



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

OBED LEITE VIEIRA

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA SÉRIE E
CAPACITÂNCIA DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO**

FORTALEZA

2014

OBED LEITE VIEIRA

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA SÉRIE E
CAPACITÂNCIA DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. MSc. Tomaz Nunes Cavalcante Neto.

FOTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- V716f Vieira, Obed Leite.
Ferramenta computacional para cálculo da impedância série e capacitância de linhas aéreas de transmissão / Obed Leite Vieira. – 2014.
155 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2014.
Orientação: Prof. Dr. Tomaz Nunes Cavalcante Neto.
1. Linha de transmissão. 2. Line Constant. 3. ATP. 4. Cabos para-raios. 5. Circuito duplo. I. Título.
CDD 621.3
-

OBED LEITE VIEIRA

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA SÉRIE E
CAPACITÂNCIA DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção de Graduação em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 07/11/2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Tomaz Nunes Cavalcante Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. MSc. Carlos Gustavo Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Marcus Superbus de Medeiros
Companhia Energética do Ceará (Coelce)

A Deus.

Aos meus pais, Pedro e Raimunda,

Aos meus irmãos Romana e Renan.

AGRADECIMENTO

À Deus.

À minha família pela força que recebi durante minha formação, que, sem eles, não teria conseguido realizar mais esse projeto de vida.

Aos amigos que fiz na universidade que compartilharam das mesmas dificuldades e superação ao longo desses anos.

Aos meus orientadores Prof. Tomaz Nunes Cavalcante Neto, Prof. Carlos Gustavo Castelo Branco e Eng. Marcus Superbus de Medeiros por expandir meu conhecimento e compreensão da profissão a qual decidi seguir.

À todos os professores do curso por proporcionar o rico ensino da engenharia elétrica.

À todas as pessoas que de uma forma ou de outra me ajudaram nesse caminho.

Obrigado!

“Por vezes é penoso cumprir o dever, mas nunca é tão penoso como não cumpri-lo.”
(Alexandre Dumas)

RESUMO

O cálculo dos parâmetros de linhas aéreas de transmissão utilizado em estudos de curto-circuito é de difícil desenvolvimento, necessitando do auxílio de programas computacionais. Os softwares disponíveis no mercado são caros e não intuitivos em sua utilização. Dessa forma este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma aplicação em JAVA SE denominada LTCalc para o cálculo da impedância série e da capacitância para linhas de transmissão aéreas. De início, são apresentados os dados necessários para realizar o estudo, bem como o seu correto tratamento. É demonstrado o processo de cálculo das impedâncias próprias e mútuas que compõe a matriz de impedância total, levando em consideração o método de Carson para a correção do efeito do solo. Também será exposta a metodologia de formação da matriz de potencial de Maxwell, sendo a sua inversa a matriz de capacitância da linha. São propostos métodos de redução da matriz para o efeito de cabos para-raios, presença de subcondutores por fase e circuito duplo, além de aplicar transformação da matriz em componentes simétricas. A sequência operacional do *software* para a realização de um estudo é explanada, assim como seu correspondente *Line Constant* do ATP. Foi realizado um estudo de caso para uma linha de 500 kV detalhando cada parte do processo de cálculo e a execução do mesmo tanto no LTCalc quanto na sub-rotina *Line Constant* validando a ferramenta computacional desenvolvida.

Palavras-chave: Linha de Transmissão. *Line Constant*. ATP. Cabos Para-Raios. Circuito Duplo. Java. LTCalc. Método de Carson.

ABSTRACT

The calculation of the parameters of overhead transmission lines used in studies of short-circuit is difficult to develop, requiring the assistance of computer programs. The software available in the market are expensive and not intuitive in its use. Thus, this work presents the development of a JAVA SE application denominated LTCalc for calculating the series impedance and capacitance for overhead transmission lines. At first, the required data for the study is presented, as well as its appropriate treatment. The process for calculating the self and mutual impedances that compose the impedance matrix is demonstrated, taking into account Carson's method for correcting the effect of soil. It will also be exposed the methodology of constructing Maxwell's potential matrix, and its inverse matrix, which is the line capacitance matrix. Methods are proposed to reduce the matrix considering the effect of grounded wires, bundled conductors and double circuit lines, and also applying the symmetrical components transformation to the matrix. The software operation sequence for performing an analysis is explained, as well as its corresponding ATP's Line Constant parameter. A case study of a 500 kV line was done, detailing its calculation process and execution in LTCalc, and ATP's Line Constant sub-routine was used to validate LTCalc's results.

Keywords: Transmission Line. Line Constant.. ATP. Grounded Wires. Double Circuit. Java. LTCalc.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação da resistência elétrica CC pela temperatura.	17
Figura 2 - Vários tipos de encordoamentos encontrados de cabos no mercado. Os filamentos mais claros são de material condutor, alumínio, e os de coloração mais escura são de material não condutor, aço.....	19
Figura 3 - Exemplo de uma estrutura de transmissão representada em um plano cartesiano. .	20
Figura 4 - Exemplo de uma estrutura de transmissão representada em um plano cartesiano com ênfase nos condutores imagens em relação ao solo.....	21
Figura 5 - Formação de uma catenária no vão entre duas estruturas de transmissão.....	22
Figura 6 - Disposição de um sistema de dois cabos aéreos.....	27
Figura 7 - Detalhamento da matriz de impedância total.....	36
Figura 8 - Exemplo de decomposição de um sistema trifásico equilibrado em componentes simétricas de sequência zero, positiva e negativa.	37
Figura 9 - Exemplo de linha de transmissão com dois cabos para-raios.....	42
Figura 10 - Exemplo de disposição de subcondutores em uma fase (de um a quatro subcondutores).....	45
Figura 11 - Disposição de "n" subcondutores por fase.....	46
Figura 12 - Partição da matriz de impedância Z em n^2 submatrizes para a eliminação dos subcondutores por fase.	47
Figura 13 - Exemplo de estrutura com circuito duplo.....	49
Figura 14 - Procedimento de cálculo para obter os parâmetros de uma linha de transmissão aérea.....	52
Figura 15 - Tela de abertura do software LTCalc.	53
Figura 16 - Fluxograma operacional do LTCalc.....	54
Figura 17 - Fluxograma operacional de telas a serem exibidas ao usuário.	55
Figura 18 - Descrição da Tela Principal do LTCalc.....	56
Figura 19 - Detalhe da tela de resultados do LTCalc.	57
Figura 20 - Modo de acesso da tela para cadastro de cabo.....	58
Figura 21 - Acesso a tela de cadastro de linhas de transmissão do LTCalc.....	59
Figura 22 - Detalhe da tela de cadastro de linhas de transmissão do LTCalc.	60
Figura 23 - Tela de trabalho do ATPDraw.....	62
Figura 24 - Bloco LCC a ser inserido no ATPDraw para o estudo dos parâmetros de linha de transmissão.	63

Figura 25 - Aba Model na tela de elaboração do estudo dos parâmetros de linha do bloco LCC.	63
Figura 26 - Aba Data na tela de elaboração do estudo dos parâmetros de linha do bloco LCC	64
Figura 27 - Estrutura de 500 kV base para o caso estudo a ser desenvolvido.....	67
Figura 28 - Arranjo dos subcondutores em uma fase.	75
Figura 29 - Matriz equivalente de fases após a redução do efeito dos cabos guarda e do subcondutores por fase.	79
Figura 30 - Matriz de impedância em componente simétrica.	80
Figura 31 - Matriz de capacitância em componentes simétricas.	82
Figura 32 - Tela de cadastro de cabos com os dados do cabo T-Eagle.	84
Figura 33 - Tela de cadastro de cabos com os dados do cabo OPGW 12SM 11.2TC.	84
Figura 34 - Tela de cadastro da estrutura em estudo.	85
Figura 35 - Tela de escolha dos cabos condutor e para-raio, bem como da estrutura de transmissão para efetuar o estudo.	85
Figura 36 - Tela de resultados do estudo de caso para a linha de 500 kV.....	86
Figura 37 - Aba "Model" do Line Constant para a entrada do tipo de estudo e condições de operação da linha.	87
Figura 38 - Aba "Cable Data" para a entrada de dados referentes ao cabos utilizados.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperaturas cujo valor de resistência é desprezível para diferentes materiais.....	18
Tabela 2 - Resistividade típica para diferentes tipos de solos.	24
Tabela 3 - Dados necessários ao estudo do cálculo da impedância série e da capacitância de linha de transmissão aérea (continua).....	25
Tabela 4 - Dados necessários ao estudo do cálculo da impedância série e da capacitância de linha de transmissão aérea (conclusão).	26
Tabela 5 - Dados do cabo T-Eagle.	68
Tabela 6 - Dados do cabo OPGW 12SM 11.2TC.	68
Tabela 7 - Dados referentes a estrutura de transmissão (continua).	68
Tabela 8 - Dados referentes a estrutura de transmissão (conclusão).....	69
Tabela 9 - Condições de operação da linha.	70
Tabela 10 - Correspondência dos índices da matriz aos cabos.....	71
Tabela 11 - Altura efetiva de cada subcondutor.	75
Tabela 12 - Componentes simétricas obtidas do estudo de caso.....	80
Tabela 13 - Capacitância da linha em componentes simétricas para o estudo de caso realizado.	82
Tabela 14 - Resultado do estudo de caso executado pelo LTCalc.	86
Tabela 15 - Resultado do estudo de caso executado pelo ATP.....	89
Tabela 16 - Comparativo dos resultados obtidos pelo LTCalc e pelo Line Constant	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidade
a	Operador rotacional complexo	-
a_c	Variável parcial do método de Carson	-
b_i	Variável parcial do método de Carson	-
c_i	Variável parcial do método de Carson	-
c₀₀	Capacitância de sequência zero	F
c₁₁	Capacitância de sequência positiva	F
c₂₂	Capacitância de sequência negativa	F
C	Matriz de capacitância da linha de transmissão	F
d_i	Variável parcial do método de Carson	-
d₁₂	Distância entre os cabos 1 e 2	m
d_{ij}	Distância entre o condutor “i” e o condutor “j”	m
D_{ij}	Distância entre o condutor “i” e a imagem do condutor “j”	m
f	Frequência da rede	Hz
H_{efetiva}	Altura efetiva do cabo em relação ao solo	m
h_i	Altura do condutor genérico i no meio do vão	m
H_i	Altura do condutor genérico i na estrutura	m
I	Corrente elétrica em um cabo	A
I_{abc}	Vetor das correntes elétricas nas fases a,b e c	A
I_{condutor}	Vetor de corrente elétrica nos cabos condutores	A
I_{para-raio}	Vetor de corrente elétrica nos cabos para-raios	A
L_{ii}	Indutância própria do cabo genérico i	H
L_{ij}	Indutância mútua entre os cabos genéricos i e j	H
p	Raio externo do cabo	cm
P	Matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell	F ⁻¹
P_{equivalente}	Matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell após a redução do efeito dos cabos para-raios e dos subcondutores	F ⁻¹
p_{ii}	Coefficiente de Potencial próprio de Maxwell	F ⁻¹
p_{ij}	Coefficiente de Potencial mútuo de Maxwell	F ⁻¹
q	Raio interno do cabo	cm
r_{cc}	Resistência CC do cabo	ohm/km

R	Resistência série da linha de transmissão aérea	ohm/km
R₁	Resistência CC a uma temperatura t_1	ohm/km
R₂	Resistência CC a uma temperatura t_2	ohm/km
R_{ii}	Resistência própria do condutor genérico i	ohm/km
R_{int}	Resistência interna do condutor	ohm/km
ΔR_c	Parcela resistiva do método de correção do retorno pelo solo	ohm/km
T	Matriz de transformação em componentes simétricas	-
T/D	Relação de ocupação da parte condutora com a seção total do cabo	-
t₁	Temperatura cuja a resistência é conhecida	°C
T₂	Temperatura cuja a resistência é desejável conhecer	°C
x₁	Distância do cabo 1 ao centro da estrutura	m
x₂	Distância do cabo 2 ao centro da estrutura	m
X_{int}	Reatância interna do condutor	ohm/km
ΔX_c	Parcela da reativa do método de correção do retorno pelo solo	ohm/km
X	Reatância série da linha de transmissão aérea	ohm/km
X_{ii}	Reatância própria do condutor genérico i	ohm/km
X_{ij}	Reatância mútua entre os condutores genéricos i e j	ohm/km
y₁	Altura do cabo 1 ao centro da estrutura	m
y₂	Altura do cabo 2 ao centro da estrutura	m
Z	Matriz de Impedância série da linha de transmissão aérea	ohm/km
Z₀₁₂	Matriz da impedância série da linha de transmissão em componentes simétricas	ohm/km
z₀₀	Impedância série de sequência zero	ohm/km
z₁₁	Impedância série de sequência positiva	ohm/km
z₂₂	Impedância série de sequência negativa	ohm/km
z₁₀₀	Impedância série de sequência zero do circuito 1	ohm/km
z₁₁₁	Impedância série de sequência positiva do circuito 1	ohm/km
z₁₂₂	Impedância série de sequência negativa do circuito 1	ohm/km
z₂₀₀	Impedância série de sequência zero do circuito 2	ohm/km
z₂₁₁	Impedância série de sequência positiva do circuito 2	ohm/km
z₂₂₂	Impedância série de sequência negativa do circuito 2	ohm/km
z₂₁₂₂	Impedância série mútua de sequência zero do arranjo em	ohm/km

	circuito duplo dos circuitos 1 e 2	
z_{1222}	Impedância série mútua de sequência zero do arranjo em circuito duplo dos circuitos 1 e 2	ohm/km
Z_{abc}	Matriz de impedância referente ao circuito abc	ohm/km
Z_{def}	Matriz de impedância referente ao circuito def	ohm/km
Z_{abcdef}	Matriz de impedância mutua entre os circuitos abc e def	ohm/km
Z_{defabc}	Matriz de impedância mutua entre os circuitos def e abc	ohm/km
Z_A	Matriz de impedância parcial para a eliminação dos cabos subcondutores	ohm/km
Z_B	Matriz de impedância parcial para a eliminação dos cabos subcondutores	ohm/km
Z_C	Matriz de impedância parcial para a eliminação dos cabos subcondutores	ohm/km
Z_D	Matriz de impedância parcial para a eliminação dos cabos subcondutores	ohm/km
$Z_{condutor}$	Matriz de impedâncias entre condutores fase	ohm/km
$Z_{equivalente}$	Matriz de impedância após a redução dos cabos para-rarios	ohm/km
$Z_{para-raio}$	Matriz de impedâncias entre os cabos para-rarios	ohm/km
Z_{c_pr}	Matriz de impedância mútua entre os cabos fase e para-rarios	ohm/km
Z_{pr_c}	Matriz de impedância mútua entre os cabos para-rarios e as fases	ohm/km
Z_{ii}	Impedância própria do cabo genérico i	ohm/km
Z_{ij}	Impedância mútua entre os cabos genéricos i e j	ohm/km
V_0	Tensão de sequência zero	V
V_1	Tensão de sequência positiva	V
V_2	Tensão de sequência negativa	V
V_A	Tensão na fase A	V
V_B	Tensão na fase B	V
V_C	Tensão na fase C	V
ΔV_i	Queda de tensão ao longo do cabo genérico i	V
ΔV_{abc}	Vetor de queda de tensão nas fases a,b e c	V
$\Delta V_{condutor}$	Vetor de queda de tensão nos condutores	V
$\Delta V_{para-raio}$	Vetor de queda de tensão nos cabos para-rarios	V

ϵ	Permissividade elétrica do meio	Farad/m
ρ	Resistividade do solo	ohm.m
μ_{meio}	Permeabilidade magnética do meio	H/m
μ_{vacuo}	Permeabilidade magnética do vácuo	H/m
μ_{relativo}	Permeabilidade magnética relativa entre o meio e o vácuo	-
ω	Frequência angular da rede	rad/s
ϕ	Ângulo que o condutor genérico i faz com sua imagem e com a imagem do condutor genérico j	rad

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	13
1.2	MOTIVAÇÃO	13
1.3	METODOLOGIA	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA SÉRIE E DA CAPACITÂNCIA DE LINHA DE TRANSMISSÃO AÉREA	16
2.1	INTRODUÇÃO.....	16
2.2	DADOS DE ENTRADA	16
2.2.1	<i>Cabo</i>	<i>16</i>
2.2.1.1	<i>Resistência Elétrica.....</i>	<i>17</i>
2.2.1.2	<i>Raio externo e interno</i>	<i>18</i>
2.2.2	<i>Estrutura da Linha de Transmissão</i>	<i>19</i>
2.2.2.1	<i>Distância entre fases e distância entre as fases e suas imagens.....</i>	<i>20</i>
2.2.2.2	<i>Altura Efetiva</i>	<i>22</i>
2.2.3	<i>Frequência, permeabilidade magnética do meio e resistividade do solo</i>	<i>23</i>
2.2.3.1	<i>Frequência.....</i>	<i>23</i>
2.2.3.2	<i>Permeabilidade Magnética</i>	<i>23</i>
2.2.3.3	<i>Resistividade do Solo.....</i>	<i>23</i>
2.2.4	<i>Resumo dos Dados Necessários</i>	<i>24</i>
2.3	CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE LINHAS AÉREAS	26
2.3.1	<i>Formação da Matriz de Impedância pelo Método das Imagens</i>	<i>27</i>
2.3.2	<i>Impedância Série da Linha de Transmissão Aérea</i>	<i>30</i>
2.3.2.1	<i>Impedância Interna do Condutor ($Z_{interna}$)</i>	<i>31</i>
2.3.2.2	<i>Reatância própria do condutor</i>	<i>32</i>
2.3.2.3	<i>Reatância mútua do condutor</i>	<i>33</i>
2.3.2.4	<i>Impedância devido ao retorno pelo solo.....</i>	<i>33</i>
2.3.3	<i>Matriz de Impedância Série Primitiva.....</i>	<i>36</i>
2.3.4	<i>Matriz de Impedância de Componente Simétrica</i>	<i>36</i>
2.3.5	<i>Matriz de Capacitâncias de sequência e componentes simétricas.....</i>	<i>40</i>
2.4	CONCLUSÃO	41

3	CABOS PARA-RAIOS, SUBCONDUTORES POR FASE E CIRCUITO DUPLO42	
3.1	INTRODUÇÃO.....	42
3.2	CABOS PARA-RAIOS	43
3.3	SUBCONDUTORES POR FASE	45
3.4	CIRCUITO DUPLO.....	48
3.5	RESUMO DO PROCEDIMENTO PARA OBTER A MATRIZ DE IMPEDÂNCIA E CAPACITÂNCIA DE COMPONENTES SIMÉTRICAS	51
4	PROGRAMA LTCALC E SUBROTINA <i>LINE CONSTANT</i>	53
4.1	INTRODUÇÃO.....	53
4.2	LTCALC	54
4.2.1	<i>Processo Operacional</i>	54
4.2.2	<i>Cadastro de cabos</i>	57
4.2.3	<i>Cadastro de Linhas</i>	59
4.3	<i>LINE CONSTANT</i>	61
4.4	CONCLUSÃO	65
5	ESTUDO DE CASO.....	66
5.1	INTRODUÇÃO.....	66
5.2	DESCRIÇÃO DO ESTUDO	66
5.3	DADOS DE ENTRADA	67
5.4	CÁLCULO DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA	70
5.4.1	<i>Correção da resistência CC dos cabos para a temperatura de operação</i>	72
5.4.2	<i>Cálculo das impedâncias internas do cabo</i>	72
5.4.3	<i>Cálculo da reatância própria do cabo</i>	74
5.4.4	<i>Cálculo da reatância mútua do cabo</i>	75
5.4.5	<i>Cálculo da correção da impedância série devido ao efeito do solo</i>	76
5.4.6	<i>Formação da matriz de impedância total</i>	76
5.4.7	<i>Eliminação do efeito dos cabos para-raios</i>	77
5.4.8	<i>Redução dos subcondutores</i>	78
5.4.9	<i>Transformação em componentes simétricas.</i>	79
5.5	CÁLCULO DA MATRIZ DE CAPACITÂNCIA DE SEQUÊNCIA	80
5.5.1	<i>Construção da matriz de potencial de Maxwell</i>	81

5.5.2	<i>Eliminação do efeito dos cabos para-raios e dos subcondutores</i>	81
5.5.3	<i>Matriz de capacitância total</i>	81
5.5.4	<i>Matriz de capacitância de sequência</i>	82
5.6	ESTUDO DE CASO COM O SOFTWARE LT _{CALC}	83
5.7	ESTUDO DE CASO COM O ATP – <i>LINE CONSTANT</i>	86
5.8	CONCLUSÃO	90
6	CONCLUSÃO	92
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICE A – FUNÇÕES DE BESSEL NA SUA FORMA POLINOMIAL	95
	APÊNDICE B – IMPEDÂNCIAS INTERNAS, PRÓPRIAS, MÚTUAS E DE CARSON PARA O ESTUDO DE CASO	96
	APÊNDICE C – MATRIZES DE IMPEDÂNCIAS.....	102
	APÊNDICE D – MATRIZES DO CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA DA LINHA	124
	APÊNDICE E – RELATÓRIO TÉCNICO ELABORADO PELO LT _{CALC} PARA O ESTUDO DE CASO	146
	ANEXO A – CARTÃO DE ENTRADA CONSTRUÍDO PELO <i>LINE CONSTANT</i> ...	148
	ANEXO B – RESUMO DO CARTÃO DE SAÍDA DO <i>LINE CONSTANT</i> PARA O ESTUDO DE CASO	149

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar o software LTCalc desenvolvido para calcular a impedância série e da capacitância de linhas de transmissão aérea, validando-o com a sub-rotina *Line Constant* do ATP.

1.2 Motivação

De acordo com Cavalcante Neto (2013), as linhas de transmissão são partes fundamentais no SEP (Sistema Elétrico de Potência), pois transportam a energia elétrica da geração ao consumidor. No Brasil, devido a longas distâncias entre os centros de geração, em sua maioria de centrais hidrelétricas localizadas no interior do país, e as unidades consumidoras, localizadas de forma expressiva na região litorânea, as linhas de transmissão são predominantemente aéreas, extensas e possuem estruturas de grande porte devido ao nível de tensão que deve ser elevado para o transporte de grandes blocos de carga.

Sendo elementos tão expressivos para o bom funcionamento do sistema elétrico, devem ser conhecidas todas as informações a respeito das linhas de transição aérea, dentre elas seus parâmetros: resistência, indutância e capacitância.

Com o valor da resistência e da indutância, representados pela impedância, e o da capacitância é possível calcular vários problemas do SEP de acordo com Stevenson (1986, p. 93), como a conservação da tensão dentro dos limites especificados ao longo do sistema, estudo de fluxo de potência entre geração e carga, níveis de curto-circuito em cada ponto do sistema, dentre outros.

Os softwares disponíveis no mercado como ATP e Cymdist realizam o procedimento de cálculo para obter os parâmetros de linha através de subrotinas, porém são programas que necessitam de licenças para seu funcionamento que, por muitas vezes, são dispendiosas e, somando ao fato da política de licenciamento, são rejeitadas por empresas.

O ATP, por exemplo, apesar de ser mundialmente aceito para estudos de transitórios com recurso para estudo de linhas de transmissão, necessita de um embasamento teórico para sua utilização, uma vez que a inclusão de um dado de forma equívoca gera

resultados errôneos. O Cymdist possui pouco material disponível para sua correta utilização, sendo ofertados cursos pela própria empresa detentora da licença, por vezes onerosos para o cliente.

Devido a essa importância e servindo de alternativa para os programas existentes no mercado, será apresentada uma ferramenta computacional em Java SE desenvolvida para calcular a impedância série e a capacitância de linhas aéreas de transmissão, com um ambiente mais agradável de utilização e voltado para usuários pouco experientes na área colocarem os dados de projeto de forma clara e limitando as possíveis brechas para a inclusão de dados errados.

1.3 Metodologia

A metodologia consiste em apresentar todos os cálculos referentes a formação das matrizes de impedância e capacitância da linha de transmissão levando em consideração o efeito do solo, para em seguida apresentar o *software* desenvolvido. Um estudo de caso será abordado para exemplificar o processo de equacionamento, bem como validar a ferramenta desenvolvida pela sub-rotina *Line Constant*.

1.4 Estrutura do trabalho

No capítulo 1 são apresentados os objetivos do trabalho, bem como sua metodologia e motivação para desenvolver o *software*.

No capítulo 2 são detalhados os dados necessários para realizar o estudo, o procedimento de equacionamento para obter as matrizes de impedância e capacitância da linha de transmissão.

No capítulo 3 são apresentadas as formas de redução de matriz com relação ao efeito dos cabos para-raios, a presença de subcondutores por fase e a inclusão em circuito duplo.

No capítulo 4 é detalhado o *software* desenvolvido, apresentando seus diagramas de operação e suas várias funcionalidades. Também é feita uma apresentação sobre a sub-rotina *Line Constant* do programa ATP.

No capítulo 5 é apresentado um estudo de caso para uma linha aérea de transmissão de 500 kV, detalhando cada parte do processo de formação das matrizes e, ao fim, a apresentação do mesmo caso no LTCalc e na sub-rotina *Line Constant*.

Ao final, serão realizadas a conclusão deste trabalho e as considerações para trabalhos futuros.

2 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA SÉRIE E DA CAPACITÂNCIA DE LINHA DE TRANSMISSÃO AÉREA

2.1 Introdução

Neste capítulo serão abordados os dados necessários para um completo estudo de cálculo dos parâmetros de linha de transmissão, a metodologia do equacionamento, em matrizes de impedâncias e dos coeficientes de potencial de Maxwell, e apresentação da matriz de sequência tanto para a impedância série da linha como para a capacitância.

2.2 Dados de Entrada

Antes de iniciar o cálculo dos parâmetros, é necessário ter certas informações sobre o projeto da linha: o tipo de cabo e estrutura utilizados, a frequência de operação da rede, a permeabilidade magnética do meio e a resistividade do solo. No decorrer do tópico, esses dados serão detalhados a fim de se obter um estudo mais amplo do tema.

2.2.1 Cabo

Os condutores elétricos constituem uma parte de fundamental importância na transmissão de energia elétrica, pois é através deles que ela é transportada da fonte aos consumidores. Sua escolha deve ser levada com bastante cuidado, uma vez que tanto o desempenho físico e o econômico são determinantes em projetos.

As características ideais a serem atingidas por um condutor de acordo com Fuchs (1977) são:

- a) alta condutibilidade elétrica;
- b) baixo custo;
- c) boa resistência mecânica;
- d) baixo custo específico;
- e) alta resistência à oxidação e à corrosão por agentes químicos.

Dentre os materiais candidatos, se destacam o cobre e o alumínio. No início da transmissão de energia elétrica o cobre era o utilizado, mas por seu custo e peso serem

maiores, para uma mesma resistência desejada, ele foi substituído pelo alumínio. Uma outra vantagem adquirida da substituição foi a redução do efeito corona¹, pois o alumínio apresenta um maior diâmetro que um condutor de cobre equivalente, resultando em um menor fluxo elétrico para um mesmo nível de tensão e menor gradiente de potencial na superfície e, conseqüentemente, redução da ionização do ar ao redor de acordo com Stevenson (1986, p. 40).

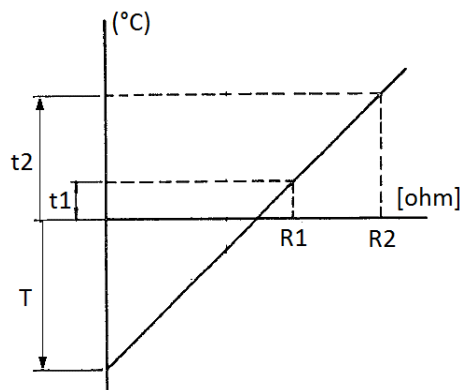
Os dados necessários dos cabos para o cálculo dos parâmetros de linha são a resistência e a temperatura a qual é obtida, e seu raio externo e interno.

2.2.1.1 Resistência Elétrica

O dado de interesse é a resistência CC do cabo na determinada temperatura de operação, dada em ohm/km, e esse valor deve ser fornecido pelos fabricantes. A partir dele e das dimensões do cabo, é possível calcular a impedância interna do condutor. O cálculo desta impedância é mostrado no item 2.3.2.1.

Em alguns casos, o projeto de uma linha estabelece uma temperatura de operação diferente da fornecida pelo fabricante no seu manual. Portanto, deve-se ter uma correção desse valor para a nova temperatura. A Figura 1 mostra a variação da temperatura com a resistência CC de forma linear.

Figura 1 - Variação da resistência elétrica CC pela temperatura.



Fonte: ZANETTA JUNIOR, 2005

¹ O Efeito Corona é um mecanismo de descarga eletrostática que acontece devido a ionização em um material isolante, geralmente um gás, sujeito a um campo elétrico de intensidade acima de um nível crítico (WEDY,2009).

A relação entre a resistência e a temperatura é dada pela simples razão mostrada em (1).

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{|T| + t_2}{|T| + t_1} \quad (1)$$

A temperatura T é a temperatura de referência na qual a resistência do material seria, supostamente, desprezível. Esse valor varia de acordo com o material do cabo. A Tabela 1 exibe os valores para materiais comumente utilizados.

Tabela 1 - Temperaturas cujo valor de resistência é desprezível para diferentes materiais.

MATERIAL	TEMPERATURA T (°C)
COBRE RECOZIDO	-234,5
COBRE À TÊMPERA DURA	-241,0
ALUMÍNIO À TÊMPERA DURA	-228,0

Fonte: ZANETTA JUNIOR, 2006

Tendo em posse um valor de resistência CC R_1 a uma temperatura t_1 , é possível obter a resistência CC R_2 a uma temperatura t_2 de operação da linha, utilizando (1).

2.2.1.2 Raio externo e interno

Os outros dois dados relevantes da parte de cabos são justamente o raio externo e o raio interno do cabo.

