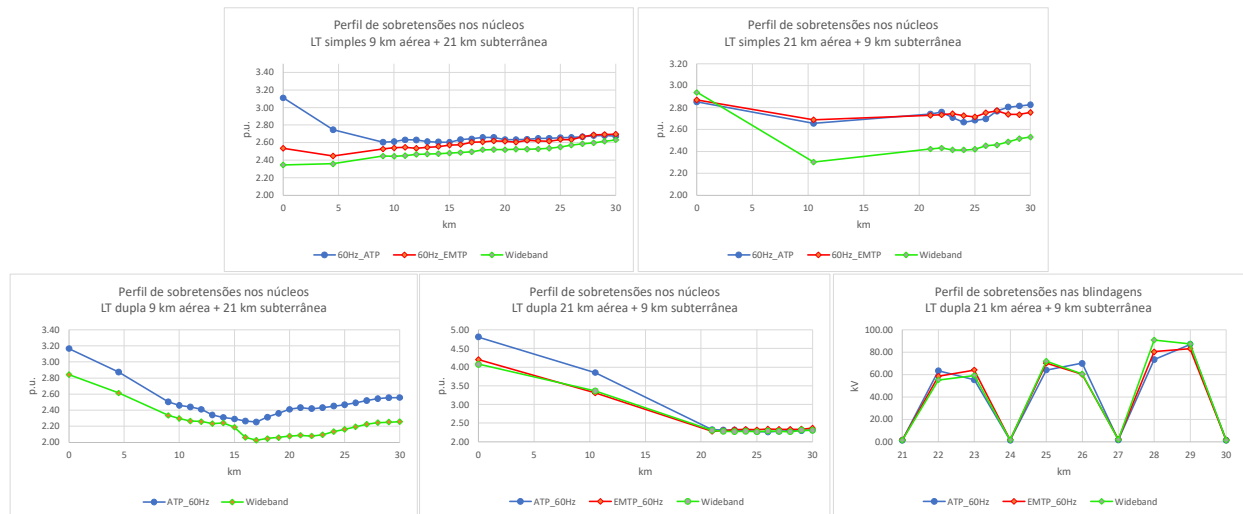


Figura 6 – Perfis de sobretensões máximas ao longo da LT estudada para diferentes configurações
Manobra de religamento tripolar

Tendo em vista valores proibitivos de sobretensões nos trechos aéreos em alguns casos analisados, foi realizada simulação adicional considerando para-raios no terminal B15 e na transição entre meios, prática comumente adotada em projetos reais. Somente foram avaliadas as manobras de religamento pelo terminal B16. A Figura 7 apresenta as comparações entre resultados para este caso. A Figura 8 apresenta simulações no domínio do tempo com e sem para-raios para o caso de religamento pelo terminal B16, condição que ocasiona máxima sobretensão em B15. Por fim, a Figura 9 apresenta comparação entre sobretensões em um ponto das blindagens metálicas com base nos instantes de manobra que apresentaram máximos valores no modelo *Wideband*. Nota-se que os modelos do programa EMTP não apresenta diferenças significativas no valor do primeiro pico, diferente do modelo calculado no ATP.

Tabela 5 – Comparações entre máximos valores no terminal B15.

Configuração		Máximas sobretensões (p.u.)			Desvios (%)	
		ATP	EMTP	Wideband	ATP	EMTP
		60 Hz	60 Hz		60 Hz	60 Hz
Simples	9 km aérea + 21 km subterrânea	3.11	2.53	2.34	32.9	8.1
	21 km aérea + 9 km subterrânea	2.85	2.87	2.94	-3.1	-2.4
Duplo	9 km aérea + 21 km subterrânea	3.17	-	2.84	11.6	-
	21 km aérea + 9 km subterrânea	4.81	4.2	4.08	17.9	2.9

