

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**MARCOS EDUARDO COCIELO**

**INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO NA IMPEDÂNCIA  
LONGITUDINAL DE SEQUÊNCIA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO EM LINHA  
DE TRANSMISSÃO AÉREA**

**MEDIANEIRA  
2022**

**MARCOS EDUARDO COCIELO**

**INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO NA IMPEDÂNCIA  
LONGITUDINAL DE SEQUÊNCIA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO EM LINHA  
DE TRANSMISSÃO AÉREA**

**Influence of the earth's electrical resistivity on the longitudinal sequence  
impedance per unit of length in overhead transmission line**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Elétrica da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR)

Orientador: Hugo Andrés Ruiz Flórez  
Coorientador: Evandro André Konopatzki  
Coorientador: Javier Arturo Santiago Ortega

**MEDIANEIRA  
2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**MARCOS EDUARDO COCIELO**

**INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO NA IMPEDÂNCIA  
LONGITUDINAL DE SEQUÊNCIA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO EM LINHA  
DE TRANSMISSÃO AÉREA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Elétrica da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR)

Data de aprovação: 22/junho/2022

---

Hugo Andrés Ruiz Flórez  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Evandro André Konopatzki  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Javier Arturo Santiago Ortega  
Doutorado  
Universidade Estadual de Campinas

---

Cristiane Lionço de Oliveira  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Diogo Marujo  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**MEDIANEIRA  
2022**

Dedico este trabalho à minha mãe, pelos momentos de sacrifício e luta durante todos esses anos.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, que auxilia e ampara a difícil jornada longe de casa, minha mãe Jaqueline Alves de Oliveira, minha irmã Beatriz Fávaro e meu padrasto Nilton Cesar Fávaro.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Hugo Andrés Ruiz Flórez, por aceitar o desafio deste trabalho.

Agradeço aos meus coorientadores, o Prof. Dr. Evandro André Konopatzki e o Dr. Javier Arturo Santiago Ortega, que contribuíram de maneira exemplar.

Agradeço à Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares, por apresentar os conceitos utilizados neste trabalho de forma brilhante.

Aos meus amigos e colegas de sala.

Por fim agradeço a Deus por conceder a capacidade, a força de vontade e a motivação para não desistir nos momentos difíceis.

## RESUMO

As linhas de transmissão aéreas compõem vital parcela do sistema elétrico de potência, que é responsável por gerar, transmitir e distribuir grandes quantidades de energia elétrica, necessário para o desenvolvimento de qualquer nação. O Brasil é um país com dimensões continentais, tendo em sua composição diferentes climas e vegetações, fatores que influenciam na formação do solo e, portanto, o valor de sua resistividade elétrica. Com isso se torna necessário identificar a importância da modelagem do solo como um plano condutor com resistividade finita, analisando a sensibilidade existente entre diferentes resistividades do solo e os parâmetros elétricos longitudinais unitários, decompostos em componentes de sequência, também conhecidos por componentes modais, utilizando o método das imagens complexas. Neste trabalho foi desenvolvida uma rotina de cálculo, em linguagem MATLAB®, para realizar o cálculo matricial dos parâmetros elétricos da linha de transmissão, com dados de uma linha real de 440 kV, desde a matriz primitiva até as impedâncias de sequência. Os resultados foram comparados com os dados obtidos no *software* PSCAD/EMTDC®, separados como resistência e indutância por unidade de comprimento, apresentados na forma de tabelas e gráficos. Esses dados mostram que a consideração do solo real não tem influência significativa na impedância de sequência positiva, no entanto, influência drasticamente a impedância de sequência zero, de maneira mais impactante quando ignorada e produz erro considerável dentro das resistividades analisadas.

**Palavras-chave:** linhas elétricas aéreas; sistemas de energia elétrica; solos - propriedades elétricas; impedância (eletricidade).

## ABSTRACT

Overhead transmission lines make up a vital part of the electrical power system, which is responsible for generating, transmitting and distributing large amounts of electrical energy, necessary for the development of any nation. Brazil is a country with continental dimensions, having in its composition different climates and vegetation, factors that influence the formation of the soil and, therefore, the value of its electrical resistivity. With this, it becomes necessary to identify the importance of modeling the soil as a conducting plane with finite resistivity, analyzing the relationship between different soil resistivities and the unit longitudinal electrical parameters, decomposed into sequence components, also known as modal components, using the complex image method. In this work, a calculation routine was developed, in MATLAB® language, to reproduce the matrix calculation of the electrical parameters of the transmission line, with data from a real 440 kV line, from the primitive matrix to the sequence impedances. The results were compared with the data obtained in the PSCAD/EMTDC® software, separated as resistance and inductance per unit of length, presented in the form of tables and graphs. These data show that the consideration of the real ground has no negligible influence on the positive sequence impedance, however, it drastically influences the zero sequence impedance, in a more impactful way when ignored and produces considerable error within the analyzed resistivities.

**Keywords:** overhead power lines, electric power systems, soils - electrical properties, impedance (electricity).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Circuito pi nominal de uma linha de transmissão de comprimento médio.....	16
Figura 2 – Circuito exemplo para equivalencia de linha trifásica.....	17
Figura 3 – Perspectiva geoeétrica das linhas de transmissão da rede básica – horizonte brasileiro 2024 .....	18
Figura 4 – Mapa temático da resistividade elétrica no estado de Santa Catarina .....	20
Figura 5 – Representação da imagem do condutor sobre o solo ideal .....	24
Figura 6 – Representação das distâncias entre os cabos e suas imagens para o cálculo da impedância externa .....	24
Figura 7 – Vista do condutor: (a) longitudinal e (b) transversal .....	29
Figura 8 – Representação das distâncias entre os cabos e suas imagens para o cálculo da impedância externa usando o método do plano complexo.....	32
Figura 9 – Representação das distâncias entre os cabos condutores de fase .....	37
Figura 10 – Representação do equivalente trifásico após redução matricial .....	37
Figura 11 – Esquema de transposição de uma linha de transmissão com quatro trechos .....	42
Figura 12 – Representação das componentes simétricas.....	44
Figura 13 – Diagrama da metodologia de cálculo aplicada.....	48
Figura 14 – Silhueta da torre.....	51
Figura 15 – Seções de componentes na aba <i>Master Library</i> .....	56
Figura 16 – Exemplo genérico das configurações e opções do componente <i>TLine</i> .....	56
Figura 17 – Configurações dos parâmetros da simulação .....	57
Figura 18 – Detalhe das propriedades e configurações de cálculo do solo .....	58
Figura 19 – Dados de saída – matriz de impedâncias e admitâncias de sequência na aba <i>Output</i> .....	59
Figura 20 – Gráfico da resistência de sequência zero em função da resistividade.....	60
Figura 21 – Gráfico da indutância de sequência zero em função da resistividade....	62
Figura 22 – Gráfico da resistência de sequência positiva em função da resistividade .....	64
Figura 23 – Gráfico da indutância de sequência positiva em função da resistividade .....	65
Figura 24 – Gráfico da sensibilidade das resistências de sequência em função da frequência .....	67
Figura 25 – Gráfico da sensibilidade das indutâncias de sequência em função da frequência .....	68



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa de resistividade elétrica típicas de alguns tipos de solo .....	18
Tabela 2 – Intervalos da distribuição da resistividade do solo no estado de Santa Catarina.....	20
Tabela 3 – Dados dos condutores de fase da linha de transmissão – condutor Grosbeak.....	52
Tabela 4 – Dados dos cabos pára-raios da linha de transmissão .....	52
Tabela 5 – Resistência de sequência zero para uma mesma resistividade de solo em 60 Hz .....	59
Tabela 6 – Indutância de sequência zero para uma mesma resistividade de solo em 60 Hz .....	61
Tabela 7 – Dados calculados do RMSE para impedância de sequência zero .....	62
Tabela 8 – Resistência de sequência positiva para uma mesma resistividade de solo em 60 Hz.....	63
Tabela 9 – Indutância de sequência positiva para uma mesma resistividade de solo em 60 Hz.....	64
Tabela 10 – Dados calculados do RMSE para impedância de sequência positiva ...	65
Tabela 11 – Erro percentual dos parâmetros de sequência com diferentes resistividades .....	66
Tabela 12 – Capacitância de sequência para uma mesma resistividade de solo em 60 Hz.....	68

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1.	Objetivo	13
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>14</b>
2.1.	Linhas de transmissão aéreas	15
2.2.	Estudos sobre o solo e a resistividade no brasil	17
2.3.	Parâmetros elétricos da linha de transmissão aérea	21
2.3.1.	Resistência elétrica	21
2.3.2.	Indutância elétrica	23
2.3.3.	Condutância	25
2.3.4.	Capacitância	25
2.4.	Hipóteses adotadas para o cálculo dos parâmetros elétricos unitários da linha de transmissão aérea	26
2.5.	Cálculo dos parâmetros elétricos	28
2.5.1.	Impedância longitudinal	28
2.5.2.	Admitância transversal	33
2.6.	Cálculo simplificado para 60 Hz	34
<b>3.</b>	<b>ABORDAGEM MATRICIAL NO CÁLCULO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DA LINHA DE TRANSMISSÃO AÉREA</b>	<b>36</b>
3.1.	Redução dos feixes dos cabos condutores	38
3.2.	Eliminação dos cabos pára-raios	41
3.3.	Transposição em linhas de transmissão	41
3.4.	Representação em componentes de sequência	43
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>46</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>50</b>
5.1.	Características da linha de transmissão aérea em estudo	50
5.2.	Implementação do código em linguagem MATLAB®	52
5.3.	Implementação no PSCAD/EMTDC®	55
5.4.	Resistência de sequência zero	59
5.5.	Indutância de sequência zero	61
5.6.	Resistência de sequência positiva	62
5.7.	Indutância de sequência positiva	64
5.8.	Tabulação dos erros	66
5.9.	Sensibilidade em frequência da impedância longitudinal	66
5.10.	Capacitância de sequência	68

<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão aéreas desempenham um papel importante dentro da área de estudos do Sistema Elétrico de Potência (SEP), já que são por elas que a energia elétrica trafega, saindo das unidades de geração e indo até os consumidores. A energia no Brasil é gerada majoritariamente em centrais hidrelétricas que se encontram afastadas dos principais centros de consumo, exigindo assim que seja feita a transmissão de grandes blocos de energia por grandes extensões territoriais (ZANETTA, 2006). Essa configuração torna as linhas de transmissão (LT) aéreas essenciais para a interligação das centrais geradoras e o transporte da energia, de forma técnica e economicamente viável (MOURA, MOURA e ROCHA, 2019). Entender como funciona o processo de equivalência elétrica de uma linha de transmissão aérea passa por analisar sua estrutura de torre, tipos de cabos condutores e dos cabos guarda e os fenômenos físicos de grande complexidade que cercam a problemática da propagação dos campos eletromagnéticos (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011).

O cálculo dos parâmetros elétricos da LT aérea normalmente apresentados e utilizados na graduação da engenharia elétrica, tem como objetivo apresentar apenas a impedância de sequência positiva, amplamente utilizados em estudos regime permanente, como os estudos de fluxo de potência, considerando que o SEP está balanceado (TAVARES, 2003). A medida em que a característica do estudo muda, como estudos dos transitórios eletromagnéticos e de contingências, a consideração de fenômenos que influenciam esses parâmetros, como o efeito dos cabos pára-raios e a modelagem do solo como um meio com perdas, se torna importante para a precisão, confiabilidade e a reprodução correta do comportamento da linha.

No entanto, os SEP's trifásicos tem como característica o acoplamento mútuo entre as fases, que dificulta a solução de quaisquer problemas de maneira direta, então é comumente utilizado uma transformação modal, como a transformada de Fortescue, uma transformação de coordenada que desacopla as fases em três circuitos monofásicos independentes: sequência zero; sequência positiva e a sequência negativa (TAVARES, 2003).

As impedâncias de sequência representam mais genericamente os parâmetros elétricos da linha de transmissão aérea já que, em estudos em que o SEP pode ser considerado balanceado, é possível utilizar apenas a impedância de sequência

positiva e, em análises desbalanceadas, surge a necessidade conhecer o valor da impedância de sequência zero e de sequência negativa para encontrar a solução do problema.

Observando que as linhas de transmissão aéreas interligam todo o território nacional, um país com dimensões continentais composto por diferentes climas, vegetações, formações geológicas e, como a resistividade elétrica do solo é função dos tipos de solo, da umidade e da profundidade de cada camada que compõe o terreno, se torna importante compreender uma metodologia para a obtenção dos parâmetros elétricos da LT que considere o solo com resistividade finita, a fim de entender sua influência na impedância longitudinal ou impedância série, visto que a admitância transversal não sofre significativa influência dessa modelagem do solo (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011).

Encontram-se na literatura diversos estudos acerca do problema da propagação de campos eletromagnéticos ao longo de linhas de transmissão compostas por um único condutor acima do solo, considerando-o um meio com perdas (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011), sendo inicialmente formulado por (CARSON, 1926) que, entre as suposições apresentadas, apresenta a condição de baixa frequência, considerando o solo com condutividade constante e permissividade desprezível, das quais se derivam outras linhas de pesquisa a fim de incluir o efeito da corrente de retorno pelo solo. Convém destacar o método do plano complexo (DERI, et al., 1981), que introduziu o conceito de distância equivalente de retorno pelo solo, propondo solução para a integral infinita de Carson (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011) e que será utilizado nesse trabalho.

Com o aumento das variáveis e da complexidade do cálculo, torna-se essencial a utilização de ferramentas computacionais que sejam capazes de compilar uma grande quantidade de dados e realizar processos matemáticos robustos, em especial processos matriciais com números complexos, envolvidos no processo de cálculo dos parâmetros elétricos da LT. Com grande reconhecimento no ambiente acadêmico e comercial, o *software Power Systems Computer Aided Desing (PSCAD/EMTDC®)* é uma ferramenta avançada e completa para a análise de sistemas de potência, criação de sistemas de controle complexos, análise dos transitórios eletromagnéticos e demais estudos que necessitam de simulações no domínio do tempo é capaz de realizar a obtenção dos parâmetros de linha a partir da geometria da torre e dos dados elétricos.

O desenvolvimento de uma rotina para o cálculo dos parâmetros elétricos por unidade de comprimento, escrito em linguagem difundida na engenharia elétrica, como é o caso do *MATrix LABoratory* (MATLAB®) que utiliza a linguagem MATLAB®, que seja bem fundamentada, com menos simplificações e que inclua mais efeitos que influenciam a obtenção dos parâmetros, como a modelagem do solo com condutividade finita, a fim de melhorar a representação elétrica da LT, torna-se importante para servir de alternativa aos *softwares* comerciais no uso em estudos acadêmicos.

### **1.1. Objetivo**

Este trabalho tem como principal objetivo identificar a influência que a resistividade elétrica do solo exerce sobre a impedância longitudinal unitária, de uma linha de transmissão aérea, decompostos em componentes de sequência, com frequência fixada em 60 Hz, encontrando a sensibilidade da resistência e da indutância de sequência em função da resistividade do solo. Para isso é escrito um código em linguagem MATLAB®, utilizando-se da metodologia matricial apresentada por (TAVARES, 2003), que considera a inclusão do efeito do solo com condutividade finita pelo método das imagens complexas definida por (DERI, et al., 1981), onde também é possível apresentar a variação desses parâmetros com a frequência.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para garantir os parâmetros de qualidade de energia, a continuidade do serviço e o suprimento constante de potência, o SEP demanda uma extensa gama de estudos, dentre eles estão os estudos de transitórios eletromagnéticos, análises de contingências, despacho econômico, controle e proteção, estimação de estado, fluxo de carga, planejamento e expansão. Com isso é possível perceber a presença do elemento linha de transmissão (LT) na grande maioria desses estudos, se não em sua totalidade, na forma dos parâmetros elétricos: Resistência (R), Indutância (L), Condutância (G) e Capacitância (C).

A resistência e a indutância compõem a impedância longitudinal do modelo elétrico da linha de transmissão e são responsáveis por provocar as quedas de tensão (TAVARES, 2003). A resistência está relacionada com as condições construtivas do condutor, como o material utilizado e as suas dimensões, sendo influenciado por fatores como a temperatura, a umidade e a frequência do sinal que a LT transporta. A indutância é fruto das interações eletromagnéticas causadas pela passagem de corrente elétrica, sendo influenciada por fatores como a interação mútua entre as fases, a presença dos cabos pára-raios (ou cabos guarda) e o efeito do solo, tanto na consideração ideal quanto na com condutividade finita (TAVARES, 2003).

A condutância e a capacitância formam a admitância transversal e estão relacionadas aos desvios de corrente ao longo do circuito (FUCHS, 1977). A condutância está relacionada com as fugas de corrente nos isoladores que sustentam os cabos nas estruturas e ao efeito Corona, enquanto a capacitância está diretamente ligada ao campo elétrico gerado pela presença da tensão nos condutores, seja entre os condutores ou entre os condutores e o solo.

Na literatura os modelos de LT podem ser classificados quanto à natureza dos seus parâmetros, sendo classificados como: modelos de parâmetros concentrados, modelos de parâmetros distribuídos (KUROKAWA, 2003) e modelos com parâmetros dependentes da frequência (MOURA, MOURA e ROCHA, 2019). Os modelos de parâmetros concentrados são de fácil utilização e por isso amplamente utilizados em estudos na graduação. No entanto podem não representar adequadamente a LT em toda a faixa de frequências presentes em fenômenos de natureza transitória (KUROKAWA, 2003).

Os métodos utilizados para o cálculo dos parâmetros elétricos da LT aérea normalmente apresentados e utilizados na graduação, apresentam simplificações importantes com o cálculo sendo função apenas das posições dos condutores na estrutura e produzindo apenas a impedância de sequência positiva, utilizando-se da consideração que o SEP está balanceado, amplamente utilizados em estudos de regime permanente como os estudos de fluxo de potência (TAVARES, 2003). A medida em que a característica do estudo muda, como estudos dos transitórios eletromagnéticos e contingências, a consideração de fenômenos que influenciam os parâmetros, como o efeito dos cabos pára-raios e a modelagem do solo como um meio com perdas, se torna importante para a precisão e a confiabilidade do estudo (TAVARES, 2003).

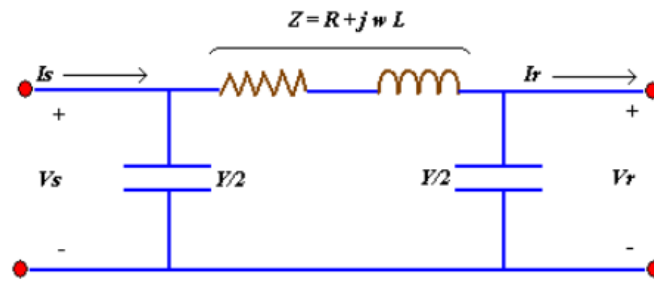
## **2.1. Linhas de transmissão aéreas**

As linhas de transmissão são elementos de diferentes geometrias, comprimentos e características, sendo construídas conforme o nível de tensão padronizado podendo ser aéreas, subterrâneas e híbridas (TAVARES, 2003). Podem ser classificadas pela quantidade de circuitos, sendo de circuito simples ou circuito duplo, pela característica da estrutura, sendo autoportante ou estaiada, geralmente com cabos condutores entrelaçados de alumínio com alma de aço contanto também com isoladores e cabos para-raios de aço (MOURA, MOURA e ROCHA, 2019).