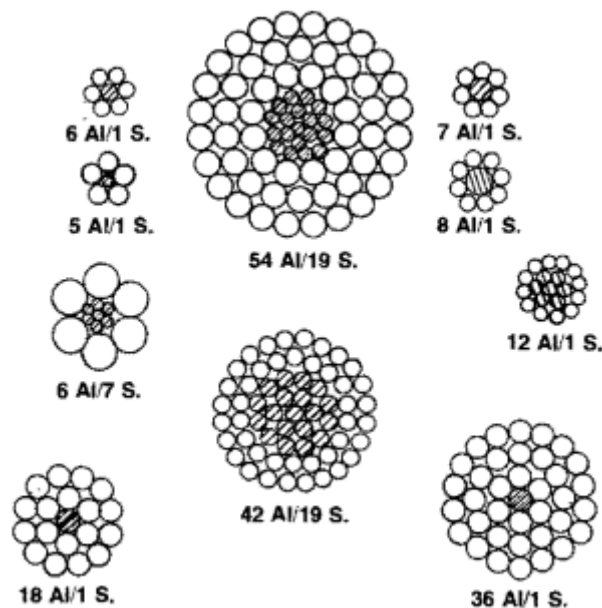
O raio externo delimita toda a área do material condutor e é geralmente expresso em centímetros (cm) ou em polegadas (pol)

O raio interno é o raio do material não condutor (geralmente aço) utilizado para dar reforço mecânico à sustentação do cabo. Esse material não condutor provém de um dos efeitos indesejáveis na condução de energia elétrica: o efeito pelicular². Em razão deste

² Efeito observado na condução por corrente alternada em condutores elétricos. Quando a corrente é alternada, a densidade de corrente tende a ser maior nas periferias do condutor e menor nas regiões centrais. Esse feito tem como consequência a redução da área efetiva de condução.

fenômeno, a parte central do cabo (material condutor), que não está sendo utilizada para o transporte de energia elétrica, é substituída por outro material que proverá maior suporte mecânico ao cabo. A Figura 2 traz exemplos de constituição de cabos com as chamadas alma-de-aço. O raio interno também é dado em ou centímetro ou em polegada.

Figura 2 - Vários tipos de encordoamentos encontrados de cabos no mercado. Os filamentos mais claros são de material condutor, alumínio, e os de coloração mais escura são de material não condutor, aço.



Fonte: THE ALUMINUM ASSOCIATION, 1989.

2.2.2 Estrutura da Linha de Transmissão

A disposição dos condutores na estrutura é de fundamental importância para o cálculo da impedância da linha, principalmente o da reatância indutiva. Este trabalho não se atenta a construção ou o dimensionamento das estruturas, mas sim a localização de cada fase dentro da estrutura de transmissão.

Cada estrutura possui sua peculiaridade, tais como o material empregado na construção, distância entre condutores, número de circuitos, disposição dos cabos, dentre outros. Contudo, de acordo com Fuchs (1977), os fatores determinantes do dimensionamento das estruturas são a tensão nominal de exercício e as sobretensões previstas. Em segundo

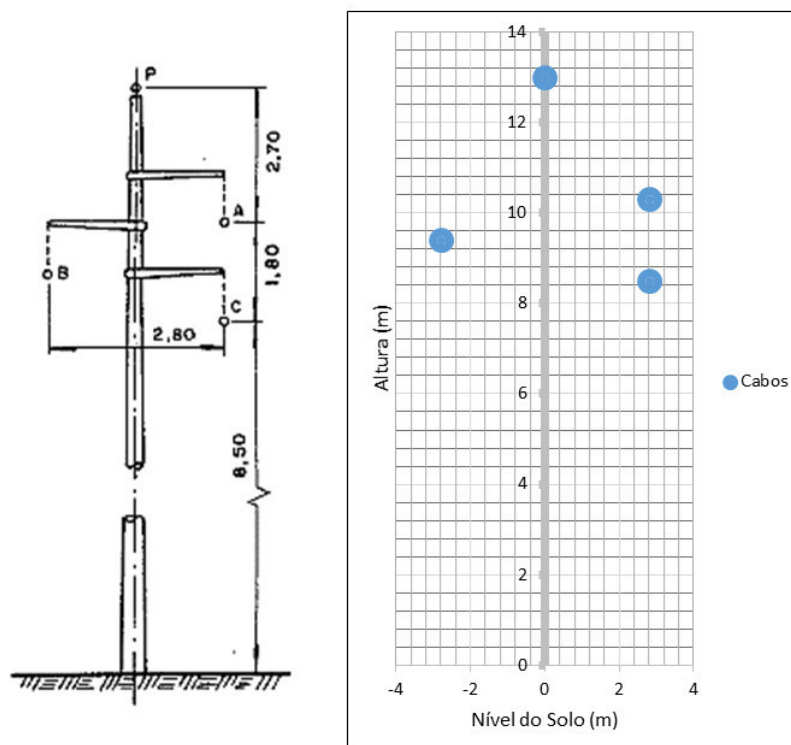
plano ficam fatores como a flecha dos cabos, a forma de sustentação e o diâmetro dos condutores.

Para a metodologia de cálculo de parâmetros de linha, são levadas em consideração, basicamente, as distâncias entre as fases, a distância entre as fases e suas imagens e a altura equivalente de cada fase para o solo. Cada conjunto de dados necessários será descrito nos itens 2.2.2.1 e 2.2.2.2.

2.2.2.1 Distância entre fases e distância entre as fases e suas imagens

A distância entre fases é calculada basicamente pelo teorema de Pitágoras, sendo os condutores pontos em um plano cartesiano, o solo o eixo das abscissas e o eixo vertical da estrutura o eixo das ordenadas. Um exemplo descrevendo essa disposição é mostrada na Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de uma estrutura de transmissão representada em um plano cartesiano.



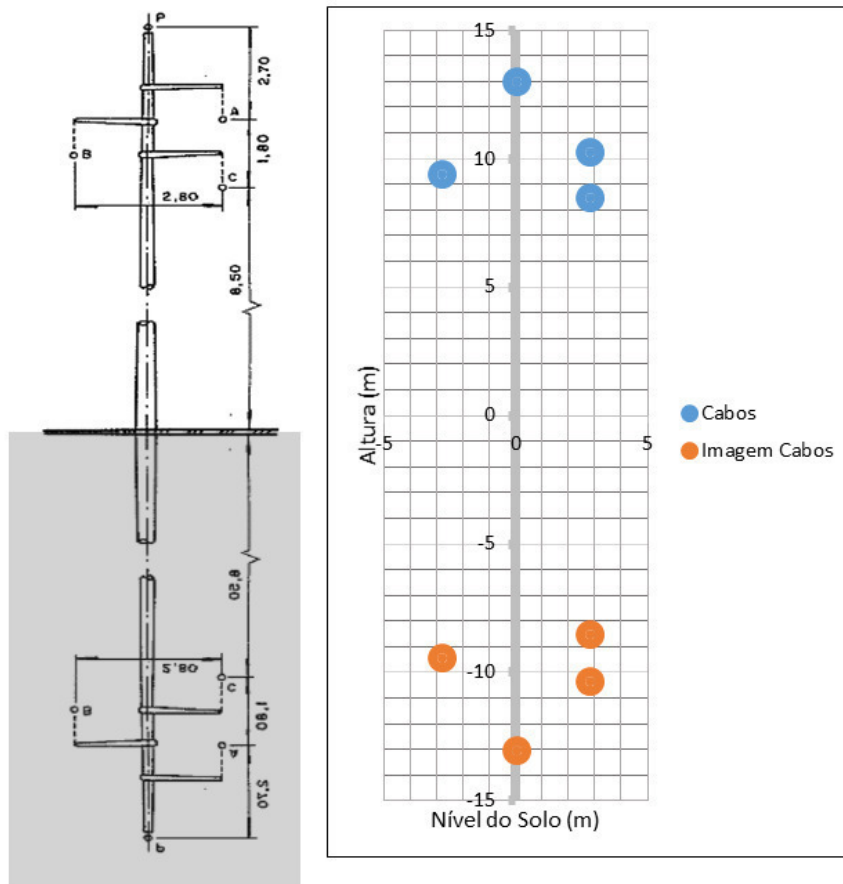
Fonte: Adaptada de (FUCHS, 1977).

Observa-se pela Figura 3 que qualquer linha de transmissão pode ser discriminada para um plano cartesiano, onde cada cabo é um ponto com sua abscissa x e ordenada y . O cálculo da distância de dois cabos, cabo A e cabo B, se dá pela equação (2).

$$d_{AB} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} \quad (2)$$

Outro dado a ser calculado das estruturas é a distância entre a fase e a imagem da outra fase. No decorrer do trabalho, este dado será necessário para determinar a reatância indutiva mútua. A Figura 4 demonstra a disposição dos condutores imagem para cada cabo na estrutura.

Figura 4 - Exemplo de uma estrutura de transmissão representada em um plano cartesiano com ênfase nos condutores imagens em relação ao solo.



Fonte: Adaptada de (FUCHS, 1977).

A distância entre um cabo (cabo A) e a imagem de outro cabo (cabo B) é dado pela equação (3).

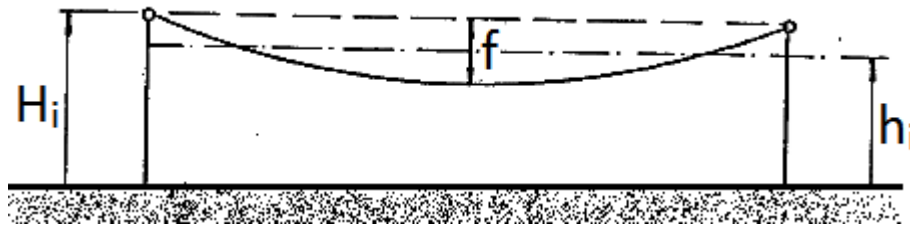
$$d'_{AB} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A + y_B)^2} \quad (3)$$

As distâncias calculadas pelas equações (2) e (3) necessitam basicamente das posições no plano cartesiano para serem calculadas. Portanto, os dados de entrada necessários são as abscissas (distâncias dos cabos até o centro da estrutura) e as ordenadas (altura do cabo ao solo) de cada cabo na estrutura.

2.2.2.2 Altura Efetiva

Os cabos quando inseridos nas linhas tendem a adotar a forma de uma catenária entre duas estruturas consecutivas como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Formação de uma catenária no vão entre duas estruturas de transmissão.



Fonte: Adaptada de (FUCHS, 1977).

Assim, a altura do cabo não é uma constante ao longo da linha. Para efeito de cálculos elétricos, Fuchs (1977) relata que é usual adotar uma correção para esse fato. A correção é considerar o solo como plano e os cabos tendo uma altura constante ao longo da linha, sendo esta altura variável e seu cálculo é mostrado na equação (4).

$$H_{efetiva} = \frac{1}{3} \times H_i + \frac{2}{3} \times h_i \quad (4)$$

Essas alturas são calculadas para um vão médio da linha sob condições de temperatura média, no seu estado final de acordo com Fuchs (1977).

2.2.3 *Frequência, permeabilidade magnética do meio e resistividade do solo*

2.2.3.1 *Frequência*

A frequência adotada neste estudo é a frequência da rede do sistema elétrico brasileiro (60 Hz). Tanto nos cálculos quanto no software LTCalc ela é um dado de entrada para o usuário, pois é possível simular as impedâncias e susceptâncias para uma linha operando a um outro nível de frequência, como em 50 Hz (sistema elétrico europeu, por exemplo).

2.2.3.2 *Permeabilidade Magnética*

De acordo com Cavalcante Neto (2013), a permeabilidade magnética do meio é definida como a facilidade que o meio oferece à livre circulação das linhas de fluxo magnético.

A permeabilidade do meio é referida na equação (5).

$$\mu_{meio} = \mu_{vacuo} \times \mu_{relativo} \quad (5)$$

Linhas áreas de transmissão possuem como meio dielétrico o ar. Para efeitos de cálculo das impedâncias e susceptâncias da linha, o $\mu_{relativo}$ será unitário, com a permeabilidade magnética do ar igual ao do vácuo, ou seja, igual a $4\pi 10^{-7}$ H/m.

2.2.3.3 *Resistividade do Solo*

Para o cálculo da impedância série e da capacitância da linha de transmissão proposto nesse trabalho, a resistividade do solo necessita ser inclusa, uma vez que a corrente de retorno pelo solo, característica de faltas fase-terra correlacionada com a impedância de sequência zero da linha, está estritamente ligada a esse valor.

O seu valor irá variar de acordo com a composição do solo, valor da umidade e da temperatura, podendo concluir que depende de sua localização geográfica. A Tabela 2 apresenta os valores típicos encontrados em medições para diferentes tipos de solo.

Tabela 2 - Resistividade típica para diferentes tipos de solos.

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE (OHM/M³)
ÁGUA DO MAR	0,01 – 1,0
SOLO PANTANOSO	10 – 100
TERRA SECA	1000
PEDREGULHO	10 ⁷
ARENITO	10 ⁹
VALOR MÉDIO DE GRANDE NÚMERO DE MEDIÇÕES	100

Fonte: Adaptada de (FUCHS, 1977).

A importância desse valor será apresentado no item 2.3.2.4 que trata do método de Carson para correção da impedância da linha devido ao efeito do solo.

2.2.4 Resumo dos Dados Necessários

Com todos os parâmetros já apresentados, é interessante resumir os dados necessários ao cálculo dos parâmetros de linha, bem como suas unidades de medida. A Tabela 3 aborda a lista de variáveis a serem preenchidas por aquele que realizará um estudo.

Tabela 3 - Dados necessários ao estudo do cálculo da impedância série e da capacitância de linha de transmissão aérea (continua).

Dado de Entrada	Unidade	Descrição/Observação
<i>Cabo</i>		
Resistência CC	ohm/km	Valor necessário caso necessite de uma correção na temperatura da resistência CA
Temperatura da resistência CC	°C	Temperatura a qual a resistência CC foi obtida.
Temperatura de Operação da Linha	°C	Temperatura prevista em projeto para a operação da linha.
Raio Externo	cm	Raio externo do condutor
Raio Interno	cm	Raio da alma de aço do condutor. Cabos compactos possuem raio interno igual a zero.
Estrutura		
Xa	m	Distância da fase A ao centro da estrutura.
Xb	m	Distância da fase B ao centro da estrutura.
Xc	m	Distância da fase C ao centro da estrutura.
HA	m	Altura na estrutura da fase A ao solo.
HB	m	Altura na estrutura da fase B ao solo.
Hc	m	Altura na estrutura da fase C ao solo.
hA	m	Altura da fase a ao solo no ponto de flecha máxima.
hb	m	Altura da fase b ao solo no ponto de flecha máxima
hc	m	Altura da fase c ao solo no ponto de flecha máxima.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Tabela 4 - Dados necessários ao estudo do cálculo da impedância série e da capacitância de linha de transmissão aérea (conclusão).

Dado de Entrada	Unidade	Descrição/Observação
Outros Parâmetros		
Frequência	Hz	Frequência da rede a qual a linha de transmissão está inserida. No sistema elétrico brasileiro, a frequência é de 60 Hz.
Permeabilidade magnética do meio	H/m	O meio para linhas aéreas é o ar e considera-se que sua permeabilidade magnética é igual à do vácuo ($4\pi 10^{-7}$ H/m).
Resistividade do solo	ohm.m	Ver Tabela 2. Para o nordeste brasileiro considera-se resistividade igual a 100 ohm.m.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

2.3 Cálculo dos Parâmetros de Linhas aéreas

O procedimento de cálculo a ser desenvolvido terá como objetivo o valor das impedâncias de sequências da linha de transmissão aérea (impedância de sequência zero, positiva e negativa), bem como as capacitâncias de sequência (capacitância de sequência zero, positiva e negativa).

Primeiro será abordado a metodologia do cálculo da impedância pelo método das imagens, dando o significado à utilização da aplicação matricial.

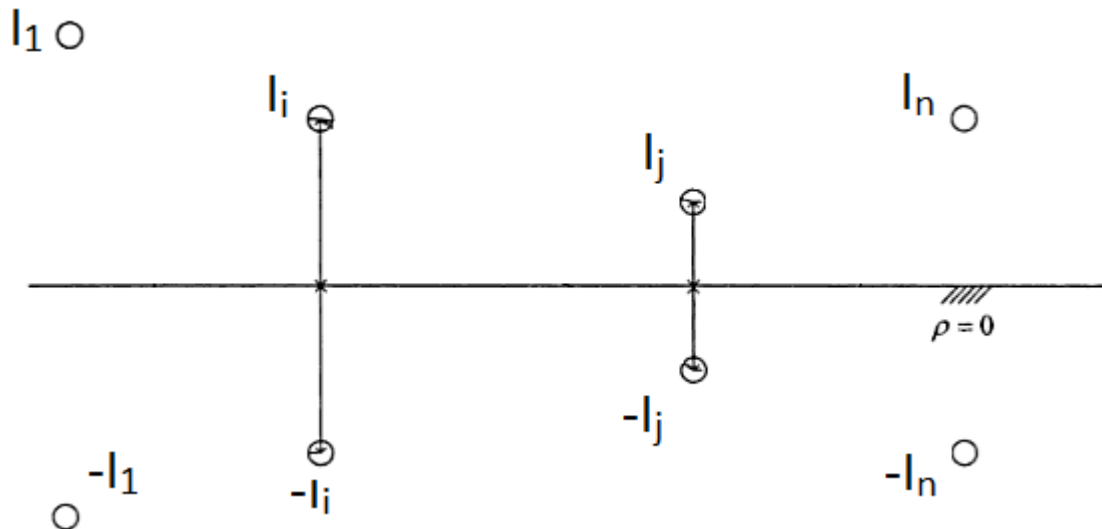
Após o entendimento da formação da matriz, será abordado o cálculo das impedâncias compõe a matriz de impedâncias série da linha de transmissão: impedância interna, própria e mútua, e a impedância de correção de Carson. Após os devidos cálculos, será apresentado a formação da matriz de impedância de sequência total e, logo em seguida, a transformação para a matriz das impedâncias de componentes simétricas.

Para o cálculo da capacitância, será utilizada a matriz de potencial de Maxwell, e, com sua inversa, obter a matriz de capacitância total, que, após a aplicação da matriz de Fortescue, ser possível calcular a matriz de capacitância de componentes simétricas.

2.3.1 Formação da Matriz de Impedância pelo Método das Imagens

Em uma primeira análise, considera-se o solo com resistividade nula e a disposição dos cabos apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Disposição de um sistema de dois cabos aéreos.



Fonte: Zanetta Junior, 2005.

Para Zanetta Junior (2005), algumas suposições podem ser feitas a respeito do estudo:

- considera-se o retorno pelo solo como um condutor imagem de mesma seção a uma profundidade igual a altura do condutor da linha de transmissão;
- a soma das correntes na linha de transmissão é igual a I ;
- a soma das correntes dos condutores imagens é igual a $-I$.

Dessa forma, pode-se dizer que a corrente total do sistema é nula. Isso implica na possibilidade de se utilizar o fluxo concatenado fechado a esse grupo de condutores. Dessa forma, o fluxo concatenado para um condutor genérico i é dado pela equação (6).

$$\phi_i = \phi_{i1} + \phi_{i2} + \dots + \phi_{ii} + \dots + \phi_{ni} \quad (6)$$

Sabendo que a queda de tensão para o condutor i , no domínio do tempo, é dada pela equação (7).

$$\Delta V_i(t) = R_{ii} \cdot i(t) + \frac{d\phi_i(t)}{dt} \quad (7)$$

Onde R_{ii} é a resistência própria do condutor i .

A equação (7) em regime permanente, origina a equação (8)

$$\Delta V_i = R_{ii} \cdot I_i + j\omega\phi_i \quad (8)$$

A equação (8) pode também ser descrita no procedimento em (9).

$$\begin{aligned} \Delta V_i &= R_{ii} \cdot I_i + (j\omega\phi_{i1} + j\omega\phi_{i2} + \dots + j\omega\phi_{ii} + \dots + j\omega\phi_{ni}) \\ \Delta V_i &= R_{ii} \cdot I_i + (jI_1 X_{i1} + jI_2 X_{i2} + \dots + jI_i X_{ii} + \dots + jI_n X_{ni}) \\ \Delta V_i &= jI_1 X_{i1} + jI_2 X_{i2} + \dots + (R_{ii} + jX_{ii})I_i + \dots + jI_n X_{ni} \end{aligned} \quad (9)$$

Onde $R_{ii}+jX_{ii}$ é a impedância própria da linha.

Com o procedimento descrito em (9), é possível montar um sistema de equações lineares mostradas em (10).

$$\begin{aligned} \Delta V_1 &= (R_{11} + jX_{11})I_1 + jI_2 X_{12} + \dots + jI_n X_{n1}) \\ \Delta V_i &= jI_1 X_{i1} + jI_2 X_{i2} + \dots + (R_{ii} + jX_{ii})I_i + \dots + jI_n X_{ni}) \\ \Delta V_n &= jI_1 X_{n1} + jI_2 X_{i2} + \dots + (R_{nn} + jX_{nn})I_n \end{aligned} \quad (10)$$

Esse sistema pode ser escrito em um sistema matricial, resultando na expressão (11).

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_{11} + jX_{11} & \cdots & X_{1i} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ X_{i1} & \cdots & R_{ii} + jX_{ii} & \cdots & X_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & \cdots & X_{ni} & \cdots & R_{nn} + jX_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1i} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ Z_{i1} & \cdots & Z_{ii} & \cdots & Z_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{ni} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Assim, a matriz de impedâncias de uma linha de transmissão é apresentada em (12).

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1i} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ Z_{i1} & \cdots & Z_{ii} & \cdots & Z_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{ni} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \tag{12}$$

Cada termo desta matriz possui um significado e cálculo próprios, e serão discutidos mais detalhadamente nos tópicos a seguir. Vale ressaltar que todo o procedimento feito tomou como base a resistividade nula do solo. Esse fato, não existente na prática, é contornado pelo método de correção de Carson, sendo basicamente uma impedância adicional a cada elemento. Essa correção também será discutida e apresentada no item 2.3.2.4.

2.3.2 Impedância Série da Linha de Transmissão Aérea

A impedância série de uma linha de transmissão segue a forma descrita na equação (13).

$$Z = R + jX \quad (13)$$

De acordo com a resistência da linha pode ser interpretada como a responsável pelas perdas na transmissão de energia, uma vez que a passagem de corrente pelos condutores gera o aquecimento, denominado efeito Joule. Esse aquecimento é uma parcela de energia retirada do transporte total de energia da geração ao consumidor.

De acordo com Umarji (2007), a reatância da linha é considerada a parcela que está correlacionada com a capacidade da linha de transportar energia, uma vez que resistência representa as perdas.

Como a linha é constituída por mais de um condutor, a impedância serie é melhor descrita dividindo-a em duas parcelas: a impedância própria e a impedância mútua.

Pode-se definir a impedância própria como a oposição à corrente elétrica intrínseca do condutor e impedância mútua a oposição à corrente elétrica devido a interação eletromagnética que um condutor produz no outro.

Assim, pode-se inferir que a impedância mútua não possui a parte real (resistência), uma vez que esse é um parâmetro do condutor e não da interação de dois condutores.

Contudo, ambas parcelas da impedância série estão sujeitas à corrente de retorno pelo solo. Vale lembrar que em sistemas trifásicos, as correntes de sequência zero possuem o mesmo módulo e fase, percorrendo os condutores fase e tendo seu retorno pelo solo. Portanto, na impedância da linha deve ser feita uma correção nesse valor. Para estimar essa impedância adicional, estudos foram feitos por grandes pesquisadores, como os europeus Rudenberg Mayr e Pollaczek e os norte-americanos Carson e Campbell. Dentre os trabalhos publicados, se destacou o método proposto por J. R. Carson em 1926, cujo os valores obtidos por ele se aproximaram dos valores medidos em instalações reais, de acordo com Fuchs (2007).

Dessa forma, de acordo com Zanetta Junior (2005), a impedância série pode ser analisada pelas equações (14) e (15).

$$\begin{aligned}
Z_{ii} &= Z_{interna} + Z_{propria} + Z_{carson} \\
Z_{ii} &= (R_{int} + j \cdot X_{int}) + (j \cdot X_{ii}) + (\Delta R_c + j \cdot \Delta X_c) \\
Z_{ii} &= (R_{int} + \Delta R_c) + j \cdot (X_{int} + X_{ii} + \Delta X_c)
\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
Z_{ij} &= Z_{mutua} + Z_{carson} \\
Z_{ij} &= (j \cdot X_{ij}) + (\Delta R_c + j \cdot \Delta X_c) \\
Z_{ij} &= (\Delta R_c) + j \cdot (X_{ij} + \Delta X_c)
\end{aligned} \tag{15}$$

No decorrer dos próximos tópicos, será descrita cada parcela das equações (14) e (15), bem como a metodologia de cálculo.

2.3.2.1 Impedância Interna do Condutor ($Z_{interna}$)

Para Zanetta Junior, a impedância interna do condutor representa a sua oposição a passagem de corrente CA estando ele isolado do meio. Neste caso, o valor da resistência interna é mais significativo em comparação a reatância interna.

Para calcular seu valor, é necessário ter os dados da frequência da rede, a resistência CC, com a temperatura já corrigida para a de operação, raio externo do cabo, bem como seu raio interno, caso seja um condutor com alma de aço.

A expressão para determinar a impedância interna é dada pela equação (16).

$$R_{int} + jX_{int} = r_{cc} \cdot \left(j \cdot \frac{1}{2} \cdot mp \cdot (1 - s^2) \cdot W \right) \tag{16}$$

As equações (17) a (22) exibem como calcular cada parâmetro apresentado em (16).

$$s = \frac{q}{p} \tag{17}$$

$$mp = \sqrt{\frac{k}{1-s^2}} \quad (18)$$

$$mq = \sqrt{\frac{s^2}{1-s^2}} \quad (19)$$

$$k = \frac{8\pi \times 10^{-4} \cdot \text{frequência}}{r_{cc}} \quad (20)$$

$$W = \frac{(ber(mp) + j \cdot bei(mp)) + \varphi \cdot (ker(mp) + j \cdot kei(mp))}{(ber'(mp) + j \cdot bei'(mp)) + \varphi \cdot (ker'(mp) + j \cdot kei'(mp))} \quad (21)$$

$$\varphi = \frac{ber'(mq) + j \cdot bei'(mq)}{ker'(mq) + j \cdot kei'(mq)} \quad (22)$$

As funções ber , bei , ker e kei são as funções de Kelvin, pertencentes a funções modificadas de Bessel. As funções ber' , bei' , ker' e kei' são suas respectivas derivadas. Elas são determinadas na sua forma polinomial no apêndice A.

Analisando essas funções, o cálculo da impedância interna exige o apoio de ferramentas computacionais devido as proporções que cada uma dessas expressões pode tomar, sendo essa mais uma justificativa para a elaboração de uma ferramenta computacional que auxilie pesquisadores no estudo de linhas aéreas de transmissão.

2.3.2.2 Reatância própria do condutor

A reatância própria do condutor representa a oposição à passagem de corrente elétrica devido ao fluxo concatenado imposto por todos os demais condutores sobre o cabo em questão. Sua equação é dada por (23).

$$X_{ii} = j \cdot \omega \cdot L_{ii} \quad (23)$$

A indutância própria é calculada de acordo com a equação (24).

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{2 \cdot h_i}{p} \quad (24)$$

Observa-se a dependência do valor da indutância com somente a altura do cabo em relação ao solo e seu raio externo.

2.3.2.3 *Reatância mútua do condutor*

A reatância mútua do condutor representa a oposição à passagem de corrente elétrica devido ao fluxo concatenado que um cabo exerce no outro, ou seja, é uma relação entre somente dois cabos. Ela é dada pela equação (25).

$$X_{ij} = j \cdot \omega \cdot L_{ij} \quad (25)$$

A indutância mútua é calculada de acordo com a equação (26).

$$L_{ij} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (26)$$

Observa-se a independência da indutância mútua com os dados do cabo como o raio externo, dependendo apenas da alocação dos cabos na estrutura.

2.3.2.4 *Impedância devido ao retorno pelo solo*

Em 1926, Carson publicou o trabalho “Wave Propagation in Overhead wires with Ground Return” que se tornou referência no cálculo da impedância relativa ao efeito do solo.

Dentre os trabalhos publicados até hoje, é o que mais aproxima os resultados de cálculos dos medidos em campo, de acordo com Fuchs (1977).

O equacionamento proposto por Carson é complexo, demandando um tempo considerável para se obter os resultados. Contudo, com o avanço tecnológico e o auxílio de programas computacionais, a execução desse método se tornou rápida sem recorrer a aproximações.

Carson (1926) em seu trabalho considerou o solo com extensão infinita e resistividade uniforme. Os condutores estão dispostos paralelamente ao solo. Foi demonstrado que se podia considerar o solo como ideal, mas acrescido de uma impedância extra devido a presença da resistividade do solo, essa correção na impedância já calculada é chamada de correção de Carson.

A impedância de correção depende basicamente da disposição dos condutores, da frequência de operação e da resistividade do solo. A resistência e a reatância da correção são calculadas por meio de uma série infinita³ dada pelas equações (27) e (28).

$$\Delta r_c = 4\omega \cdot 10^{-4} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{8} - b_1 a \cos(\phi) + b_2 \left[(c_2 - \ln(a)) a^2 \cos(2\phi) + \phi a^2 \sin(2\phi) \right] + \\ + b_3 a^3 \cos(3\phi) - d_4 a^4 \cos(4\phi) - b_5 a^5 \cos(5\phi) + \\ + b_6 \left[(c_6 - \ln(a)) a^6 \cos(6\phi) + \phi a^6 \sin(6\phi) \right] + \dots \end{array} \right\} \quad (27)$$

$$\Delta x_c = 4\omega \cdot 10^{-4} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} (0,6159315 - \ln(a)) + b_1 a \cos(\phi) - d_2 a^2 \cos(2\phi) + \\ + b_3 a^3 \cos(3\phi) - b_4 \left[(c_4 - \ln(a)) a^4 \cos(4\phi) + \phi a^4 \sin(4\phi) \right] + \\ + b_5 a^5 \cos(5\phi) - d_6 a^6 \cos(6\phi) + \dots \end{array} \right\} \quad (28)$$

A variável a é dada por (29).

$$a = 4\pi\sqrt{5} \cdot 10^{-4} \cdot D_{ij} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (29)$$

³ A série apresentada é válida para frequências não elevadas (até 100 Hz).

Os termos b_i são dados por (30).

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{\sqrt{2}}{6} \\
 b_2 &= \frac{1}{16} \\
 b_i &= b_{i-2} \frac{\text{sinal}}{i(i+2)}
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

A variável sinal assume somente dois valores: ± 1 . Seu valor muda de 4 em 4 termos (para $i=1,2,3,4 \rightarrow \text{sinal}=1$, para $i=5,6,7,8 \rightarrow \text{sinal}=-1$, para $i=9,10,11,12 \rightarrow \text{sinal}=1$, para $i=13,14,15,16 \rightarrow \text{sinal}=-1$, etc).