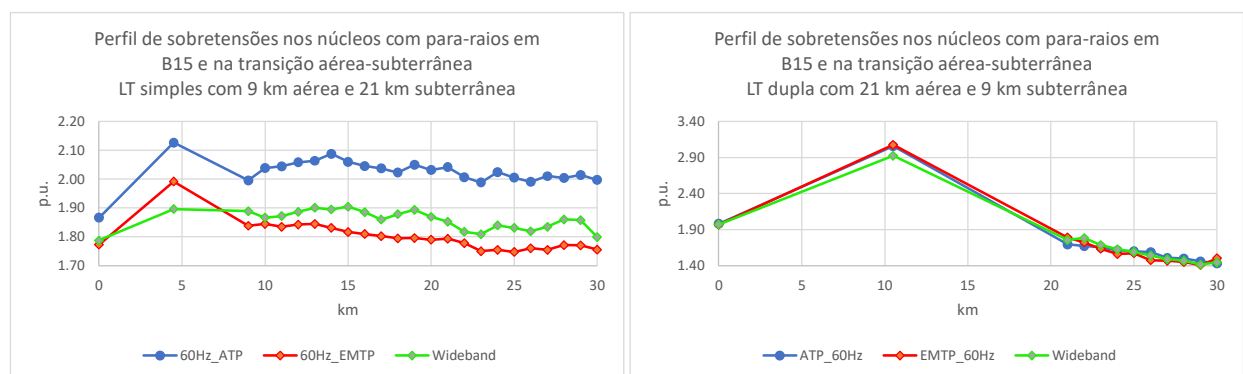


Figura 7 – Perfis de sobretensões máximas para o caso de religamento tripolar pelo terminal B16 considerando para-raios no terminal B15 e na transição entre meios (aéreo-subterrâneo)

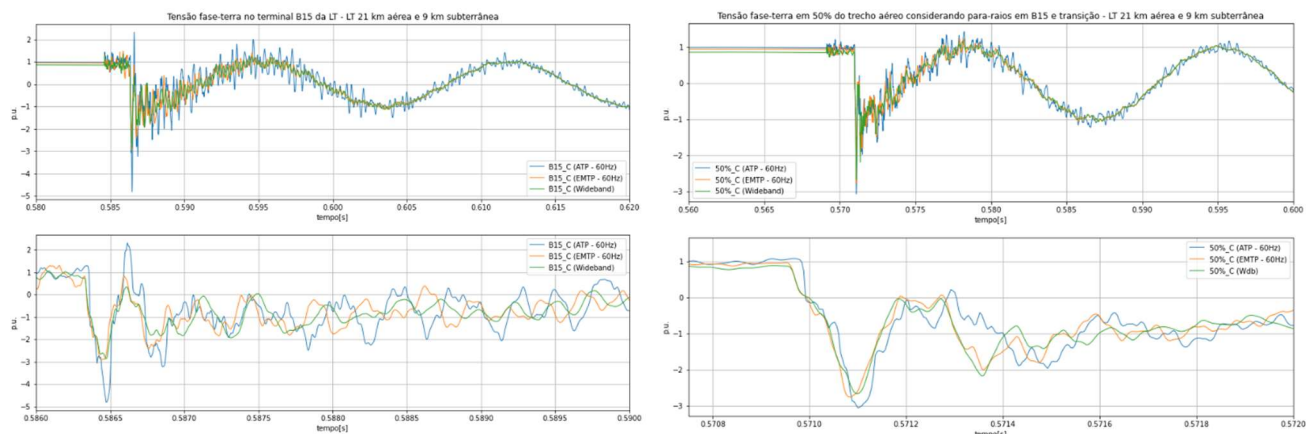


Figura 8 – Comparações entre modelos na manobra de religamento tripolar considerando os mesmos instantes de chaveamento. Instantes escolhidos como aqueles que geraram a máxima sobretensão no terminal B15 do modelo ATP. Análise sem para-raios (esquerda) e com para-raios (direita).

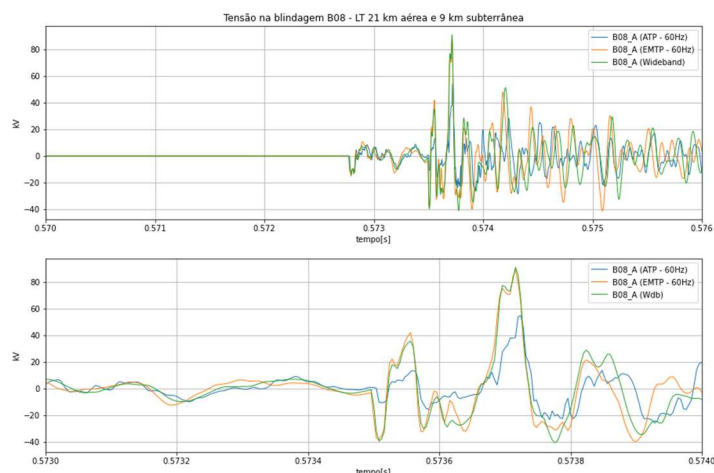


Figura 9 – Comparações entre modelos para sobretensões nas blindagens metálicas

5.0 CONCLUSÕES

Considerando uma rede teste com nível considerável de complexidade, 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) nos dois programas e o modelo *Wideband*, disponível somente no EMTP.

