



# INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE MAGNÉTICA RELATIVA DOS CABOS PARA-RAIOS NOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO E NOS TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Wellter M. Sozin\*<sup>1</sup>, Leandro P. Moura<sup>1</sup>, Thássio M. Pereira<sup>1</sup>, Maria C. D. Tavares<sup>1</sup>, Joan S. Chaves H.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FEEC/UNICAMP – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação/Universidade Estadual de Campinas

**Resumo** - Este artigo estuda as influências do valor da permeabilidade magnética relativa dos cabos para-raios nos cálculos dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão, assim como nos níveis de sobretensões críticas obtidos nas simulações computacionais de transitórios eletromagnéticos. Para isso, realizam-se os cálculos dos parâmetros homopolar e não-homopolares de uma linha real através do MATLAB, PSCAD e ATP, e simulações de energização dessa mesma linha em um sistema baseado na interligação Nordeste/Sudeste no PSCAD.

**Palavras-Chave** – Cabos para-raios, linhas de transmissão, parâmetros elétricos, permeabilidade magnética relativa, sobretensões, transitórios eletromagnéticos.

## INFLUENCE OF THE RELATIVE MAGNETIC PERMEABILITY OF GROUND WIRES IN THE ELECTRICAL PARAMETERS OF THE TRANSMISSION LINES AND IN ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS

**Abstract** - This article studies the influence of the relative magnetic permeability values of the ground wires in the calculations of the electrical parameters of the transmission lines, as well as the critical overvoltages obtained in the computational simulations of electromagnetic transients. For this, calculations of the homopolar and non-homopolar parameters of a real line are performed through MATLAB, PSCAD and ATP, and simulations of energization the same line in a system based on the Northeast/Southeast interconnection in the PSCAD.

**Keywords** – Electrical parameters, electromagnetic transients, ground wires, overvoltages, relative magnetic permeability, transmission lines.

## I. INTRODUÇÃO

Os estudos dos transitórios eletromagnéticos nas linhas de transmissão se fazem necessários para a avaliação das sobretensões as quais poderão ocorrer no sistema elétrico de potência. Por sua vez, a determinação dessas sobretensões é de fundamental importância para a realização da coordenação de isolamento das linhas de transmissão e subestações, e, da mesma maneira, para a especificação dos equipamentos que irão compor o sistema elétrico [1].

Porém, esses transitórios eletromagnéticos que originam as sobretensões possuem determinadas faixas de frequências características de acordo com os seus fenômenos causadores, podendo ser resumidamente associados da maneira em que é expressa na Tabela 1 [1].

Tabela 1 – Faixas de frequências dos transitórios eletromagnéticos

Faixa de Frequência	Fenômenos Causadores
0Hz – 100Hz	Mudanças de carga e fenômenos devido à saturação
100Hz – 10kHz	Transitórios devido à chaveamentos/manobras
10kHz – 1MHz	Transitórios devido às descargas atmosféricas
1MHz – 50MHz	Transitórios rápidos

Sabendo que um dos fatores que influenciam a duração e a amplitude das sobretensões são os parâmetros elétricos das linhas de transmissão, se faz necessário que seus modelos adotados em simulações computacionais possuam esses parâmetros o mais próximo possível da realidade. Dessa maneira, é possibilitada a determinação das sobretensões críticas as quais a linha e os equipamentos estarão sujeitos [2].

No entanto, a dependência da frequência dos parâmetros elétricos das linhas é fundamental para uma representação real, sendo que modelagens de parâmetros constantes em uma frequência (normalmente a frequência fundamental de 60Hz) não são adequadas para representar a resposta da linha nas faixas de frequências dos transitórios eletromagnéticos [3].

Da mesma maneira, os parâmetros elétricos das linhas de transmissão são determinados de acordo com a geometria da torre, especificações dos cabos condutores e cabos para-raios (diâmetro, resistência elétrica, permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ )), resistividade do solo, dentre outros fatores.

Visto isso, este trabalho analisa a influência da permeabilidade magnética relativa dos cabos para-raios nos

\*wms.wellter@gmail.com

parâmetros elétricos de modos de uma determinada linha de transmissão real no domínio da frequência. Sendo que, posteriormente, são realizadas diversas simulações de energização dessa mesma linha alterando-se a configuração do sistema e modelagem da linha para avaliar as influências nos estudos dos transitórios eletromagnéticos e, conseqüentemente, na obtenção das sobretensões críticas.