Os termos c_i e d_i são dados por (31).

$$\begin{aligned}
 c_i &= c_{i-2} + \frac{1}{i} + \frac{1}{i+2}; \\
 c_2 &= 1,3659315 \\
 d_i &= \frac{\pi}{4} b_i
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

As funções seno e cosseno do ângulo ϕ_{ij} podem ser calculadas por (32).

$$\begin{aligned}
 \cos(\phi_{ij}) &= \frac{h_i + h_j}{D_{ij}} \\
 \text{sen}(\phi_{ij}) &= \frac{x_{ij}}{D_{ij}}
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

2.3.3 Matriz de Impedância Série Primitiva

As impedâncias calculadas nos tópicos anteriores podem ser alocadas em posições em uma matriz, chamada matriz de impedâncias série total. Nela cada linha e coluna corresponde a uma fase da linha de transmissão analisada.

Para uma linha trifásica simples com um condutor por fase e sem a presença de cabos para-raios, a matriz primitiva apresenta a forma descrita na Figura 7.

Figura 7 - Detalhamento da matriz de impedância total

$$Z_{total} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

Impedâncias Próprias Impedâncias Mútuas

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A matriz de impedâncias série total apresenta as seguintes características:

- a) é simétrica;
- b) possui dimensão igual ao número de condutores presentes;
- c) impedâncias próprias se alocam na diagonal principal da matriz;
- d) impedâncias mútuas se alocam em elementos fora da diagonal principal.

Nos próximos tópicos serão adicionados os cabos para-raios bem como a utilização de mais de um subcondutor por fase, implicando na dimensão da matriz.

2.3.4 Matriz de Impedância de Componente Simétrica

O sistema elétrico trifásico, onde tensão e corrente são senoidais, é chamado de sistema de sequência de fase. Nele, os fatores de tensão e corrente são dispostos em um plano e rotacionam no mesmo sentido. Podem também assumir módulos de magnitudes diferentes

entre si, bem como ter defasamento diferente de 120° , caracterizando assim em um sistema desequilibrado.

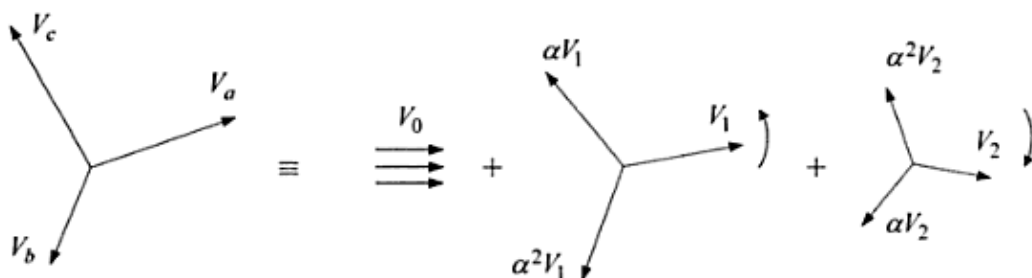
Trabalhar com sistemas desequilibrados demandam extensivos cálculos e possuem uma maior dificuldade de serem analisados por seus fasores de tensão e corrente.

Em 1918, C. O. Fortescue propôs uma das mais poderosas ferramentas de análise para sistemas polifásicos desequilibrados: o método de componentes simétricos. Esse método visa uma melhor análise para os desequilíbrios do sistema como os curtos-circuitos bifásicos, fase-terra com ou sem impedância de arco, condutores em aberto, dentre outros, de acordo com Stevenson (1986).

O teorema de Fortescue, explorado por Stevenson (1986), para sistemas trifásicos, enuncia que três fasores desequilibrados de um sistema trifásico podem ser decompostos em três sistemas equilibrados de fasores denominados componentes de sequência positiva, negativa e zero.

- e) componentes de sequência positiva: três fasores de iguais módulos defasados em 120° com a mesma sequência de fase do sistema original desequilibrado. Também conhecida como sequência direta;
- f) componente de sequência negativa: três fasores de iguais módulos defasados de 120° com a sequência de fase contrária ao sistema original;
- g) componente de sequência zero: três fasores de iguais módulos, mas com defasamento nulo entre si. Contudo, não possuem uma sequência de fase como as outras duas componentes, sendo uma componente estacionária;

Figura 8 - Exemplo de decomposição de um sistema trifásico equilibrado em componentes simétricas de sequência zero, positiva e negativa.



Fonte: Zanetta Junior, 2005.

O artifício matemático para transformação de um sistema trifásico de tensão desequilibrado em componentes simétricas, por exemplo, é dado por (33).

$$\begin{aligned}
 [V_{012}] &= [T^{-1}][V_{abc}] \\
 \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{33}$$

O fasor a é definido por (34).

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j0,866 \tag{34}$$

A matriz T e sua inversa são definidas por (35).

$$\begin{aligned}
 T &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \\
 T^{-1} &= \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{35}$$

De acordo com Zanetta Junior (2005), quando se trabalha em condições transitórias das redes, em determinados casos, tem-se a necessidade de aplicar as chamadas transformações nodais, cujo objetivo é o desacoplamento das equações. Com isso, pode-se relacionar a transformação em componentes simétricas em uma operação semelhante, na qual o mesmo desacoplamento pode ser obtido, por meio das matrizes de transformação, diagonalizando assim o sistema de equações.

Sabendo que a queda de tensão longitudinal da linha de transmissão é dada por (36).

$$[\Delta V_{abc}] = [Z_{abc}][I_{abc}] \tag{36}$$

Sendo ΔV_{abc} e I_{abc} também escritos por (37).

$$\begin{aligned} [\Delta V_{abc}] &= [T][\Delta V_{012}] \\ [I_{abc}] &= [T][I_{012}] \end{aligned} \quad (37)$$

Substituindo (37) em (36), é obtida a equação (38).

$$[T][\Delta V_{012}] = [Z_{abc}][T][I_{012}] \quad (38)$$

Aplicando a inversa de T nos dois lados da equação (38), é obtido (39).

$$\begin{aligned} [T^{-1}][T][\Delta V_{012}] &= [T^{-1}][Z_{abc}][T][I_{012}] \\ [\Delta V_{012}] &= [T^{-1}][Z_{abc}][T][I_{012}] \end{aligned} \quad (39)$$

Assim, define-se a matriz de impedância de componente simétrica na equação (40).

$$[Z_{012}] = [T^{-1}][Z_{abc}][T] \quad (40)$$

A matriz Z_{012} possui a forma apresentada em

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} z_{00} & z_{01} & z_{02} \\ z_{10} & z_{11} & z_{12} \\ z_{20} & z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Os demais termos da matriz representam as impedâncias mútuas entre sequências, e não serão abordados neste trabalho.

Pelas transformações matriciais apresentadas, a conversão da matriz de impedâncias totais para a de componente simétrica alcança parte do objetivo deste trabalho, e

todo o procedimento descrito para a obtenção desta é o cerne do programa LTCalc e a rotina Line Constant do ATP a serem apresentadas no capítulo 4, respectivamente.

2.3.5 Matriz de Capacitâncias de sequência e componentes simétricas

A formação da matriz de capacitância de sequência segue a mesma lógica do procedimento da matriz de impedâncias, utilizando o método das imagens. A diferença para a matriz de capacitância é não ser necessário a correção para o efeito do solo e pelicular, tendo um cálculo mais simples em relação ao de impedância série.

A matriz de capacitância é definida em (42).

$$[C] = [P^{-1}] \quad (42)$$

A matriz P é definida em (43).

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1i} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ p_{i1} & \cdots & p_{ii} & \cdots & p_{in} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & \cdots & p_{ni} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Cada componente da matriz é definido nas equações (44) e (45).

$$p_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (44)$$

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left(\frac{2h_i}{r_i} \right) \quad (45)$$

Em linhas de transmissão o meio dielétrico existente é o ar, com permissividade elétrica igual a $8,859 \times 10^{-12}$ farad/m.

Para se obter a matriz de capacitância em componentes simétricas, utiliza-se a matriz de transformação T e sua inversa, semelhante ao procedimento para a matriz de impedância. A transformação é dada por (46).

$$[C_{012}] = [T^{-1}][C_{abc}][T] = \begin{bmatrix} c_{00} & c_{01} & c_{02} \\ c_{10} & c_{11} & c_{12} \\ c_{20} & c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (46)$$

É de interesse também obter a susceptância de sequência positiva da linha, para cálculos de fluxo de potência. Esse valor é determinado pela formula apresentada em (47).

$$B_1 = 2\pi f \cdot c_{11} \quad (47)$$

2.4 Conclusão

Neste capítulo foi demonstrado todo o procedimento para o cálculo da matriz de impedância e capacitância da linha de transmissão, bem como o cálculo em componentes simétricas. Partindo de dados coerentes para a iniciação do estudo, são calculados, para cada termo da matriz, a impedância própria ou mútua, impedância interna e a correção pelo método de Carson, que, por serem complexas, justificam a utilização de ferramentas computacionais para seu cálculo.

Como foi visto no cálculo da matriz de impedância série e na de capacitância, a dimensão da matriz é igual ao número de cabos envolvidos. Assim, é necessário conhecer a influência de cada uma dessas características no cálculo geral dos parâmetros de linha.

Ao longo deste capítulo, serão expostas a importância de cada um desses elementos, a sua inserção na matriz tanto de impedância, quanto de capacitância e a eliminação desses efeitos para o cálculo geral em componentes simétricas.

3.2 Cabos Para-raios

Os cabos para-raios, também chamados de cabos guarda, são cabos utilizados para proteger os condutores de descargas atmosféricas. São instalados acima dos condutores a uma altura segura para prevenir a ação de raios nos condutores.

Por um tempo, esses cabos somente possuíam essa utilidade. Contudo, percebeu-se que podiam ser aproveitados para a transmissão de sinais digitais, dentre elas a teleproteção, que basicamente é uma comunicação entre relés de proteção com a intenção de tornar o sistema mais seletivo.

A inclusão dos cabos para-raios matrizes de impedância e capacitância é a mesma já apresentadas para os condutores, ou seja, é mais um cabo na estrutura que deve ser adicionado na matriz, aumentando assim sua dimensão.

O cálculo das impedâncias e capacitâncias próprias e mútuas dos cabos para-raios são calculadas da mesma forma dos condutores fase.

Eles ocupam as últimas posições na matriz. Para uma linha com dois cabos para-raios, segue a equação matricial dada em (48).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_{pr1} \\ \Delta V_{pr2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{1_pr1} & Z_{1_pr2} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{2_pr1} & Z_{2_pr2} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{3_pr1} & Z_{3_pr2} \\ Z_{pr1_1} & Z_{pr1_2} & Z_{pr1_3} & Z_{pr1_pr1} & Z_{pr1_pr2} \\ Z_{pr2_1} & Z_{pr2_2} & Z_{pr2_3} & Z_{pr2_pr1} & Z_{pr2_pr2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_{pr1} \\ I_{pr2} \end{bmatrix} \quad (48)$$

A equação (48), pode ser resumida em (49).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{condutor} \\ \Delta V_{para-raio} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{condutor} & Z_{c_pr} \\ Z_{pr_c} & Z_{para-raio} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{condutor} \\ I_{para-raio} \end{bmatrix} \quad (49)$$

Cabos para-raios, geralmente, possuem aterramento em cada estrutura (torre), podendo assim considerar que sua queda de tensão em cada trecho é nula. Seguindo o procedimento proposto por Zanetta Junior (2005) e aplicando $\Delta V_{para-raio} = 0$ na equação (49), ela pode ser reescrita em (50).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{condutor} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{condutor} & Z_{c_pr} \\ Z_{pr_c} & Z_{para-raio} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{condutor} \\ I_{para-raio} \end{bmatrix} \quad (50)$$

Montando o sistema de equações para esse sistema matricial, tem-se o sistema em (51).

$$\begin{cases} \Delta V_{condutor} = Z_{condutor} \cdot I_{condutor} + Z_{c_pr} \cdot I_{para-raio} \\ 0 = Z_{pr_c} \cdot I_{condutor} + Z_{para-raio} \cdot I_{para-raio} \end{cases} \quad (51)$$

Isolando $I_{para-raio}$ na segunda expressão do sistema linear (51), apresenta-se o resultado em (52).

$$[I_{para-raio}] = [-Z_{para-raio}]^{-1} \cdot [Z_{pr_c}] \cdot [I_{condutor}] \quad (52)$$

Substituindo (52) na primeira expressão do sistema linear (51), é obtida a expressão (53).

$$[\Delta V_{condutor}] = [Z_{condutor} - Z_{c_pr} \cdot Z_{para-raio}^{-1} \cdot Z_{pr_c}] [I_{condutor}] \quad (53)$$

Portanto, a matriz equivalente, sem a presença dos cabos para-raios, é dada por (54).

$$[Z_{equivalente}] = [Z_{condutor} - Z_{c_pr} \cdot Z_{para-raio}^{-1} \cdot Z_{pr_c}] \quad (54)$$

Observa-se que a matriz $Z_{\text{equivalente}}$ é de mesma dimensão da matriz Z_{condutor} . Portanto, a matriz equivalente terá a mesma dimensão do número de condutores presentes na estrutura.

Caso a linha possua cabos para-raios isolados, não há a passagem de corrente alguma por eles, ficando $I_{\text{para-raio}}=0$. Portanto, na resolução do sistema linear (51), os cabos para-raios não influenciariam na matriz dos condutores, sendo seu efeito nulo e, conseqüentemente, fazendo a matriz equivalente igual a matriz de impedância total.

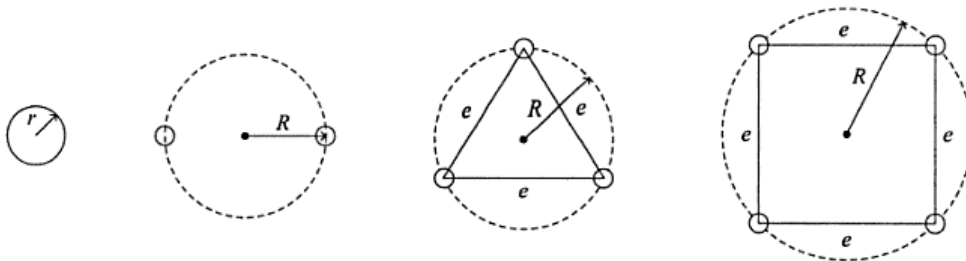
Para o procedimento da matriz de capacitância, a mesma redução se aplica, obtendo ao fim do processo a matriz de potencial de Maxwell ($P_{\text{equivalente}}$).

3.3 Subcondutores por Fase

Certos projetos de linhas necessitam realizar grandes transportes de energia. Uma forma de transportar essa grande quantidade de energia é utilizando cabos com seções maiores ou mais de um cabo por fase, mas tendo a seção reduzida, os chamados subcondutores por fase. Quando se opta pela segunda opção, por motivos financeiros ou estruturais, há um aumento no número de cabos na estrutura, e, conseqüentemente, na dimensão da matriz de impedância também.

Em linhas aéreas de transmissão, normalmente, são utilizados até 4 cabos subcondutores por fase. A geometria de cada cabo é mostrada na figura 1.

Figura 10 - Exemplo de disposição de subcondutores em uma fase (de um a quatro subcondutores).



Fonte: Adaptada de (ZANETTA JUNIOR, 2005).

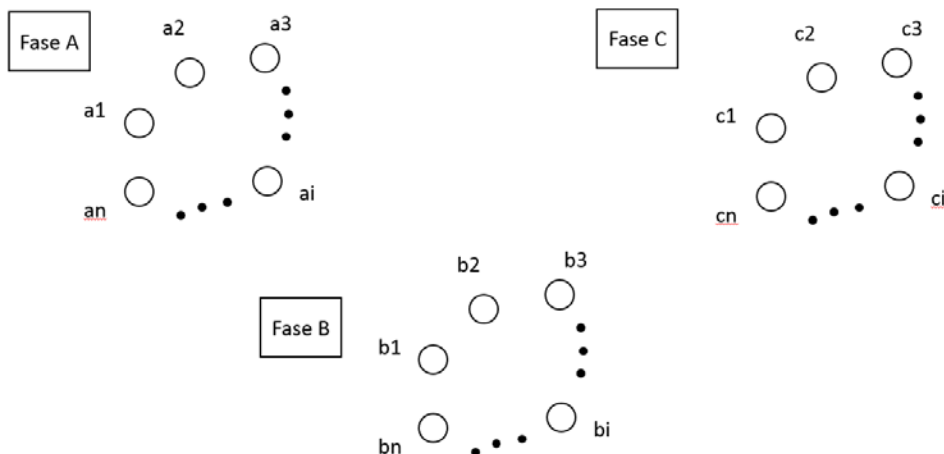
Cada subcondutor irá representar uma linha e uma coluna nas matrizes, ou seja, se for uma linha de transmissão com 4 subcondutores por fase, a matriz teria dimensões de 12 x 12. Realizar operações com matrizes de maiores dimensões implica em maior tempo de

processamento, além de não contribuir com informações que são objetivos do cálculo, como a matriz de sequência total e de componentes simétricas que representam a linha em termos de três impedâncias. Dessa forma, surge a necessidade de também reduzir a matriz com todos os subcondutores em uma matriz de dimensões igual ao número de fases na estrutura.

Uma linha com “n” subcondutores com a numeração 1,2,3...,i,...,n, mostrada na Figura 11, apresenta a matriz de impedância dada em (55).

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{a1a1} & Z_{a1b1} & Z_{a1c1} & \dots & Z_{a1ai} & Z_{a1bi} & Z_{a1ci} & \dots & Z_{a1an} & Z_{a1bn} & Z_{a1cn} \\ Z_{b1a1} & Z_{b1b1} & Z_{b1c1} & \dots & Z_{b1ai} & Z_{b1bi} & Z_{b1ci} & \dots & Z_{b1an} & Z_{b1bn} & Z_{b1cn} \\ Z_{c1a1} & Z_{c1b1} & Z_{c1c1} & \dots & Z_{c1ai} & Z_{c1bi} & Z_{c1ci} & \dots & Z_{c1an} & Z_{c1bn} & Z_{c1cn} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots & & & & \vdots & & \\ Z_{aia1} & Z_{aib1} & Z_{aic1} & \dots & Z_{aiai} & Z_{aibi} & Z_{aici} & \dots & Z_{aian} & Z_{aibn} & Z_{aicn} \\ Z_{bia1} & Z_{bib1} & Z_{bic1} & \dots & Z_{biai} & Z_{bib1} & Z_{bici} & \dots & Z_{bian} & Z_{bibn} & Z_{bicn} \\ Z_{cia1} & Z_{cib1} & Z_{cic1} & \dots & Z_{ciai} & Z_{cibi} & Z_{cici} & \dots & Z_{cian} & Z_{cibn} & Z_{cicn} \\ \vdots & & & & \vdots & & & \ddots & \vdots & & \\ Z_{ana1} & Z_{anb1} & Z_{anc1} & \dots & Z_{anai} & Z_{anbi} & Z_{anci} & \dots & Z_{anan} & Z_{anbn} & Z_{ancn} \\ Z_{bna1} & Z_{bnb1} & Z_{bnc1} & \dots & Z_{bnai} & Z_{bnbi} & Z_{bnbi} & \dots & Z_{bnan} & Z_{bnbn} & Z_{bncn} \\ Z_{cna1} & Z_{cnb1} & Z_{cnc1} & \dots & Z_{cnai} & Z_{cnbi} & Z_{cnbi} & \dots & Z_{cnan} & Z_{cnbn} & Z_{cncn} \end{bmatrix} \quad (55)$$

Figura 11 - Disposição de "n" subcondutores por fase.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

A primeira parte do processo de redução é a partição da matriz em n² submatrizes, como descrito na Figura 12.

Figura 12 - Partição da matriz de impedância Z em n^2 submatrizes para a eliminação dos subcondutores por fase.

$$Z = \begin{bmatrix} \begin{matrix} Z_{a1a1} & Z_{a1b1} & Z_{a1c1} \\ Z_{b1a1} & Z_{b1b1} & Z_{b1c1} \\ Z_{c1a1} & Z_{c1b1} & Z_{c1c1} \end{matrix} & \begin{matrix} Z_{a1a2} & Z_{a1b2} & Z_{a1c2} \\ Z_{b1a2} & Z_{b1b2} & Z_{b1c2} \\ Z_{c1a2} & Z_{c1b2} & Z_{c1c2} \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} Z_{a1an} & Z_{a1bn} & Z_{a1cn} \\ Z_{b1an} & Z_{b1bn} & Z_{b1cn} \\ Z_{c1an} & Z_{c1bn} & Z_{c1cn} \end{matrix} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{matrix} Z_{aia1} & Z_{aib1} & Z_{aic1} \\ Z_{bia1} & Z_{bib1} & Z_{bic1} \\ Z_{cia1} & Z_{cib1} & Z_{cic1} \end{matrix} & \begin{matrix} Z_{aia2} & Z_{aib2} & Z_{aic2} \\ Z_{bia2} & Z_{bib2} & Z_{bic2} \\ Z_{cia2} & Z_{cib2} & Z_{cic2} \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} Z_{aian} & Z_{aibn} & Z_{aicn} \\ Z_{bian} & Z_{bibn} & Z_{bicn} \\ Z_{cian} & Z_{cibn} & Z_{cicn} \end{matrix} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{matrix} Z_{ana1} & Z_{anb1} & Z_{anc1} \\ Z_{bna1} & Z_{bnb1} & Z_{bnc1} \\ Z_{cna1} & Z_{cnb1} & Z_{cnc1} \end{matrix} & \begin{matrix} Z_{ana2} & Z_{anb2} & Z_{anc2} \\ Z_{bna2} & Z_{bnb2} & Z_{bnc2} \\ Z_{cna2} & Z_{cnb2} & Z_{cnc2} \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} Z_{anan} & Z_{anbn} & Z_{ancn} \\ Z_{bnan} & Z_{bnbn} & Z_{bncn} \\ Z_{cnan} & Z_{cnbn} & Z_{cncn} \end{matrix} \end{bmatrix}$$

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Cada submatriz corresponde a um sistema trifásico composto por subcondutores de cada fase.

O processo de redução da matriz se dá pela formação de quatro matrizes, que, de acordo com Umarji (2007), são definidas de (56) a (59).

$$Z_A = Z_{11_{3 \times 3}} \quad (56)$$

$$Z_B = \left[\begin{matrix} (Z_{12_{3 \times 3}} - Z_{11_{3 \times 3}}) & (Z_{13_{3 \times 3}} - Z_{11_{3 \times 3}}) & \dots & (Z_{1n_{3 \times 3}} - Z_{11_{3 \times 3}}) \end{matrix} \right]_{3 \times (n-3)} \quad (57)$$

$$Z_C = \left[\begin{matrix} (Z_{21_{3 \times 3}} - Z_{11_{3 \times 3}}) \\ (Z_{31_{3 \times 3}} - Z_{11_{3 \times 3}}) \\ \vdots \\ (Z_{n1_{3 \times 3}} - Z_{11_{3 \times 3}}) \end{matrix} \right]_{(n-3) \times 3} \quad (58)$$

$$Z_D = \begin{bmatrix} (Z_{22} - Z_{12} - Z_{21} + Z_{11}) & \cdots & (Z_{2n} - Z_{1n} - Z_{21} + Z_{11}) \\ \vdots & \ddots & \\ (Z_{n2} - Z_{12} - Z_{2n} + Z_{11}) & & (Z_{nn} - Z_{1n} - Z_{2n} + Z_{11}) \end{bmatrix}_{(n-3) \times (n-3)} \quad (59)$$

Após o cálculo de cada uma das matrizes apresentadas de (56) a (59), faz-se a redução da matriz conforme a equação matricial (60).

$$[Z_{equivalente}] = [Z_A - Z_B \cdot Z_D^{-1} \cdot Z_C]_{3 \times 3} \quad (60)$$

Dessa forma, uma matriz com dimensão $n \times n$, foi reduzida para uma matriz 3×3 equivalente. Caso seja, por exemplo, um circuito duplo, onde ao todo são 6 fases presentes, a matriz equivalente teria dimensões 6×6 .

Para a transformação em matriz de componentes simétricas, utiliza-se o mesmo procedimento descrito no item 2.3.4, como mostrado em (61).

$$[Z_{012}] = [T^{-1}] [Z_{equivalente}] [T] \quad (61)$$

Obtendo, assim, as componentes de sequência zero, positiva e negativa.

Para matriz de capacitância, segue o mesmo procedimento descrito, onde a matriz a ser reduzida é a matriz de coeficientes de potencial de Maxwell. Obtendo a matriz $P_{equivalente}$, sendo a matriz $C_{equivalente}$ sua inversa.

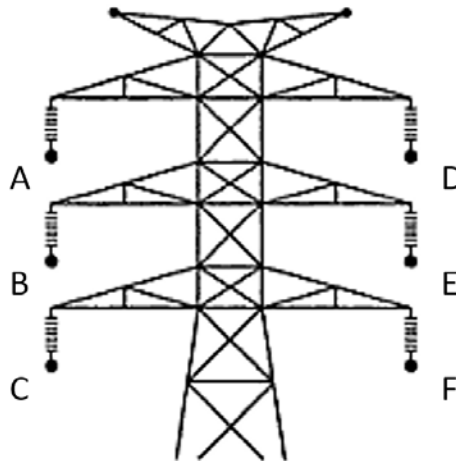
3.4 Circuito Duplo

Circuitos independentes podem, ao longo de sua linha de transmissão, compartilhar a mesma estrutura, ficando próximos um do outro. Essa proximidade influencia no cálculo das impedâncias e da capacitância, uma vez que os condutores de um circuito geram tanto fluxo concatenado com os do outro circuito, como também há a formação de capacitância entre eles. Dessa forma, é importante contabilizar esse efeito nos parâmetros de linha.

Diferente do método dos subcondutores por fase, o circuito duplo não irá possuir mais de um cabo por fase, mas sim cada condutor representará uma fase na matriz. Dessa forma, em uma estrutura de circuito duplo com dois circuitos trifásicos, a matriz de impedância de seqüência total e de capacitância passaram a ter dimensão 6 x 6 em vez de 3 x 3. Ou seja, não será aplicada redução alguma nessas matrizes, pois o resultado que interessa é com relação aos dois circuitos, e não a somente um deles.

Um exemplo de estrutura com circuito duplo está mostrado na Figura 13. Nela existem dois circuitos independentes: circuito “abc” e circuito “edf”.

Figura 13 - Exemplo de estrutura com circuito duplo



Fonte: Adaptada de (ZANETTA JUNIOR, 2005).

A matriz de impedância total para a estrutura da Figura 13 assume a forma dada em (62).

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ad} & Z_{ae} & Z_{af} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bd} & Z_{be} & Z_{bf} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cd} & Z_{ce} & Z_{cf} \\ Z_{da} & Z_{db} & Z_{dc} & Z_{dd} & Z_{de} & Z_{df} \\ Z_{ea} & Z_{eb} & Z_{ec} & Z_{ed} & Z_{ee} & Z_{ef} \\ Z_{fa} & Z_{fb} & Z_{fc} & Z_{fd} & Z_{fe} & Z_{ff} \end{bmatrix} \quad (62)$$

A matriz (62) pode ser representada na forma descrita em (63).

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{abc}_{3 \times 3} & Z_{abcdef}_{3 \times 3} \\ Z_{edfabc}_{3 \times 3} & Z_{edf}_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (63)$$

Para a transformação em componentes simétricas, há uma diferença do que foi apresentado. A matriz de transformação T assume agora a forma descrita em (64).

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a^2 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (64)$$

A inversa da matriz T é dada por (65).

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a & a^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (65)$$

O processo de transformação é o mesmo já discutido, e é apresentado em (66).

$$[Z_{012}] = [T^{-1}][Z][T] \quad (66)$$

A matriz de componentes simétricas assume a forma dada em (67).

$$Z_s = \begin{bmatrix} z1_{00} & - & - & z21_{00} & - & - \\ - & z1_{11} & - & - & - & - \\ - & - & z1_{22} & - & - & - \\ z21_{00} & - & - & z2_{00} & - & - \\ - & - & - & - & z2_{11} & - \\ - & - & - & - & - & z2_{22} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (67)$$

Onde os traços representam valores muito menores que os demais elementos mostrados na matriz.

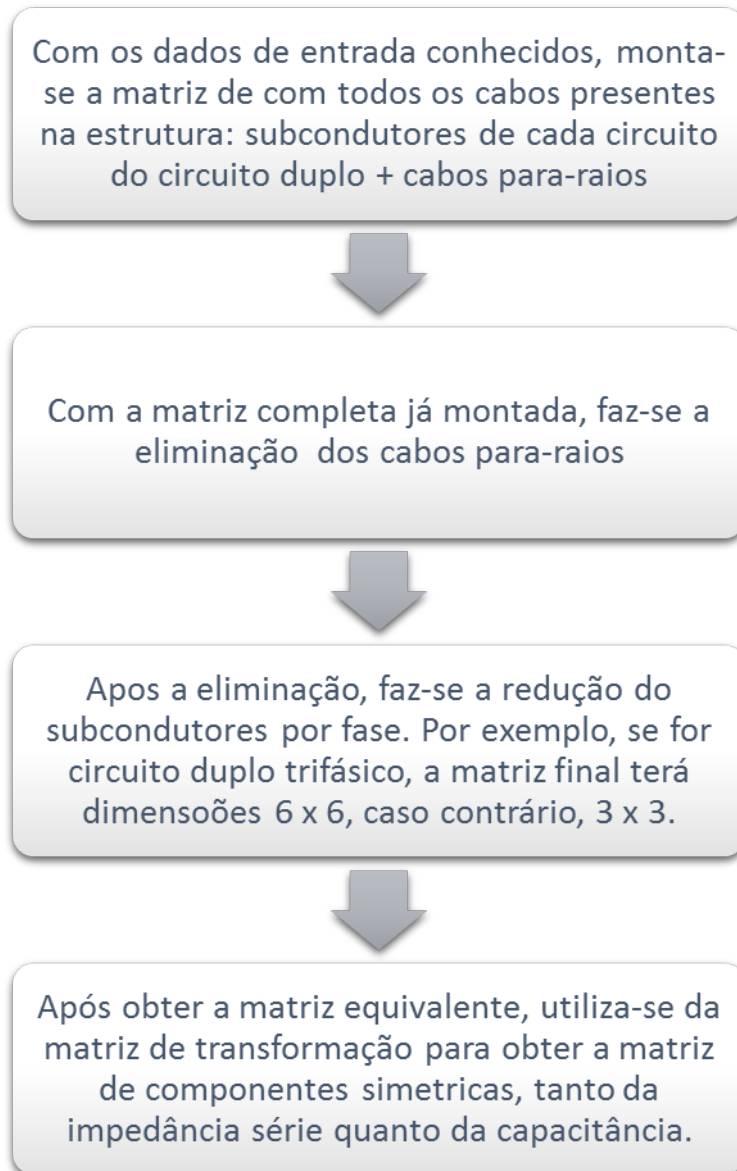
Observa-se que o resultado para cada circuito se apresenta na mesma posição como se fosse circuito simples. Contudo, observa-se um novo termo na matriz, a chamada impedância mutua de sequência zero ($Z21_{00}$). Esse valor é utilizado em cálculos de curto circuito, principalmente em curtos fase-terra.