A representação matemática da linha de transmissão é feita através de seus parâmetros elétricos e a representação de seus parâmetros por unidade de comprimento é válida quando a linha tem características homogêneas e o efeito dos seus terminais pode ser desprezado (FLORES, 2006) O modelo  $\pi$  é amplamente utilizado para representar a linha monofásica de média distância com parâmetros concentrados, incluindo a admitância transversal ora desconsiderada no modelo de linha curta apresentado na Figura 1. Esse modelo pode ser utilizado para representar uma linha longa desde que considere a linha segmentada em quadripolos (FLORES, 2006).



Figura 1 – Circuito pi nominal de uma linha de transmissão de comprimento médio



Fonte: FLORES (2006)

Ainda segundo (FLORES, 2006), a representação da linha de comprimento longo, acima de 240 km, utiliza o conceito de que os parâmetros da linha não estão concentrados, mas sim distribuídos uniformemente na linha, tendo por solução a representação por quadripolos hiperbólicos (A, B, C e D) da impedância característica  $Z_c$  e da constante de propagação  $\gamma$ , de acordo com as Equações de (1) até (4):

$$A = \cosh(\gamma x) \quad (1)$$

$$B = -Z_c \sinh(\gamma x) \quad (2)$$

$$C = -\frac{\sinh(\gamma x)}{Z_c} \quad (3)$$

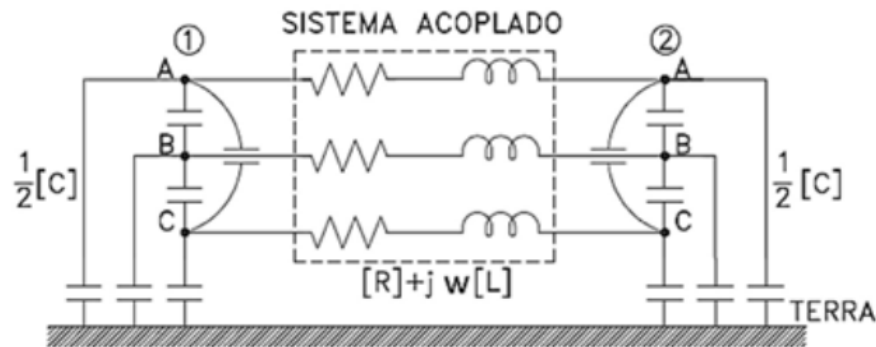
$$D = A \quad (4)$$

Com isso é possível obter a tensão e corrente de qualquer ponto do circuito pelo quadripolo tradicional, apresentado na Equação (5):

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Essas soluções são aplicáveis em circuitos monofásicos, para sistemas polifásicos as impedâncias e admitâncias tem forma matricial e estão acopladas, conforme ilustra a Figura 2.

**Figura 2 – Circuito exemplo para equivalência de linha trifásica**



Fonte: (MOURA, MOURA e ROCHA 2019)

Para os circuitos polifásicos idealmente transpostos, há a possibilidade de ser aplicado um desacoplamento entre as fases por meio de uma transformação modal, sendo possível analisar cada modo como um circuito monofásico (WEDEPOHL, 1963), como acontece com as componentes de sequência, baseadas no teorema de Fostescue (1918), que decompõe um sistema trifásico desbalanceado em três sistemas monofásicos com fasores balanceados (GRAINGER e STEVENSON, 1994).

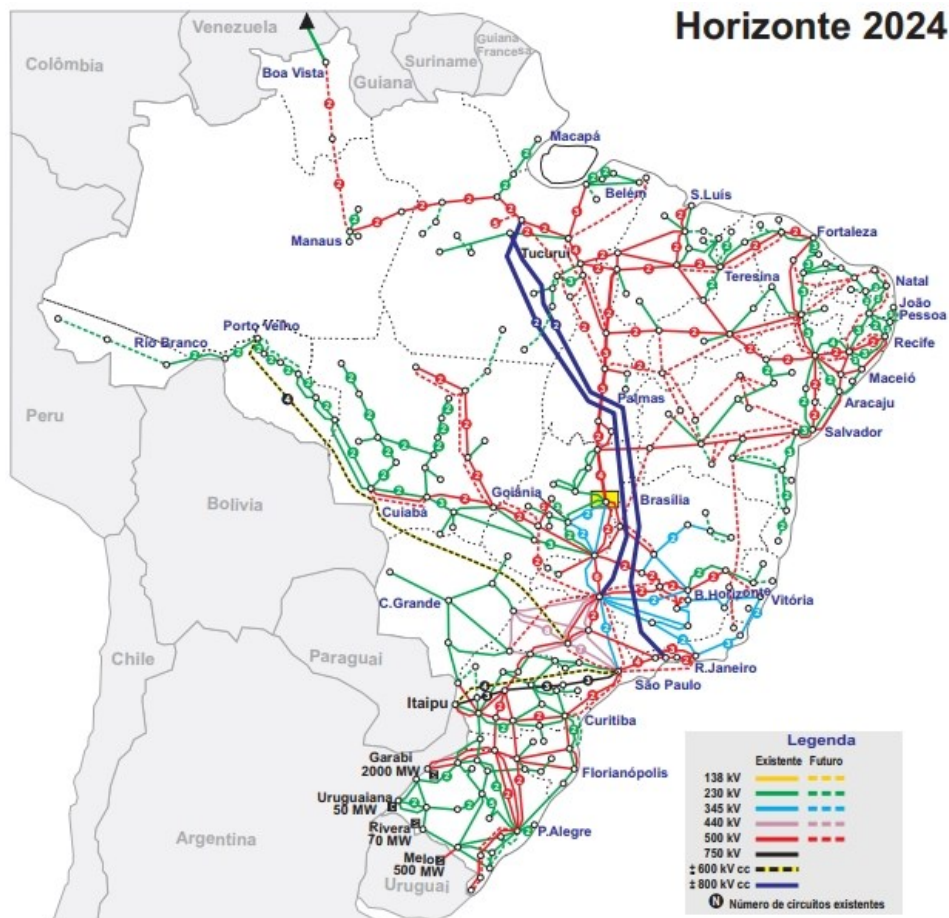
## 2.2. Estudos sobre o solo e a resistividade no brasil

As linhas de transmissão que têm maior extensão são pertencentes à rede básica, composta por linhas com tensões de operação iguais ou superiores a 230 kV, que fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN) e interligam quase todos os estados brasileiros. Segundo o Planejamento Elétrico de Médio Prazo - PAR/PEL 2020 -2024 elaborado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), em 2019 a rede básica tinha uma extensão de 141.756 km, conforme ilustrado na Figura 3.

A norma NBR 7117 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) trata da medição da resistividade e determinação da estratificação do solo e, segundo ela:

O solo é um meio geralmente heterogêneo, de modo que o valor de sua resistividade varia de local para local em função do tipo, nível de umidade, profundidade das camadas, idade de formação geológica, temperatura, salinidade e outros fatores naturais, sendo também afetado por fatores externos como contaminação e compactação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 2012)

**Figura 3 – Perspectiva geoeétrica das linhas de transmissão da rede básica – horizonte brasileiro 2024**



Fonte: ONS, 2020

Na Tabela 1 são apresentados alguns tipos de solo no Brasil e suas respectivas faixas de resistividade.

**Tabela 1 – Faixa de resistividade elétrica típicas de alguns tipos de solo (continua)**

Tipos de solos	Faixas de resistividade $\Omega m$
Água do Mar	Menor que 10
Alagadiço, limo, húmus, lama	Até 350
Água destilada	300
Argila	300 – 5.000
Calcário	500 – 5.000
Areia	1.000 – 8.000
Granito	1.500 – 10.000

**Tabela 1 – Faixa de resistividade elétrica típicas de alguns tipos de solo  
(conclusão)**

<b>Tipos de solos</b>	<b>Faixas de resistividade <math>\Omega\text{m}</math></b>
Basalto	A partir de 10.000
Concreto	Molhado <sup>a</sup> : 20 – 100
	Úmido: 300 – 1.000
	Seco: 3.000 – 2.000.000

**Nota<sup>a</sup>: A categoria “molhado” é típica de aplicação em ambientes externos.  
Valores inferiores a 50  $\Omega\text{m}$  são considerados altamente corrosivos.  
Fonte: Adaptado de NBR 7117 (2012)**

A complexidade em analisar de maneira efetiva a resistividade do solo ao longo de uma LT que, dependendo do nível de tensão, pode atravessar diversos estados brasileiros e, portanto, diferentes tipos de solo com perfil de condutividade/resistividade. O conhecimento do perfil de resistividade do solo é geralmente uma tarefa lenta e onerosa (MOLINA, et al., 2008) já que requer um número extremamente grande de medições.

A concessionária de energia elétrica Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), desenvolveu um estudo para quantificar o perfil da resistividade do solo em toda sua área de concessão (MOLINA, et al., 2008). Os autores concluíram que a medição *in loco* da resistividade elétrica, seguindo publicações especializadas, seriam inviáveis já que a CELESC possui uma área de concessão de mais de 90.000 quilômetros quadrados e essas fontes recomendam medições de 5 pontos para cada 4 quilômetros quadrados de solo, em regiões urbanas e um ponto a cada 500 m de rede para as regiões rurais. Os autores optaram por realizar um estudo que correlaciona a resistividade do solo aos tipos de solo predominantes no estado (MOLINA, et al., 2008).

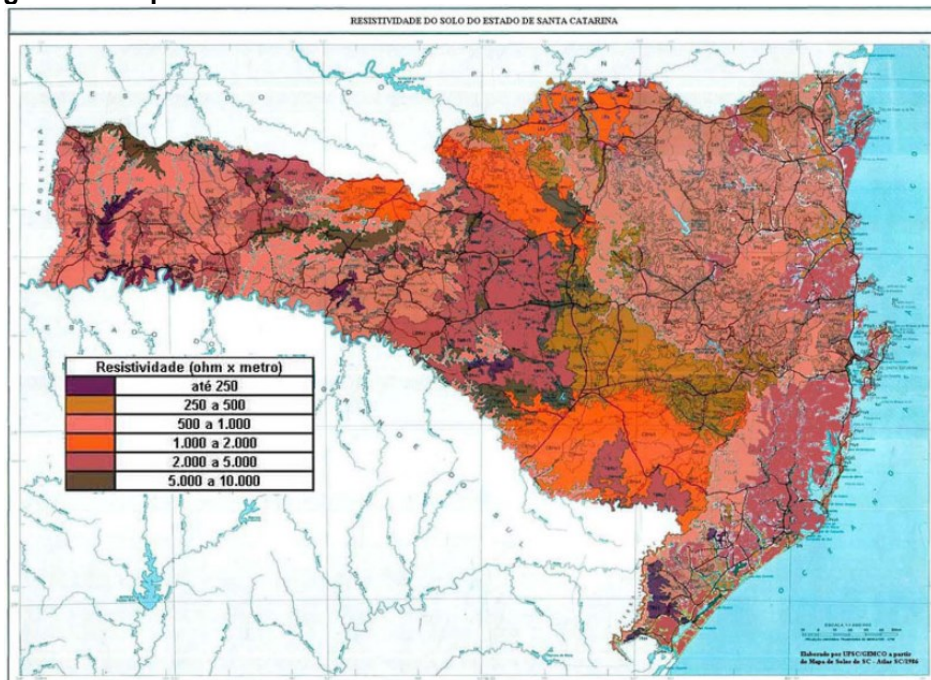
A Tabela 2 mostra os intervalos obtidos no estudo, onde a coluna correspondente ao valor f representa a quantidade de valores que ocorrem em cada classe, enquanto que a coluna p é o valor acumulado de f expresso em percentual do total (MOLINA, et al., 2008).

**Tabela 2 – Intervalos da distribuição da resistividade do solo no estado de Santa Catarina**

$\rho_a$ ( $\Omega\text{m}$ )	R5H ( $\Omega$ )	f	p (%)
Até 250	28,38	30	24,19
500	56,76	16	37,10
1.000	113,52	16	50,00
2.000	227,04	18	64,52
5.000	567,60	22	82,26
10.000	1.135,20	14	93,55
Acima de 10.000	2.270,40	8	100,00
Total		124	

Fonte: Adaptado de (MOLINA, et al., 2008)

A coluna R5H significa a metodologia da obtenção da resistividade aplicada no estudo, onde R5H significa 5 hastes alinhadas. Foi concluído que mais de 64% das medidas apresentam valores de resistividade inferiores a 2.000  $\Omega\text{.m}$  (MOLINA, et al., 2008), e os autores criaram um mapa temático que apresenta a resistividade elétrica no estado de Santa Catarina, conforme Figura 4.

**Figura 4 – Mapa temático da resistividade elétrica no estado de Santa Catarina**

Fonte: MOLINA, et al., (2008)

Portanto, as linhas de transmissão estão sucessíveis a atravessar solos com diferentes perfis de resistividade, principalmente as da rede básica.

### 2.3. Parâmetros elétricos da linha de transmissão aérea

Neste capítulo serão apresentados conceitos teóricos sobre os elementos da impedância série e da admitância transversal utilizados neste trabalho.

#### 2.3.1. Resistência elétrica

A resistência elétrica, expressa em Ohm ( $\Omega$ ), é o componente responsável pela dissipação de energia por efeito Joule na passagem de corrente, sendo função das características do material condutor, como a resistividade a corrente contínua a uma certa temperatura, o encordoamento, do efeito pelicular. Segundo (FUCHS, 1977), a resistência  $R_t$  pode ser dividida em três parcelas: a resistência que o condutor apresenta à passagem de corrente contínua  $R_{cc}$ ; a resistência aparente  $R_a$ , provocada pela interação eletromagnética interna no condutor; e a resistência aparente adicional  $R_{ad}$ , relacionada às fontes adicionais de dissipação de energia, como a presença dos cabos pára-raios, de acordo com a Equação (6):

$$R_t = R_{cc} + R_a + R_{ad} \quad (6)$$

A resistência à corrente contínua é função da resistividade do condutor  $\rho$  a uma certa temperatura (Ohm.m) o comprimento do condutor  $l$  (m) e de sua seção transversal  $A$  (m<sup>2</sup>), expressa na Equação (7):

$$R_{cc} = \frac{\rho l}{A} \quad (7)$$

Na Equação (8) é apresentado outro fator que aumenta a resistência CC é a temperatura, variando quase linearmente para a temperatura de operação (Tavares, 2003):

$$R_{cc2} = R_{cc} \cdot \frac{(T + t_2)}{(T + t_1)} \quad (8)$$

Onde

$T$  é uma constante que depende do material do condutor – Cobre 234,5; Alumínio 228,0;

$t_1$  é a temperatura na qual a resistividade foi calculada;

$R_{cc2}$  é a nova resistência a temperatura  $t_2$ .

Os condutores nas linhas de transmissão aéreas são trançados para obter maior resistência a tração mecânica, e com isso, o comprimento efetivo do condutor pode aumentar de 1% a 2% (MOURA, MOURA e ROCHA, 2019), conseqüentemente aumentando a sua resistência.

A resistência à corrente alternada é composição dos efeitos causados quando o sinal aplicado a LT é alternado de frequência  $f$ . O efeito pelicular, que ocorre quando um condutor é percorrido por uma corrente alternada, faz com que a densidade de corrente sofra desuniformidade, concentrando-se na superfície do condutor (GRAINGER e STEVENSON, 1994), as perdas de energia por correntes parasitas, por histerese e pelo efeito Corona – ionização da região em torno do condutor – e a presença do solo com resistividade finita, fazem com que a resistência da LT seja dependente da frequência. Com isso, a obtenção de uma expressão analítica para descrever a resistência total é complexa.

A Equação (9) apresenta o cálculo do valor da resistência efetiva do condutor, ou a resistência em corrente alternada (MOURA, MOURA e ROCHA 2019), relacionando a perda de potência no condutor com a corrente eficaz, e pode ser utilizada quando o valor dessas variáveis são conhecidas.

$$R = \frac{\text{Perda de Potência no Condutor}}{(\text{Corrente}_{rms})^2} \quad (9)$$

### 2.3.2. Indutância elétrica

A indutância é a capacidade de um elemento armazenar energia por meio de campos magnéticos, calculada através de enlaces de fluxo por Ampères e expressa em Henry (H) (MOURA, MOURA e ROCHA, 2019). Nas linhas de transmissão aéreas, assume-se a indutância  $L$  com valor constante, para qualquer nível de corrente, adotando que a permeabilidade magnética do ar ( $\mu_{ar}$ ) é igual a permeabilidade magnética do vácuo ( $\mu_0$ ) e pode ser definida como a relação entre o fluxo magnético  $\phi$ , concatenado em  $N$  espiras e produzido por uma corrente ( $I$ ) (ZANETTA, 2006):

$$L = \frac{N \cdot \phi}{I} \quad (10)$$

Segundo (HEDMAN, 1979) a indutância total em um condutor cilíndrico, é a soma da queda de tensão indutiva devido ao fluxo interno no condutor e da queda de tensão indutiva proveniente do fluxo externo do condutor, apresentado na Equação (11):

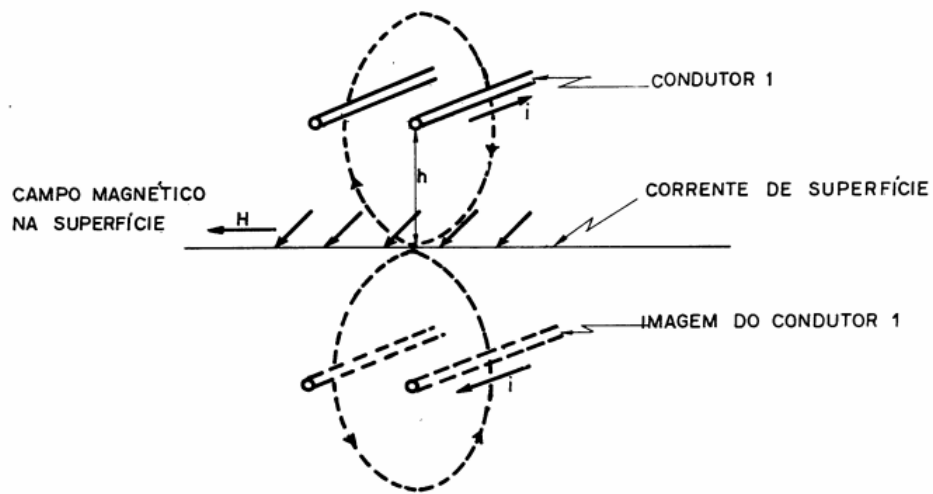
$$L_{total} = L_{interno} + L_{externo} \quad (11)$$

A parcela de indutância interna é devida ao efeito pelicular, enquanto a externa reflete as interações mútuas entre os cabos e entre as fases, a influência dos cabos pára-raios e do efeito do solo real (TAVARES, 2003).