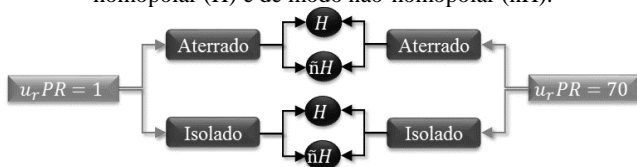
Vale ressaltar que, a escolha da análise se voltar para a permeabilidade magnética relativa dos cabos para-raios, se dá pelo fato de que, muitas das vezes, aproxima-se este valor para a unidade. No entanto, este valor pode variar em torno de 70 até 100 devido os cabos para-raios serem em material de aço galvanizado e às suas características construtivas. Essa aproximação é até mesmo realizada pelo *software* versão *Alternative Transient Program* (ATP) do *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) que considera sempre a permeabilidade magnética dos cabos para-raios unitária.

## II. CÁLCULOS DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DA LINHA DE TRANSMISSÃO NA DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA

Os parâmetros elétricos da linha de transmissão calculados foram os de modo homopolar (sequência zero) e de modo não-homopolar (sequência positiva e negativa), tanto resistência quanto indutância, obtendo sempre os seus valores por unidade de comprimento e considerando a linha idealmente transposta [4]. Os cálculos foram realizados na dependência da frequência com uma varredura de 1 Hz até 1 MHz.

Para os cálculos, foram consideradas as configurações dos cabos para-raios onde estes se apresentem aterrados ou isolados, e com permeabilidade magnética relativa unitária ou de 70, como mostrado na Figura 1.

Figura 1: Esquema das quatro configurações adotadas dos cabos para-raios para os cálculos dos parâmetros da linha de modo homopolar (H) e de modo não-homopolar ( $\tilde{n}H$ ).

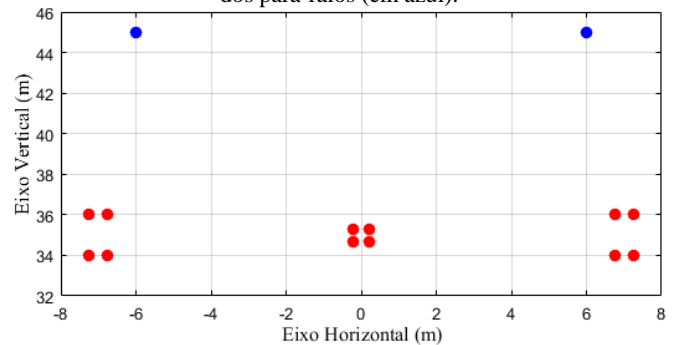


Para a realização dos cálculos e posterior análise dos resultados, foi-se utilizada uma linha de transmissão real cuja operação se dá na tensão nominal de 500 kV, possui 350 km de comprimento, 4 condutores *Bluejay* por fase e 2 cabos para-raios de aço galvanizado EHS 3/8". Seus parâmetros construtivos são exibidos na Tabela 2 e a silhueta da torre exibida na Figura 2.

Tabela 2 – Parâmetros construtivos da linha de transmissão

<b>CONDUTORES</b> Tipo CAA	Diâmetro externo (mm)	29,59
	Diâmetro interno (mm)	7,4
	Resistência CC a 25°C ( $\Omega$ /km)	0,0514
	Permeabilidade magnética relativa	1
	Flecha a meio vão em 60°C (m)	13,4
<b>PARA-RAIOS</b> Galvanização classe B	Diâmetro externo (mm)	9,144
	Resistência CC a 25°C ( $\Omega$ /km)	3,51
	Permeabilidade magnética relativa	70
	Flecha a meio vão em 40°C (m)	6,4
Vão médio entre torres (m)		400
Resistividade média do solo ( $\Omega$ .m)		4000

Figura 2: Silhueta da torre da linha de transmissão utilizada, mostrando a disposição espacial dos condutores (em vermelho) e dos para-raios (em azul).



Foram utilizadas três metodologias para a realização dos cálculos, sendo que a seguir serão abordadas cada uma separadamente e ao final desta seção serão apresentados os comparativos dos resultados entre as mesmas.

### A. Cálculos Através do “Matrix Laboratory” (MATLAB)

Desenvolveu-se um *script* através do MATLAB para obter os parâmetros elétricos da linha através de seus parâmetros construtivos e de sua silhueta.

Este programa utiliza a teoria aprofundada para o cálculo dependente da frequência [5], sendo assim, obtém as impedâncias internas dos cabos condutores e cabos para-raios através das funções de Bessel, realiza o cálculo da matriz de impedância externa com solo ideal fazendo posteriormente sua correção considerando o solo com condutividade finita através da formulação integral de Carson [6]. Com isso, a matriz de impedância longitudinal primitiva é obtida, os feixes dos condutores de cada fase são reduzidos e os efeitos dos para-raios são incorporados nos condutores de fases levando em conta se estão aterrados ou isolados, realiza-se a transposição ideal da linha para obter a matriz de impedâncias de fase, e, por fim, aplica-se a transformação das componentes simétricas de Fortescue para obter as impedâncias de modo homopolar e não-homopolar. Portanto, tem-se como resultado, as resistências e indutâncias longitudinais da linha de transmissão em modos.