Para a matriz de capacitância segue o mesmo procedimento apresentado para o de impedância série, obtendo assim tanto as capacitâncias próprias de cada circuito, quanto as mútuas entre circuitos.

3.5 Resumo do procedimento para obter a matriz de impedância e capacitância de componentes Simétricas

Com todos os dados de entrada conhecidos para uma estrutura que possua cabos para-raios, subcondutores por fase e circuito duplo, o fluxograma apresentado na Figura 14 resume a sequência de passos para a correta redução da matriz até a matriz de componentes simétricas.

Figura 14 - Procedimento de cálculo para obter os parâmetros de uma linha de transmissão aérea.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

4 PROGRAMA LTCALC E SUBROTINA *LINE CONSTANT*

4.1 Introdução

Com base nos cálculos mostrados nos capítulos 2 e 3, foi desenvolvido na plataforma Java SE o programa LTCalc para cálculo de parâmetros de linha de transmissão com retorno pelo solo, com uma interface amigável ao usuário e sem a necessidade de licenciamento para sua utilização. Sua tela de abertura é mostrada na Figura 15.

Figura 15 - Tela de abertura do *software* LTCalc.



Fonte: LTCalc

O software consiste em cadastrar informações relativas aos cabos e estruturas de transmissão e armazenar esses dados em arquivos de texto, servindo de banco de dados. Inserindo esses arquivos, é possível carregá-los e executar um estudo. Além do resultado em componentes simétricas, há a possibilidade de elaboração de um relatório automático resumindo os dados iniciais e as matrizes obtidas durante o processo (matriz total e a equivalente).

As funcionalidades podem ser assim enumeradas:

- a) correção da resistência CC para a temperatura de operação da linha de transmissão (ver apêndice A);
- b) correção da resistência CC devido ao efeito pelicular (ver apêndice A);
- c) inclusão até 2 cabos para-raios na estrutura;
- d) inclusão de no máximo 4 cabos subcondutores por fase;

- e) possibilidade de adicionar circuito duplo;
- f) frequência, resistividade do solo e permissividade magnética do meio ajustáveis;
- g) elaboração de relatório técnico sobre o estudo realizado.

O processo de utilização do software na elaboração de um estudo de linha será abordado neste capítulo, bem como a análise dos dados de entrada e de saída.

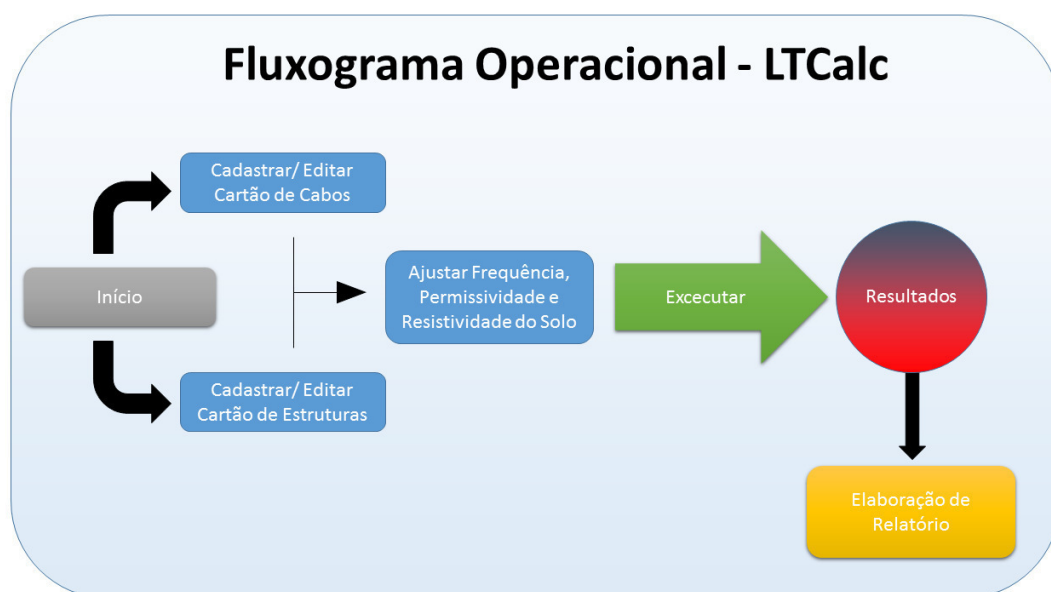
Outro software utilizado para o cálculo dos parâmetros de linhas é a sub-rotina *Line Constant* do programa ATP (*Alternative Transients Program*). Essa sub-rotina é uma dentre as muitas funcionalidades desse *software*, cujo o objetivo é o estudo de transitórios no sistema elétrico de potência. A sua abordagem também será tema no decorrer deste capítulo.

4.2 LTCalc

4.2.1 Processo Operacional

O software LTCalc utiliza o processo geral de funcionamento descrito na Figura 16.

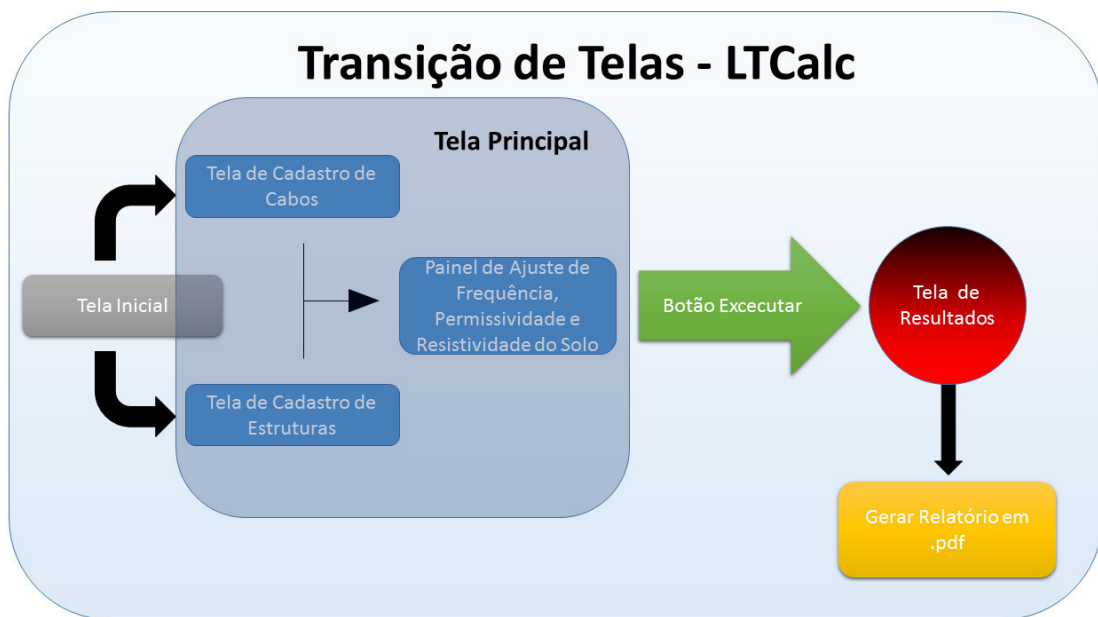
Figura 16 - Fluxograma operacional do LTCalc



Fonte: Elaborada pelo Autor.

O fluxograma da Figura 16 determina as atividades que o usuário irá realizar para desenvolver o estudo. É possível ter uma correlação deste fluxograma com a apresentação das telas do programa apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Fluxograma operacional de telas a serem exibidas ao usuário.

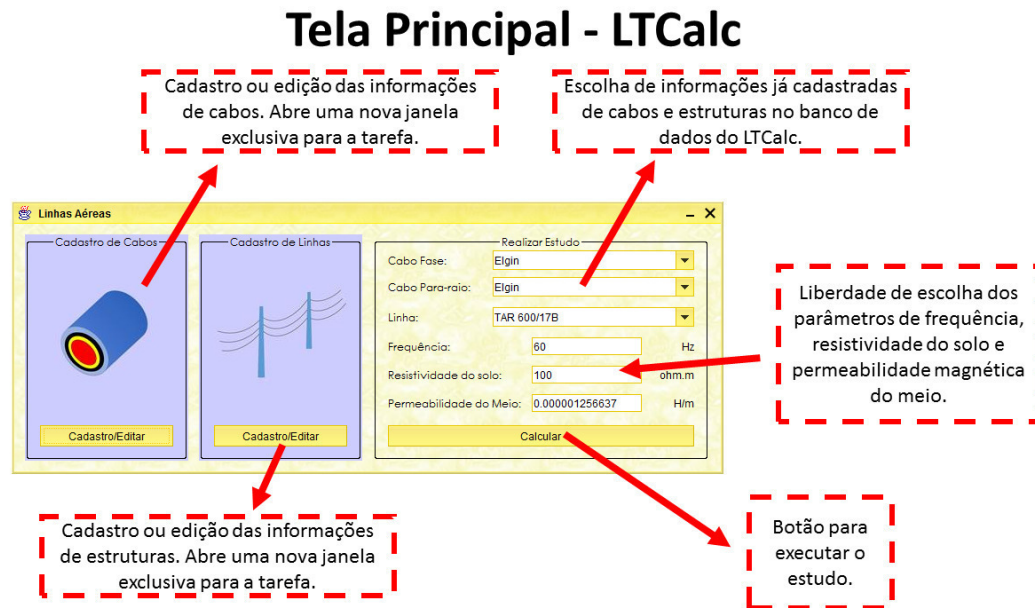


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Com base nas Figura 16 e Figura 17, é possível descrever o funcionamento do LTCalc:

- a) ao iniciar o software, o usuário se depara com uma tela inicial com o logo do programa, bem como um botão para inicializa-lo. Esta tela está exibida na Figura 18;
- b) a tela exposta após a tela inicial, chamada de principal, é o ambiente onde o usuário irá realizar seu estudo, cadastrando ou editando as informações de cabos e estruturas, podendo até selecionar uma informação já armazenada no banco de dados do software. Há também a possibilidade de variar os parâmetros frequência, resistividade do solo e permeabilidade magnética. Com os dados já prontos para o estudo, o usuário pressiona o botão “Calcular” e todo procedimento de cálculo de parâmetros de linha de transmissão será executado.

Figura 18 - Descrição da Tela Principal do LTCalc.

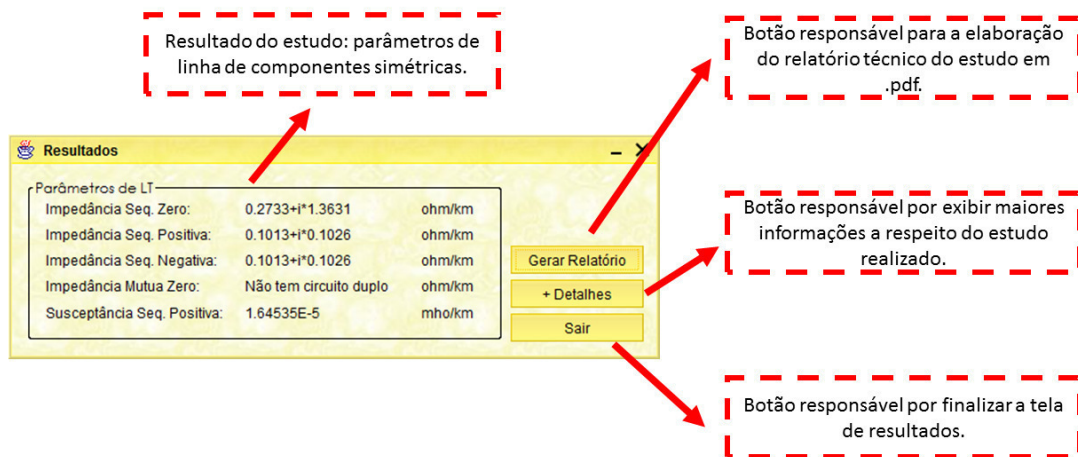


Fonte: Elaborada pelo Autor.

- c) as telas de cabos e estruturas serão melhor descritas nos itens 4.2.2 e 4.2.3. Cada uma possui como finalidade o cadastro de informações em arquivos de texto que serão armazenados no banco de dados do programa, facilitando futuros estudos que necessitem dos mesmos dados de entrada;
- d) os resultados do estudo são mostrados na janela de resultados, apresentada na Figura 19. Nela, além de apresentar as componentes simétricas dos parâmetros de linha, permite que o usuário gere relatório e veja maiores detalhes dos cálculos.

Figura 19 - Detalhe da tela de resultados do LTCalc.

Tela de Resultados - LTCalc



Fonte: Elaborada pelo Autor.

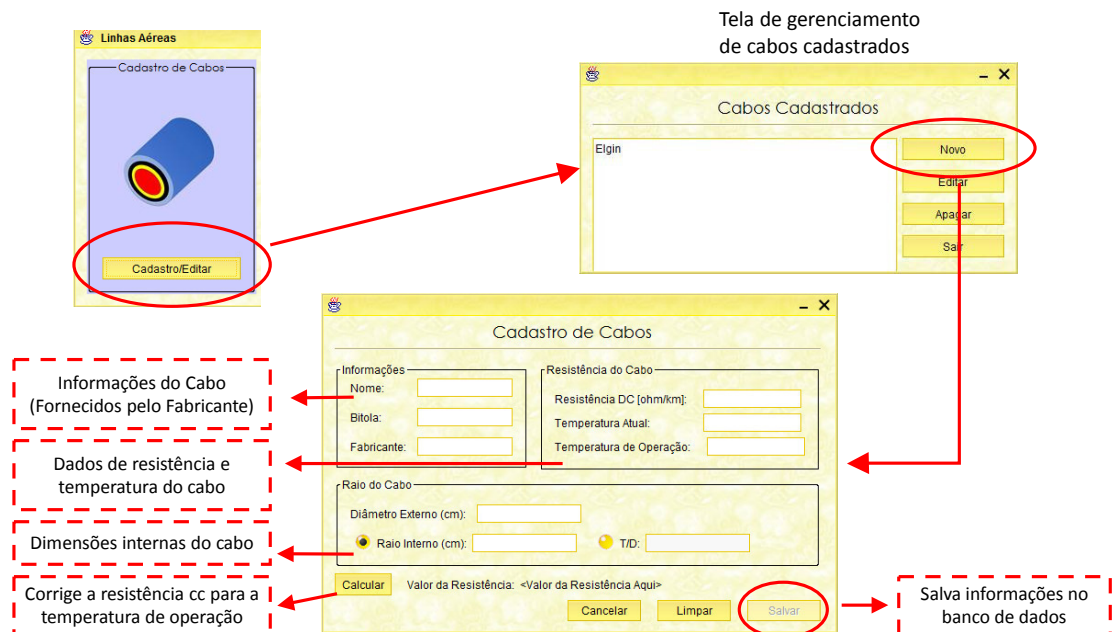
Com a visão global do software apresentada, é possível detalhar nos itens a seguir cada segmento do processo como formatação do arquivo do banco de dados, telas de cadastro de informações e relatório de saída com os resultados obtidos.

4.2.2 Cadastro de cabos

O programa LTCalc foi desenvolvido em Java SE, a qual apresenta a característica de ser orientado a objetos. Usando dessa possibilidade da linguagem, o software trabalha em cima de duas classes: a classe “Cabo” e a classe “Linha”. A classe “Cabo” irá gerenciar toda a informação pertinente a dados dos condutores e para-raios, e a classe Linhas toda a informação da estrutura base da linha de transmissão.

O usuário poderá cadastrar um novo cabo pela tela de cadastro de cabos. A Figura 20 mostra como acessá-la.

Figura 20 - Modo de acesso da tela para cadastro de cabo.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Antes do usuário visualizar a tela de cadastro de cabos, a janela de gerenciamento de cabos cadastrados é apresentada contendo todos os cabos já informados em estudos anteriores ao usuário, sem ter a necessidade de fornecer mais de uma vez a informação. Caso seja um novo estudo com um novo tipo de condutor, o botão de “Novo” levará à tela de cadastro de cabos. Ainda nesta janela é possível editar informações já existentes, bem como apagar o registro do banco de dados.

Para a inserção de um novo cabo no banco de dados do programa, o usuário precisa preencher os seguintes dados:

- a) dados gerais do cabo: nome do cabo, bitola e nome do fabricante;
- b) resistência: resistência CC em ohm/km, temperatura a qual foi fornecida a resistência CC e a temperatura de operação do cabo;
- c) raio do cabo: diâmetro externo em centímetros, raio interno para condutores com alma de aço ou sua relação T/D^4 .

Para armazenar esses valores no banco de dados, antes deve-se calcular o valor da resistência CC corrigida para a temperatura de operação.

⁴ A relação T/D é definida como a razão da diferença entre os raios externo e interno pelo diâmetro externo do cabo. Por vezes, é fornecido esse dado em detrimento da informação do raio interno.

O banco de dados do LTCalc é dividido em dois arquivos, um irá armazenar dados referentes aos cabos, e outro às estruturas das linhas de transmissão. Em cada arquivo, ficarão guardadas informações de cada cabo que já foram devidamente inseridas através da janela de cadastro.

4.2.3 Cadastro de Linhas

Para o cadastro das estruturas de transmissão, o mesmo procedimento apresentado para os cabos é aplicado. A Figura 21 mostra o relacionamento de telas para a execução do cadastro de estruturas de linhas.

Figura 21 - Acesso a tela de cadastro de linhas de transmissão do LTCalc.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

A tela de cadastro de novas estruturas é mostrada na Figura 22 em maiores detalhes.

Figura 22 - Detalhe da tela de cadastro de linhas de transmissão do LTCalc.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Os dados necessários para a inserção na janela da Figura 22 são divididos de acordo com numeração apresentada na mesma:

1. Nome da estrutura;
2. Distâncias de cada fase ao centro da estrutura em metros. Observa-se que estas distâncias possuem sinal positivo ou negativo, dependendo da posição relativa de cada cabo. Cabos a direita da estrutura são valores positivos, e a esquerda, negativos;
3. Alturas máxima e mínima de cada fase. Entende-se por altura máxima a altura da torre de transmissão e mínima pela altura onde ocorre a flecha máxima;
4. Informações sobre a existência ou não de mais de um condutor por fase. Se for afirmativo, deve-se inserir a quantidade (o LTCalc limita esse valor em até 4 subcondutores), o ângulo de rotação da disposição desses condutores e o espaçamento em centímetros entre eles;
5. Informações sobre cabos para-raios, com a possibilidade de inclusão de até dois. Se houver cabos para-raios, deve ser informado sua distância ao centro do poste e as alturas máxima e mínima para cada cabo, conforme feito para os condutores fase;
6. Possibilidade de estudo em circuito duplo, onde serão consideradas as mesmas informações para o segundo circuito, simplesmente espelhando as distâncias ao

centro do poste e mantendo as alturas. Vale ressaltar que somente cabos fase serão espelhados;

7. Possibilidade de visualizar a estrutura cadastrada em forma de gráfico. Cada ponto no gráfico representa um cabo inserido, e a legenda se encontra logo abaixo da área gráfica. Qualquer mudança nos dados de entrada, deve-se pressionar o botão atualizar para redesenhar a nova estrutura para visualização;
8. Botão para armazenar em um arquivo de texto (banco de dados) a informação recém cadastrada.

Os dados mínimos para executar um estudo são os descritos no capítulo 2, que representam uma estrutura simples trifásica, com um condutor por fase, sem cabo para-raio e circuito duplo.

Após o botão “Salvar”, o usuário já está apto a utilizar a estrutura em seus estudos.

Com cabos e estruturas cadastrados, é possível calcular a impedância série e capacitância em componentes simétricas para uma série de combinações de projetos de linhas de transmissão.

4.3 *Line Constant*

A sub-rotina *Line Constant* pertence a uma série de sub-rotinas que compõe o programa ATP.

O ATP é mundialmente aceito para o desenvolvimento de estudos de transitórios eletromagnéticos e sua sub-rotina *Line Constant* é referência no cálculo de parâmetros de linhas de transmissão.

O ATP originou-se do antigo programa EMTP iniciado nos anos 60, que possuía apenas pequenas modelagens de sistemas monofásicos. Com o passar dos anos e os avanços nas pesquisas e desenvolvimento de novas linguagens de programação, o EMTP evoluiu e alterou seu nome para ATP, de acordo com Amon F. e Pereira (1996).

Recentemente, o ATP garantiu uma versão de análise gráfica: o ATPDraw. Antes o software trabalhava com a inserção de cartões de entrada e geração de cartões de saída, sendo a realização de estudos de transitórios uma forma difícil de ser bem assimilada para os

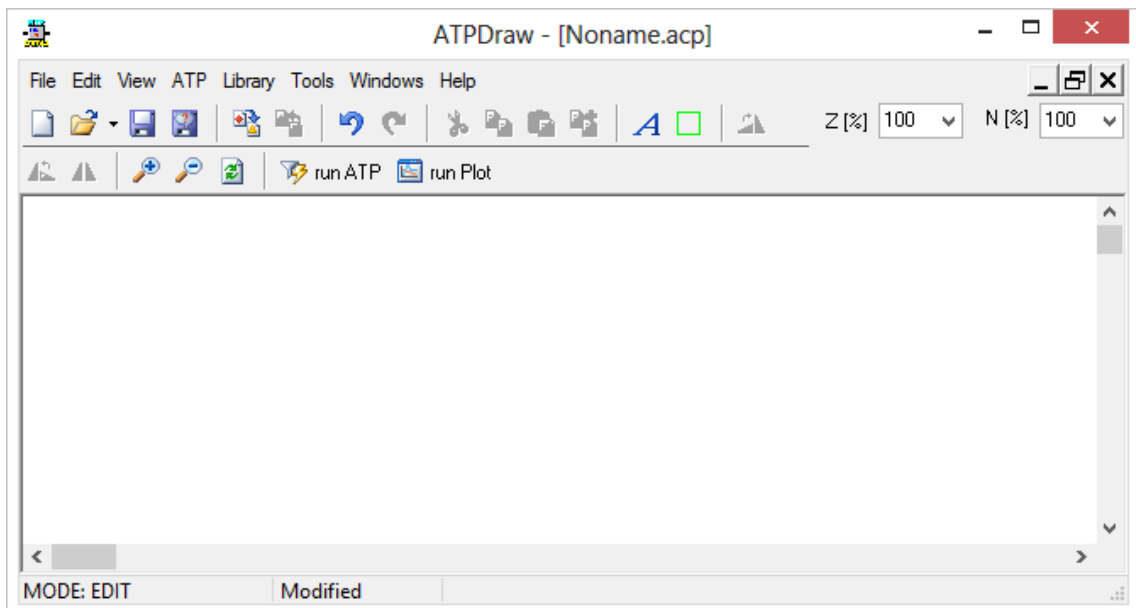
profissionais não experientes na área. Assim, surgiu uma versão gráfica do ATP, onde é possível modelar o sistema com digrama de blocos, se tornando mais intuitivo.

A sub-rotina *Line Constant* funcionava também como um processo que examinava um cartão com os dados de entrada e gerava os parâmetros de linha em um cartão de saída. A forma de inserir os dados no cartão de entrada seguia um padrão extenso que deveria ser obedecido em sua totalidade, que, em caso contrário, ocorreria erro na execução. Por esse motivo, era frequente erros de digitação que invalidava estudos de linhas de transmissão.

Com o ATPDraw, o processo de trabalho com cartões permaneceu, mas a forma de criação deles foi modificada. Antes era necessário utilizar editores de texto para criar um cartão, já no ATPDraw utiliza-se uma janela com campos a serem preenchidos pelo usuário e o próprio software gera o cartão de texto e executa.

A área de trabalho do ATPDraw é mostrada na Figura 23.

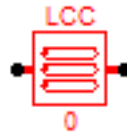
Figura 23 - Tela de trabalho do ATPDraw.



Fonte: ATPDraw.

Para utilizar a sub-rotina *Line Constant*, deverá ser inserido o bloco LCC, mostrado na Figura 24.

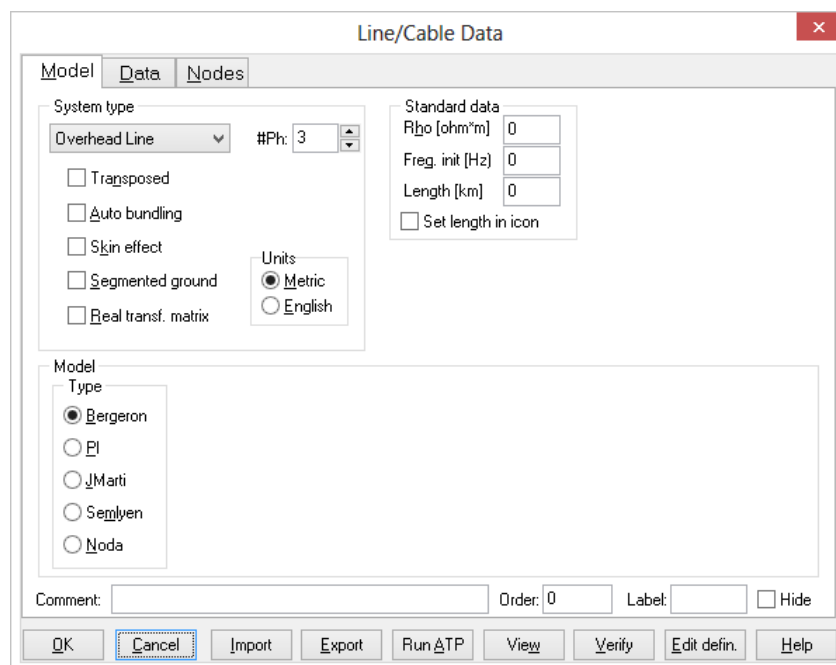
Figura 24 - Bloco LCC a ser inserido no ATPDraw para o estudo dos parametros de linha de transmissão.



Fonte: ATPDraw.

Pressionando o bloco duas vezes, a tela da sub-rotina é apresentada na aba “Model”, como mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Aba Model na tela de elaboração do estudo dos parâmetros de linha do bloco LCC.



Fonte: ATPDraw.

Na tela apresentada na Figura 25 é possível realizar diversos estudos e escolher diversas características da rede tanto para linhas aéreas, quanto para cabos subterrâneos:

- a) *System type*: local de escolha do tipo de linha de transmissão, se aérea ou subterrânea. Para linhas aéreas, escolhe a opção *Overhead Line*. Nessa seção é também possível determinar o número de fases (igual a 3 para linhas trifásicas simples, ou 6 para linhas trifásicas em circuito duplo), incorporar o efeito pelicular (*Skin Effect*), subcondutores por fase (*Auto bunding*), escolhera unidade de medida, dentre outros;

b) *Model*: local de escolha do tipo de saída ou modelo utilizado nos cálculos.

Neste trabalho será explorado o modelo de linha PI;

c) *Standard data*: características nominais da linha como a resistividade do solo, frequência da rede e o comprimento da linha.

Na aba Data, apresentada na Figura 26, é possível inserir os dados do cabo condutor ou cabo para-raio, informando sua altura máxima e mínima, distância ao centro da estrutura, resistência CC, dentre outros parâmetros.

Nos botões na parte inferior da janela apresentada na Figura 26, se destacam:

a) *Import*: utilizado para importar os dados de um estudo já realizado anteriormente na extensão “.alc”;

b) *Export*: salva o presente estudo com todos os seus dados em um arquivo com extensão “.alc”;

c) *Run ATP*: executa o estudo gerando um cartão de saída de texto com formato “.lis”;

d) *View*: pré-visualiza a estrutura durante a inserção dos dados.

Figura 26 - Aba Data na tela de elaboração do estudo dos parâmetros de linha do bloco LCC

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: ATPDraw.

Estudos desenvolvidos fora do escopo da *Line Constant* utilizam ela para validarem seus resultados. Esse é o caso do software LTCalc, cujo o desenvolvimento gira em torno do ATP e sua sub-rotina, tendo seus resultados validados pelo mesmo.

A contribuição do LTCalc com relação as funcionalidades do ATP é a proposta de elaboração de uma interface mais amigável e de fácil compreensão por parte do usuário, tendo por ele maior sensibilidade na análise do estudo e de seus resultados.

4.4 Conclusão

A proposta de desenvolvimento de um software para cálculo de parâmetros de linhas de transmissão, denominado LTCalc, foi exposta, trazendo o processo de funcionamento, a transição entre telas, a alocação dos dados de entrada em bancos de dados para futuros estudos, a execução de um estudo e os resultados obtidos tanto por meio de telas, quanto por meio de um relatório técnico.

O software referência ATP, mais em específico a sub-rotina *Line Constant*, foi também explanado de forma a comparar sua estrutura com a do LTCalc, mostrando a dificuldade que é encontrada em alocar os dados de entrada no ATP e sua interface pouco amigável em comparação ao LTCalc.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Introdução

Nos capítulos 2 e 3, foi explicado o procedimento do cálculo dos parâmetros de linhas de transmissão, partindo dos dados do cabo e da estrutura, até a formulação das impedâncias internas, próprias, mútuas, de correção por Carson e a matriz de potencial de Maxwell, conduzindo aos valores desejados das matrizes de sequência de impedância série e de capacitância.

Com o objetivo de validar o software desenvolvido e demonstrar a correta inserção dos dados de entrada para a execução de um estudo, será realizado um estudo de caso neste capítulo para uma linha de transmissão de 500 kV, cujo objetivo é determinar o valor das impedâncias série da linha em componentes simétricas. Todos os cálculos a serem explanados são reproduzidos no programa e serão aqui detalhados.