Inicialmente a indutância externa é a indutância mútua entre os condutores, calculada a partir da Lei de Ampère, considerando apenas os condutores da estrutura nas suas respectivas posições no espaço. Então é realizado a inclusão da presença do solo como um plano com condutividade infinita, dando origem ao método das imagens ilustrado na Figura 5, que consiste no espelhamento dos condutores tendo o solo como centro (TAVARES, 2003).



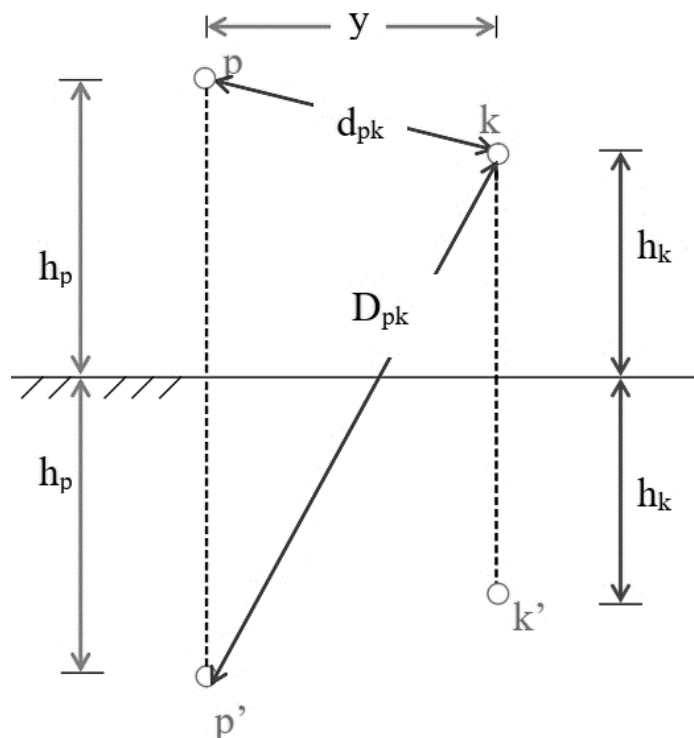
Figura 5 – Representação da imagem do condutor sobre o solo ideal



Fonte: HEDMAN (1979)

Neste ponto, os condutores e o solo são considerados ideais. Sejam os condutores  $p$  e  $k$ , paralelos entre si e entre o solo, de raios  $R_p$  e  $R_k$ , situados a uma altura  $h_p$  e  $h_k$  e afastados a uma distância euclidiana  $d_{pk}$  e  $D_{pk}$ , como mostra a Figura 6:

Figura 6 – Representação das distâncias entre os cabos e suas imagens para o cálculo da impedância externa



Fonte: Tavares (2003)

A indutância externa considerando o solo ideal é expressa na Equação (12):

$$L_{pk} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_{pk}}{d_{pk}}\right) \quad (12)$$

Para  $p = k$ , deve ser considerado  $D_{pk} = 2h_p$  e  $d_{pk} = R_{1p}$

$\mu_0$  a permeabilidade magnética do vácuo -  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

$p$  e  $k$  os índices dos condutores

Como as estruturas da LT são projetadas para utilizar o mesmo tipo de condutor, sejam os condutores de fase, seja os cabos guarda, os raios  $R_p$  são iguais aos  $R_k$  quando são analisados a indutância entre fase-fase ou entre os cabos para-raios, sendo diferentes na interação entre fase e para-raios (TAVARES, 2003). O número total de condutores é a soma do número de condutores de fase com o número de cabos para-raios uma vez que, mesmo não sendo sua função, os campos eletromagnéticos também fluem pelos cabos guarda devido aos acoplamentos mútuos.

### 2.3.3. Condutância

A condutância de uma linha de transmissão, expressa em Siemens (S), representa a perda de potência ocasionada pelos desvios de corrente nos isoladores para a terra e pelo efeito Corona, que consiste da ionização da região do condutor, aumentando as perdas do sistema por uma descarga elétrica em forma de coroa circular (TAVARES, 2003). No entanto, a obtenção de modelos analíticos para descrever a condutância em linhas de transmissão aéreas devido a sua grande dependência das condições meteorológicas (GLOVER, SARMA e OVERBYE, 2011) e assim como (GRAINGER e STEVENSON, 1994) é considerado que as perdas nos isoladores têm seu valor desprezível em comparação à outras grandezas do sistema.

### 2.3.4. Capacitância

Análogo a indutância, a capacitância expressa a capacidade de um elemento armazenar energia por meio de campos elétricos, definida como a quantidade de

carga por unidade de tensão e expressa em Faraday (F), sendo obtida pela Equação (13):

$$C = \frac{q}{v} \quad (13)$$

Nas linhas de transmissão, a capacitância resulta da diferença de potencial, entre os condutores e entre os condutores e a terra, se tornando importante para linhas maiores que 80 km (GRAINGER e STEVENSON, 1994).

#### **2.4. Hipóteses adotadas para o cálculo dos parâmetros elétricos unitários da linha de transmissão aérea**

Segundo (TAVARES, 2003), a análise exata do problema de propagação de ondas em linhas de transmissão aéreas é bastante complexa devido a: o solo não ser plano nem homogêneo e suas características não são conhecidas com precisão; a configuração geométrica da torre é relativamente complexa para a definição dos campos eletromagnéticos, caso seja considerada: a flecha dos condutores, a forma das torres e os isoladores, o efeito corona, a não linearidade das características magnéticas, em especial dos cabos para-raios. Portanto, é usual realizar algumas simplificações:

- a) O solo é plano nas vizinhanças da linha;
- b) O solo é homogêneo, sendo a condutividade e a constante dielétricas independentes da frequência e constantes ao longo de toda a extensão da linha;
- c) Os condutores são paralelos entre si e o solo, sendo seus raios muito inferiores às distâncias envolvidas;
- d) Os efeitos terminais da linha e das estruturas são desprezados na determinação do campo eletromagnético;
- e) Os cabos pára-raios de aço da linha possuem permeabilidade magnética constante;
- f) Simplificar o efeito Corona;

- g) Os cabos de fase, compostos por fios encordoados com alma de aço, são representados através de um condutor com seção reta com a forma de coroa circular, onde a corrente na alma de aço é desprezada.

Para efeitos do cálculo, o valor da altura dos condutores leva em consideração as suas respectivas flechas (MOURA, MOURA e ROCHA, 2019), causadas pelos esforços verticais devido ao próprio peso do cabo. É considerada, portanto, a altura média  $H_m$  calculada a partir da altura na torre  $H_{torre}$  e a flecha máxima do condutor  $Flecha_{max}$ , conforme Equação (14):

$$H_m = H_{torre} - \frac{2}{3} Flecha_{max} \quad (14)$$

A inclusão do efeito do solo real, considerando-o como um meio com perdas, foi inicialmente estudado por Carson (CARSON, 1926) e possui algumas suposições ou limitações que são apresentadas por (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011):

- a) Solo como meio linear isotrópico e homogêneo, com permeabilidade magnética relativa unitária.
- b) Propagação de ondas na velocidade da luz e sem atenuação na direção axial do eixo condutor
- c) Condição de baixa frequência com permissividade desprezível, condutividade elétrica uniforme e constante, invariável à frequência

Ainda segundo (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011), outros autores seguiram a linha de pesquisa de Carson, como Wise (WISE, 1931), Arismundandar (ARISMUNANDAR, 1963) e Deri (DERI, et al., 1981). Cabe destacar o método do plano complexo (DERI, et al., 1981), que introduziu o conceito de distância equivalente de retorno ou profundidade complexa para a inclusão do efeito do solo com condutividade finita nos cálculos dos parâmetros elétricos, seguindo linhas de pesquisa para a integral infinita de Carson (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011), que será utilizada neste trabalho para a representação do efeito do solo real.

## 2.5. Cálculo dos parâmetros elétricos

Neste capítulo serão apresentados as considerações e formulações para a obtenção dos parâmetros elétricos da LT.

### 2.5.1. Impedância longitudinal

Para o cálculo da impedância longitudinal por unidade de comprimento, com unidade ( $\text{Ohm.km}^{-1}$ ), deve ser realizado considerado o efeito pelicular e o efeito do solo com condutividade finita, que pode ser expresso pelo método das imagens complexas (DERI, et al., 1981). Segundo (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011), impedância longitudinal por unidade de comprimento é obtida somando-se as três parcelas mostradas na Equação (15):

$$Z_l = Z_{int} + Z_{ext} + Z_{solo} \quad (15)$$

A impedância interna é associada a relação do campo elétrico na superfície do condutor e a corrente no condutor, ao efeito pelicular e as características do condutor, supondo que o condutor está sozinho no espaço.

$$Z_{int} = R_{int} + jX_{int} \quad (16)$$

A impedância externa, associada a interação dos campos eletromagnéticos entre os cabos presentes na estrutura e suas imagens, assumindo o solo e condutores ideais.

$$Z_{ext} = jX_{ext} \quad (17)$$

A impedância de retorno pelo solo, que considera o solo um meio homogêneo com perdas.

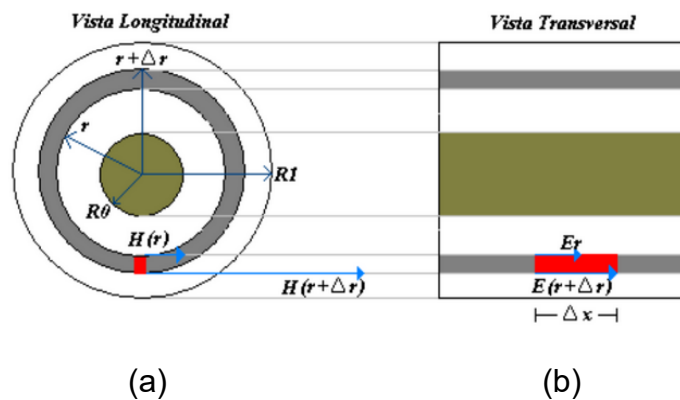
$$Z_{solo} = R_{solo} + jX_{solo} \quad (18)$$

Nas equações (16), (17) e (18), a indutância por unidade de comprimento, expressa em Henry por quilometro ( $\text{H.km}^{-1}$ ), está incluída na reatância indutiva  $X_L$  expresso em Ohm por quilometro ( $\text{Ohm.km}^{-1}$ ), que depende da frequência angular do sinal  $\omega$ , segundo Equação (19):

$$X_L = j\omega L \quad (19)$$

O cálculo da impedância interna é realizado considerando um condutor cilíndrico de seção reta em forma de coroa circular, com raio interno  $R_0$  e raio externo  $R_1$ , sendo a componente longitudinal correspondente ao campo elétrico e a componente transversal ao campo magnético (TAVARES, 2003), conforme Figura 7.

Figura 7 – Vista do condutor: (a) longitudinal e (b) transversal



Fonte: Tavares (2003)

Para baixas frequências, a densidade de corrente pode ser considerada uniformemente distribuída na seção transversal do condutor (TAVARES, 2003). Porém quando a frequência do sinal aumenta, a densidade de corrente concentra-se em maior grau na região superficial do condutor e diminui na região central, tornando a distribuição disforme. Esse fenômeno ocorre devido às alterações dos campos elétricos e magnéticos no interior do condutor e é conhecido como Efeito Pelicular (*Skin effect*), que resulta em uma alteração na resistência e na indutância por unidade de comprimento que dependem da frequência (TAVARES, 2003).

Quando considerado o efeito pelicular, é necessário analisar os campos eletromagnéticos e a densidade de corrente no interior do condutor, através das equações de Maxwell. A relação entre o campo elétrico longitudinal na superfície do condutor e a corrente interna será a impedância interna por unidade de comprimento (TAVARES, 2003). Realizando-se as deduções e aplicando as condições de contorno adequadas, encontra-se a solução numa combinação das funções modificadas de Bessel que, para os condutores é apresentada nas Equações de (20) até (22):

$$Z_{intc} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_{cond}}{\sigma_{cond}}} \cdot \frac{1}{2\pi R_1} \cdot \frac{I_0(\rho_1) \cdot K_1(\rho_0) + K_0(\rho_1) \cdot I_1(\rho_0)}{I_1(\rho_1) \cdot K_1(\rho_0) - I_1(\rho_0) \cdot K_1(\rho_1)} \quad (20)$$

$$\rho_0 = R_0 \sqrt{j\omega \cdot \mu_{cond} \cdot \sigma_{cond}} \quad (21)$$

$$\rho_1 = R_1 \sqrt{j\omega \cdot \mu_{cond} \cdot \sigma_{cond}} \quad (22)$$

Onde:

$I_0, I_1, K_0$  e  $K_1$  - são funções de Bessel de primeira espécie ( $I$ ) ordem zero e de segunda espécie ( $K$ ) ordem um;

$\omega$  – frequência angular do sinal de excitação ( $\text{rad.s}^{-1}$ );

$\sigma_{cond}$  – condutividade do condutor ( $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ ) e

$\mu_{cond}$  – permeabilidade magnética do condutor ( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

$R_0$  – raio interno do condutor cilíndrico

$R_1$  – raio externo do condutor cilíndrico

Para os cabos pára-raios, que não possuem modelagem como os condutores de fase, sendo considerado um cilindro maciço fazendo  $R_0$  e, portanto,  $\rho_0$  tender a zero, a Equação (20) é alterada para Equação (23):

$$Z_{intpr} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_{cond}}{\sigma_{cond}}} \cdot \frac{1}{2\pi R_1} \cdot \frac{I_0(\rho_1)}{I_1(\rho_1)} \quad (23)$$

Para implementar a solução computacionalmente, pode-se utilizar fórmulas aproximadas das funções acima, que apresentam uma boa precisão quando

analisadas em 60 Hz (TAVARES, 2003) tanto para os cabos condutores quanto para os cabos guarda.

Considerando a distribuição uniforme da densidade de corrente e analisando em baixas frequências (TAVARES, 2003), a impedância interna se encontra na Equação (24):

$$Z_{int} = \frac{1}{\sigma_{cond}} \cdot \frac{1}{\pi R_1^2 - \pi R_0^2} + j \cdot \frac{\omega \mu_{cond}}{\pi R_1^2 - \pi R_0^2} \cdot \left[ \frac{R_0^4}{2(R_1^2 - R_0^2)} \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_0}\right) + \frac{1}{8} \cdot R_1^2 - \frac{3}{8} \cdot R_0^2 \right] \quad (24)$$

Onde a primeira parcela (parcela real) – Resistência CC (ou para  $j\omega$  muito pequeno) e a segunda parcela (parcela imaginária) – Reatância para  $j\omega$  reduzido.

Segundo (TAVARES, 2003) a impedância externa representa a interação entre os cabos reais e os cabos fictícios, denominados condutores imagem, considerando os condutores e o solo um meio sem perdas, com cálculo apresentado na Equação (12). O cálculo da impedância de retorno pelo solo representa a interação do solo com condutividade finita  $\sigma_{solo}$  relacionada com a resistividade do solo  $\rho_{solo}$  pela Equação (25), pode ser calculada com erro aceitável até frequências da ordem de 1 MHz através das formulações de Carson modificadas (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011).

$$\sigma_{solo} = \frac{1}{\rho_{solo}} \quad (25)$$

O efeito da corrente de retorno pelo solo é incluído no cálculo da impedância longitudinal externa, utilizando-se do método das imagens complexas formulado por (DERI, et al., 1981) que seguiu uma linha de pesquisa em busca da solução para a integral infinita de Carson que conta com boa aproximação para baixas frequências (TAVARES, 2003).

O cálculo consiste em considerar uma parcela do solo como um plano condutor ideal e adicionar um segundo plano a fim de simular o solo real adicionando uma distância complexa, como apresentado na Figura 8, apresentando a camada do solo com condutividade finita, a uma profundidade complexa  $\delta$ , calculada a partir da



frequência do sinal  $\omega$ , da condutividade do solo  $\sigma_{solo}$  e da permeabilidade magnética  $\mu_0$ , conforme apresentado nas Equações (26) a (29):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{j\omega\sigma_{solo}\mu_0}} = \sqrt{\frac{\rho_{solo}}{j\omega\mu_0}} \quad (26)$$

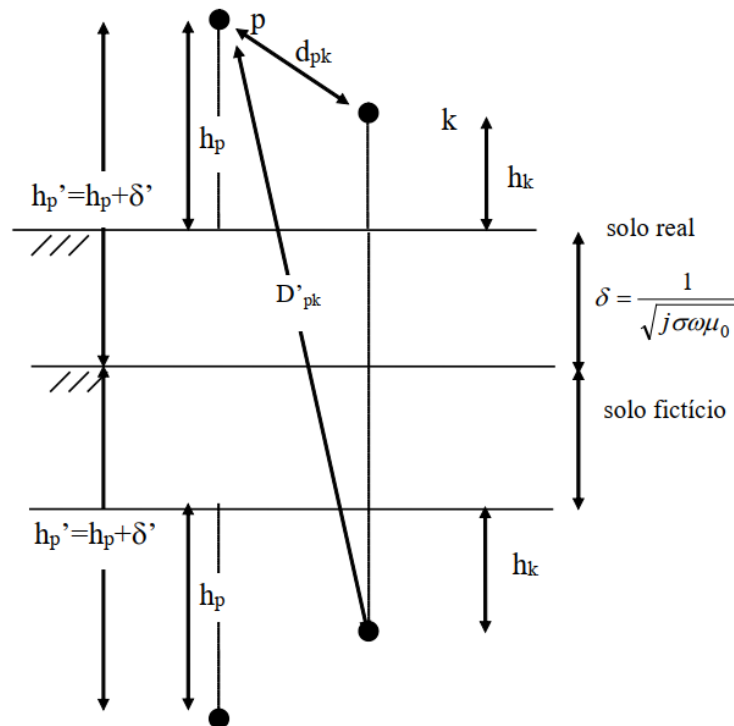
$$L_{pk} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D'_{pk}}{d_{pk}}\right) \quad (27)$$

$$D'_{pk} = \sqrt{(x_p - x_k)^2 + (h_p + h_k + 2\delta)^2} \quad (28)$$

$$d_{pk} = \sqrt{(x_p - x_k)^2 + (h_p - h_k)^2} \quad (29)$$

A metodologia do plano complexo permite que o cálculo das parcelas da impedância longitudinal  $Z_{ext} + Z_{solo}$  sejam executadas através uma expressão, acelerando o processo computacional, como ilustra a Figura 8.

**Figura 8 – Representação das distâncias entre os cabos e suas imagens para o cálculo da impedância externa usando o método do plano complexo**



Fonte: Tavares (2003)

Portanto, a solução proposta por (DERI, et al., 1981) para o do problema da modelagem do solo na propagação de campos eletromagnéticos ao longo de linhas de transmissão, inclui o efeito do solo real na obtenção dos parâmetros elétricos da LT com relativa facilidade em relação aos outros processos de cálculo (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011).

Vale ressaltar que a grandeza impedância elétrica encontrada nos cálculos, depende da frequência do sinal e, por isso, a apresentação dos parâmetros da linha é feita em função das componentes da impedância por unidade de comprimento, sendo a resistência expressa em  $\text{Ohm.km}^{-1}$  e a indutância expressa em  $\text{mH.km}^{-1}$ .