Foi possível notar que o modelo de Bergeron calculado em diferentes programas responde de forma diferente nas simulações computacionais, tanto nas sobretensões nos núcleos quanto nas blindagens metálicas, mesmo considerando instantes de manobra idênticos. Geralmente, o modelo calculado no ATP apresenta componentes com frequência superiores se comparado aos demais e tempos de propagação diferentes.

Nas análises de energização de LT, se considerarmos o modelo *Wideband* como referência de comparação e analisarmos as máximas diferenças entre resultados, o modelo de Bergeron calculado em 60 Hz no ATP pode apresentar discrepâncias da ordem de 10% nos valores máximos para LT totalmente subterrânea e até 20% para LT híbrida. Já o modelo de Bergeron no EMTP apresenta diferenças da ordem de 5% nas duas configurações (LT puramente subterrânea ou híbrida).

De forma geral, os modelos que não levam em conta a dependência dos parâmetros com a frequência sobrestimam os resultados, sendo maiores no ATP.

Nas análises de religamento tipolar apresentadas aqui, realizadas apenas para LTs híbridas, as diferenças aumentam. Para o modelo calculado no ATP, há casos em que a máxima diferença é da ordem de 30% enquanto que no EMTP a diferença fica limitada em torno de 10%.

Do ponto de vista das sobretensões calculadas nas blindagens metálicas, os resultados geralmente são pouco discrepantes, apesar de haver ocasiões onde o modelo *Wideband* apresenta resultados mais severos nesses componentes.

É interessante aprofundar as investigações para tentar entender porque modelos de mesma natureza (parâmetros constantes) apresentam respostas tão diferentes em softwares distintos, porém, há que se comentar que as rotinas auxiliares para composição dos modelos não são as mesmas para o ATP e para o EMTP, devendo ser as causadoras principais das discrepâncias. Ao longo do desenvolvimento do trabalho, notou-se que os modos de propagação, principalmente dos trechos subterrâneos, apresentam parâmetros (impedâncias características, atenuações e velocidade de propagação) distintos nesses softwares. Algo que também ocorre (aparentemente), é a utilização de matrizes de transformação modal complexas no ATP, enquanto que o EMTP utiliza matrizes reais nas simulações no domínio do tempo.

Algo importante a ser pontuado é que atualmente os modelos disponíveis no ATP para representar linhas subterrâneas, que levam em conta a dependência dos parâmetros com a frequência, não possuem formulação adequada. Enquanto isso, em outros programas de simulação estes modelos são constantemente revisitados. Ultimamente, tem-se buscado a representação das matrizes Z_{serie} e Y_{shunt} calculando os parâmetros por meio da resolução das equações de campo nos condutores [16].

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] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Estudo de Atendimento à Região Metropolitana de São Paulo – Sub-regiões Norte, Leste e Sul. EPE, 2019.
- [2] ATP: Alternative Transients Program Rule Book. Leuven, K. U. Leuven EMTP Center, 1987.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [7] 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.
- [8] CIGRE WG C4.503, "TB 736: Power System Test Cases for EMT-Type Simulation Studies". August, 2018.
- [9] IEEE 39-Bus System. Figura retirada de <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-39-bus-system/>
- [10] A. Ametani (1980). A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 3, pp. 902-910, May 1980.
- [11] Programa para cálculo de parâmetros de sequência em linhas de transmissão subterrâneas. Manual versão 02. Disponível em https://github.com/mgarciaribeiro/Sispot/blob/main/Manual_Ferramenta_parametros_LTS_rev02.pdf.
- [12] Programa para cálculo de parâmetros de sequência em linhas de transmissão subterrâneas. Programa na versão 13. Disponível em https://github.com/mgarciaribeiro/Sispot/blob/main/parametros_LTS_rev13.py.
- [13] IEC 60287-1-1: Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General.
- [14] B. Gustavsen (2001), Panel session on data for modeling system transientes insulated cables. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, Columbus, OH, USA, 2001, pp. 718-723 vol. 2.
- [15] ZANETTA, L. (2003). Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, 1ª ed., São Paulo: Edusp.
- [16] U. R. Patel and P. Triverio (2016). Accurate Impedance Calculation for Underground and Submarine Power Cables Using MoM-SO and a Multilayer Ground Model. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 3, pp. 1233-1241, June 2016.

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.