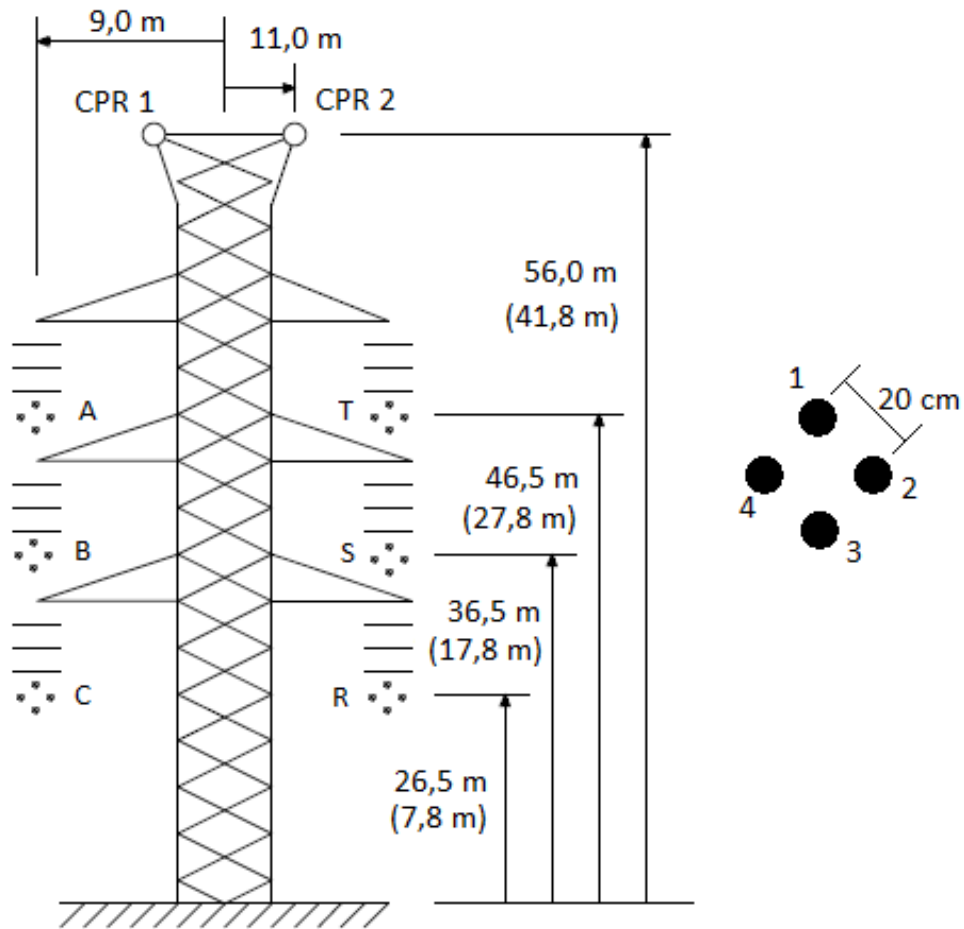
Ao fim deste capítulo, será abordado a execução do caso tanto no LTCalc quanto no ATP, evidenciando a inserção dos dados de entrada e a apresentação dos resultados ao usuário.

5.2 Descrição do Estudo

O estudo é voltado para uma linha de transmissão de 500 kV com cabo T-Eagle como condutor e Telcon OPGW 12SM 11.2TC como cabo para-raio. A sua estrutura é mostrada na Figura 27.

É uma estrutura em circuito duplo, com dois cabos para-raios e 4 subcondutores por fase em cada circuito. O resultado do estudo será dado em ohm/km, sendo irrelevante o comprimento da linha neste caso.

Figura 27 - Estrutura de 500 kV base para o caso estudo a ser desenvolvido.



Fonte: Adaptada de (AMON F. e PEREIRA, 1996).

5.3 Dados de Entrada

Os dados necessários para a execução do estudo se resume aos dados dos cabos e da disposição físicas deles na estrutura.

O cabo condutor utilizado neste estudo é o cabo de alumínio termorresistente com alma de aço T-Eagle da fabricante Nexans (2013), que no seu catálogo é possível obter os dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados do cabo T-Eagle.

T-EAGLE	
Fabricante	Nexans
Bitola	556,5 AWG
Diâmetro Interno (Alma De Aço)	10,38 mm
Diâmetro Externo (Total)	24,21 mm
Resistência Cc A 20 °C	0,1047 ohm/km

Fonte: Nexans, 2013.

O cabo para-raio utilizado neste estudo é o OPGW 12SM 11.2TC da fabricante Telcon (2011), que no seu catálogo é possível obter os dados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados do cabo OPGW 12SM 11.2TC.

Opgw 12sm 11.2tc	
Fabricante	Telcon
Bitola	73 mm ²
Diâmetro Externo (Total)	11,2 mm
Resistência Cc A 20 °C	1,154 ohm/km

Fonte: Telcon (2011).

Para a estrutura de transmissão é possível obter a Tabela 7 a partir da Figura 27.

Tabela 7 - Dados referentes a estrutura de transmissão (continua).

Distância Da Fase A Ao Centro Da Estrutura	- 9,0 M
Distância Da Fase B Ao Centro Da Estrutura	- 9,0 m
Distância Da Fase C Ao Centro Da Estrutura	- 9,0 m
Distância Da Fase R Ao Centro Da Estrutura	9,0 m
Distância Da Fase S Ao Centro Da Estrutura	9,0 m

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Tabela 8 - Dados referentes a estrutura de transmissão (conclusão).

Distância Da Fase A Ao Centro Da Estrutura	- 9,0 M
Distância Da Fase B Ao Centro Da Estrutura	- 9,0 m
Distância Da Fase C Ao Centro Da Estrutura	- 9,0 m
Distância Da Fase R Ao Centro Da Estrutura	9,0 m
Distância Da Fase S Ao Centro Da Estrutura	9,0 m
Distância Da Fase T Ao Centro Da Estrutura	9,0 m
Altura Máxima Da Fase A	46,5 m
Altura No Meio Do Vão Da Fase A	27,8 m
Altura Máxima Da Fase B	36,5 m
Altura No Meio Do Vão Da Fase B	17,8 m
Altura Máxima Da Fase C	26,5 m
Altura No Meio Do Vão Da Fase C	7,8 m
Altura Máxima Da Fase R	26,5 m
Altura No Meio Do Vão Da Fase R	7,8 m
Altura Máxima Da Fase S	36,5 m
Altura No Meio Do Vão Da Fase S	17,8 m
Altura Máxima Da Fase T	46,5 m
Altura No Meio Do Vão Da Fase T	27,8 m
Distância Do Cabo Para-Raio 1 Ao Centro Da Estrutura	- 11,0 m
Distância Do Cabo Para-Raio 2 Ao Centro Da Estrutura	11,0 m
Altura Máxima Do Cabo Para-Raio 1	56,0 m
Altura No Meio Do Vão Cabo Para-Raio 1	41,8 m
Altura Máxima Do Cabo Para-Raio 2	56,0 m
Altura No Meio Do Vão Cabo Para-Raio 2	41,8 m
Distância Entre Subcondutores	20 cm

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Tabela 9 mostra outros dados de operação da linha que também são necessários ao estudo.

Tabela 9 - Condições de operação da linha.

Temperatura de Operação	85 °C
Frequência da Rede	60 Hz
Resistividade do solo	100 ohm.m

Fonte: Elaborada pelo Autor.

De posse desses dados, é possível iniciar o procedimento de cálculo da matriz de impedância de sequência e a de capacitância de sequência, que segue a seguinte ordem:

a) impedância série:

- correção da resistência CC dos cabos para a temperatura de operação;
- cálculo das impedâncias internas do cabo;
- cálculo da reatância própria do cabo;
- cálculo das impedâncias mútuas do cabo;
- cálculo da correção da impedância série devido ao efeito do solo;
- formação da matriz de impedância total;
- eliminação do efeito dos cabos para-raios;
- redução dos subcondutores;
- transformação em componentes simétricas.

b) capacitância:

- construção da matriz de potencial de Maxwell;
- eliminação do efeito dos cabos para-raios e dos subcondutores;
- cálculo da matriz de capacitância total;
- cálculo da matriz de capacitância de sequência.

5.4 Cálculo da Matriz de Impedância de Sequência

Nesse item, será abordado todo o processo de cálculo para construção da matriz de impedância série total, bem como a matriz de impedância série de sequência.

O primeiro passo a ser adotado, é a modificar a resistência CC para a temperatura de operação. De posse desse e dos outros valores, é possível calcular as impedâncias que compõe cada termo da matriz de impedância série total: interna, própria, mútua e a correção de Carson.

Com a matriz montada, faz-se a redução do efeito dos cabos para-raios e dos subcondutores por fase, obtendo assim uma matriz reduzida para este circuito duplo (matriz quadrada de dimensão igual a 6), que, quando aplicada as matrizes de transformação, se obtém a equivalente em componente simétrica.

Para este caso exemplo, a matriz de impedância série total irá possuir dimensão 26 x 26, pois cada cabo inserido na estrutura representa uma linha e uma coluna na matriz: são 4 subcondutores por fase (totalizando 12 cabos) em um circuito, que, em circuito duplo, esse número duplica (24 cabos) e adicionando os dois cabos para-raios, há um total de 26 cabos.

Com relação aos índices que referenciam cada subcondutor na matriz de impedância total, é feito o posicionamento definido pela Tabela 10. Dessa forma, o subcondutor 2 da fase T irá ser representado pela coluna 12 e linha 12, por exemplo.

Tabela 10 - Correspondência dos índices da matriz aos cabos.

Índice 1	Subcondutor 1 da Fase A	Índice 14	Subcondutor 3 da Fase B
Índice 2	Subcondutor 1 da Fase B	Índice 15	Subcondutor 3 da Fase C
Índice 3	Subcondutor 1 da Fase C	Índice 16	Subcondutor 3 da Fase R
Índice 4	Subcondutor 1 da Fase R	Índice 17	Subcondutor 3 da Fase S
Índice 5	Subcondutor 1 da Fase S	Índice 18	Subcondutor 3 da Fase T
Índice 6	Subcondutor 1 da Fase T	Índice 19	Subcondutor 4 da Fase A
Índice 7	Subcondutor 2 da Fase A	Índice 20	Subcondutor 4 da Fase B
Índice 8	Subcondutor 2 da Fase B	Índice 21	Subcondutor 4 da Fase C
Índice 9	Subcondutor 2 da Fase C	Índice 22	Subcondutor 4 da Fase R
Índice 10	Subcondutor 2 da Fase R	Índice 23	Subcondutor 4 da Fase S
Índice 11	Subcondutor 2 da Fase S	Índice 24	Subcondutor 4 da Fase T
Índice 12	Subcondutor 2 da Fase T	Índice 25	Cabo Para-raio 1
Índice 13	Subcondutor 3 da Fase A	Índice 26	Cabo Para-raio 2

Fonte: Elaborada pelo Autor.

5.4.1 Correção da resistência CC dos cabos para a temperatura de operação

Utilizando a expressão (68) apresentada no capítulo 2 para o cabo T-Eagle, cuja a resistência a 20 °C é 0,1047 ohm/km, e considerando uma temperatura de operação da linha de 85 °C, pode-se obter a resistência CC com a temperatura corrigida dada em (69).

$$\frac{R_2}{0,1047} = \frac{|-228,0|+85}{|-228,0|+20} \quad (68)$$

$$r_{T-Eagle_{cc\ 85^\circ C}} = R_2 = \frac{0,1047 \times (228,0 + 85)}{228,0 + 20} = 0,1321 \text{ ohm/km} \quad (69)$$

Para o cabo OPGW 12SM 11.2TC, a correção de sua resistência CC é dada por (70).

$$r_{OPGW_{cc85^\circ C}} = R_2 = \frac{1,154 \times (228,0 + 85)}{228,0 + 20} = 1,4564 \text{ ohm/km} \quad (70)$$

5.4.2 Cálculo das impedâncias internas do cabo

Para o cálculo da impedância interna utiliza-se a equação (16). Contudo, é necessário que se tenha os parâmetros das equações (17), (18) e (21) calculadas.

Para o cabo T-Eagle, sabe-se que o raio externo do cabo é 12,1 mm (24,21 ÷ 2) e o raio interno é 5,2 mm (10,38 ÷ 2), é possível calcular a variável s de acordo com a equação (17), resultando em (71).

$$s = \frac{5,2}{12,1} = 0,4297 \quad (71)$$

Adotando a frequência da rede em 60 Hz, utiliza-se da equação (20) para obter o fator k em (72).

$$k = \frac{8\pi \times 10^{-4} \cdot 60}{0,1321} = 1,1415 \quad (72)$$

O cálculo dos parâmetros mp e mq são dados por (73) e (74).

$$mp = \sqrt{\frac{1,1415}{1 - 0,4297^2}} = 1,1832 \quad (73)$$

$$mq = \sqrt{\frac{0,4297^2}{1 - 0,4297^2}} = 0,4758 \quad (74)$$

De posse dos valores de (73) e (74), é possível calcular a variável φ em 1.

$$\varphi = \frac{ber'(0,4758) + j \cdot bei'(0,4758)}{ker'(0,4758) + j \cdot kei'(0,4758)} = \frac{-0,0081 + j \cdot 0,2534}{-1,7898 + j \cdot 0,3345} = -0,030 + 0,1360 \quad (75)$$

O parâmetro W , com sua formula de cálculo apresentada em (21), é calculado em (76).

$$W = \frac{(ber(1,1832) + j \cdot bei(1,1832)) + \varphi \cdot (ker(1,1832) + j \cdot kei(1,1832))}{(ber'(1,1832) + j \cdot bei'(1,1832)) + \varphi \cdot (ker'(1,1832) + j \cdot kei'(1,1832))}$$

$$W = \frac{0,9695 + j0,3485 + (0,03 + j0,136) \cdot (0,1776 - j0,4120)}{-0,1032 + j0,5853 + (0,03 + j0,136) \cdot (-0,5094 + j0,3363)} \quad (76)$$

$$W = 0,2130 - j2,0781$$

Assim, a impedância interna é calculada em (77), a partir da equação (16).

$$R_{int} + jX_{int} = 0,1321 \cdot \left(j \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,1832 \cdot (1 - 0,4297^2) \cdot (0,2130 + j2,0781) \right) \quad (77)$$

$$R_{int} + jX_{int} = 0,1325 + j0,0136 \text{ ohm / km}$$

Para o cabo para-raio OPGW 12SM 11.2TC, aplicam-se as mesmas equações utilizadas para o cabo T-Eagle, obtendo assim um valor de impedância interna em (78).

$$R_{\text{int}} + jX_{\text{int}} = 1,4565 + j0,0188 \text{ ohm / km} \quad (78)$$

5.4.3 Cálculo da reatância própria do cabo

A reatância própria de cada cabo é dada na equação (23). Ela deve ser aplicada para cada subcondutor e cabo para-raio presentes na estrutura. Sua expressão depende da altura de cada cabo em relação ao solo, bem como a dimensão do raio externo. Ao todo, serão 26 reatâncias próprias a serem calculadas.

Para efeito demonstrativo, as expressões (79) e (80) mostram o cálculo da reatância própria do subcondutor 1 da fase A e de um cabo para-raio, respectivamente.

$$X_{1,1} = j \cdot \omega \cdot L_{00} = j \cdot 377 \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{2 \cdot (h_{\text{subcondutor_faseA}})}{r_{T\text{-Eagle}}} \quad (79)$$

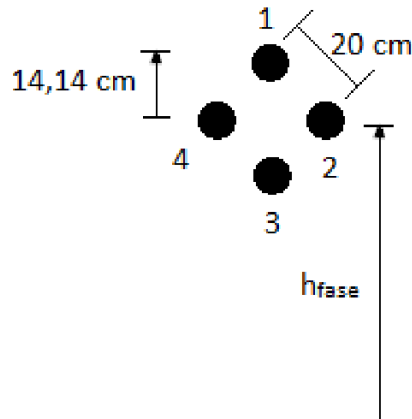
$$X_{1,1} = j0,4774 \text{ ohm / km}$$

$$X_{25,25} = j \cdot \omega \cdot L_{00} = j \cdot 377 \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{2 \cdot (h_{CPR1})}{r_{OPGW}} \quad (80)$$

$$X_{25,25} = j0,7327 \text{ ohm / km}$$

Deve ser feita uma consideração sobre a altura de cada subcondutor. Pela Figura 27, observa-se que a disposição em cada fase é dada por um losango de lado de 20 cm e a altura de cada fase fornecida é a altura a partir do centro desse losango. Assim, pode-se calcular a altura efetiva de cada subcondutor, demonstrada na Figura 28. A real posição de cada subcondutor é dada pela Tabela 11.

Figura 28 - Arranjo dos subcondutores em uma fase.



Fonte: Adaptada de (AMON F. e PEREIRA, 1996).

Tabela 11 - Altura efetiva de cada subcondutor.

	ALTURA EFETIVA
SUBCONDUTOR 1	$H_{\text{fase}} + 14,14 \text{ cm}$
SUBCONDUTOR 2	H_{fase}
SUBCONDUTOR 3	$H_{\text{fase}} - 14,14 \text{ cm}$
SUBCONDUTOR 4	H_{fase}

Fonte: Elaborada pelo Autor.

O apêndice B apresenta os resultados para as 26 reatâncias próprias.

5.4.4 Cálculo da reatância mútua do cabo

A reatância mútua entre cabos é dada na equação (25). Ela deve ser aplicada para cada subcondutor e cabo para-raio presentes na estrutura. Sua expressão depende da distância entre cabos e a distância entre um cabo e a imagem do outro. Ao todo, serão 650 ($26^2 - 26$) reatâncias mútuas a serem calculadas.

Para efeito demonstrativo, as expressões (81) e (82) mostram o cálculo da reatância mútua entre dois subcondutores, subcondutor 1 da fase A e subcondutor 1 da fase B, e de um cabo para-raio com o outro, respectivamente.

$$X_{1,2} = j \cdot \omega \cdot L_{14} = j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D_{12}}{d_{12}}$$

$$X_{1,2} = j \cdot 377 \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{58,06}{10,0} \quad (81)$$

$$X_{1,2} = j0,1326 \text{ ohm / km}$$

$$X_{25,26} = j \cdot \omega \cdot L_{2526} = j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D_{25,26}}{d_{25,26}}$$

$$X_{25,26} = j \cdot 377 \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{95,63}{22,0} \quad (82)$$

$$X_{25,26} = j0,1326 \text{ ohm / km}$$

O apêndice B mostra os resultados para as 650 reatâncias mútuas.

5.4.5 Cálculo da correção da impedância série devido ao efeito do solo

De posse dos dados da frequência da rede, resistividade do solo e a disposição física dos cabos na estrutura, é possível calcular a correção da impedância pelo efeito do solo utilizando o método de Carson, descrito no item 2.3.2.4. Utilizando as equações de (27) a (32), obtém-se a correção de Carson tanto para os elementos da diagonal principal, quanto para os elementos fora da diagonal principal, cuja a diferença se baseia no cálculo das equações (32), cuja a altura e a distância irá depender da disposição de cada cabo. As impedâncias de Carson são mostradas no apêndice B.

5.4.6 Formação da matriz de impedância total

Para a construção da matriz de impedância total com dimensão 26x26, o cálculo de elemento por elemento da matriz se dá seguindo o que está disposto na (14) para os elementos da diagonal principal e na equação (15) para os elementos fora da diagonal principal.

Para os elementos da diagonal principal, deve-se somar os valores correspondentes da impedância interna, própria e a correção de Carson para o cabo em questão. Já para os demais elementos, soma-se apenas a impedância mútua e a correção por Carson.

A matriz com os valores calculados para este exemplo está exposta no apêndice C item 1.

5.4.7 Eliminação do efeito dos cabos para-raios

O objetivo deste procedimento é obter a matriz de impedâncias em componentes simétricas. Contudo, nela, deverá ser retirado o efeito dos cabos guarda, bem como os dos subcondutores por fase, para que ao fim a matriz resultante seja reduzida a ter dimensão 6x6, sendo cada linha e coluna correspondente a uma fase da matriz.

A primeira redução a ser feita é com relação aos cabos para-raios, cujo o processo se encontra descrito no item 3.2. Nele, é necessário determinar as 4 matrizes, oriundas da partição da matriz de impedância total, necessárias a redução proposta em (54): $Z_{condutor}$, Z_{c_pr} , Z_{pr_c} e $Z_{para-raio}$. Essas matrizes são expostas no apêndice C item 2. A matriz de impedância total é mostrada na equação (83).

$$Z_{26 \times 26} = \begin{bmatrix} Z_{condutor_{24 \times 24}} & Z_{c_pr_{24 \times 2}} \\ Z_{pr_c_{2 \times 24}} & Z_{para-raio_{2 \times 2}} \end{bmatrix}_{26 \times 26} \quad (83)$$

A matriz $Z_{condutor}$ é uma matriz de 24 x 24, cujo o valor se dá na expressão (84).

$$Z_{condutor_{24 \times 24}} = \begin{bmatrix} 0,1865 + j0,6867 & \cdots & 0,0555 + j0,2641 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0,0555 + j0,2641 & \cdots & 0,1896 + j0,6836 \end{bmatrix}_{24 \times 24} \quad (84)$$

A matriz Z_{c_pr} é uma matriz de 2 x 24, cujo o valor se dá na expressão (85).

$$Z_{c-pr_{24 \times 2}} = \begin{bmatrix} 0,0530 + j0,3234 & 0,0530 + j0,2770 \\ \vdots & \vdots \\ 0,0545 + j0,2285 & 0,0545 + j0,2504 \end{bmatrix}_{24 \times 2} \quad (85)$$

Z_{c-pr} : é uma matriz de 2 x 24, cujo o valor se dá na expressão (86).

$$Z_{pr-c_{2 \times 24}} = \begin{bmatrix} 0,0530 + j0,3234 & \cdots & 0,0545 + j0,2285 \\ 0,0530 + j0,2770 & \cdots & 0,0545 + j0,2504 \end{bmatrix}_{2 \times 24} \quad (86)$$

$Z_{para-raio}$: é uma matriz de 2 x 2, cujo o valor se dá na expressão (87).

$$Z_{pr-c_{2 \times 2}} = \begin{bmatrix} 1,5086 + j0,9256 & 0,0520 + j0,2828 \\ 0,0520 + j0,2828 & 1,5086 + j0,9256 \end{bmatrix}_{2 \times 2} \quad (87)$$

Utilizando a equação matricial (54), é obtida a matriz de dimensões 24x24 sem o efeito dos cabos para-raios e é apresentada no apêndice C item 2.

5.4.8 Redução dos subcondutores

A redução dos subcondutores por fase, descrita no item 3.3 deste trabalho, revelará uma matriz equivalente para cada fase do circuito, que no caso em estudo é um circuito duplo, ou seja, 6 fases. Esse procedimento também pode ser entendido como a redução de 4 subcondutores em um único condutor por fase.

As matrizes parciais Z_A , Z_B , Z_C e Z_D estão exibidas no apêndice C item 3. A matriz equivalente é apresentada na Figura 29.

Figura 29 - Matriz equivalente de fases após a redução do efeito dos cabos guarda e do subcondutores por fase.

		Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha	1	0.1379+j0.5617	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2192	0.1035+j0.2167
Linha	2	0.0984+j0.2669	0.1262+j0.5740	0.0894+j0.2768	0.0978+j0.2127
Linha	3	0.0940+j0.2192	0.0894+j0.2768	0.1193+j0.5818	0.0936+j0.1969
Linha	4	0.1035+j0.2167	0.0978+j0.2127	0.0936+j0.1969	0.1379+j0.5617
Linha	5	0.0978+j0.2127	0.0928+j0.2285	0.0892+j0.2224	0.0984+j0.2669
Linha	6	0.0936+j0.1969	0.0892+j0.2224	0.0861+j0.2362	0.0940+j0.2192
		Coluna 5	Coluna 6		
Linha	1	0.0978+j0.2127	0.0936+j0.1969		
Linha	2	0.0928+j0.2285	0.0892+j0.2224		
Linha	3	0.0892+j0.2224	0.0861+j0.2362		
Linha	4	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2192		
Linha	5	0.1262+j0.5740	0.0894+j0.2768		
Linha	6	0.0894+j0.2768	0.1193+j0.5818		

Fonte: Elaborada pelo Autor.

5.4.9 Transformação em componentes simétricas.

O último processo a ser feito é a aplicação da matriz de transformação T e sua inversa, dada por (66), na matriz equivalente obtida pela redução dos cabos para-raios e dos subcondutores por fase da expressão .

$$Z_{012} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a & a^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot Z_{abcrst}_{6 \times 6} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a^2 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (88)$$

Assim, a matriz Z_{012} é apresentada na Figura 30.

Figura 30 - Matriz de impedância em componente simétrica.

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.0339+j0.3182	-0.0293+j0.0176	-0.0042-j0.0133	0.0006+j0.0165
Linha 2	0.0303+j0.0165	0.0339+j0.3182	0.0189-j0.0199	0.0117+j0.0060
Linha 3	0.0189-j0.0199	-0.0042-j0.0133	0.3156+j1.0810	0.0092-j0.0142
Linha 4	0.0006+j0.0165	-0.0110+j0.0069	0.0045-j0.0079	0.0339+j0.3182
Linha 5	0.0117+j0.0060	0.0006+j0.0165	0.0092-j0.0142	0.0303+j0.0165
Linha 6	0.0092-j0.0142	0.0045-j0.0079	0.2812+j0.6485	0.0189-j0.0199

	Coluna 5	Coluna 6
Linha 1	-0.0110+j0.0069	0.0045-j0.0079
Linha 2	0.0006+j0.0165	0.0092-j0.0142
Linha 3	0.0045-j0.0079	0.2812+j0.6485
Linha 4	-0.0293+j0.0176	-0.0042-j0.0133
Linha 5	0.0339+j0.3182	0.0189-j0.0199
Linha 6	-0.0042-j0.0133	0.3156+j1.081

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Com a matriz Z_{012} determinada, os resultados de interesse, que são a impedância de sequência positiva, negativa e zero, ficam apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Componentes simétricas obtidas do estudo de caso.

Impedância de Seq. Zero	0,3156 + j1,0810
Impedância de Seq. Positiva	0,0339 + j0,3182
Impedância de Seq. Negativa	0,0339 + j0,3182

Fonte: Elaborada pelo Autor.

5.5 Cálculo da Matriz de Capacitância de Sequência

Para a matriz de capacitância, utiliza-se o procedimento descrito no item 2.3.5.

O primeiro processo a ser abordado é o de construção da matriz de potencial de Maxwell P, cuja dimensão é 26 x 26. Depois, faz-se a redução dos cabos para-raios e dos subcondutores por fase, da mesma forma abordada no cálculo da impedância série. Com a matriz de potencial equivalente, realiza-se a sua inversão e é obtida a matriz de capacitância

equivalente para as fases. Ao fim, utiliza-se das matrizes T e sua inversa para se obter a matriz de capacitância em componentes simétricas.

Com esses resultados, é finalizado o procedimento de cálculo da impedância série da linha de transmissão aérea de 500 kV.

5.5.1 Construção da matriz de potencial de Maxwell

Utilizando das equações apresentadas em (45) e (44) para os termos da diagonal principal e fora da diagonal principal, respectivamente, é obtida a matriz completa P, apresentada no apêndice D item 1. O procedimento para obter as distâncias entre cabos, entre um cabo e a imagem do outro e a altura de cada cabo, é a mesmo apresentado no cálculo da impedância série.

5.5.2 Eliminação do efeito dos cabos para-raios e dos subcondutores

A redução matricial é feita da mesma forma apresentada nos itens 5.4.7 e 5.4.8 deste capítulo para a impedância série.

A matriz P é obtida após a redução dos cabos guarda é mostrada no apêndice D item 2.

A matriz P é obtida após a redução dos subcondutores por fase é mostrada no apêndice D item 3.

5.5.3 Matriz de capacitância total

Retirando o efeito dos cabos para-raios e dos subcondutores por fase da matriz P, é obtida uma matriz 6x6 de potencial equivalente. A matriz de capacitância será a inversa dessa matriz, de acordo com a equação (42) e é apresentada no apêndice D item 4.

5.5.4 Matriz de capacitância de sequência

Aplicando a transformação da equação (46), é obtida a matriz de capacitância em componentes simétricas C_{012} apresentada na expressão (89). O resultado obtido é mostrada na matriz da Figura 31.

$$C_{012} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a & a^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot C_{abcrst}_{6 \times 6} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a^2 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (89)$$

Figura 31 - Matriz de capacitância em componentes simétricas.

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.1381 E-6	-0.0068 E-6	0.0001 E-6	-0.0042 E-6
Linha 2	-0.0068 E-6	0.1381 E-6	0.0001 E-6	-0.0018 E-6
Linha 3	0.0001 E-6	0.0001 E-6	0.0808 E-6	-0.0012 E-6
Linha 4	-0.0042 E-6	-0.0018 E-6	-0.0012 E-6	0.1381 E-6
Linha 5	-0.0018 E-6	-0.0042 E-6	-0.0012 E-6	-0.0068 E-6
Linha 6	-0.0012 E-6	-0.0012 E-6	-0.0219 E-6	0.0001 E-6

	Coluna 5	Coluna 6
Linha 1	-0.0018 E-6	-0.0012 E-6
Linha 2	-0.0042 E-6	-0.0012 E-6
Linha 3	-0.0012 E-6	-0.0219 E-6
Linha 4	-0.0068 E-6	0.0001 E-6
Linha 5	0.1381 E-6	0.0001 E-6
Linha 6	0.0001 E-6	0.0808 E-6

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Com a matriz C_{012} determinada, os resultados de interesse, que são a capacitância de sequência positiva, negativa e zero, podem ser obtidas e são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Capacitância da linha em componentes simétricas para o estudo de caso realizado.

Capacitância de Seq. Zero	0.0808 μ F
Capacitância de Seq. Positiva	0.1381 μ F
Capacitância de Seq. Negativa	0.1381 μ F

Fonte: Elaborada pelo Autor.