### 2.5.2. Admitância transversal

A admitância longitudinal unitária por unidade de comprimento, expressa em Siemens por quilometro ( $\text{S.km}^{-1}$ ), é considerada distribuída uniformemente ao longo da LT, composta pela condutância  $G$ , responsável por representar os desvios de corrente da LT e pela capacitância  $C$ , responsável por representar as interações do campo elétrico presente entre os condutores e os condutores e a terra (TAVARES, 2003).

O cálculo da capacitância por unidade de comprimento da LT aérea, expressa em micro-Faraday por quilometro ( $\mu\text{F.km}^{-1}$ ), é realizado de maneira análoga ao da indutância externa, sendo considerado o solo ideal, apresentado na equação (12), sendo função apenas da posição dos cabos na estrutura (TAVARES, 2003) e seu cálculo pode ser efetuado nas condições de solo ideal sem prejuízo matemático (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011).

Matricialmente a capacitância é descrita pelas Equações (30) e (31):

$$[C_T] = 2\pi\varepsilon_0.[A]^{-1} \quad (30)$$

$$[A] = \left[ \ln \left( \frac{D_{pk}}{d_{pk}} \right) \right] \quad (31)$$

Para  $p = k$ , deve ser considerado  $D_{pk} = 2h_p$  e  $d_{pk} = R_{1p}$  sendo:

$\omega$  – frequência angular do sinal de excitação ( $\text{rad.s}^{-1}$ ) e

$\varepsilon_0$  – permissividade elétrica do vácuo -  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ (F.m}^{-1}\text{)}$ .

A relação entre a admitância e a capacitância é dada pela Equação (32):

$$[Y_t] = j\omega[C_T] \quad (32)$$

## 2.6. Cálculo simplificado para 60 Hz

Para obter os parâmetros elétricos de sequência positiva da linha de transmissão idealmente transposta, é possível utilizar uma simplificação dos cálculos apresentados, que utiliza o conceito do raio médio geométrico (RMG) e da distância média geometria (DMG), desconsiderando os cabos para-raios e o efeito do solo (TAVARES, 2003), apresentados nas Equações de (33) a (36).

A DMG é calculada a partir das distâncias entre os centros dos feixes de cabos condutores de cada fase contendo um fator de correção  $F_c$ , enquanto no cálculo do RMG são utilizadas as distâncias entre os subcondutores (TAVARES, 2003):

$$RMG = \sqrt[nf]{D_{ab}D_{ac}D_{bc}} \quad (33)$$

$$DMG = \sqrt[nc]{R_1 F_c d_{a1a2} d_{a1a3} d_{a1a4}} \quad (34)$$

$$F_c = e^\theta \quad (35)$$

$$\theta = \frac{-2}{nc(R_0^2 - R_1^2)} \left[ \frac{R_1^4}{2(R_0^2 - R_1^2)} \ln\left(\frac{R_0}{R_1}\right) + \frac{1}{8}R_1^2 - \frac{3}{8}R_0^2 \right] \quad (36)$$

Onde:

$nc$  – número de condutores

$nf$  – número de fases

$D_{ab}$  – distância entre os centros dos feixes da fase A e da fase B

$d_{a1a2}$  – distância entre subcondutores  $A_1$  e  $A_2$  da fase A

$F_c$  – fator de correção

Com isso é possível calcular, segundo as Equações (37) e (38), a impedância longitudinal e a admitância transversal de sequência positiva por unidade de comprimento (TAVARES, 2003):

$$Z_{+RMG} = \frac{R_{cc}}{nc} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left[ \frac{RMG}{DMG} \right] \quad (37)$$

$$Y_{+RMG} = j\omega 2\pi\epsilon_0 \ln \left[ \frac{DMG}{R_1} \right] \quad (38)$$

Esses são os parâmetros que podem ser utilizados para estudos do SEP na condição balanceada e em regime permanente.

### 3. ABORDAGEM MATRICIAL NO CÁLCULO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DA LINHA DE TRANSMISSÃO AÉREA

Seguindo a metodologia matricial apresentada por (TAVARES, 2003), para o cálculo dos parâmetros elétricos da linha de transmissão aérea com  $n$  condutores de fase e  $k$  cabos pára-raios, as equações (39) e (40) apresentam matricialmente as relações entre as tensões, as correntes, a impedância longitudinal e a admitância transversal:

$$[\Delta V_L] = [Z_{LP}] \cdot [I_L] \quad (39)$$

$$[I_T] = [Y_{TP}] \cdot [V_T] \quad (40)$$

Onde:

$\Delta V_L$  – vetor de diferenças de potenciais longitudinais

$I_L$  – vetor de corrente nos condutores (longitudinal)

$V_T$  – vetor de tensões entre os condutores e o solo (transversal)

$I_T$  – vetor de correntes transversais

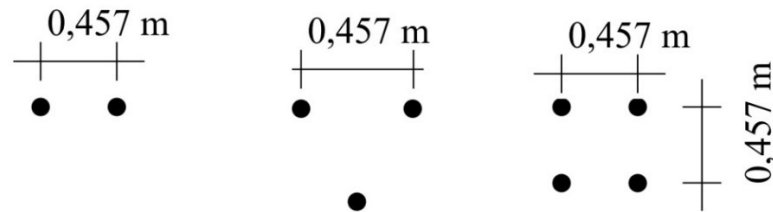
$Z_{LP}$  – matriz primitiva de impedâncias longitudinais

$Y_{TP}$  – matriz primitiva de admitâncias transversais

As matrizes  $Z_{LP}$  e  $Y_{TP}$  são ditas matrizes primitivas unitárias por unidade de comprimento. Tem dimensão quadrada de  $(n + k) \times (n + k)$  e descrevem as interações entre todos os cabos condutores e os pára-raios (TAVARES, 2003).

Essas matrizes primitivas devem ser reduzidas para a ordem do sistema polifásico - sendo que o sistema trifásico é o mais utilizado no mundo – e que, não necessariamente é o número de condutores de fase, pois é usual utilizar mais de um condutor por fase nas LT's com faixa de tensão nominal superior a 230 kV, ou seja da rede básica, dispostos em geometria regular, partindo de dois subcondutores por fase, conforme apresentado na Figura 9, que possibilita o aumento da potência transferida (TAVARES, 2003).

**Figura 9 – Representação das distâncias entre os cabos condutores de fase**



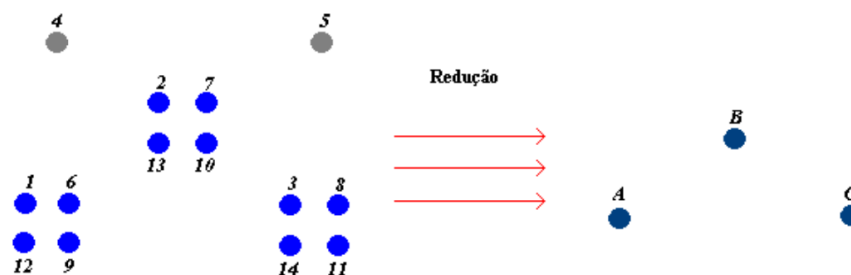
Fonte: Tavares (2003)

Segundo (TAVARES, 2003), para que a redução seja realizada é necessário considerar algumas hipóteses:

- A corrente total por feixe de cada fase é correspondente à soma das correntes dos subcondutores no feixe;
- A tensão em cada subcondutor é igual a tensão de fase equivalente
- Os cabos pára-raios são considerados aterrados em todas as estruturas, fazendo a tensão entre esses cabos e a terra seja nula
- A respeito da hipótese (c), a autora destaca que os cabos pára-raios poderiam estar isolados em todas as estruturas, o que tornaria nula a corrente longitudinal entre esses cabos e a terra;

Com isso, a primeira redução é eliminar os subcondutores, fazendo com que cada fase seja representada por um condutor equivalente e, subsequentemente, incorporar o efeito dos cabos pára-raios nos elementos equivalentes de cada fase (TAVARES 2003) e um exemplo gráfico dessa redução pode ser observado na Figura 10.

**Figura 10 – Representação do equivalente trifásico após redução matricial**



Fonte: FLORES (2006)

As matrizes  $[Z_{Lp}]$  e  $[Y_{Tp}]$  são construídas conforme as Equações de (41) a (45) (TAVARES, 2003):

$$Z_{Lp} = \begin{bmatrix} Z_{a1a1} & \cdots & Z_{a1cn} & Z_{a1pr1} & \cdots & Z_{a1prk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{cna1} & \cdots & Z_{cncn} & Z_{cnpr1} & \cdots & Z_{cnprk} \\ Z_{pr1a1} & \cdots & Z_{pr1cn} & Z_{pr1pr1} & \cdots & Z_{pr1prk} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{prka1} & \cdots & Z_{prkcn} & Z_{prkpr1} & \cdots & Z_{prkprk} \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$Z_{Lp_{mm}} = (R_{int_{mn}} + R_{solo_{mn}}) + j\omega(L_{int_{mn}} + L_{ext_{mn}} + L_{solo_{mn}}) \quad (42)$$

$$Z_{Lp_{mn}} = (R_{solo_{mn}}) + j\omega(L_{ext_{mn}} + L_{solo_{mn}}) \quad (43)$$

$$Y_{Tp} = \begin{bmatrix} Y_{a1a1} & \cdots & Y_{a1cn} & Y_{a1pr1} & \cdots & Y_{a1prk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{cna1} & \cdots & Y_{cncn} & Y_{cnpr1} & \cdots & Y_{cnprk} \\ Y_{pr1a1} & \cdots & Y_{pr1cn} & Y_{pr1pr1} & \cdots & Y_{pr1prk} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{prka1} & \cdots & Y_{prkcn} & Y_{prkpr1} & \cdots & Y_{prkprk} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$Y_{Tp_{mn}} = j\omega(C_{mn}) \quad (45)$$

Vale ressaltar que a impedância interna está presente apenas nos elementos da diagonal principal, que representa a impedância própria de cada condutor. Para a primeira redução, pode-se separar as matrizes primitivas isolando os termos referentes aos condutores de fase e retornar os elementos mútuos e próprios que tem relação com os cabos pára-raios.

### 3.1. Redução dos feixes dos cabos condutores

A redução dos feixes dos cabos condutores é realizada por um condutor equivalente, para a redução dos feixes dos cabos de fase é executada de acordo com as condições de contorno (TAVARES, 2003), sendo que a tensão nos subcondutores são iguais e a corrente transportada pela fase é a soma das correntes de cada subcondutor, apresentado nas Equações (46) e (47):

$$V_a = V_{a1} = V_{a2} = \cdots = V_{an} \quad (46)$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + \dots + I_{an} \quad (47)$$

A solução segundo as condições de contorno apresentadas, a solução para a redução dos subcondutores em uma matriz que está na forma de impedâncias é a redução de Kron (TAVARES, 2003). Para sistemas com  $n$  sub-condutores, o equacionamento na forma matricial se torna extenso e é preferível utilizar a redução de Kron eliminando linha por linha. A eliminação da linha  $p$  é dada pela Equação (48):

$$Z_{ij} = Z_{ij} - \frac{Z_{ip} \cdot Z_{pj}}{Z_{pp}} \quad (48)$$

Para  $i = 1, 2, \dots, p - 1, p + 1, \dots, n$

Para  $j = 1, 2, \dots, p - 1, p + 1, \dots, n$

Com isso, a matriz de impedâncias alterada  $[Z_{L_{abc-pr}}]$ , que conta com a redução dos feixes dos subcondutores e com os cabos para-raios, é apresentada nas Equações (49) e (50) (TAVARES, 2003):

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \Delta V_{pr1} \\ \Delta V_{pr2} \end{bmatrix} = [Z_{L_{abc-pr}}] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_b \\ I_{pr1} \\ I_{pr2} \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$[Z_{L_{abc-pr}}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{apr1} & Z_{apr2} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bpr1} & Z_{bpr2} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cpr1} & Z_{cpr2} \\ Z_{pr1a} & Z_{pr1b} & Z_{pr1c} & Z_{pr1pr1} & Z_{pr1pr2} \\ Z_{pr2a} & Z_{pr2b} & Z_{pr2c} & Z_{pr2pr1} & Z_{pr2pr2} \end{bmatrix} \quad (50)$$

Para matrizes em forma de admitância, as condições de contorno apresentadas conduzem para uma redução sem equacionamento, sendo necessário somar as submatrizes quadradas com dimensão da quantidade de fases, conforme apresentado nas Equações (51) e (52), um caso com dois subcondutores por fase para melhor visualização (TAVARES, 2003):



$$\begin{bmatrix} I'_{a1} \\ I'_{b1} \\ I'_{c1} \\ I'_{a2} \\ I'_{b2} \\ I'_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{a1a1} & Y_{a1b1} & Y_{a1c1} & Y_{a1a2} & Y_{a1b2} & Y_{a1c2} \\ Y_{b1a1} & Y_{b1b1} & Y_{b1c1} & Y_{b1a2} & Y_{b1b2} & Y_{b1c2} \\ Y_{c1a1} & Y_{c1b1} & Y_{c1c1} & Y_{c1a2} & Y_{c1b2} & Y_{c1c2} \\ Y_{a2a1} & Y_{a2b1} & Y_{a2c1} & Y_{a2a2} & Y_{a2b2} & Y_{a2c2} \\ Y_{b2a1} & Y_{b2b1} & Y_{b2c1} & Y_{b2a2} & Y_{b2b2} & Y_{b2c2} \\ Y_{c2a1} & Y_{c2b1} & Y_{c2c1} & Y_{c2a2} & Y_{c2b2} & Y_{c2c2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V'_{a1} \\ V'_{b1} \\ V'_{c1} \\ V'_{a2} \\ V'_{b2} \\ V'_{c2} \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$\begin{bmatrix} I'_{abc1} \\ I'_{abc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_{abc1}] & [Y_{1-2}] \\ [Y_{2-1}] & [Y_{abc2}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V'_{abc1} \\ V'_{abc2} \end{bmatrix} = \quad (52)$$

Do mesmo modo que a redução na matriz em forma de impedância, a matriz de admitância alterada  $[Y_{T_{abc-pr}}]$ , que conta com a redução dos feixes dos subcondutores e com os cabos para-raios, conforme apresentado nas Equações (53) e (54) (TAVARES, 2003):

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_b \\ I_{pr1} \\ I_{pr2} \end{bmatrix} = [Y_{T_{abc-pr}}] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b \\ V_{pr1} \\ V_{pr2} \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$[Y_{T_{abc-pr}}] = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & Y_{apr1} & Y_{apr2} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & Y_{bpr1} & Y_{bpr2} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & Y_{cpr1} & Y_{cpr2} \\ Y_{pr1a} & Y_{pr1b} & Y_{pr1c} & Y_{pr1pr1} & Y_{pr1pr2} \\ Y_{pr2a} & Y_{pr2b} & Y_{pr2c} & Y_{pr2pr1} & Y_{pr2pr2} \end{bmatrix} \quad (54)$$

A inversão de uma matriz de impedâncias possibilita obter a matriz admitância correspondente, que se invertida novamente é obtido a matriz original, apresentado nas Equações (55) e (56) (TAVARES, 2003):

$$[Y_L] = [Z_L]^{-1} \quad (55)$$

$$[Z_T] = [Y_T]^{-1} \quad (56)$$

Essa propriedade permite escolher a maneira de trabalhar as condições para a eliminação dos subcondutores e dos cabos para-raios como, utilizando a matriz na forma de impedâncias ou de admitâncias.

### 3.2. Eliminação dos cabos pára-raios

Após a eliminação dos subcondutores de fase, é preciso eliminar os cabos guarda, para que as matrizes longitudinal e transversal por unidade de comprimento fiquem da ordem do sistema (TAVARES, 2003). A consideração dos cabos pára-raios aterrados em todas as estruturas é a mais utilizada, fazendo com que as tensões em todos os condutores sejam iguais a zero, conforme Equação (57):

$$V_{pr1} = V_{pr2} = \dots = V_{prk} = 0 \quad (57)$$

Realizando as deduções com a condição de contorno apresentada e, de maneira análoga à redução dos subcondutores, a eliminação na matriz em forma de impedâncias é realizada através da redução de Kron. No entanto para a matriz em forma de admitância e como a tensão nos cabos pára-raios é nula, basta considerar somente a parte referente aos condutores de fase e desconsiderar as linhas e colunas correspondentes (TAVARES, 2003), portanto as matrizes ficam com dimensão do número de fases, contendo os elementos próprios na diagonal principal e elementos mútuos diferentes de zero, de acordo com as Equações (58) e (59):

$$Z_{L_{abc}} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$Y_{T_{abc}} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (59)$$

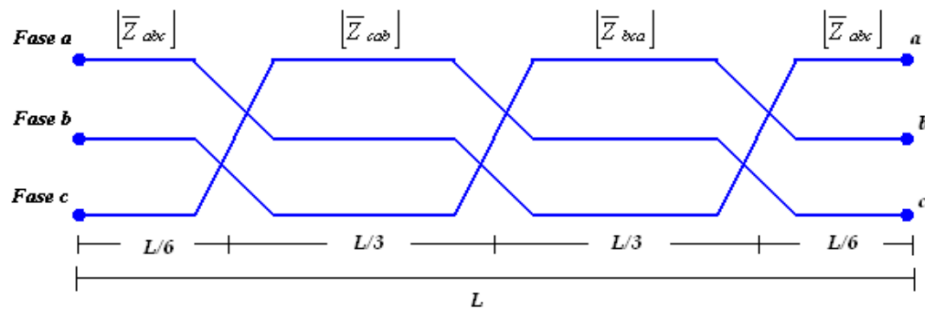
### 3.3. Transposição em linhas de transmissão

Uma linha de transmissão não deveria agregar desequilíbrio no sistema, mas isso acontece devido ao efeito eletromagnético provocado pela linha (TAVARES 2003). Esse desequilíbrio é causado quase que exclusivamente pela geometria da linha, influenciando o regime normal e o comportamento quando submetidas a perturbações transitórias (FLORES, 2006).

Em linhas de transmissão trifásicas, essas características eletromagnéticas geram desequilíbrio na tensão e corrente a frequência fundamental, sendo ampliada

em função do comprimento da LT (FLORES, 2006). A transposição de linha é uma medida para evitar o desequilíbrio entre os extremos da LT, fazendo com que cada fase ocupe cada posição nas torres por distâncias iguais, sendo que a troca pode ser feita a cada 1/3 do comprimento total da linha (FLORES, 2006). Uma outra configuração de transposição da linha é representada na Figura 11, utilizada para que o sequenciamento de fases seja o mesmo no emissor e no receptor sendo que, no primeiro e no último terço, a transposição é executada em 1/6 do comprimento da LT.

**Figura 11 – Esquema de transposição de uma linha de transmissão com quatro trechos**



Fonte: FLORES (2006)

Com isso, as matrizes de impedância longitudinal  $[Z_{L_{abc}}]$  admitância transversal  $[Y_{T_{abc}}]$  por unidade de comprimento encontradas após o processo de redução matricial sofrem a troca de linhas e colunas para representar o processo de transposição ideal, sendo que os elementos da diagonal principal são elementos próprios e os restantes são elementos que representam a interação mútua entre as fases.