Dessa maneira, utilizando-se desse programa e considerando cada uma das quatro configurações expressas anteriormente, foram obtidos os valores de resistências e indutâncias em modos.

### B. Cálculos Através do “Power Systems Computer Aided Design” (PSCAD)

Utilizando-se do *software* de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC (“*Electromagnetic Transients including DC*”) foi possível modelar a linha em questão considerando também as quatro configurações.

Através do Modelo Dependente da Frequência em Fases para a linha disponibilizado pelo PSCAD, foi possível obter a matriz de impedância longitudinal por unidade de comprimento calculada para cada valor de frequência dentro da faixa de varredura.

Vale ressaltar que o PSCAD ao incorporar os efeitos dos cabos para-raios nas fases, por *default*, é considerado que estão sempre aterrados, implicando em tensão transversal nula. Portanto, não foi solicitado na modelagem da linha para

eliminá-los. Dessa maneira, a matriz completa de impedância calculada pelo PSCAD é reduzida considerando-se o caso dos para-raios aterrados ou isolados (correntes nulas). Com isso, obtêm-se os parâmetros elétricos em modos, tanto resistência quanto indutância, para ambos os casos.

### C. Cálculos Através do ATP

Para obter os parâmetros elétricos em modos da linha de transmissão, dentre outras informações, na varredura da frequência, o ATP disponibiliza uma rotina de cálculos denominada “Line Constants” [7].

Nesta rotina, basta informar os dados da geometria e os parâmetros construtivos da linha, assim como a quantidade de décadas e de pontos por década de frequências em que se deseja obter os resultados.

Da mesma maneira que na obtenção dos resultados através do MATLAB e do PSCAD, há a possibilidade de se trabalhar com os cabos para-raios aterrados ou isolados. No entanto, como já ressaltado, não há a possibilidade de se alterar a permeabilidade magnética relativa dos para-raios, sendo considerada unitária internamente ao *software*.

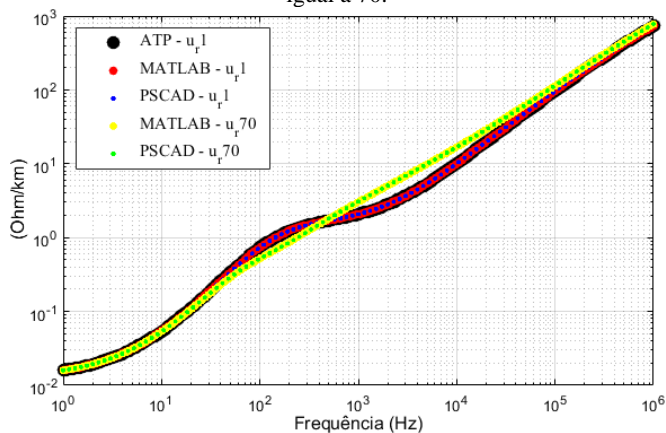
Dessa maneira, os resultados obtidos através do ATP ficaram restritos à apenas duas configurações dentre as expressas anteriormente, ou seja, cabos para-raios aterrados ou isolados, mas sempre com sua permeabilidade magnética relativa unitária.

### D. Comparativos dos Resultados

Comparando-se os resultados obtidos através das três metodologias, se faz possível validar tanto o desenvolvimento do programa de cálculo do MATLAB quanto a modelagem adotada para a linha no PSCAD com a rotina de cálculo do ATP.

Os primeiros resultados a serem comparados e estudados são os de resistência longitudinal em modo homopolar, ou seja, de sequência zero, para os para-raios aterrados. No gráfico contido na Figura 3 estão plotadas as curvas dos resultados com a  $\mu_r$  dos para-raios unitária e também igual a 70.

Figura 3: Resistências longitudinais por unidade de comprimento em modo homopolar para os para-raios aterrados com  $\mu_r$  unitária e igual a 70.



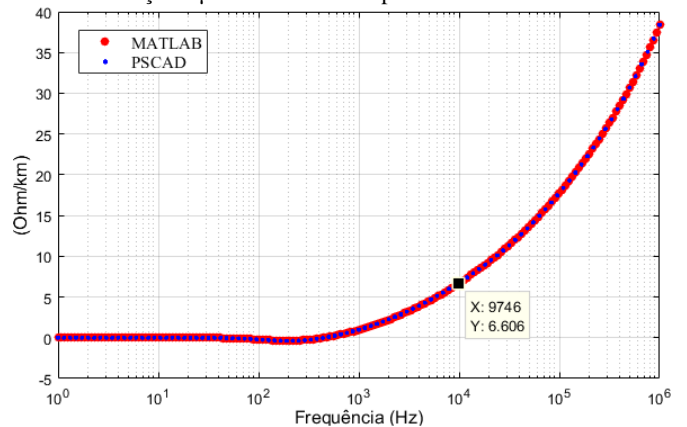
Observa-se que, em ambas as metodologias, independentemente do valor utilizado para a  $\mu_r$  dos para-raios, os resultados coincidem exatamente, validando a utilização de todas elas.