É de interesse também o cálculo da susceptância de sequência positiva, dada em (90).

$$\begin{aligned} B_1 &= 2\pi f \cdot 0,1381 \\ B_1 &= 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ mho/km} \end{aligned} \tag{90}$$

Esses resultados finalizam o procedimento de cálculo da impedância série e da capacitância da linha de transmissão aérea de 500 kV. Com este exemplo, foi possível explicar sobre o procedimento de cálculo e obter esses parâmetros, o qual é utilizado no software LTCalc.

No item a seguir, será abordado este mesmo caso exemplo tanto no LTCalc quanto na sub-rotina *Line Constant*, mostrando a inserção dos dados de entrada e a validação dos resultados obtidos.

5.6 Estudo de caso com o software LTcalc

O software desenvolvido foi utilizado para o cálculo da impedância série e da capacitância da linha de transmissão de 500 kV, caso exemplo a ser abordado neste capítulo.

Para a execução desse estudo é necessário cadastrar três objetos:

- a) o cabo condutor T-Eagle: os dados apresentados na Tabela 5 são inseridos na janela de cadastro de cabos apresentada na Figura 32;

Figura 32 - Tela de cadastro de cabos com os dados do cabo T-Eagle.

Fonte: LTCalc

- b) o cabo condutor OPGW 12SM 11.2TC: os dados apresentados na Tabela 6 são inseridos na janela de cadastro de cabos apresentada na Figura 33;

Figura 33 - Tela de cadastro de cabos com os dados do cabo OPGW 12SM 11.2TC.

Fonte: LTCalc

- c) A estrutura de 500 kV: os dados apresentados na Tabela 7 são inseridos na janela de cadastro de cabos apresentada na Figura 34.

Figura 34 - Tela de cadastro da estrutura em estudo.

Fonte: LTCalc

Com os cabos e a linha cadastradas, na tela principal de elaboração do estudo, escolhe-se qual o cabo condutor, para-raio e a estrutura utilizada, como demonstrado na Figura 35. Deverá ser informada a frequência da rede, que no caso é 60 HZ, a resistividade do solo (100 ohm.m) e a permeabilidade do meio (0,000001256637 H/m).

Figura 35 - Tela de escolha dos cabos condutor e para-raio, bem como da estrutura de transmissão para efetuar o estudo.

Fonte: LTCalc

Pressionando o botão “Calcular”, o software apresenta a tela de resultados na Figura 36.

Figura 36 - Tela de resultados do estudo de caso para a linha de 500 kV.

Parâmetros de LT		
Impedância Seq. Zero:	0.3156+i*1.081	ohm/km
Impedância Seq. Posi...	0.0339+i*0.3182	ohm/km
Impedância Seq. Negativa:	0.0339+i*0.3182	ohm/km
Impedância Mutua Zero:	0.2812+i*0.6485	ohm/km
Susceptância Seq. Positiva:	5.2067E-6	mho/km
Susceptância Seq. Negativa:	5.2067E-6	mho/km
Susceptância Seq. Zero:	3.0478E-6	mho/km

Fonte: LTCalc

Caso o usuário deseje elaborar um relatório técnico do estudo apresentado, deverá pressionar o botão “Gerar Relatório” e um relatório em PDF será exibido. O relatório produzido pelo LTCalc é apresentado no apêndice E.

Os resultados obtidos pelo LTCalc são apresentados na Tabela 15.

Tabela 14 - Resultado do estudo de caso executado pelo LTCalc.

Impedância de Seq. Zero	0,3156 + j1,0801 ohm/km
Impedância de Seq. Positiva	0,0339 + j0,3182 ohm/km
Impedância de Seq. Negativa	0,0339 + j0,3182 ohm/km
Susceptância Seq. Zero	3,0478.10 ⁻⁶ mho/km
Susceptância Seq. Positiva	5.2067.10 ⁻⁶ mho/km
Susceptância Seq. Negativa	5.2067.10 ⁻⁶ mho/km

Fonte: Elaborada pelo Autor.

5.7 Estudo de caso com o ATP – Line Constant

O preenchimento dos dados no ATP se assemelha ao desenvolvido pelo LTCalc. De início, deve-se configurar na aba “Model” o tipo de estudo, a rede a qual a linha está inserida e o tipo de modelo a ser executado, como segue na Figura 37.

Deve-se ressaltar que a resistividade do solo adotada é 100 ohm.m, a frequência da rede é 60 Hz. Apesar de não necessitar do comprimento da linha para o estudo, o ATP requer que um comprimento seja inserido para seus estudos de transitório, dessa forma, adota-

se para somente a realização do cálculo dos parâmetros de linha um comprimento igual a 1 km.

Figura 37 - Aba "Model" do *Line Constant* para a entrada do tipo de estudo e condições de operação da linha.

Fonte: ATPDraw

- Algumas considerações devem ser feitas a respeito dos dados inseridos nesta aba:
- escolheu-se a opção *Overhead Line*, para linhas aéreas;
 - foram marcadas as opções de *Auto bundling* para a inclusão de subcondutores por fase, *Skin effect* para considerar o efeito pelicular e *Segmented ground* informando que os cabos para-raios são aterrados em cada estrutura;
 - são colocadas no estudo 6 fases (3 fases para o circuito trifásico 1 e 3 fases para o circuito trifásico 2);
 - as unidades de medida a serem trabalhadas estão no em metros e em seus derivados (quilometro e centímetro);

- e) o modelo escolhido é o modelo PI onde no cartão de saída são impressas tanto as matrizes da impedância série, quanto as da capacitância da linha de transmissão.
- f) os dados referentes a seção *Standard data* são os dados do sistema o qual a linha está inserida, como a resistividade do solo dada em ohm.m, neste caso 100 ohm.m, a frequência da rede, 60Hz para o sistema brasileiro, e o comprimento da linha (parâmetro este somente usado para a análise de transitórios do programa).

Na aba “Data” são inseridos os dados dos cabos, condutor e para-raio, e é exibida na Figura 38.

Figura 38 - Aba "Cable Data" para a entrada de dados referentes ao cabos utilizados.

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	5.19	12.105	0.1321	-9	46.5	27.8	20	0	4
2	2	5.19	12.105	0.1321	-9	36.5	17.8	20	0	4
3	3	5.19	12.105	0.1321	-9	26.5	7.8	20	0	4
4	4	5.19	12.105	0.1321	9	26.5	7.8	20	0	4
5	5	5.19	12.105	0.1321	9	36.5	17.8	20	0	4
6	6	5.19	12.105	0.1321	9	46.5	27.8	20	0	4
7	0	0	0.56	1.4564	11	56	41.8	0	0	0
8	0	0	0.56	1.4564	-11	56	41.8	0	0	0

Fonte: ATPDraw

Algumas considerações devem ser feitas a respeito dos dados inseridos nesta aba:

- a) as fases são numeradas de 1 a 6 e os cabos para-raios possuindo numeração 0 (zero);
- b) os valores de raio interno (R_{in}), raio externo (R_{out}), resistência CC (R_{resis}), distância horizontal de cada cabo ao centro do poste (H_{horiz}), altura máxima (V_{tower}) e mínima (V_{mid}) do cabo, distância entre subcondutores (S_{epar}), ângulo de rotação (α) e a quantidade de subcondutores (N_B) estão conforme fornecidos nas Tabelas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7.

Ao pressionar o botão “Export” será gerado o cartão dos dados de entrada do estudo para futuras aplicações. Para este estudo de caso, o cartão pode ser conferido no anexo A.

Ao pressionar o botão “Run ATP” será gerado o cartão de saída ou cartão de resultados do estudo para. Para este estudo de caso, o cartão pode ser conferido no anexo B.

Os resultados obtidos pelo ATP são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultado do estudo de caso executado pelo ATP.

Impedância de Seq. Zero	0,3158 + j1,0805 ohm/km
Impedância de Seq. Positiva	0,0339 + j0,3182 ohm/km
Impedância de Seq. Negativa	0,0339 + j0,3182 ohm/km
Susceptância Seq. Zero	$3,04782 \cdot 10^{-6}$ mho/km
Susceptância Seq. Positiva	$5.2067 \cdot 10^{-6}$ mho/km
Susceptância Seq. Negativa	$5.2067 \cdot 10^{-6}$ mho/km

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Tabela 16 resume os dados obtidos tanto pelo LTCalc quanto pelo ATP para este estudo de caso, além de incluir a diferença entre valores em percentagem, tomando como valor de base os obtidos pelo *Line Constant*.

Tabela 16 - Comparativo dos resultados obtidos pelo LTCalc e pelo Line Constant

Dados Obtidos	LTCalc	<i>Line Constant</i>	Diferença entre valores com relação ao <i>Line Constant</i> (%)
Impedância de Seq. Zero	0,3156 + j1,0801	0,3158 + j1,0805	0,039
Impedância de Seq. Positiva	0,0339 + j0,3182	0,0339 + j0,3182	0,000
Impedância de Seq. Negativa	0,0339 + j0,3182	0,0339 + j0,3182	0,000
Susceptância Seq. Zero	$3,0478 \cdot 10^{-6}$	$3,0478 \cdot 10^{-6}$	0,000
Susceptância Seq. Positiva	$5.2067 \cdot 10^{-6}$	$5.2067 \cdot 10^{-6}$	0,000
Susceptância Seq. Negativa	$5.2067 \cdot 10^{-6}$	$5.2067 \cdot 10^{-6}$	0,000

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Pela Tabela 16, percebe-se que as diferenças entre valores são nulas para as impedâncias de sequência positiva e negativa e para a susceptância de sequência positiva. Uma diferença de 0,039% é obtida nas impedâncias de sequência zero. Dessa forma, pode-se concluir que o software desenvolvido foi validado e pode ser utilizado por profissionais nos estudos dos parâmetros de linhas de transmissão.

5.8 Conclusão

Este capítulo abordou um exemplo prático de aplicação de cálculo dos parâmetros de linhas de transmissão. Foi possível montar tanto a matriz de impedância quanto de potencial, cada uma com dimensão 26 x 26, que, após cálculos de redução da matriz, foi obtido tanto as impedâncias quanto as capacitâncias de sequência zero, positiva e negativa de cada circuito, como mostrado na Tabelas 12 e 13, respectivamente.

O mesmo estudo foi reproduzido tanto pelo LTCalc quanto pelo *Line Constant*. O resultado que mais diferiu entre os dois foi a impedância de sequência zero, cujo erro é de 0,039% com base no valor do *Line Constant*, todos os outros foram erros nulos, validando assim o software desenvolvido.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o procedimento de cálculo para a formação das matrizes de impedância e de capacitância de linhas de transmissão aéreas, bem como a abordagem de desenvolvimento de uma ferramenta computacional, que realiza todo o equacionamento explorado, validada por um outro software referência em estudos de linhas de transmissão o *Line Constant*.

No capítulo 2 foram abordados os dados necessários para realizar o cálculo das matrizes que basicamente se resume a constituição do cabo utilizado, tanto condutor quanto para-raio, e sua disposição na estrutura de transmissão.

De posse de todas as informações necessárias, são calculados os termos da diagonal principal, chamados de próprios, e fora da diagonal principal, chamado de mútuos, tanto da matriz de impedância, quanto da matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell.

As impedâncias ditas próprias foram particionadas nas impedâncias interna, na reatância própria e no método de correção do efeito do solo proposto por Carson. As impedâncias mutuas foram particionadas em duas impedâncias, a reatância mútua e a pare corretiva de Carson.

Tendo todos os termos da matriz calculados, foi possível construtor a matriz de impedância total e a matriz de potencial total. Foi mostrado que essas matrizes possuem dimensão igual ao número de cabos presentes na estrutura, e dependendo da linha, podem se tornar trabalhosas em seu desenvolvimento, tal como a presença de cabos para-raios, subcondutores por fase e a divisão de dois circuitos em uma mesma estrutura, chamado de circuito duplo. Dessa forma, no capítulo 3 foram apresentados métodos de redução da matriz total para uma matriz que contenha apenas as informações de cada fase ou de componente simétrica.

Expostos o processo de formação das matrizes e sua redução, foi apresentado no capítulo 4 o software LTCalc, desenvolvido para a auxiliar no estudo do cálculo dos parâmetros das linhas de transmissão. Na sua abordagem, foi detalhado o funcionamento de cada tela, o processo de cadastro de cabos e estruturas para futuros estudos, apresentação de resultados e sua correspondência com a sub-rotina *Line Constant*.

Sendo sua motivação ser um software com uma interface amigável e de simples implementação de um estudo, onde o usuário pode usufruir do programa com maior segurança nos dados de entrada e explorar os resultados vistos de forma mais compacta por

meio de um relatório técnico, o LTCalc consegue propor aqui para o motivo o qual foi elaborado. Em comparação com o *Line Constant*, o usuário deverá possuir uma maior facilidade de realizar seu estudo pelo software desenvolvido.

A principal dificuldade para a elaboração do software foi a laboração de todo artifício matemático apresentado no capítulo 2, pois o programa deve contar com a capacidade de construir e analisar matrizes de dimensão variável de acordo com a estrutura cadastrada.

No capítulo 5, um estudo de caso para uma linha de transmissão de 500 kV foi elaborado para melhor entendimento das equações apresentadas ao longo do trabalho. Cada resultado parcial foi exposto e comentado. Na ferramenta desenvolvida o mesmo caso foi executado, bem como na sub-rotina *Line Constant*. A diferença do valor obtido pelo software referência, ATP, com o desenvolvido, LTCalc, foi de 0 a 0,039%, valor este aceitável para a validação do software.

Para trabalhos futuros, sugere-se a inclusão do cálculo dos parâmetros de linha para linhas subterrâneas de transmissão no software LTCalc, tornando-o o mais genérico possível e aplicável como um todo por qualquer sistema de potência.

REFERÊNCIAS

- AMON F., Jorge; PEREIRA, Marco Polo. Curso básico sobre a utilização do ATP. 2. ed. Rio de Janeiro. CLAUÉ, 1996.
- CARSON, J.R. **Wave propagation in overhead wires with ground return**. Bell System Technical Journal, vol. 5, pp. 539-54, 1926.
- CAVALCANTE NETO, T. N. **Disciplina transmissão de energia elétrica**: notas de aula. UFC. Fortaleza. 2013.
- EMTP.**ATP: Alternative Transients Program Rule Book**. Leuven, K.U Leuven EMTP Center, 1987.
- FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica**: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos; Itajubá, Escola Federal de Engenharia, 1977.
- KERSTING, William H. **Distribution system modeling and analysis**. 1. ed. Las Cruces. New Mexico State University, 2001.
- NEXANS. **Catálogo condutores de alumínio nus**. Rio de Janeiro, 2013.
- STEVENSON, William D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2. ed. São Paulo. McGraw-Hill, 1986.
- TELCON. **Catálogo cabo de guarda com fibra óptica OPGW: OPGW 24SM 11.7TC-10AG**. Sorocaba, 2011.
- THE ALUMINIUM ASSOCIATION. **Aluminum Electrical Conductor handbook**. 1. ed. Washington, DC. 1989.
- UMARJI, Hussein. **Cálculo de parâmetros de linhas aéreas para redes de distribuição**. Dissertação - (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
- WEDY, Germano Ferreira. **Inclusão do Efeito Corona em Modelos de Linhas de Transmissão Bifásica Utilizando a Técnica de Variáveis de Estado**. Dissertação - (Mestrado em Engenharia Elétrica). Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2009.
- ZANETTA JUNIOR, Luiz Cera. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. São Paulo. Editora Livraria da Física, 2005.

APÊNDICE A – FUNÇÕES DE BESSEL NA SUA FORMA POLINOMIAL

$$ber(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{4n}}{2^{4n} \cdot [(2n)!]^2}$$

$$bei(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{4n+2}}{2^{4n+2} \cdot [(2n+1)!]^2}$$

$$ker(x) = \frac{\pi}{4} \cdot bei(x) - \left[\gamma + \ln\left(\frac{x}{2}\right) \right] \cdot ber(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{4n}}{2^{4n} \cdot [(2n)!]^2} \sum_{m=1}^{2n} \frac{1}{m}$$

$$kei(x) = -\frac{\pi}{4} \cdot ber(x) - \left[\gamma + \ln\left(\frac{x}{2}\right) \right] \cdot bei(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{4n-2}}{2^{4n-2} \cdot [(2n-1)!]^2} \sum_{m=1}^{2n-1} \frac{1}{m}$$

$$ber'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{4n-1}}{2^{4n-1} \cdot (2n-1)! \cdot (2n)!}$$

$$bei'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{4n+1}}{2^{4n+1} \cdot (2n)! \cdot (2n+1)!}$$

$$ker'(x) = \frac{\pi}{4} \cdot bei'(x) - \left[\gamma + \ln\left(\frac{x}{2}\right) \right] \cdot ber'(x) - \frac{1}{x} \cdot ber(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{4n-1}}{2^{4n-1} \cdot (2n)! \cdot (2n-1)!} \sum_{m=1}^{2n} \frac{1}{m}$$

$$kei'(x) = -\frac{\pi}{4} \cdot ber'(x) - \left[\gamma + \ln\left(\frac{x}{2}\right) \right] \cdot bei'(x) - \frac{1}{x} \cdot bei(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{4n-3}}{2^{4n-3} \cdot (2n-1)! \cdot (2n-2)!} \sum_{m=1}^{2n-1} \frac{1}{m}$$

$$\gamma = \lim_{x \rightarrow \infty} \left[1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{x} - \ln(x) \right] \square 0,5772$$

**APÊNDICE B – IMPEDÂNCIAS INTERNAS, PRÓPRIAS, MÚTUAS E DE CARSON
PARA O ESTUDO DE CASO**

Condutor	Zinterna[ohm/km]	Xpropria[ohm/km]	Xmutua[ohm/km]	Zcarson[ohm/km]
1	0.1325+j0.0136	j0.4774	Não se aplica	0.0540+j0.1957
2	0.1325+j0.0136	j0.4512	Não se aplica	0.0555+j0.2204
3	0.1325+j0.0136	j0.4106	Não se aplica	0.0570+j0.2594
4	0.1325+j0.0136	j0.4774	Não se aplica	0.0540+j0.1957
5	0.1325+j0.0136	j0.4512	Não se aplica	0.0555+j0.2204
6	0.1325+j0.0136	j0.4106	Não se aplica	0.0570+j0.2594
7	0.1325+j0.0136	j0.4777	Não se aplica	0.0539+j0.1954
8	0.1325+j0.0136	j0.4516	Não se aplica	0.0555+j0.2199
9	0.1325+j0.0136	j0.4114	Não se aplica	0.0570+j0.2586
10	0.1325+j0.0136	j0.4777	Não se aplica	0.0539+j0.1954
11	0.1325+j0.0136	j0.4516	Não se aplica	0.0555+j0.2199
12	0.1325+j0.0136	j0.4114	Não se aplica	0.0570+j0.2586
13	0.1325+j0.0136	j0.4774	Não se aplica	0.0540+j0.1957
14	0.1325+j0.0136	j0.4512	Não se aplica	0.0555+j0.2204
15	0.1325+j0.0136	j0.4106	Não se aplica	0.0570+j0.2594
16	0.1325+j0.0136	j0.4774	Não se aplica	0.0540+j0.1957
17	0.1325+j0.0136	j0.4512	Não se aplica	0.0555+j0.2204
18	0.1325+j0.0136	j0.4106	Não se aplica	0.0570+j0.2594
19	0.1325+j0.0136	j0.4771	Não se aplica	0.0540+j0.1960
20	0.1325+j0.0136	j0.4507	Não se aplica	0.0555+j0.2208
21	0.1325+j0.0136	j0.4099	Não se aplica	0.0571+j0.2601
22	0.1325+j0.0136	j0.4771	Não se aplica	0.0540+j0.1960
23	0.1325+j0.0136	j0.4507	Não se aplica	0.0555+j0.2208
24	0.1325+j0.0136	j0.4099	Não se aplica	0.0571+j0.2601
25	1.4565+j0.0189	j0.7327	Não se aplica	0.0520+j0.1740
26	1.4565+j0.0189	j0.7327	Não se aplica	0.0520+j0.1740

Condutor	Zinterna[ohm/km]	Xpropria[ohm/km]	Xmutua[ohm/km]	Zcarson[ohm/km]
1 e 2	Não se aplica	Não se aplica	j0.1326	0.0547+j0.2069
1 e 3	Não se aplica	Não se aplica	j0.0661	0.0555+j0.2204
1 e 4	Não se aplica	Não se aplica	j0.1040	0.0540+j0.1932
1 e 5	Não se aplica	Não se aplica	j0.0824	0.0547+j0.2035
1 e 6	Não se aplica	Não se aplica	j0.0491	0.0555+j0.2156
1 e 7	Não se aplica	Não se aplica	j0.4397	0.0539+j0.1955
1 e 8	Não se aplica	Não se aplica	j0.1339	0.0547+j0.2067
1 e 9	Não se aplica	Não se aplica	j0.0669	0.0555+j0.2202
1 e 10	Não se aplica	Não se aplica	j0.1035	0.0539+j0.1930
1 e 11	Não se aplica	Não se aplica	j0.0824	0.0547+j0.2033
1 e 12	Não se aplica	Não se aplica	j0.0494	0.0555+j0.2153
1 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.4134	0.0540+j0.1957
1 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.1326	0.0547+j0.2069
1 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.0661	0.0555+j0.2204
1 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.1028	0.0540+j0.1931
1 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.0816	0.0547+j0.2034
1 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0487	0.0555+j0.2154
1 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.4394	0.0540+j0.1958
1 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.1314	0.0547+j0.2071
1 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0654	0.0555+j0.2206
1 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.1032	0.0540+j0.1933
1 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0816	0.0547+j0.2036
1 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0484	0.0555+j0.2157
1 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.1394	0.0530+j0.1839
1 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0952	0.0530+j0.1817
2 e 3	Não se aplica	Não se aplica	j0.1008	0.0563+j0.2372
2 e 4	Não se aplica	Não se aplica	j0.0824	0.0547+j0.2035
2 e 5	Não se aplica	Não se aplica	j0.0801	0.0555+j0.2156
2 e 6	Não se aplica	Não se aplica	j0.0546	0.0563+j0.2298
2 e 7	Não se aplica	Não se aplica	j0.1317	0.0547+j0.2067

2 e 8	Não se aplica	Não se aplica	j0.4136	0.0555+j0.2202
2 e 9	Não se aplica	Não se aplica	j0.1021	0.0563+j0.2369
2 e 10	Não se aplica	Não se aplica	j0.0819	0.0547+j0.2033
2 e 11	Não se aplica	Não se aplica	j0.0797	0.0555+j0.2153
2 e 12	Não se aplica	Não se aplica	j0.0548	0.0563+j0.2295
2 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.1326	0.0547+j0.2069
2 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.3872	0.0555+j0.2204
2 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.1008	0.0563+j0.2372
2 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.0816	0.0547+j0.2034
2 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.0790	0.0555+j0.2154
2 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0539	0.0563+j0.2296
2 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.1335	0.0547+j0.2071
2 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.4131	0.0555+j0.2206
2 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0994	0.0563+j0.2374
2 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.0821	0.0547+j0.2036
2 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0793	0.0555+j0.2157
2 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0538	0.0563+j0.2299
2 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0859	0.0538+j0.1931
2 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0673	0.0538+j0.1903
3 e 4	Não se aplica	Não se aplica	j0.0491	0.0555+j0.2156
3 e 5	Não se aplica	Não se aplica	j0.0546	0.0563+j0.2298
3 e 6	Não se aplica	Não se aplica	j0.0473	0.0570+j0.2467
3 e 7	Não se aplica	Não se aplica	j0.0658	0.0555+j0.2202
3 e 8	Não se aplica	Não se aplica	j0.1000	0.0563+j0.2369
3 e 9	Não se aplica	Não se aplica	j0.3732	0.0570+j0.2590
3 e 10	Não se aplica	Não se aplica	j0.0488	0.0555+j0.2153
3 e 11	Não se aplica	Não se aplica	j0.0543	0.0563+j0.2295
3 e 12	Não se aplica	Não se aplica	j0.0472	0.0570+j0.2463
3 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.0661	0.0555+j0.2204
3 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.1008	0.0563+j0.2372
3 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.3466	0.0570+j0.2594
3 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.0487	0.0555+j0.2154
3 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.0539	0.0563+j0.2296
3 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0465	0.0570+j0.2464
3 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.0664	0.0555+j0.2206
3 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.1016	0.0563+j0.2374
3 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.3724	0.0571+j0.2598
3 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.0490	0.0555+j0.2157
3 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0543	0.0563+j0.2299
3 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0466	0.0571+j0.2468
3 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0468	0.0545+j0.2039
3 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0388	0.0545+j0.2001
4 e 5	Não se aplica	Não se aplica	j0.1326	0.0547+j0.2069
4 e 6	Não se aplica	Não se aplica	j0.0661	0.0555+j0.2204
4 e 7	Não se aplica	Não se aplica	j0.1035	0.0539+j0.1930
4 e 8	Não se aplica	Não se aplica	j0.0824	0.0547+j0.2033
4 e 9	Não se aplica	Não se aplica	j0.0494	0.0555+j0.2153
4 e 10	Não se aplica	Não se aplica	j0.4397	0.0539+j0.1955
4 e 11	Não se aplica	Não se aplica	j0.1339	0.0547+j0.2067
4 e 12	Não se aplica	Não se aplica	j0.0669	0.0555+j0.2202
4 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.1028	0.0540+j0.1931
4 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.0816	0.0547+j0.2034
4 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.0487	0.0555+j0.2154
4 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.4134	0.0540+j0.1957
4 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.1326	0.0547+j0.2069
4 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0661	0.0555+j0.2204
4 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.1032	0.0540+j0.1933
4 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.0816	0.0547+j0.2036
4 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0484	0.0555+j0.2157
4 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.4394	0.0540+j0.1958
4 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.1314	0.0547+j0.2071
4 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0654	0.0555+j0.2206
4 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0952	0.0530+j0.1817
4 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.1394	0.0530+j0.1839
5 e 6	Não se aplica	Não se aplica	j0.1008	0.0563+j0.2372

5 e 7	Não se aplica	Não se aplica	j0.0819	0.0547+j0.2033
5 e 8	Não se aplica	Não se aplica	j0.0797	0.0555+j0.2153
5 e 9	Não se aplica	Não se aplica	j0.0548	0.0563+j0.2295
5 e 10	Não se aplica	Não se aplica	j0.1317	0.0547+j0.2067
5 e 11	Não se aplica	Não se aplica	j0.4136	0.0555+j0.2202
5 e 12	Não se aplica	Não se aplica	j0.1021	0.0563+j0.2369
5 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.0816	0.0547+j0.2034
5 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.0790	0.0555+j0.2154
5 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.0539	0.0563+j0.2296
5 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.1326	0.0547+j0.2069
5 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.3872	0.0555+j0.2204
5 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.1008	0.0563+j0.2372
5 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.0821	0.0547+j0.2036
5 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.0793	0.0555+j0.2157
5 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0538	0.0563+j0.2299
5 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.1335	0.0547+j0.2071
5 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.4131	0.0555+j0.2206
5 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0994	0.0563+j0.2374
5 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0673	0.0538+j0.1903
5 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0859	0.0538+j0.1931
6 e 7	Não se aplica	Não se aplica	j0.0488	0.0555+j0.2153
6 e 8	Não se aplica	Não se aplica	j0.0543	0.0563+j0.2295
6 e 9	Não se aplica	Não se aplica	j0.0472	0.0570+j0.2463
6 e 10	Não se aplica	Não se aplica	j0.0658	0.0555+j0.2202
6 e 11	Não se aplica	Não se aplica	j0.1000	0.0563+j0.2369
6 e 12	Não se aplica	Não se aplica	j0.3732	0.0570+j0.2590
6 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.0487	0.0555+j0.2154
6 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.0539	0.0563+j0.2296
6 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.0465	0.0570+j0.2464
6 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.0661	0.0555+j0.2204
6 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.1008	0.0563+j0.2372
6 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.3466	0.0570+j0.2594
6 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.0490	0.0555+j0.2157
6 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.0543	0.0563+j0.2299
6 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0466	0.0571+j0.2468
6 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.0664	0.0555+j0.2206
6 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.1016	0.0563+j0.2374
6 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.3724	0.0571+j0.2598
6 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0388	0.0545+j0.2001
6 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0468	0.0545+j0.2039
7 e 8	Não se aplica	Não se aplica	j0.1330	0.0547+j0.2065
7 e 9	Não se aplica	Não se aplica	j0.0666	0.0555+j0.2199
7 e 10	Não se aplica	Não se aplica	j0.1031	0.0539+j0.1929
7 e 11	Não se aplica	Não se aplica	j0.0820	0.0547+j0.2031
7 e 12	Não se aplica	Não se aplica	j0.0491	0.0555+j0.2151
7 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.4397	0.0539+j0.1955
7 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.1317	0.0547+j0.2067
7 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.0658	0.0555+j0.2202
7 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.1024	0.0539+j0.1930
7 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.0811	0.0547+j0.2032
7 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0484	0.0555+j0.2152
7 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.4134	0.0540+j0.1957
7 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.1305	0.0547+j0.2069
7 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0651	0.0555+j0.2204
7 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.1028	0.0540+j0.1931
7 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0811	0.0547+j0.2034
7 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0481	0.0555+j0.2154
7 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.1405	0.0530+j0.1838
7 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0952	0.0530+j0.1816
8 e 9	Não se aplica	Não se aplica	j0.1013	0.0563+j0.2366
8 e 10	Não se aplica	Não se aplica	j0.0820	0.0547+j0.2031
8 e 11	Não se aplica	Não se aplica	j0.0794	0.0555+j0.2151
8 e 12	Não se aplica	Não se aplica	j0.0544	0.0563+j0.2291
8 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.1339	0.0547+j0.2067
8 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.4136	0.0555+j0.2202