A transposição ideal para a matriz de impedância longitudinal é apresentado nas Equações (60) e (61):

$$Z_{L_{IT}} = \frac{[Z_{L_{abc}}] + [Z_{L_{cab}}] + [Z_{L_{bca}}]}{3} \quad (60)$$

$$Z_{L_{IT}} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \quad (61)$$

Onde:

$Z_p$  é a impedância própria

$Z_m$  é a impedância mútua

O processo de transposição ideal para a matriz transversal é diferente da longitudinal (TAVARES, 2003), já que a troca das linhas e colunas não acontece diretamente na matriz  $[Y_{abc}]$ , mas sim na matriz dos logaritmos  $[A_{abc}]$  de acordo com as Equações de (62) a (65):

$$A_{abc} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} & A_{ac} \\ A_{ba} & A_{bb} & A_{bc} \\ A_{ca} & A_{cb} & A_{cc} \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$A_{IT} = \frac{[A_{abc}] + [A_{cab}] + [A_{bca}]}{3} \quad (63)$$

$$Y_{LIT} = j\omega 2\pi\epsilon_0 \cdot [A_{IT}]^{-1} \quad (64)$$

$$Y_{LIT} = \begin{bmatrix} Y_p & Y_m & Y_m \\ Y_m & Y_p & Y_m \\ Y_m & Y_m & Y_p \end{bmatrix} \quad (65)$$

Onde:

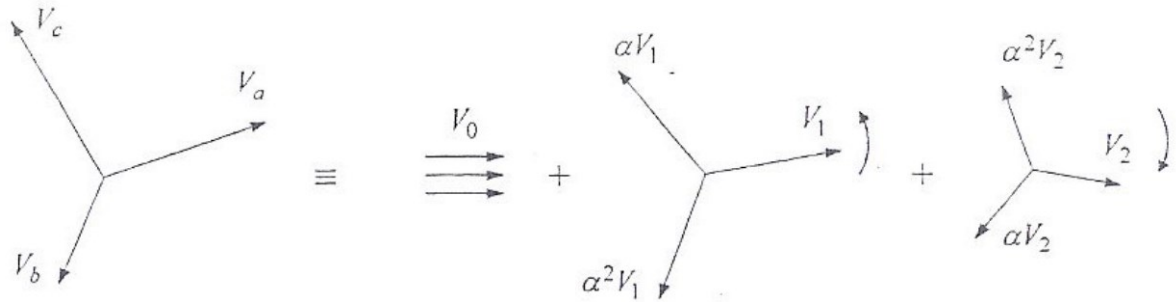
$\bar{Y}_p$  é a admitância própria

$\bar{Y}_m$  é a admitância mútua

### 3.4. Representação em componentes de sequência

Quando o sistema é polifásico de  $n$  fases, é necessário aplicar uma mudança de coordenadas, chamada transformação modal para desacoplar o sistema de equação, possibilitando realizar a análise em  $n$  circuitos independentes, conhecida como transformação de fase-modo (TAVARES, 2003). A transformação de Fostescue decompõe um sistema trifásico desbalanceado em três sistemas monofásicos com fasores balanceados, conforme Figura 12, chamados de componentes simétricas, sendo elas a de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero (ZANETTA, 2006).

**Figura 12 – Representação das componentes simétricas**



**Fonte: (ZANETTA 2006)**

Como exemplo a transformação de Fortescue é aplicada a matriz de impedâncias longitudinais idealmente transposta, que contém elementos próprios e elementos mútuos (TAVARES, 2003), definidas pelas Equações de (66) a (70):

$$Z_{LIT} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \quad (66)$$

$$Z_{L012} = [T]^{-1} \cdot Z_{LIT} \cdot [T] \quad (67)$$

$$Z_{L012} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (69)$$

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \quad (70)$$

Onde:

$Z_0$  – impedância de sequência zero

$Z_1$  – impedância de sequência positiva

$Z_2$  – impedância de sequência negativa

$T$  – matriz de transformação

$T^{-1}$  – matriz de transformação inversa

Ainda segundo (TAVARES, 2003) as impedâncias e admitâncias modais são numericamente iguais independente da transformação utilizada, seja a transformada

apresentada, a de Clarke ou a de Karrenbauer e podem ser calculadas sem a utilização da matriz de transformação, segundo as Equações (71) e (72):

$$Z_0 = Z_p + 2Z_m \quad (71)$$

$$Z_1 = Z_2 = Z_p + Z_m \quad (72)$$

#### 4. METODOLOGIA

Foi escrito um código em linguagem MATLAB® para calcular os parâmetros elétricos por unidade de comprimento, partindo da matriz primitiva, que compreende as interações internas e externas de cada cabo presente na estrutura, seja ele condutor ou cabo para-raios, realizando as reduções matriciais para a eliminação dos subcondutores de fase e a inclusão do efeito dos cabos para-raios, chegando na matriz com dimensão do número de fases que será transposta idealmente, originando a matriz com elementos próprios e mútuos iguais. A transformação modal de Fortescue foi aplicada nessa última matriz, também conhecida como de componentes simétricas, tornando a matriz de impedâncias antes cheia em uma matriz diagonal, separando assim as fases acopladas do circuito em três circuitos monofásicos independentes.

Para representar a impedância interna foi utilizada a fórmula aproximada das funções modificadas de Bessel apresentada na equação (24), que apresenta boa precisão para baixas frequências (TAVARES, 2003). A impedância externa e o efeito da corrente de retorno pelo solo foram representados pelo método das imagens complexas (DERI, et al., 1981) que seguiu de uma linha de pesquisa em busca da solução para a integral infinita de Carson (GERTRUDES, PORTELA e TAVARES, 2011), que também conta com uma boa aproximação para baixas frequências (TAVARES 2003). O efeito da presença dos cabos para-raios no cálculo dos parâmetros foi incluído nas inversões e reduções matriciais, juntamente com a eliminação dos subcondutores, que pode ser realizada via redução de Kron quando a matriz está na forma de impedância ou pode ser executada eliminando as linhas e colunas correspondentes quando a matriz está na forma de admitância, já que as condições de contorno são mais favoráveis.

Também foi calculada a impedância de sequência positiva da LT pelo método simplificado, realizado a partir do raio médio geométrico RMG e a distância média geométrica DMG, no qual também foi comparado ao valor de sequência positiva dos dados que consideram o solo ideal, pois a profundidade de penetração complexa é eliminada numericamente, retornando o método das imagens ao caso ideal.

A resistividade elétrica do solo foi variada entre o intervalo de 0 a 10.000  $\Omega.m$ , com passo unitário, tendo como base os valores apresentados na Tabela 1, que

relaciona o intervalo em que a resistividade elétrica que pode ser encontrada no território brasileiro.

Para validar os dados calculados, foi utilizado o *software* PSCAD/EMTDC®, onde os dados de impedância modal calculados foram utilizados para a comparação dos dados obtidos via código MATLAB®. Para linhas aéreas, analisadas a uma frequência específica, o PSCAD/EMTDC® utiliza a rotina de cálculo de Bergeron, uma metodologia de parâmetros distribuídos e representa o efeito do solo por duas maneiras: Integração Numérica Direta (IND), que soluciona a impedância devido ao solo real por meio da integração numérica direta das integrais de Carson e Método Analítico Aproximado (MAA) que utiliza a mesma aproximação analítica que o código MATLAB®.

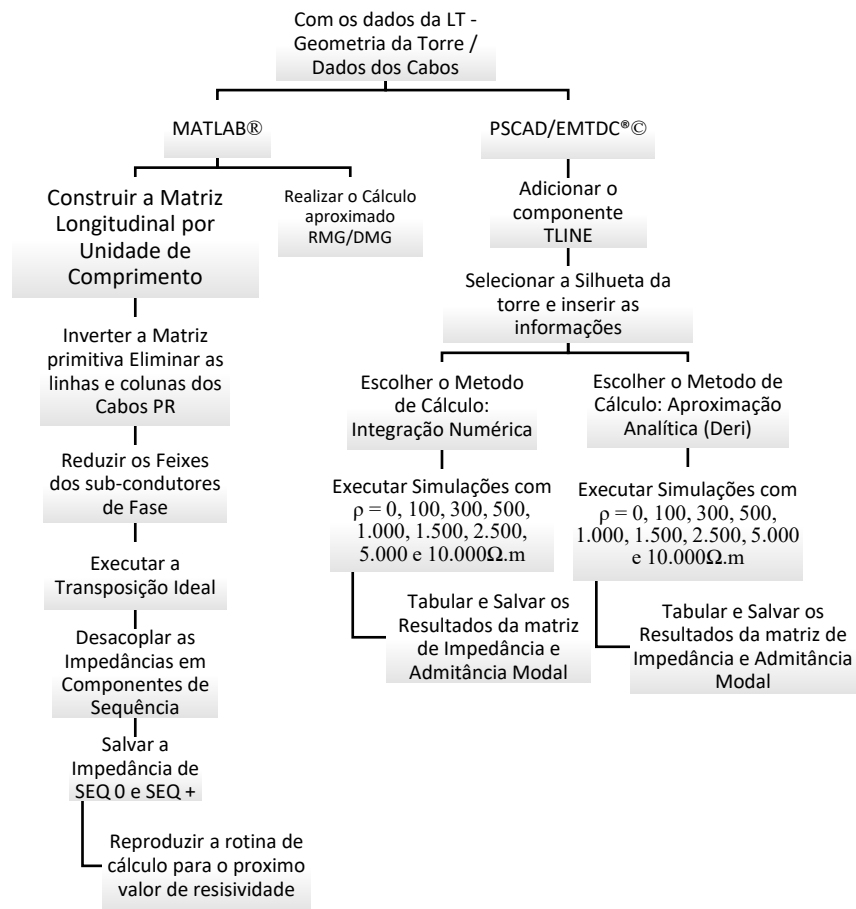
Como não há a opção de varredura dos parâmetros em função da resistividade do solo, as simulações foram executadas com resistividades específicas no PSCAD/EMTDC® e então comparadas com os correspondentes advindos do código MATLAB®. As resistividades escolhidas são:  $\rho = 0, 100, 300, 500, 1.000, 1.500, 2.500, 5.000$  e  $10.000$  (Ohm.m), executadas simulações tanto com a opção IND, que em tese é a melhor solução por não utilizar aproximações, quanto com a opção MAA implementada dentro do software.

Os resultados obtidos nas simulações foram separados em dois grupos: as impedâncias de sequência zero e as impedâncias de sequência positiva, e com esses resultados são construídos os gráficos de sensibilidade, onde o eixo abscissas apresentam a resistividade elétrica do solo (Ohm.m) e o eixo das ordenadas as componentes da impedância por unidade de comprimento, com a parte real representada pela resistência (Ohm.Km<sup>-1</sup>) e a parte complexa pela indutância (mH.Km<sup>-1</sup>).

Um diagrama da metodologia de cálculo desenvolvida para essa pesquisa é apresentado na Figura 13.



**Figura 13 – Diagrama da metodologia de cálculo aplicada**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

O método escolhido para validar os dados provenientes do código MATLAB® será a raiz do erro quadrático médio, em inglês *Root Mean Square Error* (RMSE), uma medida de desempenho de um conjunto de dados calculado em função de um conjunto de dados padrão, que no caso deste estudo são os dados retirados do PSCAD/EMTDC® e pode ser utilizado nas impedâncias calculadas a uma mesma resistividade. O RMSE é comumente utilizado para expressar a acurácia dos resultados numéricos, apresentando valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada e que, quanto menor o valor desse indicador, melhor os dados estão ajustados, com cálculo apresentado na Equação (73):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{calc_i} - Z_{ref_i})^2} \quad (73)$$

Após a apresentação dos resultados que são o objetivo deste trabalho, o cálculo da variação dos parâmetros longitudinais em função da frequência também foi executado, aproveitando a capacidade do código e que serve para ilustrar o comportamento da LT. Com resistividade de solo fixada em 2.500 Ohm.m, foi possível fazer a varredura em frequência até 1 MHz e sua sensibilidade também é apresentada no capítulo de resultados.

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as características da LT em estudo, contendo as informações da silhueta da torre e as características elétricas dos cabos condutores e dos cabos para-raios, a implementação do código em linguagem MATLAB®, a implementação no PSCAD/EMTDC® e os resultados obtidos nas simulações, seguindo a ordem das componentes das impedâncias de sequência zero, as componentes das impedâncias de sequência positiva, a capacitância de sequência e a variação dos parâmetros com a frequência.

Como a escolha do método de cálculo dos parâmetros em linhas aéreas dentro do PSCAD/EMTDC® produz uma diferença nos parâmetros, o RMSE será calculado em função desses dois conjuntos: dados do PSCAD/EMTDC® com a Integração Numérica Direta (IND) e os dados do PSCAD/EMTDC® com o Método Analítico Aproximado (MAA) que também utiliza o que foi apresentado por (DERI, et al., 1981). Os dados com IND são, em tese os mais precisos, já que resolvem computacionalmente a integral infinita que é usada para descrever a influência do solo com resistividade finita.

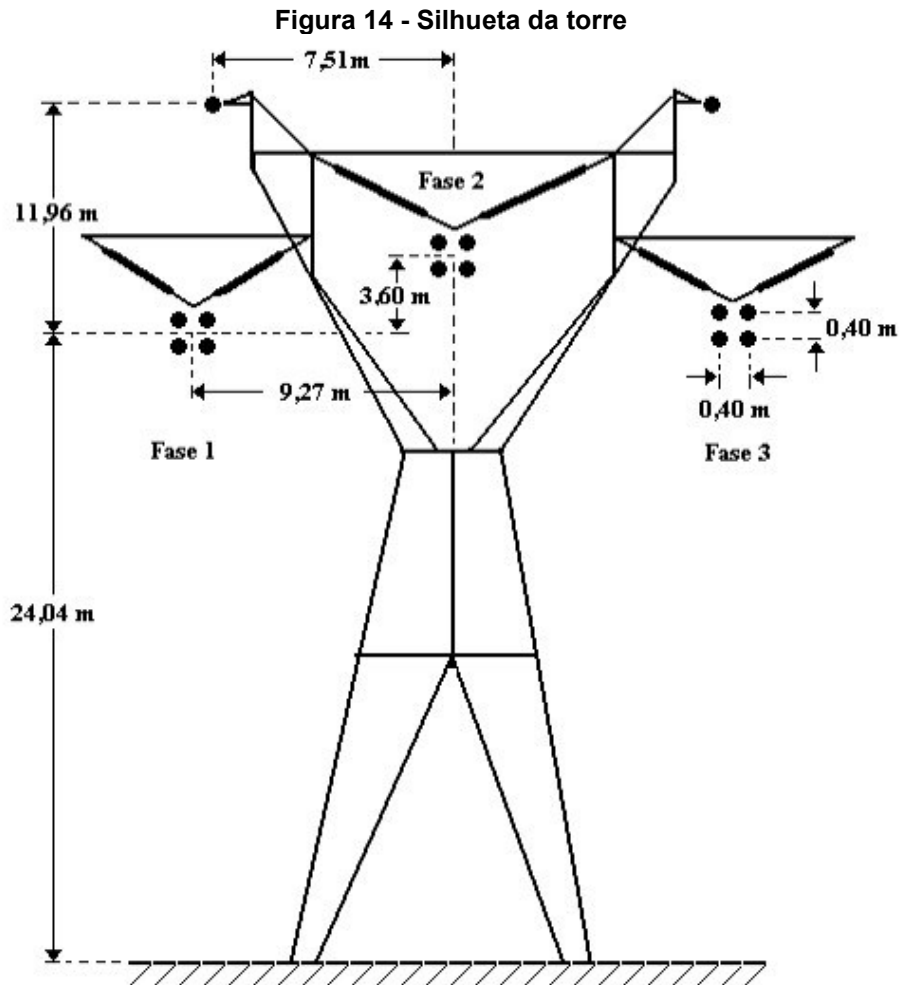
Em primeiro plano são apresentados os dados referentes as impedâncias de sequência zero ou modo homopolar, onde há a separação da impedância modal em sua componente real, representado pela resistência e expressa em  $\text{Ohm.km}^{-1}$ , e a componente imaginária, representada pela indutância e expressa em  $\text{mH.km}^{-1}$ , unidade de medida comumente utilizada ao invés da reatância indutiva, já que a impedância também é função da frequência de análise.

Para os gráficos apresentados, será utilizado o mesmo esquema de cores e de marcadores para os respectivos tipos de dados. As curvas em azul apresentam os dados calculados via MATLAB®, os asteriscos na cor preta representam os dados PSCAD/EMTDC® obtidos via IND, os círculos vermelhos são dados obtidos pelo MAA e para os dados de sequência positiva são incluídos triângulos na cor preta para o método aproximado RMG/DMG.

### 5.1. Características da linha de transmissão aérea em estudo

A linha de transmissão utilizada nesse trabalho é trifásica com tensão nominal de 440 kV, pertence a Companhia Energética de São Paulo (CESP) e está presente

no trecho Araraquara-Bauru. Constituída de circuito simples com estrutura autoportante de aço galvanizado, possui eixo de simetria vertical. Com relação aos cabos, São doze cabos de fase distribuídos em quatro subcondutores por fase e dois cabos guarda ou para-raios. As posições dos condutores e as distâncias envolvidas estão apresentadas na Figura 14.



Fonte: FLORES (2006)

As características elétricas dos cabos condutores presentes na LT são apresentados na Tabela 3 e, na Tabela 4, os dados remetem aos cabos para-raios. A distância entre as torres é de 450 m e as análises serão feitas em frequência nominal 60 Hz.

**Tabela 3 – Dados dos condutores de fase da linha de transmissão – condutor Grosbeak**

Variável	Extenso	Valor
$R_0$	Raio interno (mm)	4,635
$R_1$	Raio externo (mm)	12,57
$R_{cc}$	Resistência CC ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	0,089898
$T$	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	75
$\mu_r$	Permeabilidade relativa	1,0
$F_m$	Flecha a meio vão (m)	13,43

Fonte: Adaptado de FLORES (2006)

**Tabela 4 – Dados dos cabos pára-raios da linha de transmissão**

Variável	Extenso	Valor
$R_0$	Raio interno (mm)	0,0
$R_1$	Raio externo (mm)	4,752
$R_{cc}$	Resistência CC ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	4,188
$T$	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	45
$\mu_r$	Permeabilidade relativa	70,0
$F_m$	Flecha a meio vão (m)	6,4

Fonte: Adaptado de FLORES (2006)

Para finalizar, foi necessário realizar a correção de temperatura da resistência CC do cabo condutor utilizado a Equação (8) para a temperatura de operação de 75 °C, constante de temperatura do material de 228 e temperatura inicial de 20 °C, chegando no valor de 0,109825 Ohm.km<sup>-1</sup>.

## 5.2. Implementação do código em linguagem MATLAB®

O código escrito em linguagem MATLAB® reproduziu a sequência de cálculo matricial para a obtenção dos parâmetros elétricos unitários por unidade de comprimento da linha de transmissão aérea apresentado por (TAVARES, 2003), utilizando os dados apresentados anteriormente. Além da metodologia matricial, a rotina do cálculo aproximado RMG/DMG foi executada no mesmo script.