No entanto, utilizando a  $\mu_r$  com seu valor real, obtém-se uma curva de resultados mais linear. Dessa maneira, para uma faixa de frequências entre aproximadamente 30 Hz e 450 Hz, a resistência de modo homopolar da linha quando se utiliza  $\mu_r$  com seu valor real é menor do que quando  $\mu_r$  é aproximada para a unidade, podendo essa diferença ser máxima de 0,36  $\Omega$  em 190 Hz.

Por outro lado, a resistência de modo homopolar é maior no caso quando se utiliza  $\mu_r$  real do que com relação à  $\mu_r$  unitária para os valores de frequências maiores do que 450 Hz. Esta diferença cresce infinitamente, tendo valor de aproximadamente 6,7  $\Omega$  em uma frequência de 10 kHz, sendo esta a frequência máxima das sobreensões causadas por transitórios devido à chaveamentos e manobras.

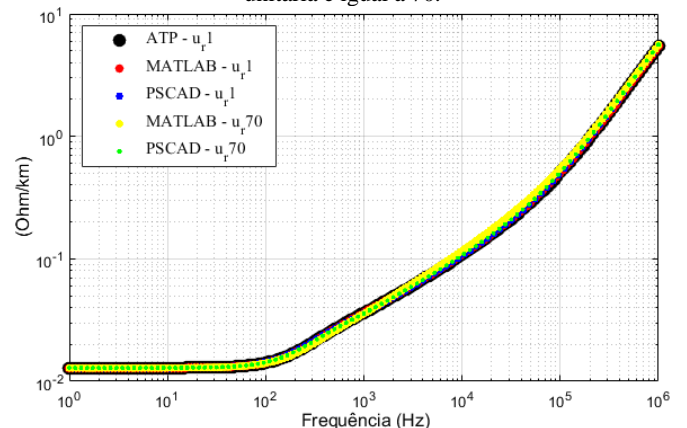
Estas diferenças podem ser melhor observadas na Figura 4, onde foram calculadas sempre observando o caso de  $\mu_r$  real com relação ao de  $\mu_r$  unitária.

Figura 4: Diferenças entre as resistências longitudinais por unidade de comprimento em modo homopolar do caso com  $\mu_r$  de 70 com relação à  $\mu_r$  unitária com os para-raios aterrados.



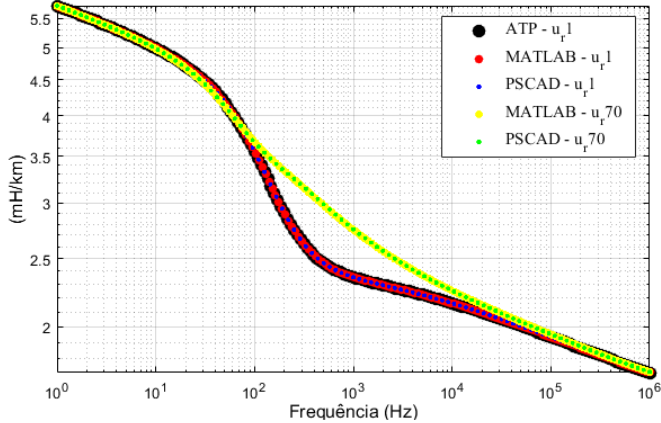
Já para a resistência longitudinal em modo não-homopolar, ou seja, de sequência positiva ou negativa, na configuração onde os para-raios se encontram aterrados, não foram observadas diferenças nos resultados se considerada a  $\mu_r$  dos para-raios como 70 ou como unitária. No entanto, os resultados de ambas as metodologias coincidiram, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5: Resistências longitudinais por unidade de comprimento em modo não-homopolar para os para-raios aterrados com  $\mu_r$  unitária e igual a 70.



Quando avaliada a indutância longitudinal em modo homopolar com os para-raios aterrados, observa-se também a coincidência dos resultados entre as metodologias, como pode ser visualizada na Figura 6.