8 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.1000	0.0563+j0.2369
8 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.0816	0.0547+j0.2032
8 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.0787	0.0555+j0.2152
8 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0536	0.0563+j0.2292
8 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.1348	0.0547+j0.2069
8 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.3872	0.0555+j0.2204
8 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0987	0.0563+j0.2372
8 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.0821	0.0547+j0.2034
8 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0790	0.0555+j0.2154
8 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0534	0.0563+j0.2296
8 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0865	0.0538+j0.1930
8 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0675	0.0538+j0.1901
9 e 10	Não se aplica	Não se aplica	j0.0491	0.0555+j0.2151
9 e 11	Não se aplica	Não se aplica	j0.0544	0.0563+j0.2291
9 e 12	Não se aplica	Não se aplica	j0.0470	0.0570+j0.2459
9 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.0669	0.0555+j0.2202
9 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.1021	0.0563+j0.2369
9 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.3732	0.0570+j0.2590
9 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.0490	0.0555+j0.2152
9 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.0541	0.0563+j0.2292
9 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0463	0.0570+j0.2460
9 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.0672	0.0555+j0.2204
9 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.1030	0.0563+j0.2372
9 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.3466	0.0570+j0.2594
9 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.0493	0.0555+j0.2154
9 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0544	0.0563+j0.2296
9 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0465	0.0570+j0.2464
9 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0473	0.0545+j0.2037
9 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0391	0.0545+j0.1999
10 e 11	Não se aplica	Não se aplica	j0.1330	0.0547+j0.2065
10 e 12	Não se aplica	Não se aplica	j0.0666	0.0555+j0.2199
10 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.1024	0.0539+j0.1930
10 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.0811	0.0547+j0.2032
10 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.0484	0.0555+j0.2152
10 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.4397	0.0539+j0.1955
10 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.1317	0.0547+j0.2067
10 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0658	0.0555+j0.2202
10 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.1028	0.0540+j0.1931
10 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.0811	0.0547+j0.2034
10 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0481	0.0555+j0.2154
10 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.4134	0.0540+j0.1957
10 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.1305	0.0547+j0.2069
10 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0651	0.0555+j0.2204
10 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0952	0.0530+j0.1816
10 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.1405	0.0530+j0.1838
11 e 12	Não se aplica	Não se aplica	j0.1013	0.0563+j0.2366
11 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.0816	0.0547+j0.2032
11 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.0787	0.0555+j0.2152
11 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.0536	0.0563+j0.2292
11 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.1339	0.0547+j0.2067
11 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.4136	0.0555+j0.2202
11 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.1000	0.0563+j0.2369
11 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.0821	0.0547+j0.2034
11 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.0790	0.0555+j0.2154
11 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0534	0.0563+j0.2296
11 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.1348	0.0547+j0.2069
11 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.3872	0.0555+j0.2204
11 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0987	0.0563+j0.2372
11 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0675	0.0538+j0.1901
11 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0865	0.0538+j0.1930
12 e 13	Não se aplica	Não se aplica	j0.0490	0.0555+j0.2152
12 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.0541	0.0563+j0.2292
12 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.0463	0.0570+j0.2460
12 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.0669	0.0555+j0.2202
12 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.1021	0.0563+j0.2369

12 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.3732	0.0570+j0.2590
12 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.0493	0.0555+j0.2154
12 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.0544	0.0563+j0.2296
12 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0465	0.0570+j0.2464
12 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.0672	0.0555+j0.2204
12 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.1030	0.0563+j0.2372
12 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.3466	0.0570+j0.2594
12 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0391	0.0545+j0.1999
12 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0473	0.0545+j0.2037
13 e 14	Não se aplica	Não se aplica	j0.1326	0.0547+j0.2069
13 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.0661	0.0555+j0.2204
13 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.1017	0.0540+j0.1931
13 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.0808	0.0547+j0.2033
13 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0483	0.0555+j0.2153
13 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.4394	0.0540+j0.1958
13 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.1314	0.0547+j0.2071
13 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0654	0.0555+j0.2206
13 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.1021	0.0540+j0.1932
13 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0808	0.0547+j0.2035
13 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0480	0.0555+j0.2155
13 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.1397	0.0530+j0.1839
13 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0945	0.0530+j0.1817
14 e 15	Não se aplica	Não se aplica	j0.1008	0.0563+j0.2372
14 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.0808	0.0547+j0.2033
14 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.0780	0.0555+j0.2153
14 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0533	0.0563+j0.2294
14 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.1335	0.0547+j0.2071
14 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.4131	0.0555+j0.2206
14 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0994	0.0563+j0.2374
14 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.0813	0.0547+j0.2035
14 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0783	0.0555+j0.2155
14 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0531	0.0563+j0.2297
14 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0860	0.0538+j0.1931
14 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0669	0.0538+j0.1902
15 e 16	Não se aplica	Não se aplica	j0.0483	0.0555+j0.2153
15 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.0533	0.0563+j0.2294
15 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0457	0.0570+j0.2460
15 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.0664	0.0555+j0.2206
15 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.1016	0.0563+j0.2374
15 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.3724	0.0571+j0.2598
15 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.0486	0.0555+j0.2155
15 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0536	0.0563+j0.2297
15 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0458	0.0571+j0.2465
15 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0468	0.0545+j0.2039
15 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0386	0.0545+j0.2000
16 e 17	Não se aplica	Não se aplica	j0.1326	0.0547+j0.2069
16 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.0661	0.0555+j0.2204
16 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.1021	0.0540+j0.1932
16 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.0808	0.0547+j0.2035
16 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0480	0.0555+j0.2155
16 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.4394	0.0540+j0.1958
16 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.1314	0.0547+j0.2071
16 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0654	0.0555+j0.2206
16 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0945	0.0530+j0.1817
16 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.1397	0.0530+j0.1839
17 e 18	Não se aplica	Não se aplica	j0.1008	0.0563+j0.2372
17 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.0813	0.0547+j0.2035
17 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.0783	0.0555+j0.2155
17 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0531	0.0563+j0.2297
17 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.1335	0.0547+j0.2071
17 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.4131	0.0555+j0.2206
17 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0994	0.0563+j0.2374
17 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0669	0.0538+j0.1902
17 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0860	0.0538+j0.1931
18 e 19	Não se aplica	Não se aplica	j0.0486	0.0555+j0.2155

18 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.0536	0.0563+j0.2297
18 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0458	0.0571+j0.2465
18 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.0664	0.0555+j0.2206
18 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.1016	0.0563+j0.2374
18 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.3724	0.0571+j0.2598
18 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0386	0.0545+j0.2000
18 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0468	0.0545+j0.2039
19 e 20	Não se aplica	Não se aplica	j0.1323	0.0548+j0.2072
19 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.0657	0.0555+j0.2208
19 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.1025	0.0540+j0.1934
19 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0813	0.0548+j0.2037
19 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0483	0.0555+j0.2158
19 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.1386	0.0530+j0.1840
19 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0945	0.0530+j0.1818
20 e 21	Não se aplica	Não se aplica	j0.1002	0.0563+j0.2377
20 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.0813	0.0548+j0.2037
20 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0786	0.0555+j0.2158
20 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0535	0.0563+j0.2300
20 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0853	0.0538+j0.1933
20 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0667	0.0538+j0.1904
21 e 22	Não se aplica	Não se aplica	j0.0483	0.0555+j0.2158
21 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.0535	0.0563+j0.2300
21 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0459	0.0571+j0.2469
21 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0463	0.0545+j0.2040
21 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0383	0.0545+j0.2002
22 e 23	Não se aplica	Não se aplica	j0.1323	0.0548+j0.2072
22 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.0657	0.0555+j0.2208
22 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0945	0.0530+j0.1818
22 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.1386	0.0530+j0.1840
23 e 24	Não se aplica	Não se aplica	j0.1002	0.0563+j0.2377
23 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0667	0.0538+j0.1904
23 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0853	0.0538+j0.1933
24 e 25	Não se aplica	Não se aplica	j0.0383	0.0545+j0.2002
24 e 26	Não se aplica	Não se aplica	j0.0463	0.0545+j0.2040

APÊNDICE C – MATRIZES DE IMPEDÂNCIAS

C.1. Matriz de Impedância total 26 x 26.

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.1865+j0.6867	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2972
Linha 2	0.0547+j0.3395	0.1880+j0.6851	0.0563+j0.3380	0.0547+j0.2860
Linha 3	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3380	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2646
Linha 4	0.0540+j0.2972	0.0547+j0.2860	0.0555+j0.2646	0.1865+j0.6867
Linha 5	0.0547+j0.2860	0.0555+j0.2956	0.0563+j0.2844	0.0547+j0.3395
Linha 6	0.0555+j0.2646	0.0563+j0.2844	0.0570+j0.2941	0.0555+j0.2865
Linha 7	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.2860	0.0539+j0.2966
Linha 8	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2858
Linha 9	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2647
Linha 10	0.0539+j0.2966	0.0547+j0.2853	0.0555+j0.2641	0.0539+j0.6353
Linha 11	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2837	0.0547+j0.3406
Linha 12	0.0555+j0.2647	0.0563+j0.2842	0.0570+j0.2935	0.0555+j0.2870
Linha 13	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2960
Linha 14	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3379	0.0547+j0.2851
Linha 15	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3379	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2641
Linha 16	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2641	0.0540+j0.6091
Linha 17	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835	0.0547+j0.3395
Linha 18	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2865
Linha 19	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870	0.0540+j0.2966
Linha 20	0.0547+j0.3384	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390	0.0547+j0.2852
Linha 21	0.0555+j0.2859	0.0563+j0.3369	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2641
Linha 22	0.0540+j0.2966	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2647	0.0540+j0.6352
Linha 23	0.0547+j0.2852	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2842	0.0547+j0.3384
Linha 24	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2837	0.0571+j0.2935	0.0555+j0.2859
Linha 25	0.0530+j0.3234	0.0538+j0.2790	0.0545+j0.2507	0.0530+j0.2770
Linha 26	0.0530+j0.2770	0.0538+j0.2576	0.0545+j0.2389	0.0530+j0.3234
	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8
Linha 1	0.0547+j0.2860	0.0555+j0.2646	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3406
Linha 2	0.0555+j0.2956	0.0563+j0.2844	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.6337
Linha 3	0.0563+j0.2844	0.0570+j0.2941	0.0555+j0.2860	0.0563+j0.3369
Linha 4	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0539+j0.2966	0.0547+j0.2858

Linha 5	0.1880+j0.6851	0.0563+j0.3380	0.0547+j0.2853	0.0555+j0.2950
Linha 6	0.0563+j0.3380	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2837
Linha 7	0.0547+j0.2853	0.0555+j0.2641	0.1865+j0.6867	0.0547+j0.3395
Linha 8	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2837	0.0547+j0.3395	0.1880+j0.6852
Linha 9	0.0563+j0.2842	0.0570+j0.2935	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3380
Linha 10	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.2860	0.0539+j0.2960	0.0547+j0.2851
Linha 11	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2944
Linha 12	0.0563+j0.3390	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835
Linha 13	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2641	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3406
Linha 14	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.6337
Linha 15	0.0563+j0.2835	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2860	0.0563+j0.3369
Linha 16	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0539+j0.2954	0.0547+j0.2849
Linha 17	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3379	0.0547+j0.2844	0.0555+j0.2938
Linha 18	0.0563+j0.3379	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2636	0.0563+j0.2828
Linha 19	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2647	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3417
Linha 20	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2842	0.0547+j0.3374	0.0555+j0.6076
Linha 21	0.0563+j0.2837	0.0571+j0.2935	0.0555+j0.2854	0.0563+j0.3359
Linha 22	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2856
Linha 23	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390	0.0547+j0.2846	0.0555+j0.2944
Linha 24	0.0563+j0.3369	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2635	0.0563+j0.2830
Linha 25	0.0538+j0.2576	0.0545+j0.2389	0.0530+j0.3243	0.0538+j0.2795
Linha 26	0.0538+j0.2790	0.0545+j0.2507	0.0530+j0.2768	0.0538+j0.2577

	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha 1	0.0555+j0.2870	0.0539+j0.2966	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2647
Linha 2	0.0563+j0.3390	0.0547+j0.2853	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2842
Linha 3	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2837	0.0570+j0.2935
Linha 4	0.0555+j0.2647	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870
Linha 5	0.0563+j0.2842	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390
Linha 6	0.0570+j0.2935	0.0555+j0.2860	0.0563+j0.3369	0.0570+j0.6322
Linha 7	0.0555+j0.2865	0.0539+j0.2960	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2641
Linha 8	0.0563+j0.3380	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835
Linha 9	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835	0.0570+j0.2929
Linha 10	0.0555+j0.2641	0.1865+j0.6867	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865
Linha 11	0.0563+j0.2835	0.0547+j0.3395	0.1880+j0.6852	0.0563+j0.3380
Linha 12	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3380	0.1896+j0.6836
Linha 13	0.0555+j0.2870	0.0539+j0.2954	0.0547+j0.2849	0.0555+j0.2641
Linha 14	0.0563+j0.3390	0.0547+j0.2844	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2833
Linha 15	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2636	0.0563+j0.2828	0.0570+j0.2923

Linha 16	0.0555+j0.2641	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870
Linha 17	0.0563+j0.2833	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390
Linha 18	0.0570+j0.2923	0.0555+j0.2860	0.0563+j0.3369	0.0570+j0.6322
Linha 19	0.0555+j0.2876	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2856	0.0555+j0.2647
Linha 20	0.0563+j0.3401	0.0547+j0.2846	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2840
Linha 21	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2635	0.0563+j0.2830	0.0570+j0.2929
Linha 22	0.0555+j0.2647	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3417	0.0555+j0.2876
Linha 23	0.0563+j0.2840	0.0547+j0.3374	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3401
Linha 24	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2854	0.0563+j0.3359	0.0570+j0.6060
Linha 25	0.0545+j0.2510	0.0530+j0.2768	0.0538+j0.2577	0.0545+j0.2390
Linha 26	0.0545+j0.2390	0.0530+j0.3243	0.0538+j0.2795	0.0545+j0.2510

	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Linha 1	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2960
Linha 2	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3379	0.0547+j0.2851
Linha 3	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3379	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2641
Linha 4	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2641	0.0540+j0.6091
Linha 5	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835	0.0547+j0.3395
Linha 6	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2865
Linha 7	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.2860	0.0539+j0.2954
Linha 8	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2849
Linha 9	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2641
Linha 10	0.0539+j0.2954	0.0547+j0.2844	0.0555+j0.2636	0.0539+j0.6353
Linha 11	0.0547+j0.2849	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2828	0.0547+j0.3406
Linha 12	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2833	0.0570+j0.2923	0.0555+j0.2870
Linha 13	0.1865+j0.6867	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2948
Linha 14	0.0547+j0.3395	0.1880+j0.6851	0.0563+j0.3380	0.0547+j0.2842
Linha 15	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3380	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2636
Linha 16	0.0540+j0.2948	0.0547+j0.2842	0.0555+j0.2636	0.1865+j0.6867
Linha 17	0.0547+j0.2842	0.0555+j0.2932	0.0563+j0.2826	0.0547+j0.3395
Linha 18	0.0555+j0.2636	0.0563+j0.2826	0.0570+j0.2917	0.0555+j0.2865
Linha 19	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870	0.0540+j0.2954
Linha 20	0.0547+j0.3384	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390	0.0547+j0.2843
Linha 21	0.0555+j0.2859	0.0563+j0.3369	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2635
Linha 22	0.0540+j0.2954	0.0547+j0.2848	0.0555+j0.2641	0.0540+j0.6352
Linha 23	0.0547+j0.2843	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2833	0.0547+j0.3384
Linha 24	0.0555+j0.2635	0.0563+j0.2828	0.0571+j0.2923	0.0555+j0.2859
Linha 25	0.0530+j0.3236	0.0538+j0.2791	0.0545+j0.2507	0.0530+j0.2762
Linha 26	0.0530+j0.2762	0.0538+j0.2572	0.0545+j0.2386	0.0530+j0.3236

	Coluna 17	Coluna 18	Coluna 19	Coluna 20
Linha 1	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2641	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3384
Linha 2	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337
Linha 3	0.0563+j0.2835	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390
Linha 4	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2966	0.0547+j0.2852
Linha 5	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3379	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2950
Linha 6	0.0563+j0.3379	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2647	0.0563+j0.2842
Linha 7	0.0547+j0.2844	0.0555+j0.2636	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3374
Linha 8	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2828	0.0547+j0.3417	0.0555+j0.6076
Linha 9	0.0563+j0.2833	0.0570+j0.2923	0.0555+j0.2876	0.0563+j0.3401
Linha 10	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.2860	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2846
Linha 11	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2856	0.0555+j0.2944
Linha 12	0.0563+j0.3390	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2647	0.0563+j0.2840
Linha 13	0.0547+j0.2842	0.0555+j0.2636	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3384
Linha 14	0.0555+j0.2932	0.0563+j0.2826	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337
Linha 15	0.0563+j0.2826	0.0570+j0.2917	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390
Linha 16	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2954	0.0547+j0.2843
Linha 17	0.1880+j0.6851	0.0563+j0.3380	0.0547+j0.2848	0.0555+j0.2938
Linha 18	0.0563+j0.3380	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2833
Linha 19	0.0547+j0.2848	0.0555+j0.2641	0.1865+j0.6867	0.0548+j0.3395
Linha 20	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2833	0.0548+j0.3395	0.1881+j0.6851
Linha 21	0.0563+j0.2828	0.0571+j0.2923	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3379
Linha 22	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870	0.0540+j0.2960	0.0548+j0.2850
Linha 23	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390	0.0548+j0.2850	0.0555+j0.2944
Linha 24	0.0563+j0.3369	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835
Linha 25	0.0538+j0.2572	0.0545+j0.2386	0.0530+j0.3227	0.0538+j0.2786
Linha 26	0.0538+j0.2791	0.0545+j0.2507	0.0530+j0.2763	0.0538+j0.2571

	Coluna 21	Coluna 22	Coluna 23	Coluna 24
Linha 1	0.0555+j0.2859	0.0540+j0.2966	0.0547+j0.2852	0.0555+j0.2641
Linha 2	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2837
Linha 3	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2647	0.0563+j0.2842	0.0571+j0.2935
Linha 4	0.0555+j0.2641	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3384	0.0555+j0.2859
Linha 5	0.0563+j0.2837	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369
Linha 6	0.0571+j0.2935	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390	0.0571+j0.6321
Linha 7	0.0555+j0.2854	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2846	0.0555+j0.2635
Linha 8	0.0563+j0.3359	0.0547+j0.2856	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2830

Linha 9	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2647	0.0563+j0.2840	0.0570+j0.2929
Linha 10	0.0555+j0.2635	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3374	0.0555+j0.2854
Linha 11	0.0563+j0.2830	0.0547+j0.3417	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3359
Linha 12	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2876	0.0563+j0.3401	0.0570+j0.6060
Linha 13	0.0555+j0.2859	0.0540+j0.2954	0.0547+j0.2843	0.0555+j0.2635
Linha 14	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2848	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2828
Linha 15	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2833	0.0571+j0.2923
Linha 16	0.0555+j0.2635	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3384	0.0555+j0.2859
Linha 17	0.0563+j0.2828	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369
Linha 18	0.0571+j0.2923	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390	0.0571+j0.6321
Linha 19	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2960	0.0548+j0.2850	0.0555+j0.2641
Linha 20	0.0563+j0.3379	0.0548+j0.2850	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835
Linha 21	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835	0.0571+j0.2929
Linha 22	0.0555+j0.2641	0.1865+j0.6867	0.0548+j0.3395	0.0555+j0.2865
Linha 23	0.0563+j0.2835	0.0548+j0.3395	0.1881+j0.6851	0.0563+j0.3379
Linha 24	0.0571+j0.2929	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3379	0.1896+j0.6836
Linha 25	0.0545+j0.2504	0.0530+j0.2763	0.0538+j0.2571	0.0545+j0.2385
Linha 26	0.0545+j0.2385	0.0530+j0.3227	0.0538+j0.2786	0.0545+j0.2504

Coluna 25

Coluna 26

Linha 1	0.0530+j0.3234	0.0530+j0.2770
Linha 2	0.0538+j0.2790	0.0538+j0.2576
Linha 3	0.0545+j0.2507	0.0545+j0.2389
Linha 4	0.0530+j0.2770	0.0530+j0.3234
Linha 5	0.0538+j0.2576	0.0538+j0.2790
Linha 6	0.0545+j0.2389	0.0545+j0.2507
Linha 7	0.0530+j0.3243	0.0530+j0.2768
Linha 8	0.0538+j0.2795	0.0538+j0.2577
Linha 9	0.0545+j0.2510	0.0545+j0.2390
Linha 10	0.0530+j0.2768	0.0530+j0.3243
Linha 11	0.0538+j0.2577	0.0538+j0.2795
Linha 12	0.0545+j0.2390	0.0545+j0.2510
Linha 13	0.0530+j0.3236	0.0530+j0.2762
Linha 14	0.0538+j0.2791	0.0538+j0.2572
Linha 15	0.0545+j0.2507	0.0545+j0.2386
Linha 16	0.0530+j0.2762	0.0530+j0.3236
Linha 17	0.0538+j0.2572	0.0538+j0.2791
Linha 18	0.0545+j0.2386	0.0545+j0.2507
Linha 19	0.0530+j0.3227	0.0530+j0.2763

Linha 20	0.0538+j0.2786	0.0538+j0.2571
Linha 21	0.0545+j0.2504	0.0545+j0.2385
Linha 22	0.0530+j0.2763	0.0530+j0.3227
Linha 23	0.0538+j0.2571	0.0538+j0.2786
Linha 24	0.0545+j0.2385	0.0545+j0.2504
Linha 25	1.5086+j0.9256	0.0520+j0.2828
Linha 26	0.0520+j0.2828	1.5086+j0.9256

C.2. Matrizes para a redução dos cabos para-raios da matriz de impedância total 26 x 26 e a matriz reduzida 24 x 24.

- **Matriz Z_{condutor} 24 x 24:**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.1865+j0.6867	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2972
Linha 2	0.0547+j0.3395	0.1880+j0.6851	0.0563+j0.3380	0.0547+j0.2860
Linha 3	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3380	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2646
Linha 4	0.0540+j0.2972	0.0547+j0.2860	0.0555+j0.2646	0.1865+j0.6867
Linha 5	0.0547+j0.2860	0.0555+j0.2956	0.0563+j0.2844	0.0547+j0.3395
Linha 6	0.0555+j0.2646	0.0563+j0.2844	0.0570+j0.2941	0.0555+j0.2865
Linha 7	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.2860	0.0539+j0.2966
Linha 8	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2858
Linha 9	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2647
Linha 10	0.0539+j0.2966	0.0547+j0.2853	0.0555+j0.2641	0.0539+j0.6353
Linha 11	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2837	0.0547+j0.3406
Linha 12	0.0555+j0.2647	0.0563+j0.2842	0.0570+j0.2935	0.0555+j0.2870
Linha 13	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2960
Linha 14	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3379	0.0547+j0.2851
Linha 15	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3379	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2641
Linha 16	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2641	0.0540+j0.6091
Linha 17	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835	0.0547+j0.3395
Linha 18	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2865
Linha 19	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870	0.0540+j0.2966
Linha 20	0.0547+j0.3384	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390	0.0547+j0.2852
Linha 21	0.0555+j0.2859	0.0563+j0.3369	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2641
Linha 22	0.0540+j0.2966	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2647	0.0540+j0.6352
Linha 23	0.0547+j0.2852	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2842	0.0547+j0.3384
Linha 24	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2837	0.0571+j0.2935	0.0555+j0.2859

	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8
Linha 1	0.0547+j0.2860	0.0555+j0.2646	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3406
Linha 2	0.0555+j0.2956	0.0563+j0.2844	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.6337
Linha 3	0.0563+j0.2844	0.0570+j0.2941	0.0555+j0.2860	0.0563+j0.3369
Linha 4	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0539+j0.2966	0.0547+j0.2858
Linha 5	0.1880+j0.6851	0.0563+j0.3380	0.0547+j0.2853	0.0555+j0.2950
Linha 6	0.0563+j0.3380	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2837
Linha 7	0.0547+j0.2853	0.0555+j0.2641	0.1865+j0.6867	0.0547+j0.3395
Linha 8	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2837	0.0547+j0.3395	0.1880+j0.6852
Linha 9	0.0563+j0.2842	0.0570+j0.2935	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3380
Linha 10	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.2860	0.0539+j0.2960	0.0547+j0.2851
Linha 11	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2944
Linha 12	0.0563+j0.3390	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835
Linha 13	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2641	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3406
Linha 14	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.6337
Linha 15	0.0563+j0.2835	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2860	0.0563+j0.3369
Linha 16	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0539+j0.2954	0.0547+j0.2849
Linha 17	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3379	0.0547+j0.2844	0.0555+j0.2938
Linha 18	0.0563+j0.3379	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2636	0.0563+j0.2828
Linha 19	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2647	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3417
Linha 20	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2842	0.0547+j0.3374	0.0555+j0.6076
Linha 21	0.0563+j0.2837	0.0571+j0.2935	0.0555+j0.2854	0.0563+j0.3359
Linha 22	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2856
Linha 23	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390	0.0547+j0.2846	0.0555+j0.2944
Linha 24	0.0563+j0.3369	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2635	0.0563+j0.2830
	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha 1	0.0555+j0.2870	0.0539+j0.2966	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2647
Linha 2	0.0563+j0.3390	0.0547+j0.2853	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2842
Linha 3	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2837	0.0570+j0.2935
Linha 4	0.0555+j0.2647	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870
Linha 5	0.0563+j0.2842	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390
Linha 6	0.0570+j0.2935	0.0555+j0.2860	0.0563+j0.3369	0.0570+j0.6322
Linha 7	0.0555+j0.2865	0.0539+j0.2960	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2641
Linha 8	0.0563+j0.3380	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835
Linha 9	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835	0.0570+j0.2929
Linha 10	0.0555+j0.2641	0.1865+j0.6867	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865
Linha 11	0.0563+j0.2835	0.0547+j0.3395	0.1880+j0.6852	0.0563+j0.3380
Linha 12	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3380	0.1896+j0.6836

Linha 13	0.0555+j0.2870	0.0539+j0.2954	0.0547+j0.2849	0.0555+j0.2641
Linha 14	0.0563+j0.3390	0.0547+j0.2844	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2833
Linha 15	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2636	0.0563+j0.2828	0.0570+j0.2923
Linha 16	0.0555+j0.2641	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870
Linha 17	0.0563+j0.2833	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390
Linha 18	0.0570+j0.2923	0.0555+j0.2860	0.0563+j0.3369	0.0570+j0.6322
Linha 19	0.0555+j0.2876	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2856	0.0555+j0.2647
Linha 20	0.0563+j0.3401	0.0547+j0.2846	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2840
Linha 21	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2635	0.0563+j0.2830	0.0570+j0.2929
Linha 22	0.0555+j0.2647	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3417	0.0555+j0.2876
Linha 23	0.0563+j0.2840	0.0547+j0.3374	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3401
Linha 24	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2854	0.0563+j0.3359	0.0570+j0.6060

	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Linha 1	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2960
Linha 2	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3379	0.0547+j0.2851
Linha 3	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3379	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2641
Linha 4	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2641	0.0540+j0.6091
Linha 5	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835	0.0547+j0.3395
Linha 6	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2865
Linha 7	0.0539+j0.6353	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.2860	0.0539+j0.2954
Linha 8	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2849
Linha 9	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2641
Linha 10	0.0539+j0.2954	0.0547+j0.2844	0.0555+j0.2636	0.0539+j0.6353
Linha 11	0.0547+j0.2849	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2828	0.0547+j0.3406
Linha 12	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2833	0.0570+j0.2923	0.0555+j0.2870
Linha 13	0.1865+j0.6867	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2948
Linha 14	0.0547+j0.3395	0.1880+j0.6851	0.0563+j0.3380	0.0547+j0.2842
Linha 15	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3380	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2636
Linha 16	0.0540+j0.2948	0.0547+j0.2842	0.0555+j0.2636	0.1865+j0.6867
Linha 17	0.0547+j0.2842	0.0555+j0.2932	0.0563+j0.2826	0.0547+j0.3395
Linha 18	0.0555+j0.2636	0.0563+j0.2826	0.0570+j0.2917	0.0555+j0.2865
Linha 19	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870	0.0540+j0.2954
Linha 20	0.0547+j0.3384	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390	0.0547+j0.2843
Linha 21	0.0555+j0.2859	0.0563+j0.3369	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2635
Linha 22	0.0540+j0.2954	0.0547+j0.2848	0.0555+j0.2641	0.0540+j0.6352
Linha 23	0.0547+j0.2843	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2833	0.0547+j0.3384
Linha 24	0.0555+j0.2635	0.0563+j0.2828	0.0571+j0.2923	0.0555+j0.2859

	Coluna 17	Coluna 18	Coluna 19	Coluna 20
Linha 1	0.0547+j0.2851	0.0555+j0.2641	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3384
Linha 2	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337
Linha 3	0.0563+j0.2835	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390
Linha 4	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2966	0.0547+j0.2852
Linha 5	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3379	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2950
Linha 6	0.0563+j0.3379	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2647	0.0563+j0.2842
Linha 7	0.0547+j0.2844	0.0555+j0.2636	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3374
Linha 8	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2828	0.0547+j0.3417	0.0555+j0.6076
Linha 9	0.0563+j0.2833	0.0570+j0.2923	0.0555+j0.2876	0.0563+j0.3401
Linha 10	0.0547+j0.3385	0.0555+j0.2860	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2846
Linha 11	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2856	0.0555+j0.2944
Linha 12	0.0563+j0.3390	0.0570+j0.6322	0.0555+j0.2647	0.0563+j0.2840
Linha 13	0.0547+j0.2842	0.0555+j0.2636	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3384
Linha 14	0.0555+j0.2932	0.0563+j0.2826	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337
Linha 15	0.0563+j0.2826	0.0570+j0.2917	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390
Linha 16	0.0547+j0.3395	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2954	0.0547+j0.2843
Linha 17	0.1880+j0.6851	0.0563+j0.3380	0.0547+j0.2848	0.0555+j0.2938
Linha 18	0.0563+j0.3380	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2833
Linha 19	0.0547+j0.2848	0.0555+j0.2641	0.1865+j0.6867	0.0548+j0.3395
Linha 20	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2833	0.0548+j0.3395	0.1881+j0.6851
Linha 21	0.0563+j0.2828	0.0571+j0.2923	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3379
Linha 22	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.2870	0.0540+j0.2960	0.0548+j0.2850
Linha 23	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3390	0.0548+j0.2850	0.0555+j0.2944
Linha 24	0.0563+j0.3369	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835