O vetor que contém os dados da resistividade varia de 0 a 10.000 Ohm.m com passo unitário, fazendo com que sejam criados 10.001 exemplares de cada matriz presente na metodologia de cálculo e o mesmo número de impedâncias de sequência.

A matriz primitiva longitudinal que contém a relação da impedância interna de cada condutor e as interações mútuas entre eles, sejam cabos condutores de fase ou cabos guarda, é uma matriz cheia com dimensão 14x14.

Para a ilustração do processo de cálculo, são apresentadas matrizes que compõem a metodologia de cálculo, começando pela matriz primitiva longitudinal e chegando na matriz das impedâncias de sequência, expressas em Ohm.km<sup>-1</sup>. para resistividade de 10.000 Ohm.m. Na Equação (74) é apresentado a matriz primitiva longitudinal, que contém as impedâncias próprias e mútuas de todos os cabos presentes na estrutura:

$$Z_{LP(14 \times 14)} = \begin{bmatrix} 0,169 + 1,108j & 0,059 + 0,515j & 0,059 + 0,468j & & 0,059 + 0,451j \\ 0,059 + 0,515j & 0,169 + 1,108j & 0,058 + 0,428j & \dots & 0,059 + 0,485j \\ 0,059 + 0,468j & 0,058 + 0,428j & 0,169 + 1,108j & & 0,059 + 0,477j \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0,059 + 0,451j & 0,059 + 0,485j & 0,059 + 0,477j & \dots & 4,247 + 2,701j & 0,059 + 0,484j \\ & & & & 0,059 + 0,484j & 4,247 + 2,701j \end{bmatrix} \quad (74)$$

Com a inversão dessa matriz primitiva longitudinal, obtendo a matriz de admitâncias correspondente, conforme Equação (75), foi realizada em uma única operação a redução dos subcondutores de fase e a inclusão do efeito dos cabos para-raios. As condições de contorno aplicadas nesse sistema de equações permitem uma solução rápida quando a matriz está na forma de admitância, onde as linhas e colunas dos cabos para-raios são eliminadas já que estão os cabos aterrados e a redução dos subcondutores é realizada pela soma das 16 submatrizes de ordem 3x3 correspondentes, apresentado na Equação (77):

$$[Y_{LP}] = [Z_{LP}]^{-1} \quad (75)$$

$$[Y_{LP}] = [Y_{LPabc1}] + [Y_{LP12}] + [Y_{LP13}] + [Y_{LP14}] + \dots + [Y_{LPabcn}] \quad (76)$$

Para a obtenção da matriz de impedância fase  $[Z_{Labc}]$ , que tem dimensão 3x3, é realizado a inversão da matriz  $[Y_{Labc}]$ , de acordo com as Equações (77) e (78):

$$[Z_{Labc}] = [Y_{Labc}]^{-1} \quad (77)$$

$$[Z_{L_{abc}}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (78)$$

As impedâncias presentes nessa matriz têm como componente real  $R$  a soma da resistência interna  $R_{int}$  com a resistência da correção do solo real  $R_{solo}$ , assim como a reatância indutiva  $X$ , que é a soma da contribuição interna  $X_{int}$ , da externa com solo ideal  $X_{ext}$  e a da externa com correção do solo real  $X_{solo}$ , sendo que os dois últimos termos são calculados simultaneamente com a metodologia da profundidade complexa, como apresentado na Equação (79):

$$Z_{L_{abc}} = \begin{bmatrix} 0,1377 + 0,7753j & 0,1128 + 0,4493j & 0,1101 + 0,4049j \\ 0,1128 + 0,4493j & 0,1431 + 0,7702j & 0,1128 + 0,4493j \\ 0,1101 + 0,4049j & 0,1128 + 0,4493j & 0,1377 + 0,7753j \end{bmatrix} \quad (79)$$

As impedâncias próprias de cada fase são encontradas na diagonal principal, tem componente resistiva e reativa maiores que as impedâncias mutuas, já que a impedância mutua só tem parcela resistiva pela inclusão do efeito do solo real calculado pelo método do plano complexo e não conta com o cálculo da impedância interna. A fase central B se encontra em altura diferente das fases A e C, por isso a impedância própria  $Z_{bb}$ .tem valor diferente das outras fases.

Avançando no roteiro de cálculos, é necessário realizar a transposição ideal da matriz  $[Z_{L_{abc}}]$ , de acordo com as Equações (60) e (61), encontrando  $[Z_{L_{IT}}]$  que possui os elementos próprios e mútuos iguais, apresentado nas Equações (80) e (81):

$$Z_{L_{IT}} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \quad (80)$$

$$Z_{L_{IT}} = \begin{bmatrix} 0,1395 + 0,7735j & 0,1119 + 0,4345j & 0,1119 + 0,4345j \\ 0,1119 + 0,4345j & 0,1395 + 0,7735j & 0,1119 + 0,4345j \\ 0,0937 + 0,3677j & 0,1119 + 0,4345j & 0,1395 + 0,7735j \end{bmatrix} \quad (81)$$

A obtenção das impedâncias de sequência quando o sistema é considerado idealmente transposto, são realizadas sem a necessidade do uso da matriz de transformação, conforme apresentado nas Equações (71) e (72), produzindo em nosso exemplo os dados apresentados nas Equações (82) e (83):

$$Z_{L_{012}} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \quad (82)$$

$$Z_{L_{012}} = \begin{bmatrix} 0,3634 + 1,6426j & 0 & 0 \\ 0 & 0,02757 + 0,3390j & 0 \\ 0 & 0 & 0,02757 + 0,3390j \end{bmatrix} \quad (83)$$

### 5.3. Implementação no PSCAD/EMTDC®

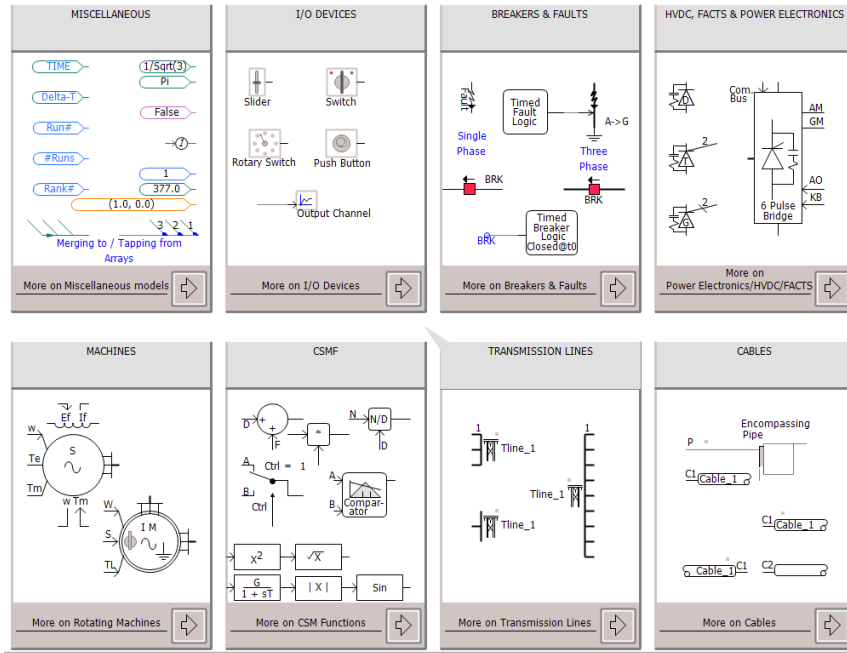
Com mais de 40 anos de mercado, o PSCAD/EMTDC® é uma ferramenta avançada e completa para a análise de sistemas de potência, criação de sistemas de controle complexos, análise dos transitórios eletromagnéticos e demais estudos que necessitam de simulações no domínio do tempo. A versão utilizada neste trabalho do PSCAD/EMTDC® é disponibilizado gratuitamente para estudantes pelo desenvolvedor Manitoba Hydro International Ltd.

O PSCAD/EMTDC® além de ser capaz de analisar linhas de transmissão aéreas, é capaz também de representar as LT's subterrâneas e híbridas, cada uma com sua modelagem específica, com modelos dependentes da frequência e apresentação dos dados em componentes modais. Os dados de saída utilizados serão as impedâncias modais e, mesmo que o *software* utilize a transformada de Clarke, a matriz de impedância modal é única e numericamente igual a matriz de impedância de sequência, em um sistema idealmente transposto, como apresentado por (TAVARES, 2003).

O ambiente de utilização é amigável e para esse trabalho foi utilizado o bloco *TLine* que pode ser visualizado na seção *Transmission Lines*, na aba *Master Library* dentro do *Workspace* apresentado na Figura 15.



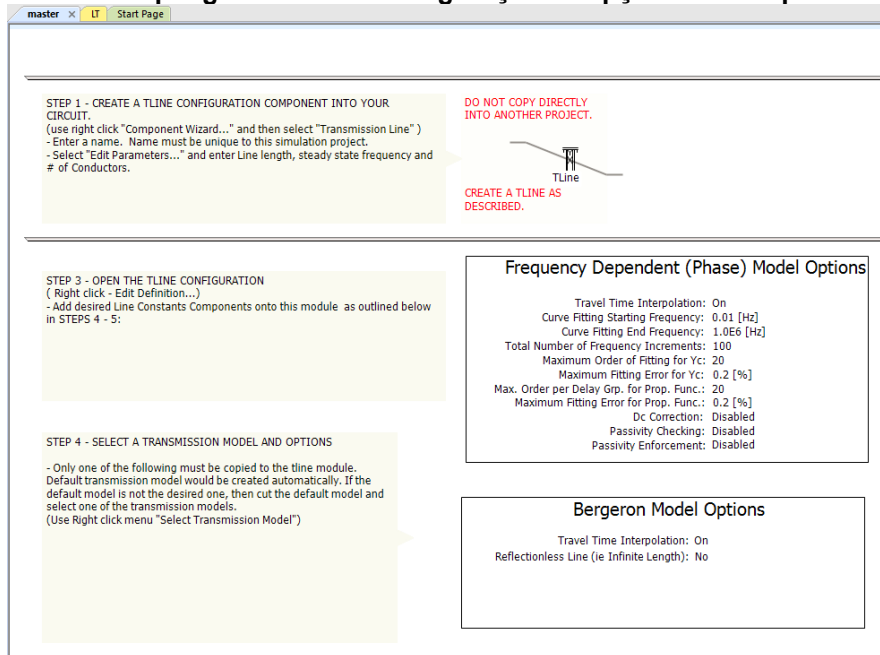
**Figura 15 – Seções de componentes na aba Master Library**



**Fonte: Adaptado de PSCAD/EMTDC® (2022)**

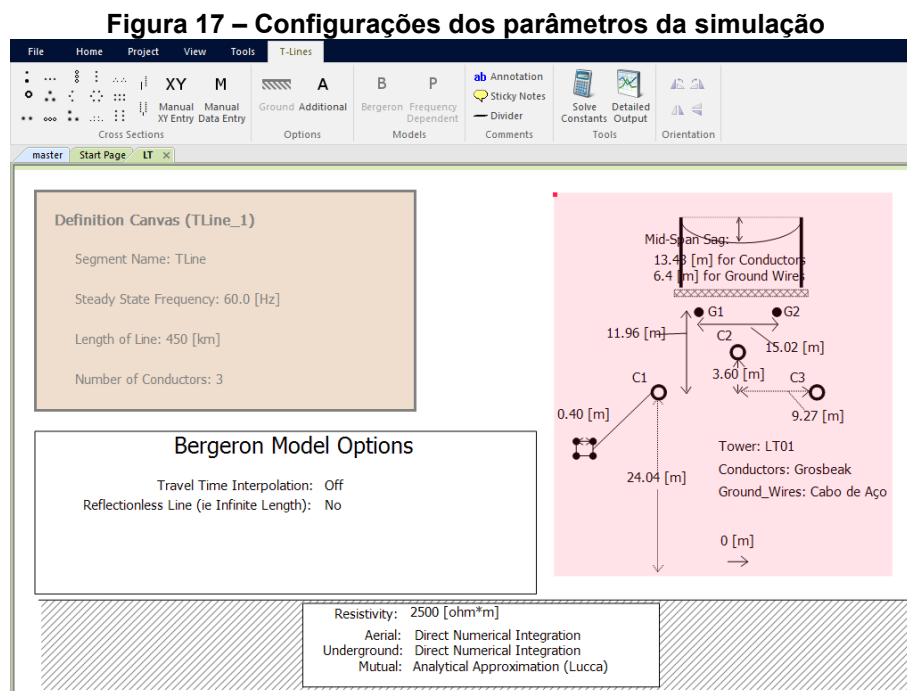
Abrindo essa seção existe um minucioso e exemplificado passo a passo de como adicionar uma LT à simulação no PSCAD/EMTDC®, as configurações possíveis tanto quanto ao tipo de LT, geometria da torre, metodologia de cálculo, opções adicionais e outros ilustrado na Figura 16.

**Figura 16 – Exemplo genérico das configurações e opções do componente TLine**



**Fonte: Adaptado de PSCAD/EMTDC® (2022)**

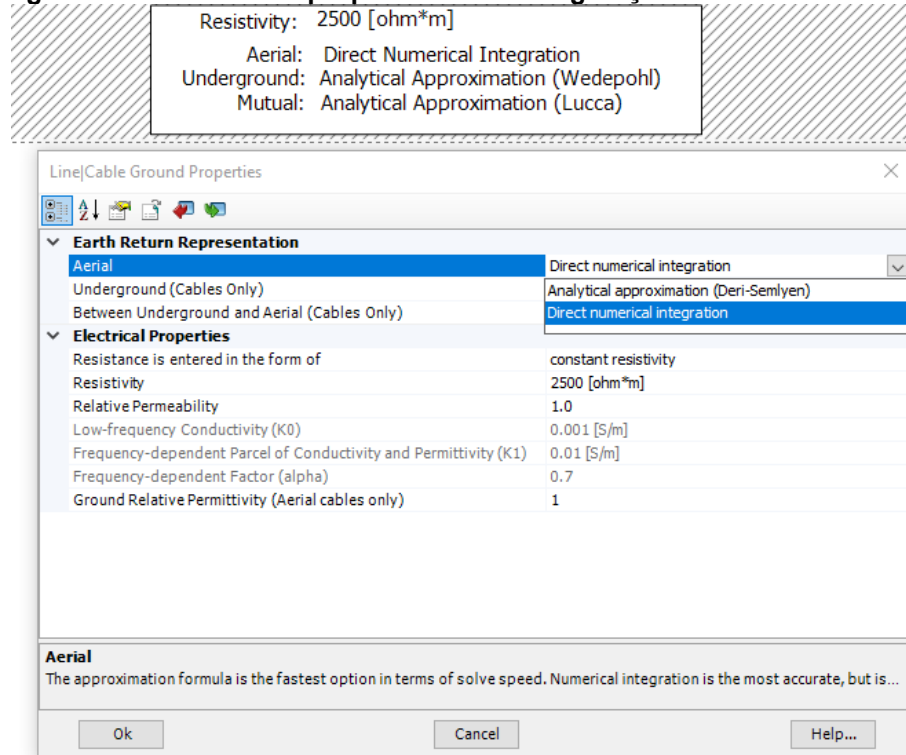
Após criar um novo projeto, é necessário incluir o componente *TLine* e executar a simulação para cada valor definido de resistividade de solo, salvando a matriz de sequência a cada novo valor de resistividade, já que não há uma ferramenta na versão gratuita capaz de automatizar essa varredura. Os dados da distância de LT, frequência de análise e número de condutores apresentado na Figura 17 foram incluídos no ambiente utilizando os dados da seção 4.1 com modelo de Bergeron.



**Fonte: Adaptado de PSCAD/EMTDC® (2022)**

Foi inserido também a resistividade, a permeabilidade e a permissividade do solo e escolhido a representação do efeito do solo que no caso das linhas aéreas, pode ser escolhido a integração numérica direta ou a aproximação analítica (DERI, et al., 1981). Vale ressaltar que a permissividade elétrica do solo é considerada desprezível nas condições impostas na metodologia de cálculo, aplicada no código MATLAB® e, no PSCAD/EMTDC®, o menor valor que pode ser colocado no campo correspondente à permissividade no IND é 1, o que para o caso do nosso estudo não surte efeito nos parâmetros. A alteração dos dados pode ser efetuada com duplo click em cada retângulo flutuante, conforme. Figura 18.

**Figura 18 – Detalhe das propriedades e configurações de cálculo do solo**



Fonte: Adaptado de PSCAD/EMTDC® (2022)

Com todos os parâmetros configurados basta pressionar o comando *Solve Constants* dentro de Tools na aba *TLine*, que pode ser visualizado no canto superior da Figura 17. Para acessar os resultados do cálculo, é necessário selecionar a aba *Output* no canto inferior direito, onde serão apresentados vários dados provenientes dessa simulação. Os parâmetros elétricos de sequência são descritos na quebra *Sequence Component Data @ 60 Hz*, na parte final do documento de saída, conforme apresentado na Figura 19.

É natural nas simulações o aparecimento de resquícios numéricos nos dados que são de interesse e, para esse trabalho, foi selecionado o valor de 1.0E-17 para o padrão de zero tolerância na aba *Additional Options*, ou seja, os valores abaixo desse padrão não serão exibidos na simulação uma vez que a matriz de impedâncias de sequência possui a característica de ter valores apenas na diagonal principal quando o sistema é considerado idealmente transposto e de circuito simples.

**Figura 19 – Dados de saída – matriz de impedâncias e admitâncias de seqüência na aba Output**

```

109 -----
110 SEQUENCE COMPONENT DATA @      60.00 Hz:
111 -----
112
113 SEQUENCE TRANSFORM MATRIX:
114 0.577350269E+00,0.000000000E+00 0.577350269E+00,0.000000000E+00 0.577350269E+00,0.000000000E+00
115 0.577350269E+00,0.000000000E+00 -.288675135E+00,-.500000000E+00 -.288675135E+00,0.500000000E+00
116 0.577350269E+00,0.000000000E+00 -.288675135E+00,0.500000000E+00 -.288675135E+00,-.500000000E+00
117
118 SEQUENCE IMPEDANCE MATRIX (Zsq) [ohms/m]:
119 0.333114544E-03,0.149713035E-02 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00
120 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.228032391E-04,0.320475779E-03 0.000000000E+00,0.000000000E+00
121 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.228032391E-04,0.320475779E-03
122
123 SEQUENCE ADMITTANCE MATRIX (Ysq) [mhos/m]:
124 0.100000000E-10,0.311264564E-08 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00
125 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.100000000E-10,0.510834888E-08 0.000000000E+00,0.000000000E+00
126 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.000000000E+00,0.000000000E+00 0.100000000E-10,0.510834888E-08
127
128 -----
129 MINIMUM TIME DELAY AND RECOMMENDED TIME STEP
130 -----
131
132 Minimum Time Delay for the Line [ms]: 1.528194773
133 Recommended Time Step for the Line [ms]: 0.152819477
134
135
136

```

Fonte: Adaptado de PSCAD/EMTDC® (2022)

A matriz de impedância de seqüência  $Z_{sq}$  tem elementos reais e complexos, sendo o primeiro número antes da vírgula correspondente a resistência e após o valor da reatância. Esses dados serão copiados manualmente para uma tabela do Excel® e importados para o MATLAB®, onde os equacionamentos e gráficos foram construídos.