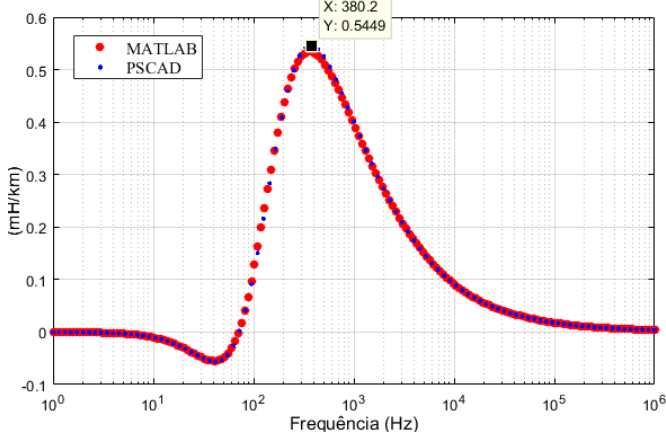
Figura 6: Indutâncias longitudinais por unidade de comprimento em modo homopolar para os para-raios aterrados com  $\mu_r$  unitária e igual a 70.



No entanto, assim como na resistência de modo homopolar, quando é utilizada a  $\mu_r$  dos para-raios como 70 obtém-se uma curva mais linear quando comparada com a curva utilizando a  $\mu_r$  unitária.

Dessa maneira, para a faixa de frequências entre aproximadamente 10 Hz e 70 Hz, a indutância de modo homopolar da linha quando se utiliza  $\mu_r$  com seu valor real é menor do que quando  $\mu_r$  é aproximada para a unidade, podendo essa diferença ser máxima de aproximadamente 0,06 mH em 40 Hz. Já para frequências maiores do que 70 Hz, a indutância de modo homopolar é maior no caso quando se utiliza  $\mu_r$  real do que com relação à  $\mu_r$  unitária. Esta diferença é máxima de aproximadamente 0,54 mH na frequência de 380 Hz e, posteriormente, decresce rapidamente tendendo a zero para frequências muito elevadas como pode ser visualizado na Figura 7.

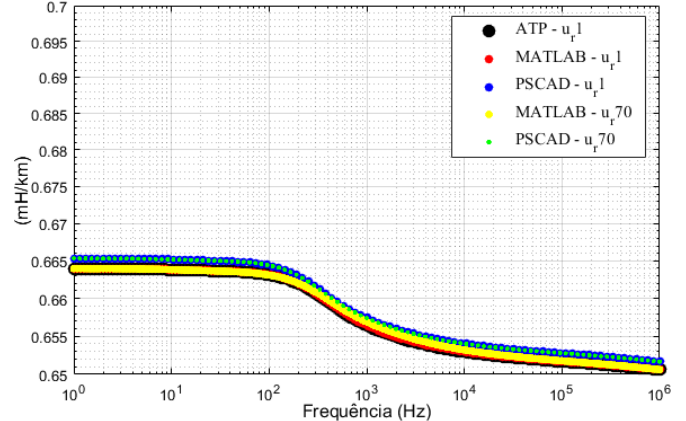
Figura 7: Diferenças entre as indutâncias longitudinais por unidade de comprimento em modo homopolar do caso com  $\mu_r$  de 70 com relação à  $\mu_r$  unitária com os para-raios aterrados.



Vale ressaltar que a indutância de modo homopolar possui o pico de maior diferença num valor de frequência interior à faixa das sobretensões causadas por transitórios devido à chaveamentos e manobras.

Já para a indutância longitudinal em modo não-homopolar na configuração onde os para-raios se encontram aterrados, não houveram diferenças nos resultados se considerada a  $\mu_r$  dos para-raios como 70 ou como unitária. Da mesma maneira que em todas as análises, os resultados de ambas as metodologias coincidiram, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8: Indutâncias longitudinais por unidade de comprimento em modo não-homopolar para os para-raios aterrados com  $\mu_r$  unitária e igual a 70.



Por fim, os parâmetros elétricos da linha de transmissão de resistência e indutância tanto de modo homopolar quanto não-homopolar, não sofreram alterações quando calculados utilizando-se a  $\mu_r$  dos cabos para-raios como 70 ou unitária se estes se encontrarem na configuração de isolados.

### III. SIMULAÇÕES DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS: ENERGIZAÇÃO DA LINHA

Com o intuito de verificar a influência das diferenças observadas entre os parâmetros elétricos da linha quando considerada a  $\mu_r$  dos para-raios real e quando é considerada unitária nos transitórios eletromagnéticos e, conseqüentemente, nos níveis de sobretensões críticas do sistema, foram realizadas algumas simulações computacionais.

Estas simulações foram realizadas através do *software* PSCAD, consistindo na energização da linha de transmissão em questão imersa em um sistema elétrico.