#### 5.4. Resistência de seqüência zero

São apresentados os valores pontuais de resistência de seqüência zero calculados a uma mesma resistividade, expressos em Ohms por quilômetro (Ohm.Km<sup>1</sup>), tanto no MATLAB® quanto no PSCAD/EMTDC® com as casas decimais reduzidas para melhor apresentação, reunidos na Tabela 5.

**Tabela 5 – Resistência de seqüência zero para uma mesma resistividade de solo em 60 Hz (continua)**

$\rho$	$R_{0_{calc}}$	$R_{0_{pscad.IND}}$	$R_{0_{pscad.MAA}}$
0	0,033523	0,034019	0,034019
100	0,261428	0,264785	0,268426
300	0,283012	0,288221	0,291729
500	0,293591	0,299587	0,303160
1000	0,308548	0,315639	0,319353
1500	0,317628	0,325391	0,329191
2500	0,329418	0,338062	0,341972

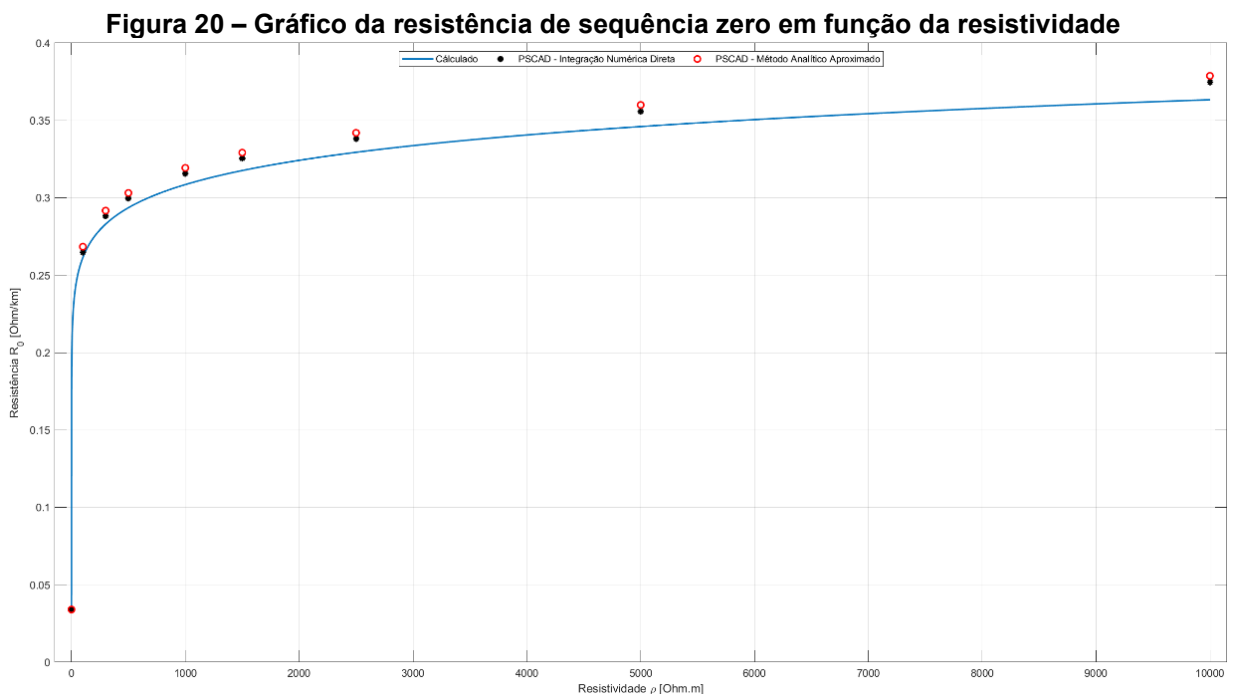
**Tabela 6 – Resistência de sequência zero para uma mesma resistividade de solo em 60 Hz (conclusão)**

$\rho$	$R_{0_{calc}}$	$R_{0_{pscad.IND}}$	$R_{0_{pscad.MAA}}$
5000	0,346040	0,355940	0,360002
10000	0,363370	0,374597	0,378812

Fonte: Autoria própria (2022)

Com o aumento da resistividade do solo é possível notar que o valor da resistência de sequência zero tem um aumento substancial já nos primeiros valores de resistividade, partindo de 0,033523 na condição ideal, ou resistividade igual à zero, para 0,261428 com resistividade em 100 Ohm.m. A resistência de sequência zero também sofre variação no restante das resistividades analisadas, de maneira menos acentuada.

Os dados calculados via MATLAB® são ligeiramente menores que os que apresentados pelo PSCAD/EMTDC®, no entanto, apresentam o mesmo comportamento à medida que a resistividade aumenta, como apresentado na Figura 20.



Fonte: Autoria própria (2022)

Portanto as resistências de sequência zero calculadas têm característica de alta variação inicial, com aumento gradual com a resistividade do solo.

### 5.5. Indutância de sequência zero

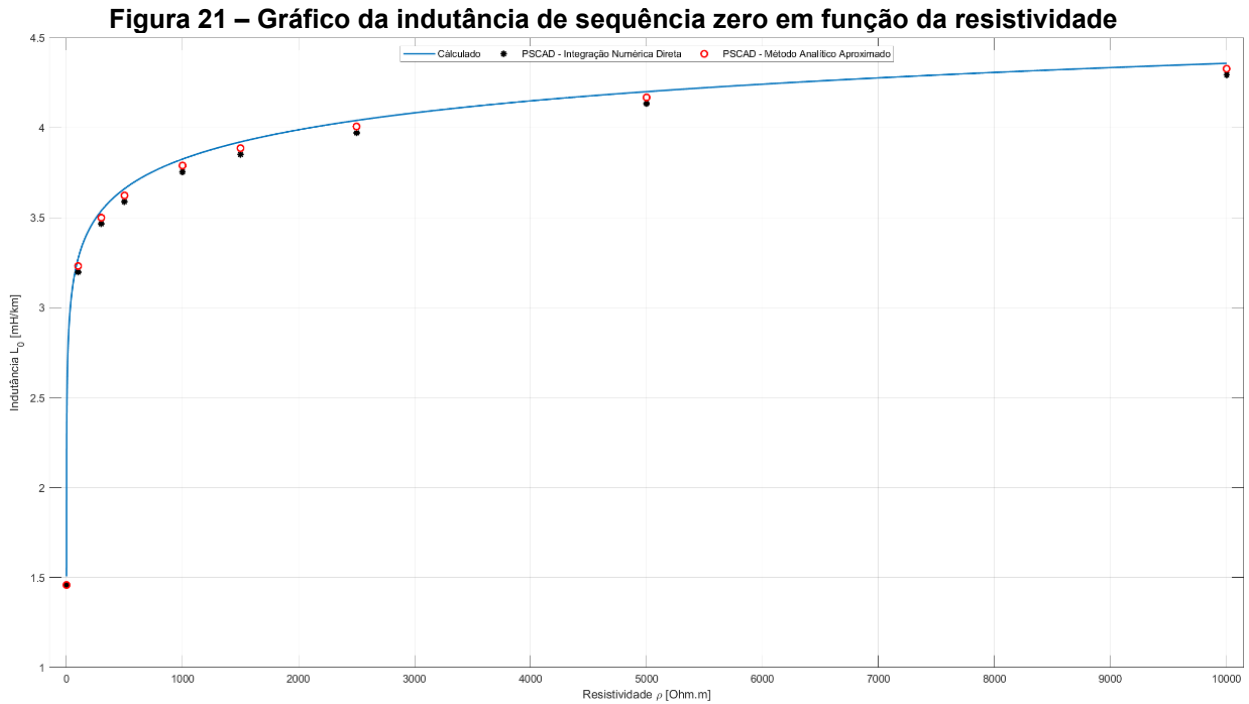
Assim como para a resistência, são apresentados na Tabela 7 os valores pontuais de indutância de sequência zero calculados a uma mesma resistividade, expressos em mili-Henry por quilômetro ( $\text{mH.Km}^{-1}$ ), tanto no MATLAB® quanto no PSCAD/EMTDC®.

**Tabela 7 – Indutância de sequência zero para uma mesma resistividade de solo em 60 Hz**

$\rho$	$L_{0_{calc}}$	$L_{0_{pscad.IND}}$	$L_{0_{pscad.MAA}}$
0	1,506833	1,458710	1,458710
100	3,271995	3,196291	3,230984
300	3,537972	3,463994	3,499327
500	3,660466	3,587701	3,622993
1000	3,825155	3,754118	3,789331
1500	3,920590	3,850633	3,885756
2500	4,039807	3,971278	4,006238
5000	4,199663	4,133175	4,167836
10000	4,357222	4,292862	4,327158

**Fonte: Autoria própria (2022)**

As indutâncias apresentadas na Tabela 7, indicam que na indutância de sequência zero encontramos a sensibilidade em função da resistividade com mesma característica que a resistência de sequência zero, contando com aumento acentuado no início e uma estabilização na variação, sendo mais sutil que a inicial. No entanto, ao contrário do que acontece na resistência, os dados calculados MATLAB® são ligeiramente maiores em relação aos dados do PSCAD/EMTDC®, graficamente apresentado na Figura 21.



Fonte: Autoria própria (2022)

É possível observar uma boa acurácia do modelado em MATLAB® em relação aos dados do PSCAD/EMTDC®, como apresentam os dados da Tabela 8, onde são mostrados os resultados calculados do RMSE para a resistência  $R_0$  e para a indutância  $L_0$  em função dos dados advindos do PSCAD/EMTDC®.

**Tabela 8 – Dados calculados do RMSE para impedância de sequência zero**

PSCAD/EMTDC®	Resistência $R_0$	Indutância $L_0$
<i>IND</i>	0,007332	0,068324
<i>MAA</i>	0,010842	0,037172

Fonte: Autoria própria (2022)

## 5.6. Resistência de sequência positiva

Para os dados de sequência positiva, tanto a resistência quanto a indutância, são adicionados uma coluna nas tabelas correspondentes, a fim de incluir os parâmetros calculados a partir do método simplificados RMG/DMG, apresentado na seção 2.6. Como esse cálculo não leva em consideração a resistividade do solo, o valor aparecerá repetido ao longo de sua coluna nas tabelas correspondentes.

Vale ressaltar que quando uma LT é considerada idealmente transposta, o valor da impedância de sequência positiva e negativa é idêntico e, portanto, são apresentados apenas os dados com referência à sequência positiva.

As resistências de sequência positiva, expressos em Ohms por quilômetro ( $\text{Ohm.Km}^{-1}$ ), são apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9 – Resistência de sequência positiva para uma mesma resistividade de solo em 60 Hz**

$\rho$	$R_{+calc}$	$R_{+pscad.IND}$	$R_{+pscad.MAA}$	$R_{+RMG/DMG}$
0	0,027582	0,027758	0,027758	0,02745
100	0,027585	0,027786	0,027762	0,02745
300	0,027578	0,027760	0,027756	0,02745
500	0,027577	0,027752	0,027754	0,02745
1000	0,027575	0,027750	0,027752	0,02745
1500	0,027575	0,027750	0,027752	0,02745
2500	0,027574	0,027750	0,027751	0,02745
5000	0,027573	0,027750	0,027750	0,02745
10000	0,027573	0,027750	0,027750	0,02745

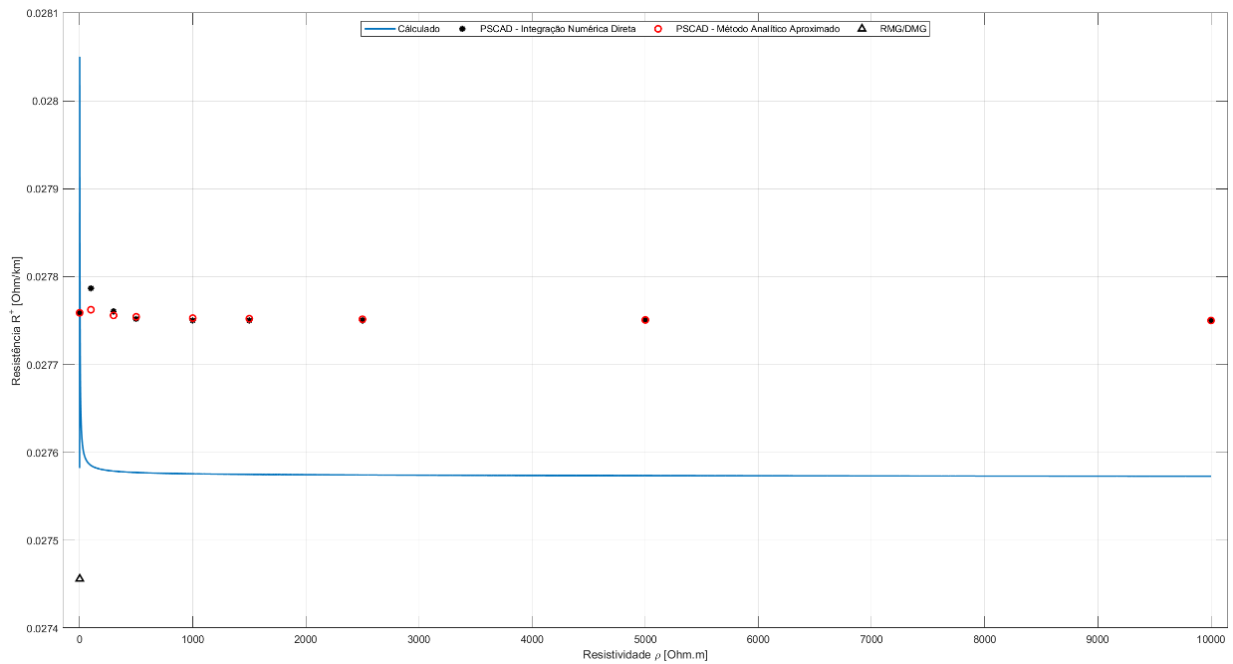
**Fonte: Autoria própria (2022)**

A resistência de sequência positiva praticamente não sofre influência da inclusão do solo real. Os valores obtidos quando a resistividade assume valores reais tendem a serem ligeiramente menores do que quando é igual a zero, no entanto essa alteração é somente percebida na 6ª casa decimal. A resistência calculada pelo método simplificado permanece abaixo dos valores encontrados na metodologia matricial e nos dados do PSCAD/EMTDC®. Os dados em forma de gráfico são apresentados na Figura 22.

A medida que a resistividade sai de zero, a curva indica que valores muito próximos de zero saltam para um valor relativamente alto, retornando um pouco abaixo do valor calculado com a resistividade igual a zero.



**Figura 22 – Gráfico da resistência de sequência positiva em função da resistividade**



Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.7. Indutância de sequência positiva

Para a indutância de sequência positiva, expressa em mili-Henry por quilômetro ( $\text{mH.Km}^{-1}$ ), os dados são apresentados na Tabela 10.

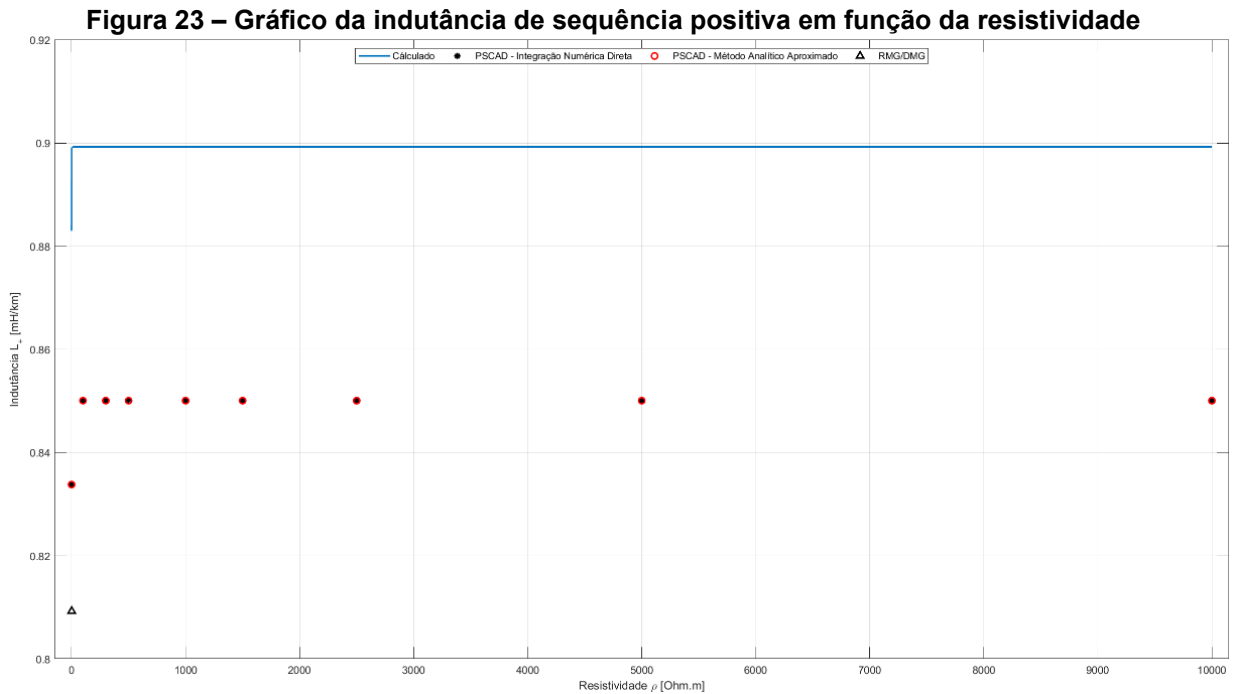
**Tabela 10 – Indutância de sequência positiva para uma mesma resistividade de solo em 60 Hz**

$\rho$	$L_{+calc}$	$L_{+pscad.IND}$	$L_{+pscad.MAA}$	$L_{+RMG/DMG}$
0	0,883022	0,833839	0,833839	0,80930
100	0,899295	0,850086	0,850107	0,80930
300	0,899294	0,850140	0,850107	0,80930
500	0,899294	0,850125	0,850106	0,80930
1000	0,899294	0,850111	0,850105	0,80930
1500	0,899293	0,850107	0,850105	0,80930
2500	0,899293	0,850105	0,850104	0,80930
5000	0,899292	0,850104	0,850104	0,80930
10000	0,899292	0,850103	0,850103	0,80930

Fonte: Autoria própria (2022)

As indutâncias sofrem alteração inicial mais significativa que a resistência de sequência positiva, estabilizando sem variação em valor maior que o calculado na

condição ideal, de maneira igual tanto nos dados calculados pelo MATLAB®, quanto nos dados do PSCAD/EMTDC®, conforme apresentado na Figura 23.



O valor calculado pelo MATLAB® ficou acima dos valores do PSCAD/EMTDC® e o valor RMG/DMG permaneceu menor que os outros. Mesmo que, por conta da escala dos gráficos, exista a impressão que a resistência e a indutância de sequência positiva calculadas estão mais dispersas em relação aos dados do PSCAD/EMTDC® que os seus correspondentes de sequência zero, eles possuem valor RMSE calculado menores e, portanto estão mais próximos dos valores de referência, conforme observa-se na Tabela 11.