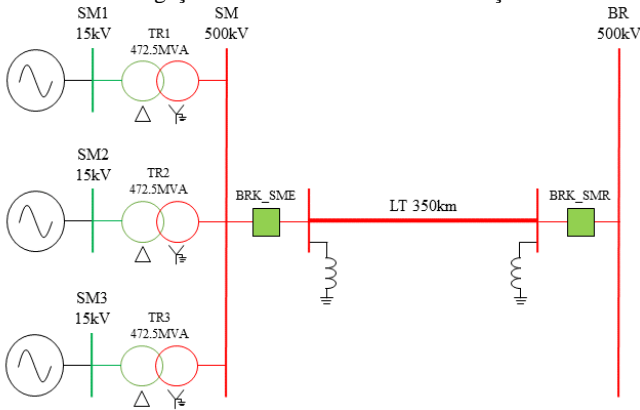
#### A. Sistema Elétrico sob Simulação

O sistema elétrico utilizado baseou-se na interligação Nordeste/Sudeste, possuindo 3 equivalentes de rede em paralelo representando os geradores.

Cada equivalente de rede possui um transformador elevador de conexão  $\Delta/Y$  aterrado com relação de transformação de 15/500 kV e potência de 472,5 MVA, sendo representadas também as curvas de saturação dos mesmos. Estes transformadores se conectam à barra de 500 kV de onde se inicia a linha de transmissão.

A linha modelada nesse sistema é a mesma utilizada para os cálculos anteriores, portanto possui 350 km de comprimento, é idealmente transposta e possui compensação reativa *shunt* em ambas as extremidades. O diagrama unifilar da rede elétrica é apresentado na Figura 9.

Figura 9: Diagrama unifilar do sistema elétrico baseado na interligação Nordeste/Sudeste sob simulação.

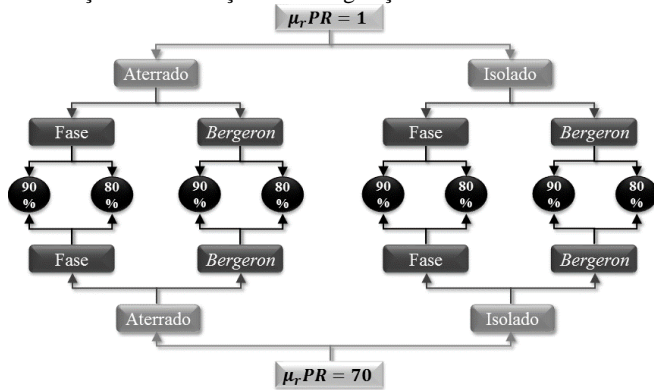


### B. Metodologia das Simulações

As simulações foram realizadas para a manobra de energização da linha de transmissão, considerando três casos, sendo eles o de energização em vazio, energização sob falta monofásica em 25% da linha e energização sob falta monofásica em 50% da linha. Para todos os casos a linha foi energizada tendo uma tensão de 1 pu em seu terminal emissor.

Para cada um desses casos foram consideradas as configurações do sistema elétrico onde os cabos para-raios possuem  $\mu_r$  real de 70 ou unitária, onde os cabos para-raios estão aterrados ou isolados, onde a linha possui compensação reativa *shunt* de 80% ou de 90%, podendo ela também ser modelada utilizando-se do modelo de *Bergeron* ou do Modelo Dependente da Frequência em Fases. Essas configurações que se totalizam 16 podem ser melhor entendidas na Figura 10.

Figura 10: Esquema das 16 configurações do sistema elétrico para realização das simulações de energização da linha de transmissão.



A utilização de duas modelagens distintas para a linha se deu em função de permitir a análise da influência da  $\mu_r$  dos cabos para-raios na dependência da frequência no comportamento das sobretensões, pois, ao utilizar o modelo de *Bergeron*, representa-se com precisão a linha de transmissão apenas na frequência fundamental. Já o Modelo Dependente da Frequência em Fases disponível no PSCAD representa com precisão sistemas balanceados e desbalanceados em qualquer faixa de frequência [8].

Para considerar a aleatoriedade da manobra de energização e a dispersão entre os polos do disjuntor devido seu mecanismo mecânico, foram realizadas 500 rodadas de simulações estatísticas. Dessa forma, o tempo de fechamento

do disjuntor é determinado por uma variável aleatória normal com desvio padrão de 2 ms podendo ter valor entre 0 e 16,67 ms, ou seja, um ciclo em 60 Hz. De maneira semelhante, cada polo do disjuntor possui sua própria dispersão representada cada uma por uma variável aleatória normal com desvio padrão de 2 ms podendo ter valor entre 0 e 2 ms.

### C. Comparativos dos Resultados das Simulações

Para realização dos comparativos dentro de cada um dos três casos de energização, foram consideradas as rodadas ótimas de cada uma das 16 configurações, sendo que a rodada ótima de uma configuração é aquela que apresentou a maior sobretensão no fim da linha dentre as 500 rodadas. Os valores num intervalo de confiança de 98% também foram calculados.