**Tabela 11 – Dados calculados do RMSE para impedância de sequência positiva**

PSCAD/EMTDC®	Resistência $R_+$	Indutância $L_+$
<i>IND</i>	0,000179	0,049183
<i>MAA</i>	0,000177	0,049187

Fonte: Autoria própria (2022)

## 5.8. Tabulação dos erros

Torna-se necessário calcular e apresentar os erros percentuais das diferentes componentes, tanto de sequência zero quanto de sequência positiva, para entender a influência da modelagem do solo com condutividade finita. Foi escolhido apresentar o erro entre a condição do solo ideal e as resistividades extremas apresentadas sendo, portanto, as resistividades iguais a 100 e 10.000 ohm.m respectivamente além do erro entre essas duas resistividades.

O erro percentual das componentes das impedâncias de sequência e dos seus módulos, expressos em ohm, são apresentados na Tabela 12. A primeira linha contém os dados considerando a resistividade igual a zero, a segunda com resistividade igual a 100 ohm.m e a terceira igual a 10.000 ohm.m. E<sub>1</sub> representa a interação dos parâmetros da linha dois em relação a linha um, enquanto o E<sub>2</sub> expressa o erro entre a linha três e a linha 1 e E<sub>3</sub> é a relação linha três com a linha dois.

**Tabela 12 – Erro percentual dos parâmetros de sequência com diferentes resistividades**

$\rho$	$R_{0_{calc}}$	$L_{0_{calc}}$	$R_{+_{calc}}$	$L_{+_{calc}}$	$ Z_{0_{calc}} $	$ Z_{+_{calc}} $
0	0,0335	1,5068	0,0276	0,8830	568,06	332,89
100	0,2614	3,2720	0,0276	0,8993	1.233,51	339,02
10000	0,3634	4,3572	0,0276	0,8993	1.642,63	339,02
E <sub>1</sub>	87,18%	53,95%	0,01%	1,81%	53,95%	1,81%
E <sub>2</sub>	90,77%	65,42%	0,03%	1,81%	65,42%	1,81%
E <sub>3</sub>	28,05%	24,91%	0,04%	0,00%	24,91%	0,00%

Fonte: Autoria própria (2022)

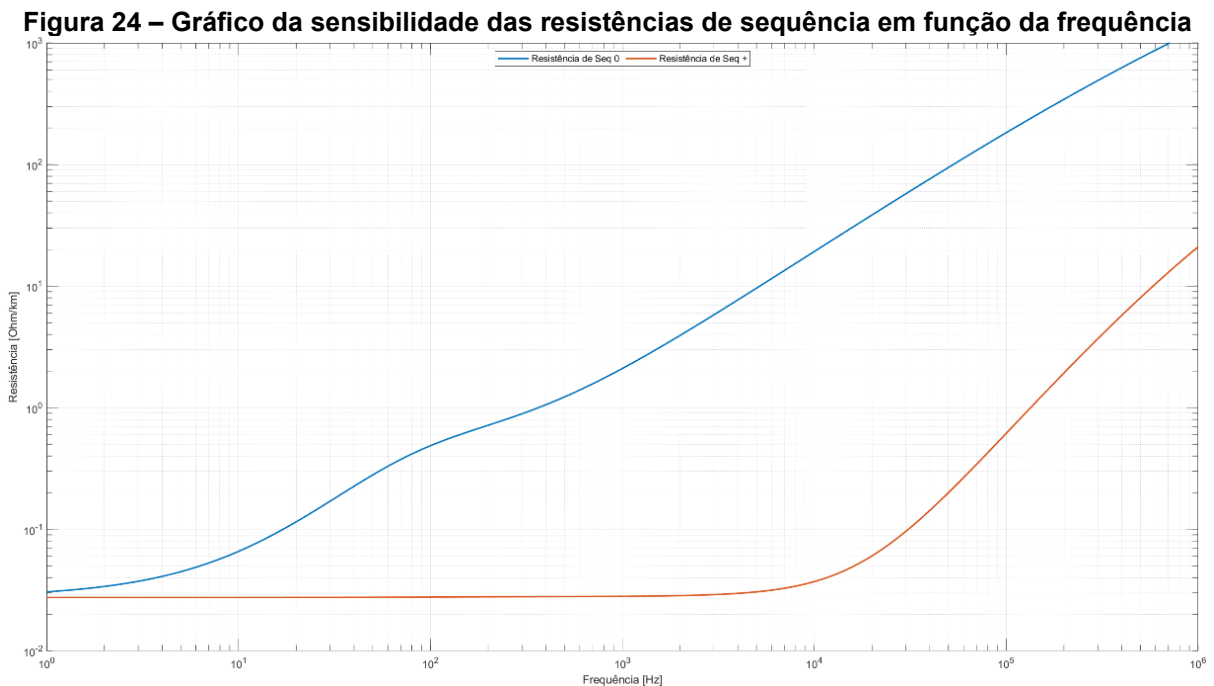
Os erros são maiores na resistência de sequência zero, demonstrando que esse parâmetro sofre grande influência da modelagem do solo. Os valores de erro tanto da indutância de sequência quanto do erro dos módulos das impedâncias foram exatamente os mesmos.

## 5.9. Sensibilidade em frequência da impedância longitudinal

Com a mesma metodologia aplicada na rotina de cálculo executada no MATLAB®, é possível realizar a sensibilidade dos parâmetros com a frequência do

sinal que passa pela LT, uma vez que a frequência angular está presente na profundidade complexa e na simplificação do cálculo da impedância interna dos condutores. Para isso é necessário fixar a resistividade em um valor diferente de zero e alterar o *loop*, que antes visava a variação da resistividade e o foco é a variação da frequência, já que o plano de profundidade complexa é numericamente anulado quando a resistividade é igual a zero.

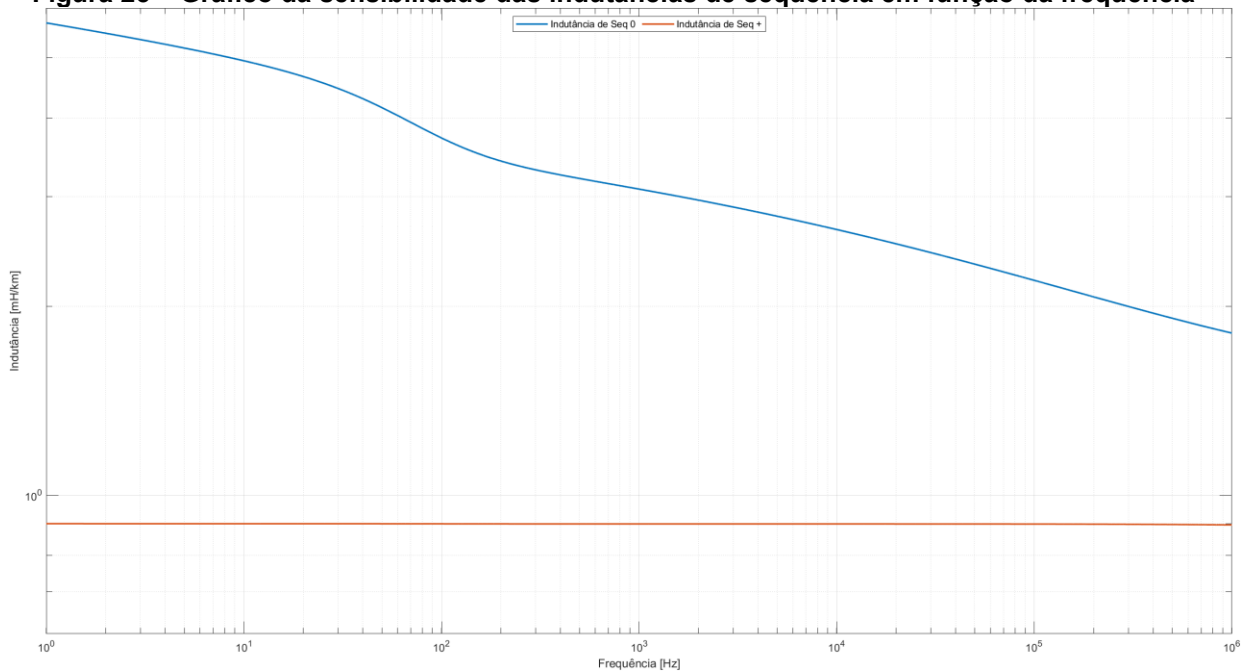
Para esta variação foram construídos gráficos com escala logarítmica, com intervalo de  $10^0$  a  $10^6$  Hz ou 1 MHz e resistividade de solo de 2.500 Ohm.m, apresentando na Figura 24 a variação da resistência de sequência zero junto com a de sequência positiva, assim como na Figura 25 as indutâncias de sequência.



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para a resistência de sequência zero ou modo homopolar existe um aumento substancial relacionado com a frequência, com valor de resistência de em torno 4 décadas superior em 1MHz em relação ao sinal com frequência próxima á de corrente contínua. O comportamento da resistência de sequência positiva também tende ao crescimento com o aumento da frequência, com estabilidade para baixas frequências e aumento menor que a resistência de sequência zero.

**Figura 25 – Gráfico da sensibilidade das indutâncias de seqüência em função da frequência**



De maneira oposta, a indutância de seqüência zero sofre redução com o aumento da frequência, com variação relativamente pequena em comparação à grande discrepância encontrada da resistência de seqüência zero. A indutância de seqüência positiva não sofre alteração perceptível com o aumento da frequência.

### 5.10. Capacitância de seqüência

Para os dados da admitância transversal, no qual é considerado apenas a parte imaginária da capacitância, os dados foram retirados apenas do cálculo realizado no PSCAD/EMTDC®, para apresentar que a modelagem do solo não influencia a capacitância da LT, com unidade expressa em nano-Faraday por quilômetro (nF.Km<sup>1</sup>), conforme apresentado na Tabela 13.

**Tabela 13 – Capacitância de seqüência para uma mesma resistividade de solo em 60 Hz**

$\rho$	$C_{0_{pscad.IND}}$	$C_{+pscad.IND}$
0	8,2565	13,5503
100	8,2565	13,5503
10000	8,2565	13,5503

Fonte: Autoria própria (2022)

Os dados de saída do PSCAD/EMTDC® para a admitância modal por unidade de comprimento tem dimensão de MHOS por metro ( $S.m^{-1}$ ), outra maneira de expressar a grandeza Siemens, então é preciso realizar a divisão pela frequência angular em 60 Hz para obter a capacitância.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho tem como principal objetivo identificar a influência que a resistividade elétrica do solo exerce sobre a impedância longitudinal unitária de uma linha de transmissão aérea, decompostos em componentes de sequência e com frequência fixada em 60 Hz, encontrando a sensibilidade entre esses fatores, através do cálculo matricial dos parâmetros que utiliza o método das imagens complexas.

Através da metodologia matricial apresentada, é possível ressaltar a dependência mútua das fases do sistema que, após as reduções dos subcondutores, da inclusão da presença dos cabos para-raios e da transposição, têm como resultado uma matriz cheia com impedâncias próprias e mútuas, que valida a ideia de utilizar uma transformação modal para dissociar as fases e, então, encontrar os parâmetros elétricos que possam ser utilizados de forma direta nos estudos do SEP, sejam as impedâncias e admitâncias de sequência positiva para estudos de sistemas equilibrados, sejam as impedâncias e admitâncias de sequência zero para estudos de sistemas desequilibrados ou em condições de contingência.

A rotina desenvolvida em linguagem MATLAB® teve um desempenho satisfatório, as resistências e indutâncias calculadas se encontram próximas aos dados retirados do PSCAD/EMTDC®, como sugerem os gráficos plotados e são confirmados pelos baixos valores do RMSE de cada componente onde, quanto mais próximo de zero o resultado do cálculo do indicador, mais próximos os valores calculados estão em relação aos dados do conjunto de referência. A utilização das hipóteses adotadas para a modelagem do cálculo, principalmente da aproximação para o cálculo em baixas frequências da impedância interna, aliada com as inversões matriciais de números complexos, podem representar fatores que diminuem a precisão dos dados obtidos pela rotina MATLAB® frente aos dados base.

Com os resultados apresentados, verifica-se dois pontos importantes sobre a influência da resistividade elétrica do solo: a não inclusão do efeito do solo real, realizada neste estudo pelo método das imagens complexas, ocasiona elevado erro na impedância de sequência zero, no entanto sem efeito na impedância de sequência positiva e a variação da resistividade dentro da faixa de 0 a 10.000 Ohm.m, produz variação considerável apenas na impedância de sequência zero.

Na impedância de sequência zero, a sensibilidade tanto da resistência quanto da indutância tem características parecidas, contando com aumento acentuado no

início e uma estabilização na variação, sendo mais sutil que a inicial. Com isso, o menor erro relativo da consideração do solo real frente ao solo ideal é igual a 53,95%, apresentado na indutância, que chega a ser uma diferença de 90,77% na resistência, que evidencia a importância da inclusão da modelagem do solo como um condutor real, para que a resistividade elétrica do solo seja incluída no cálculo.

Dentro da faixa de resistividade finita, tanto a resistência quanto a indutância sofrem variações consideráveis, sendo de 28,05% e 24,91% respectivamente e, mesmo quando a metodologia de cálculo aplicada leva em consideração a modelagem do solo real, a resistividade do solo é fixada no enunciado dos cálculo, portanto a escolha da resistividade incorreta ou a passagem da linha de transmissão por áreas geográficas com diferentes perfis de resistividade, pode ocasionar amplificação de erros no estudo que utilizam esses parâmetros de sequência zero.

A formulação utilizada para obter a impedância de sequência zero  $Z_0$ , a partir de uma LT idealmente transposta, que é a soma da impedância própria  $Z_p$  com o dobro da impedância mútua  $Z_m$ , amplifica a influência do solo, já que a impedância de solo é somada na reatância externa tanto da impedância própria quanto da impedância mútua. Já na impedância de sequência positiva  $Z_1$ , existe a predominância dos efeitos internos do condutor e têm as interações externas minimizadas, pois seu cálculo é realizado pela subtração da impedância própria da mútua.

Isso pode ser observado pela baixa sensibilidade da impedância de sequência positiva frente à resistividade do solo, seja analisando a desconsideração do solo real, seja na variação da resistividade dentro do proposto. O cálculo realizado pelo método simplificado RMG/DMG obteve bom desempenho para representar a impedância de sequência positiva.

A admitância transversal não sofreu variação com a resistividade do solo, como já comentado anteriormente, sendo seu cálculo função da posição dos condutores na torre e podendo ser calculado sem prejuízos com o método das imagens ideal. A apresentação da sensibilidade das impedâncias de sequência em função da frequência do sinal serve para evidenciar outra característica da impedância longitudinal, influenciando tanto no cálculo da impedância interna quanto na parcela externa calculado pelo método das imagens complexas, com boa aproximação até 1 MHz, que ilustra a sensibilidade de cada componente com a variação da frequência.

O aumento significativo da resistência e a diminuição da indutância de sequência zero são as componentes mais afetadas pela, a resistência de sequência



positiva também cresce com a frequência e a indutância de sequência positiva se mantém inalterada, mostrando que os parâmetros da linha de transmissão não são únicos, possuem comportamentos diferentes frente aos diversos fenômenos que acontecem no SEP, desde o fluxo de potência que acontece a frequência fundamental até os eventos transitórios, como chaveamentos de componentes ou surtos atmosféricos, que acontecem em frequências elevadas.

Para trabalhos futuros que possam seguir a linha de raciocínio desenvolvido neste trabalho, ficam as sugestões: Descrever a impedância interna pelas formulações de Bessel; Analisar outras geometrias de torre, com diferentes simetrias e distâncias envolvidas; Avaliar as duas dimensões possíveis de variação com o método das imagens complexas: a variação da resistividade concatenada com a variação da frequência do sinal; Criação de um código livre que seja capaz de entregar os parâmetros elétricos de uma linha de transmissão de maneira democrática, tanto de circuito simples quanto de circuito duplo, incluindo os efeitos do solo, dos cabos para-raios, efeito pelicular e outros.

## REFERÊNCIAS

- ARISMUNANDAR, A. *Capacitive Correction Factors for Transmission Lines to Include Finite Conductivity and Dielectric of the Earth. Proceedings of the AIEE Summer General Meeting and Nuclear Radiation Effects Conference.* jun. 16-21, 1963, Toronto, Ont., Canadá. p. 436-455.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- CARSON, J. R. *Wave Propagation in overhead wires. Bell System Technical Journal,* New York, vol. 5, p. 539-554, 1926.
- CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Os solos. **Canal Escola.** 18 ago. 2018. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Os-Solos-2620.html>. Acesso em: 12 mar 2021
- DERI, A.; TEVAN, G.; SEMLYEN, A.; CASTANNHEIRA, A. *The Complex Ground Return Plane – A Simplified Model for Homogeneous and Multi-layer Earth Return. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* vol. PAS-100, no. 8, p. 3686-3693, ago. 1981.
- FLORES, A. V. E. **Análise da correta modelagem da transposição em linhas de transmissão no domínio da frequência.** 2006. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, 2006.
- FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas.** 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1977.
- GERTRUDES, J. B.; PORTELA, C.; TAVARES, M. C. Influência da dependência de parâmetros do solo com a frequência na modelagem de linhas aéreas de transmissão: caso de condutor único. **Revista Controle & Automação,** Campinas, v. 22, n. 05, p. 506-522, set. 2011.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. S. **Power System Analysis and Design.** 5. ed. *Stanford: Cengage Learning,* 2012.
- GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power System Analysis.** 1. ed. *New York: McGraw-Hill Education,* 1994.
- HEDMAN, D. E. **Teoria das Linhas de Transmissão - I.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1979.
- KUROKAWA, S. **Parâmetros Longitudinais e Transversais de Linhas de Transmissão Calculados a partir das Correntes e Tensões de Fase.** 2003. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, 2003.
- MOLINA, F.; COELHO, H. V. C.; RAIZER, A.; DE LIMA, M. R. Mapa de Resistividades CELESC. **XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica,** out. 06-10, Olinda, 2008.

MOURA, A. P.: MOURA, A. A. F.: ROCHA, E. P. **Engenharia de Sistemas de Potência: transmissão de energia elétrica em corrente alternada**. Fortaleza: Edições UFC, 2019.

TAVARES, M. C. **Cálculo de Parâmetros Longitudinais e Transversais em componentes de fase e de seqüência**. Apostila do curso Tópicos em Sistemas de Energia Elétrica, DSCE, Campinas: UNICAMP, 2003.

WEDEPOHL, L. M. *Application of matrix methods to the solution of traveling-wave phenomena in polyphase systems*. **Proceedings IEE**, Vol. 110, No. 12, p. 2200-2212, dec. 1963.

WISE, H. W. *Effect of Ground Permeability on Ground Return Circuits*. **Bell System Technical Journal**, New York, vol. 10, p. 472-484, 1931.

ZANETTA, L. C. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência**. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.