Para o caso de energização da linha em vazio, não foram observadas variações significativas nos níveis de sobretensões críticas quando se comparam os resultados das simulações das configurações do sistema utilizando a  $\mu_r$  dos cabos para-raios como 70 ou unitária, como visto na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparativo dos resultados das simulações para o caso de energização da linha em vazio.

Configuração	Sobretensão [pu]		Variação	Sobretensão 98% [pu]		Variação
	$\mu_r$ 70	$\mu_r$ 1		$\mu_r$ 70	$\mu_r$ 1	
Aterrado_Bergeron_80%	2.31	2.29	0.57%	2.27	2.27	0.18%
Aterrado_Bergeron_90%	2.26	2.24	0.67%	2.23	2.22	0.40%
Aterrado_Fases_80%	2.36	2.37	-0.52%	2.27	2.29	-0.33%
Aterrado_Fases_90%	2.30	2.31	-0.33%	2.22	2.22	0.08%
Isolado_Bergeron_80%	2.32	2.33	-0.15%	2.28	2.28	-0.33%
Isolado_Bergeron_90%	2.28	2.26	0.96%	2.22	2.21	0.44%
Isolado_Fases_80%	2.34	2.33	0.31%	2.28	2.27	0.33%
Isolado_Fases_90%	2.32	2.35	-0.90%	2.22	2.21	0.23%

Já para o caso de energização da linha com falta monofásica em 25% de seu comprimento, observa-se uma variação notável nos níveis de sobretensões utilizando  $\mu_r$  como 70 ou unitária, sendo os maiores níveis com a  $\mu_r$  tendo valor 70.

Como pode ser observado na Tabela 4, essas variações mais notáveis ocorreram somente nas configurações do sistema em que são utilizados os cabos para-raios aterrados e a linha modelada utilizando o Modelo Dependente da Frequência em Fases. Desse modo, a maior variação é de 3,49%, ou seja, a sobretensão no fim da linha quando ela é modelada utilizando a  $\mu_r$  real é aproximadamente 36 kV maior do que quando a  $\mu_r$  é aproximada para a unidade.

Tabela 4 – Comparativo dos resultados das simulações para o caso de energização da linha com falta monofásica em 25%.

Configuração	Sobretensão [pu]		Variação	Sobretensão 98% [pu]		Variação
	$\mu_r$ 70	$\mu_r$ 1		$\mu_r$ 70	$\mu_r$ 1	
Aterrado_Bergeron_80%	2.56	2.56	-0.28%	2.61	2.62	-0.23%
Aterrado_Bergeron_90%	2.49	2.50	-0.36%	2.53	2.56	-1.34%
Aterrado_Fases_80%	2.60	2.51	3.49%	2.57	2.51	2.14%
Aterrado_Fases_90%	2.52	2.44	3.16%	2.49	2.45	1.76%
Isolado_Bergeron_80%	2.60	2.63	-1.39%	2.60	2.62	-0.37%
Isolado_Bergeron_90%	2.58	2.55	1.10%	2.54	2.55	-0.51%
Isolado_Fases_80%	2.67	2.65	0.78%	2.62	2.62	0.20%
Isolado_Fases_90%	2.57	2.56	0.05%	2.54	2.53	0.24%

De maneira semelhante, no caso de energização da linha com falta monofásica em 50% de seu comprimento, observa-se as variações significativas de sobretensões nas configurações do sistema onde os cabos para-raios se encontram aterrados e com a utilização do Modelo Dependente da Frequência em Fases.

Essas variações, como pode ser notado na Tabela 5, chegam em até 4,95% com a compensação reativa *shunt* de 80%, ou seja, a sobretensão no fim da linha quando ela é modelada

utilizando a  $\mu_r$  real é aproximadamente 50kV maior do que quando a  $\mu_r$  é aproximada para a unidade.

Tabela 5 – Comparativo dos resultados das simulações para o caso de energização da linha com falta monofásica em 50%.

ENERGIZAÇÃO COM FALTA MONOFÁSICA EM 50%						
Configuração	Sobretensão [pu]		Variação	Sobretensão 98% [pu]		Variação
	$\mu_{r70}$	$\mu_{r1}$		$\mu_{r70}$	$\mu_{r1}$	
Aterrado Bergeron 80%	2.72	2.65	2.45%	2.74	2.70	1.24%
Aterrado Bergeron 90%	2.64	2.58	2.23%	2.65	2.63	0.75%
Aterrado Fases 80%	2.60	2.48	4.95%	2.60	2.50	3.66%
Aterrado Fases 90%	2.52	2.42	4.07%	2.52	2.44	3.34%
Isolado Bergeron 80%	2.82	2.78	1.29%	2.77	2.77	0.03%
Isolado Bergeron 90%	2.72	2.68	1.46%	2.68	2.69	-0.17%
Isolado Fases 80%	2.79	2.77	0.37%	2.72	2.72	-0.12%
Isolado Fases 90%	2.72	2.68	1.42%	2.64	2.64	0.04%

Neste caso também são notadas variações significativas nas mesmas configurações observadas anteriormente, mas com a utilização do modelo de *Bergeron* para a linha. No entanto, são de menores amplitudes, chegando em até 2,45% com a compensação reativa *shunt* também de 80%.

#### IV. CONCLUSÕES

A primeira conclusão obtida foi a validação do programa no MATLAB para os cálculos dos parâmetros elétricos de qualquer tipo de linha de transmissão, visto que os seus resultados se equiparam com os resultados obtidos a partir de *softwares* profissionais como o PSCAD e o ATP.

Com relação aos parâmetros elétricos da linha de transmissão utilizada nesse estudo, se estendendo também para a teoria geral, conclui-se que, independentemente dos parâmetros elétricos analisados, sejam homopolar ou não-homopolar, estes não sofrem alteração com a variação da  $\mu_r$  dos cabos para-raios se estiverem isolados.

Isto é consequência de que, quando os para-raios se encontram isolados, como não há circulação de corrente através deles, seus efeitos não são incorporados nos condutores de fase. Dessa maneira, quaisquer variações nas parcelas referentes aos para-raios não afetam os parâmetros elétricos da linha.

Outra conclusão é a de que os parâmetros não-homopolares, tanto resistência quanto indutância, não são alterados com a variação da  $\mu_r$  dos cabos para-raios mesmo estes estando aterrados, já que para a resistência de sequência positiva o efeito predominante é o de resistência interna dos condutores e para a indutância de sequência positiva é o da indutância interna dos condutores.

Portanto, exclusivamente os parâmetros homopolares sofrem alterações com a variação da  $\mu_r$  dos cabos para-raios se, e somente se, estes estiverem aterrados.

Como para a resistência de sequência zero há influências da resistência devido ao retorno pelo solo e da resistência interna dos condutores e, para a indutância de sequência zero, há influências da indutância externa entre os cabos e da indutância devido ao solo, pressupõe-se que as variações observadas nestes parâmetros provêm de alterações nas parcelas devido ao efeito do solo.

Como são alterados somente os parâmetros homopolares, presume-se que hajam variações nos níveis das sobretensões originadas somente por transitórios que envolvam sequência zero e que estejam nas faixas de frequências em que as alterações foram observadas nos resultados dos cálculos com os para-raios aterrados.

Isso é confirmado e concluído quando estas variações são observadas somente nas simulações de energizações sob faltas monofásicas, ou seja, em eventos que envolvam a sequência zero do sistema, e nas configurações com os cabos para-raios aterrados. Sendo que, nestes casos, os transitórios ocorreram nas faixas de frequências onde os parâmetros com a  $\mu_r$  dos cabos para-raios real são menores do que com  $\mu_r$  unitária.

Além do mais que, pelo fato das influências da  $\mu_r$  dos cabos para-raios nos parâmetros da linha de transmissão estarem intimamente em dependência com a frequência, como observados nos resultados, se faz necessária a utilização de um modelo de linha dependente da frequência para obtenção dos níveis de sobretensões mais próximos da realidade.

Em suma, conclui-se que é importante considerar a  $\mu_r$  real dos cabos para-raios nos cálculos dos parâmetros das linhas de transmissão e nas simulações. Principalmente em simulações de transitórios eletromagnéticos que envolvam a excitação dos parâmetros de sequência zero, visto que eles podem sofrer variações de acordo com a faixa de frequência dos transitórios em estudo, podendo originar sobretensões em níveis maiores ou menores do que quando  $\mu_r$  é aproximado para a unidade.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro concedido pelas instituições CAPES, CNPq (136500/2017-0 e 306351/2017-0) e FAPESP (2018/06740-0 e 2017/20010-0), assim como a todos os amigos e familiares que cooperaram diretamente e indiretamente para a existência deste artigo.

#### REFERÊNCIAS

- [1] A. D'Ajuz *et al.*, *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - aplicação em sistemas de potência de alta tensão*, 1ªEd. Niterói: FURNAS, Centrais Elétricas S.A., 1987.
- [2] M. G. Pinheiro, "Análise de Sensibilidade de Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão no Domínio da Frequência," Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2005.
- [3] J. R. Marti, "Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147–157, 1982.
- [4] H. W. Dommel, *Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*. Portland: Bonneville Power Administration, 1986.
- [5] C. M. de J. C. M. Portela, *Regimes Transitórios - vol. II*. 1984.
- [6] J. R. Carson, "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 5, no. 4, pp. 539–554, 1926.
- [7] L. E. C. (LEC), *Alternative Transient Program Rule Book*. 1987.
- [8] M. H. R. Centre, "PSCAD X4 Online Help." Manitoba HVDC Research Centre, 2015.