	Coluna 21	Coluna 22	Coluna 23	Coluna 24
Linha 1	0.0555+j0.2859	0.0540+j0.2966	0.0547+j0.2852	0.0555+j0.2641
Linha 2	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2858	0.0555+j0.2950	0.0563+j0.2837
Linha 3	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2647	0.0563+j0.2842	0.0571+j0.2935
Linha 4	0.0555+j0.2641	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3384	0.0555+j0.2859
Linha 5	0.0563+j0.2837	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369
Linha 6	0.0571+j0.2935	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390	0.0571+j0.6321
Linha 7	0.0555+j0.2854	0.0540+j0.2960	0.0547+j0.2846	0.0555+j0.2635
Linha 8	0.0563+j0.3359	0.0547+j0.2856	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2830
Linha 9	0.0570+j0.6060	0.0555+j0.2647	0.0563+j0.2840	0.0570+j0.2929
Linha 10	0.0555+j0.2635	0.0540+j0.6091	0.0547+j0.3374	0.0555+j0.2854
Linha 11	0.0563+j0.2830	0.0547+j0.3417	0.0555+j0.6076	0.0563+j0.3359
Linha 12	0.0570+j0.2929	0.0555+j0.2876	0.0563+j0.3401	0.0570+j0.6060

Linha 13	0.0555+j0.2859	0.0540+j0.2954	0.0547+j0.2843	0.0555+j0.2635
Linha 14	0.0563+j0.3369	0.0547+j0.2848	0.0555+j0.2938	0.0563+j0.2828
Linha 15	0.0571+j0.6321	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2833	0.0571+j0.2923
Linha 16	0.0555+j0.2635	0.0540+j0.6352	0.0547+j0.3384	0.0555+j0.2859
Linha 17	0.0563+j0.2828	0.0547+j0.3406	0.0555+j0.6337	0.0563+j0.3369
Linha 18	0.0571+j0.2923	0.0555+j0.2870	0.0563+j0.3390	0.0571+j0.6321
Linha 19	0.0555+j0.2865	0.0540+j0.2960	0.0548+j0.2850	0.0555+j0.2641
Linha 20	0.0563+j0.3379	0.0548+j0.2850	0.0555+j0.2944	0.0563+j0.2835
Linha 21	0.1896+j0.6836	0.0555+j0.2641	0.0563+j0.2835	0.0571+j0.2929
Linha 22	0.0555+j0.2641	0.1865+j0.6867	0.0548+j0.3395	0.0555+j0.2865
Linha 23	0.0563+j0.2835	0.0548+j0.3395	0.1881+j0.6851	0.0563+j0.3379
Linha 24	0.0571+j0.2929	0.0555+j0.2865	0.0563+j0.3379	0.1896+j0.6836

- **Matriz $Z_{\text{condutor_para-raio}}$ 24 x 2:**

	Coluna 1	Coluna 2
Linha 1	0.0530+j0.3234	0.0530+j0.2770
Linha 2	0.0538+j0.2790	0.0538+j0.2576
Linha 3	0.0545+j0.2507	0.0545+j0.2389
Linha 4	0.0530+j0.2770	0.0530+j0.3234
Linha 5	0.0538+j0.2576	0.0538+j0.2790
Linha 6	0.0545+j0.2389	0.0545+j0.2507
Linha 7	0.0530+j0.3243	0.0530+j0.2768
Linha 8	0.0538+j0.2795	0.0538+j0.2577
Linha 9	0.0545+j0.2510	0.0545+j0.2390
Linha 10	0.0530+j0.2768	0.0530+j0.3243
Linha 11	0.0538+j0.2577	0.0538+j0.2795
Linha 12	0.0545+j0.2390	0.0545+j0.2510
Linha 13	0.0530+j0.3236	0.0530+j0.2762
Linha 14	0.0538+j0.2791	0.0538+j0.2572
Linha 15	0.0545+j0.2507	0.0545+j0.2386
Linha 16	0.0530+j0.2762	0.0530+j0.3236
Linha 17	0.0538+j0.2572	0.0538+j0.2791
Linha 18	0.0545+j0.2386	0.0545+j0.2507
Linha 19	0.0530+j0.3227	0.0530+j0.2763
Linha 20	0.0538+j0.2786	0.0538+j0.2571
Linha 21	0.0545+j0.2504	0.0545+j0.2385
Linha 22	0.0530+j0.2763	0.0530+j0.3227
Linha 23	0.0538+j0.2571	0.0538+j0.2786

Linha 24 0.0545+j0.2385 0.0545+j0.2504

- **Matriz $Z_{\text{para-raio_condutor 2 x 24}}$:**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.0530+j0.3234	0.0538+j0.2790	0.0545+j0.2507	0.0530+j0.2770
Linha 2	0.0530+j0.2770	0.0538+j0.2576	0.0545+j0.2389	0.0530+j0.3234

	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8
Linha 1	0.0538+j0.2576	0.0545+j0.2389	0.0530+j0.3243	0.0538+j0.2795
Linha 2	0.0538+j0.2790	0.0545+j0.2507	0.0530+j0.2768	0.0538+j0.2577

	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha 1	0.0545+j0.2510	0.0530+j0.2768	0.0538+j0.2577	0.0545+j0.2390
Linha 2	0.0545+j0.2390	0.0530+j0.3243	0.0538+j0.2795	0.0545+j0.2510

	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Linha 1	0.0530+j0.3236	0.0538+j0.2791	0.0545+j0.2507	0.0530+j0.2762
Linha 2	0.0530+j0.2762	0.0538+j0.2572	0.0545+j0.2386	0.0530+j0.3236

	Coluna 17	Coluna 18	Coluna 19	Coluna 20
Linha 1	0.0538+j0.2572	0.0545+j0.2386	0.0530+j0.3227	0.0538+j0.2786
Linha 2	0.0538+j0.2791	0.0545+j0.2507	0.0530+j0.2763	0.0538+j0.2571

	Coluna 21	Coluna 22	Coluna 23	Coluna 24
Linha 1	0.0545+j0.2504	0.0530+j0.2763	0.0538+j0.2571	0.0545+j0.2385
Linha 2	0.0545+j0.2385	0.0530+j0.3227	0.0538+j0.2786	0.0545+j0.2504

- **Matriz $Z_{\text{para-raio 2 x 24}}$:**

	Coluna 1	Coluna 2
Linha 1	1.5086+j0.9256	0.0520+j0.2828
Linha 2	0.0520+j0.2828	1.5086+j0.9256

- **Matriz $Z_{\text{equivalente}}$ 24 x 24 sem o efeito dos cabos guarda:**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.2373+j0.6068	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2191	0.1035+j0.2178
Linha 2	0.0984+j0.2669	0.2256+j0.6191	0.0894+j0.2767	0.0979+j0.2136
Linha 3	0.0940+j0.2191	0.0894+j0.2767	0.2187+j0.6269	0.0937+j0.1974
Linha 4	0.1035+j0.2178	0.0979+j0.2136	0.0937+j0.1974	0.2373+j0.6068
Linha 5	0.0979+j0.2136	0.0928+j0.2297	0.0892+j0.2233	0.0984+j0.2669
Linha 6	0.0937+j0.1974	0.0892+j0.2233	0.0861+j0.2374	0.0940+j0.2191
Linha 7	0.1049+j0.5553	0.0985+j0.2657	0.0941+j0.2185	0.1036+j0.2171
Linha 8	0.0985+j0.2679	0.0931+j0.5676	0.0894+j0.2756	0.0979+j0.2133
Linha 9	0.0940+j0.2196	0.0894+j0.2778	0.0862+j0.5754	0.0937+j0.1974
Linha 10	0.1036+j0.2171	0.0979+j0.2128	0.0937+j0.1968	0.1049+j0.5553
Linha 11	0.0979+j0.2133	0.0929+j0.2290	0.0893+j0.2225	0.0985+j0.2679
Linha 12	0.0937+j0.1974	0.0893+j0.2230	0.0861+j0.2367	0.0940+j0.2196
Linha 13	0.1047+j0.5293	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2192	0.1035+j0.2167
Linha 14	0.0984+j0.2669	0.0931+j0.5416	0.0893+j0.2767	0.0978+j0.2127
Linha 15	0.0940+j0.2191	0.0894+j0.2767	0.0861+j0.5493	0.0937+j0.1969
Linha 16	0.1035+j0.2167	0.0978+j0.2127	0.0936+j0.1969	0.1047+j0.5293
Linha 17	0.0978+j0.2127	0.0928+j0.2285	0.0892+j0.2224	0.0984+j0.2669
Linha 18	0.0937+j0.1969	0.0892+j0.2224	0.0860+j0.2362	0.0940+j0.2191
Linha 19	0.1046+j0.5555	0.0983+j0.2681	0.0939+j0.2198	0.1034+j0.2173
Linha 20	0.0983+j0.2659	0.0930+j0.5677	0.0893+j0.2779	0.0978+j0.2130
Linha 21	0.0939+j0.2187	0.0893+j0.2757	0.0861+j0.5755	0.0936+j0.1969
Linha 22	0.1034+j0.2173	0.0977+j0.2135	0.0936+j0.1976	0.1046+j0.5555
Linha 23	0.0978+j0.2130	0.0928+j0.2292	0.0892+j0.2231	0.0983+j0.2659
Linha 24	0.0936+j0.1969	0.0892+j0.2226	0.0860+j0.2368	0.0939+j0.2187

	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8
Linha 1	0.0979+j0.2136	0.0937+j0.1974	0.1049+j0.5553	0.0985+j0.2679
Linha 2	0.0928+j0.2297	0.0892+j0.2233	0.0985+j0.2657	0.0931+j0.5676
Linha 3	0.0892+j0.2233	0.0861+j0.2374	0.0941+j0.2185	0.0894+j0.2756
Linha 4	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2191	0.1036+j0.2171	0.0979+j0.2133
Linha 5	0.2256+j0.6191	0.0894+j0.2767	0.0979+j0.2128	0.0929+j0.2290
Linha 6	0.0894+j0.2767	0.2187+j0.6269	0.0937+j0.1968	0.0893+j0.2225
Linha 7	0.0979+j0.2128	0.0937+j0.1968	0.2375+j0.6066	0.0986+j0.2667
Linha 8	0.0929+j0.2290	0.0893+j0.2225	0.0986+j0.2667	0.2257+j0.6190

Linha 9	0.0893+j0.2230	0.0861+j0.2367	0.0941+j0.2190	0.0894+j0.2767
Linha 10	0.0985+j0.2657	0.0941+j0.2185	0.1037+j0.2165	0.0980+j0.2125
Linha 11	0.0931+j0.5676	0.0894+j0.2756	0.0980+j0.2125	0.0929+j0.2284
Linha 12	0.0894+j0.2778	0.0862+j0.5754	0.0938+j0.1968	0.0893+j0.2223
Linha 13	0.0978+j0.2127	0.0936+j0.1969	0.1048+j0.5553	0.0984+j0.2679
Linha 14	0.0928+j0.2285	0.0892+j0.2224	0.0985+j0.2658	0.0931+j0.5676
Linha 15	0.0892+j0.2224	0.0860+j0.2362	0.0940+j0.2185	0.0894+j0.2757
Linha 16	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2192	0.1035+j0.2160	0.0978+j0.2125
Linha 17	0.0931+j0.5416	0.0893+j0.2767	0.0979+j0.2119	0.0928+j0.2279
Linha 18	0.0894+j0.2767	0.0861+j0.5493	0.0937+j0.1963	0.0892+j0.2216
Linha 19	0.0977+j0.2135	0.0936+j0.1976	0.1047+j0.5293	0.0984+j0.2691
Linha 20	0.0928+j0.2292	0.0892+j0.2231	0.0984+j0.2648	0.0931+j0.5416
Linha 21	0.0892+j0.2226	0.0860+j0.2368	0.0940+j0.2181	0.0894+j0.2747
Linha 22	0.0983+j0.2681	0.0939+j0.2198	0.1035+j0.2167	0.0978+j0.2132
Linha 23	0.0930+j0.5677	0.0893+j0.2779	0.0978+j0.2122	0.0928+j0.2285
Linha 24	0.0893+j0.2757	0.0861+j0.5755	0.0937+j0.1963	0.0892+j0.2219

	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha 1	0.0940+j0.2196	0.1036+j0.2171	0.0979+j0.2133	0.0937+j0.1974
Linha 2	0.0894+j0.2778	0.0979+j0.2128	0.0929+j0.2290	0.0893+j0.2230
Linha 3	0.0862+j0.5754	0.0937+j0.1968	0.0893+j0.2225	0.0861+j0.2367
Linha 4	0.0937+j0.1974	0.1049+j0.5553	0.0985+j0.2679	0.0940+j0.2196
Linha 5	0.0893+j0.2230	0.0985+j0.2657	0.0931+j0.5676	0.0894+j0.2778
Linha 6	0.0861+j0.2367	0.0941+j0.2185	0.0894+j0.2756	0.0862+j0.5754
Linha 7	0.0941+j0.2190	0.1037+j0.2165	0.0980+j0.2125	0.0938+j0.1968
Linha 8	0.0894+j0.2767	0.0980+j0.2125	0.0929+j0.2284	0.0893+j0.2223
Linha 9	0.2187+j0.6268	0.0938+j0.1968	0.0893+j0.2223	0.0861+j0.2361
Linha 10	0.0938+j0.1968	0.2375+j0.6066	0.0986+j0.2667	0.0941+j0.2190
Linha 11	0.0893+j0.2223	0.0986+j0.2667	0.2257+j0.6190	0.0894+j0.2767
Linha 12	0.0861+j0.2361	0.0941+j0.2190	0.0894+j0.2767	0.2187+j0.6268
Linha 13	0.0940+j0.2197	0.1035+j0.2160	0.0978+j0.2125	0.0937+j0.1969
Linha 14	0.0894+j0.2778	0.0979+j0.2119	0.0928+j0.2279	0.0892+j0.2221
Linha 15	0.0862+j0.5754	0.0937+j0.1963	0.0892+j0.2216	0.0861+j0.2356
Linha 16	0.0937+j0.1969	0.1048+j0.5553	0.0984+j0.2679	0.0940+j0.2197
Linha 17	0.0892+j0.2221	0.0985+j0.2658	0.0931+j0.5676	0.0894+j0.2778
Linha 18	0.0861+j0.2356	0.0940+j0.2185	0.0894+j0.2757	0.0862+j0.5754
Linha 19	0.0939+j0.2203	0.1035+j0.2167	0.0978+j0.2132	0.0936+j0.1976
Linha 20	0.0893+j0.2789	0.0978+j0.2122	0.0928+j0.2285	0.0892+j0.2229
Linha 21	0.0861+j0.5493	0.0937+j0.1963	0.0892+j0.2219	0.0860+j0.2362

Linha 22	0.0936+j0.1976	0.1047+j0.5293	0.0984+j0.2691	0.0939+j0.2203
Linha 23	0.0892+j0.2229	0.0984+j0.2648	0.0931+j0.5416	0.0893+j0.2789
Linha 24	0.0860+j0.2362	0.0940+j0.2181	0.0894+j0.2747	0.0861+j0.5493

	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Linha 1	0.1047+j0.5293	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2191	0.1035+j0.2167
Linha 2	0.0984+j0.2669	0.0931+j0.5416	0.0894+j0.2767	0.0978+j0.2127
Linha 3	0.0940+j0.2192	0.0893+j0.2767	0.0861+j0.5493	0.0936+j0.1969
Linha 4	0.1035+j0.2167	0.0978+j0.2127	0.0937+j0.1969	0.1047+j0.5293
Linha 5	0.0978+j0.2127	0.0928+j0.2285	0.0892+j0.2224	0.0984+j0.2669
Linha 6	0.0936+j0.1969	0.0892+j0.2224	0.0860+j0.2362	0.0940+j0.2192
Linha 7	0.1048+j0.5553	0.0985+j0.2658	0.0940+j0.2185	0.1035+j0.2160
Linha 8	0.0984+j0.2679	0.0931+j0.5676	0.0894+j0.2757	0.0978+j0.2125
Linha 9	0.0940+j0.2197	0.0894+j0.2778	0.0862+j0.5754	0.0937+j0.1969
Linha 10	0.1035+j0.2160	0.0979+j0.2119	0.0937+j0.1963	0.1048+j0.5553
Linha 11	0.0978+j0.2125	0.0928+j0.2279	0.0892+j0.2216	0.0984+j0.2679
Linha 12	0.0937+j0.1969	0.0892+j0.2221	0.0861+j0.2356	0.0940+j0.2197
Linha 13	0.2372+j0.6069	0.0984+j0.2670	0.0939+j0.2192	0.1034+j0.2156
Linha 14	0.0984+j0.2670	0.2256+j0.6192	0.0893+j0.2768	0.0978+j0.2119
Linha 15	0.0939+j0.2192	0.0893+j0.2768	0.2186+j0.6269	0.0936+j0.1964
Linha 16	0.1034+j0.2156	0.0978+j0.2119	0.0936+j0.1964	0.2372+j0.6069
Linha 17	0.0978+j0.2119	0.0928+j0.2274	0.0892+j0.2215	0.0984+j0.2670
Linha 18	0.0936+j0.1964	0.0892+j0.2215	0.0860+j0.2351	0.0939+j0.2192
Linha 19	0.1046+j0.5555	0.0983+j0.2681	0.0939+j0.2198	0.1033+j0.2162
Linha 20	0.0983+j0.2660	0.0930+j0.5678	0.0893+j0.2779	0.0977+j0.2121
Linha 21	0.0939+j0.2187	0.0893+j0.2758	0.0861+j0.5755	0.0936+j0.1964
Linha 22	0.1033+j0.2162	0.0977+j0.2126	0.0936+j0.1971	0.1046+j0.5555
Linha 23	0.0977+j0.2121	0.0927+j0.2280	0.0891+j0.2222	0.0983+j0.2660
Linha 24	0.0936+j0.1964	0.0891+j0.2217	0.0860+j0.2357	0.0939+j0.2187

	Coluna 17	Coluna 18	Coluna 19	Coluna 20
Linha 1	0.0978+j0.2127	0.0937+j0.1969	0.1046+j0.5555	0.0983+j0.2659
Linha 2	0.0928+j0.2285	0.0892+j0.2224	0.0983+j0.2681	0.0930+j0.5677
Linha 3	0.0892+j0.2224	0.0860+j0.2362	0.0939+j0.2198	0.0893+j0.2779
Linha 4	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2191	0.1034+j0.2173	0.0978+j0.2130
Linha 5	0.0931+j0.5416	0.0894+j0.2767	0.0977+j0.2135	0.0928+j0.2292
Linha 6	0.0893+j0.2767	0.0861+j0.5493	0.0936+j0.1976	0.0892+j0.2231
Linha 7	0.0979+j0.2119	0.0937+j0.1963	0.1047+j0.5293	0.0984+j0.2648
Linha 8	0.0928+j0.2279	0.0892+j0.2216	0.0984+j0.2691	0.0931+j0.5416

Linha 9	0.0892+j0.2221	0.0861+j0.2356	0.0939+j0.2203	0.0893+j0.2789
Linha 10	0.0985+j0.2658	0.0940+j0.2185	0.1035+j0.2167	0.0978+j0.2122
Linha 11	0.0931+j0.5676	0.0894+j0.2757	0.0978+j0.2132	0.0928+j0.2285
Linha 12	0.0894+j0.2778	0.0862+j0.5754	0.0936+j0.1976	0.0892+j0.2229
Linha 13	0.0978+j0.2119	0.0936+j0.1964	0.1046+j0.5555	0.0983+j0.2660
Linha 14	0.0928+j0.2274	0.0892+j0.2215	0.0983+j0.2681	0.0930+j0.5678
Linha 15	0.0892+j0.2215	0.0860+j0.2351	0.0939+j0.2198	0.0893+j0.2779
Linha 16	0.0984+j0.2670	0.0939+j0.2192	0.1033+j0.2162	0.0977+j0.2121
Linha 17	0.2256+j0.6192	0.0893+j0.2768	0.0977+j0.2126	0.0927+j0.2280
Linha 18	0.0893+j0.2768	0.2186+j0.6269	0.0936+j0.1971	0.0891+j0.2222
Linha 19	0.0977+j0.2126	0.0936+j0.1971	0.2370+j0.6071	0.0982+j0.2671
Linha 20	0.0927+j0.2280	0.0891+j0.2222	0.0982+j0.2671	0.2255+j0.6193
Linha 21	0.0891+j0.2217	0.0860+j0.2357	0.0938+j0.2193	0.0893+j0.2769
Linha 22	0.0983+j0.2681	0.0939+j0.2198	0.1033+j0.2169	0.0976+j0.2129
Linha 23	0.0930+j0.5678	0.0893+j0.2779	0.0976+j0.2129	0.0927+j0.2287
Linha 24	0.0893+j0.2758	0.0861+j0.5755	0.0935+j0.1971	0.0891+j0.2225

	Coluna 21	Coluna 22	Coluna 23	Coluna 24
Linha 1	0.0939+j0.2187	0.1034+j0.2173	0.0978+j0.2130	0.0936+j0.1969
Linha 2	0.0893+j0.2757	0.0977+j0.2135	0.0928+j0.2292	0.0892+j0.2226
Linha 3	0.0861+j0.5755	0.0936+j0.1976	0.0892+j0.2231	0.0860+j0.2368
Linha 4	0.0936+j0.1969	0.1046+j0.5555	0.0983+j0.2659	0.0939+j0.2187
Linha 5	0.0892+j0.2226	0.0983+j0.2681	0.0930+j0.5677	0.0893+j0.2757
Linha 6	0.0860+j0.2368	0.0939+j0.2198	0.0893+j0.2779	0.0861+j0.5755
Linha 7	0.0940+j0.2181	0.1035+j0.2167	0.0978+j0.2122	0.0937+j0.1963
Linha 8	0.0894+j0.2747	0.0978+j0.2132	0.0928+j0.2285	0.0892+j0.2219
Linha 9	0.0861+j0.5493	0.0936+j0.1976	0.0892+j0.2229	0.0860+j0.2362
Linha 10	0.0937+j0.1963	0.1047+j0.5293	0.0984+j0.2648	0.0940+j0.2181
Linha 11	0.0892+j0.2219	0.0984+j0.2691	0.0931+j0.5416	0.0894+j0.2747
Linha 12	0.0860+j0.2362	0.0939+j0.2203	0.0893+j0.2789	0.0861+j0.5493
Linha 13	0.0939+j0.2187	0.1033+j0.2162	0.0977+j0.2121	0.0936+j0.1964
Linha 14	0.0893+j0.2758	0.0977+j0.2126	0.0927+j0.2280	0.0891+j0.2217
Linha 15	0.0861+j0.5755	0.0936+j0.1971	0.0891+j0.2222	0.0860+j0.2357
Linha 16	0.0936+j0.1964	0.1046+j0.5555	0.0983+j0.2660	0.0939+j0.2187
Linha 17	0.0891+j0.2217	0.0983+j0.2681	0.0930+j0.5678	0.0893+j0.2758
Linha 18	0.0860+j0.2357	0.0939+j0.2198	0.0893+j0.2779	0.0861+j0.5755
Linha 19	0.0938+j0.2193	0.1033+j0.2169	0.0976+j0.2129	0.0935+j0.1971
Linha 20	0.0893+j0.2769	0.0976+j0.2129	0.0927+j0.2287	0.0891+j0.2225
Linha 21	0.2186+j0.6270	0.0935+j0.1971	0.0891+j0.2225	0.0860+j0.2363

Linha 22	0.0935+j0.1971	0.2370+j0.6071	0.0982+j0.2671	0.0938+j0.2193
Linha 23	0.0891+j0.2225	0.0982+j0.2671	0.2255+j0.6193	0.0893+j0.2769
Linha 24	0.0860+j0.2363	0.0938+j0.2193	0.0893+j0.2769	0.2186+j0.6270

C.3. Matrizes para a redução dos subcondutores da matriz de impedância equivalente 24 x 24 e a matriz equivalente de fases 6 x 6.

- **Matriz Z_A (6 x 6):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.2373+j0.6068	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2191	0.1035+j0.2178
Linha 2	0.0984+j0.2669	0.2256+j0.6191	0.0894+j0.2767	0.0979+j0.2136
Linha 3	0.0940+j0.2191	0.0894+j0.2767	0.2187+j0.6269	0.0937+j0.1974
Linha 4	0.1035+j0.2178	0.0979+j0.2136	0.0937+j0.1974	0.2373+j0.6068
Linha 5	0.0979+j0.2136	0.0928+j0.2297	0.0892+j0.2233	0.0984+j0.2669
Linha 6	0.0937+j0.1974	0.0892+j0.2233	0.0861+j0.2374	0.0940+j0.2191

	Coluna 5	Coluna 6
Linha 1	0.0979+j0.2136	0.0937+j0.1974
Linha 2	0.0928+j0.2297	0.0892+j0.2233
Linha 3	0.0892+j0.2233	0.0861+j0.2374
Linha 4	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2191
Linha 5	0.2256+j0.6191	0.0894+j0.2767
Linha 6	0.0894+j0.2767	0.2187+j0.6269

- **Matriz Z_B (6 x 18):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	-0.1324-j0.0515	0.0001+j0.0010	0.0000+j0.0005	0.0001-j0.0007
Linha 2	0.0001-j0.0011	-0.1325-j0.0515	0.0000+j0.0010	0.0001-j0.0008
Linha 3	0.0001-j0.0006	0.0000-j0.0011	-0.1325-j0.0515	0.0001-j0.0006
Linha 4	0.0001-j0.0007	0.0000-j0.0003	0.0000-j0.0000	-0.1324-j0.0515
Linha 5	0.0001-j0.0008	0.0000-j0.0006	0.0000-j0.0002	0.0001-j0.0011
Linha 6	0.0001-j0.0006	0.0000-j0.0008	0.0000-j0.0006	0.0001-j0.0006

	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8
Linha 1	0.0000-j0.0003	0.0000-j0.0000	-0.1326-j0.0775	-0.0000+j0.0000
Linha 2	0.0000-j0.0006	0.0000-j0.0002	-0.0000+j0.0000	-0.1326-j0.0775
Linha 3	0.0000-j0.0008	0.0000-j0.0006	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 4	0.0001+j0.0010	0.0000+j0.0005	-0.0001-j0.0011	-0.0000-j0.0009
Linha 5	-0.1325-j0.0515	0.0000+j0.0010	-0.0001-j0.0009	-0.0000-j0.0012
Linha 6	0.0000-j0.0011	-0.1325-j0.0515	-0.0000-j0.0005	-0.0000-j0.0009

	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha 1	-0.0000+j0.0000	-0.0001-j0.0011	-0.0000-j0.0009	-0.0000-j0.0005
Linha 2	-0.0000-j0.0000	-0.0001-j0.0009	-0.0000-j0.0012	-0.0000-j0.0009
Linha 3	-0.1325-j0.0776	-0.0000-j0.0005	-0.0000-j0.0009	-0.0000-j0.0012
Linha 4	-0.0000-j0.0005	-0.1326-j0.0775	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 5	-0.0000-j0.0009	-0.0000+j0.0000	-0.1326-j0.0775	-0.0000-j0.0000
Linha 6	-0.0000-j0.0012	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.1325-j0.0776

	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Linha 1	-0.1327-j0.0513	-0.0001-j0.0010	-0.0001-j0.0005	-0.0001-j0.0005
Linha 2	-0.0001+j0.0012	-0.1326-j0.0514	-0.0001-j0.0010	-0.0001-j0.0001
Linha 3	-0.0001+j0.0007	-0.0001+j0.0011	-0.1326-j0.0514	-0.0001+j0.0001
Linha 4	-0.0001-j0.0005	-0.0001-j0.0006	-0.0001-j0.0005	-0.1327-j0.0513
Linha 5	-0.0001-j0.0001	-0.0001-j0.0005	-0.0001-j0.0006	-0.0001+j0.0012
Linha 6	-0.0001+j0.0001	-0.0001-j0.0001	-0.0000-j0.0005	-0.0001+j0.0007

	Coluna 17	Coluna 18
Linha 1	-0.0001-j0.0006	-0.0001-j0.0005
Linha 2	-0.0001-j0.0005	-0.0001-j0.0006
Linha 3	-0.0001-j0.0001	-0.0000-j0.0005
Linha 4	-0.0001-j0.0010	-0.0001-j0.0005
Linha 5	-0.1326-j0.0514	-0.0001-j0.0010
Linha 6	-0.0001+j0.0011	-0.1326-j0.0514

- **Matriz Z_c (18 x 6):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	-0.1324-j0.0515	0.0001-j0.0011	0.0001-j0.0006	0.0001-j0.0007
Linha 2	0.0001+j0.0010	-0.1325-j0.0515	0.0000-j0.0011	0.0000-j0.0003

Linha 3	0.0000+j0.0005	0.0000+j0.0010	-0.1325-j0.0515	0.0000-j0.0000
Linha 4	0.0001-j0.0007	0.0001-j0.0008	0.0001-j0.0006	-0.1324-j0.0515
Linha 5	0.0000-j0.0003	0.0000-j0.0006	0.0000-j0.0008	0.0001+j0.0010
Linha 6	0.0000-j0.0000	0.0000-j0.0002	0.0000-j0.0006	0.0000+j0.0005
Linha 7	-0.1326-j0.0775	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0001-j0.0011
Linha 8	-0.0000+j0.0000	-0.1326-j0.0775	-0.0000+j0.0000	-0.0000-j0.0009
Linha 9	-0.0000+j0.0000	-0.0000-j0.0000	-0.1325-j0.0776	-0.0000-j0.0005
Linha 10	-0.0001-j0.0011	-0.0001-j0.0009	-0.0000-j0.0005	-0.1326-j0.0775
Linha 11	-0.0000-j0.0009	-0.0000-j0.0012	-0.0000-j0.0009	-0.0000+j0.0000
Linha 12	-0.0000-j0.0005	-0.0000-j0.0009	-0.0000-j0.0012	-0.0000+j0.0000
Linha 13	-0.1327-j0.0513	-0.0001+j0.0012	-0.0001+j0.0007	-0.0001-j0.0005
Linha 14	-0.0001-j0.0010	-0.1326-j0.0514	-0.0001+j0.0011	-0.0001-j0.0006
Linha 15	-0.0001-j0.0005	-0.0001-j0.0010	-0.1326-j0.0514	-0.0001-j0.0005
Linha 16	-0.0001-j0.0005	-0.0001-j0.0001	-0.0001+j0.0001	-0.1327-j0.0513
Linha 17	-0.0001-j0.0006	-0.0001-j0.0005	-0.0001-j0.0001	-0.0001-j0.0010
Linha 18	-0.0001-j0.0005	-0.0001-j0.0006	-0.0000-j0.0005	-0.0001-j0.0005

	Coluna 5	Coluna 6
Linha 1	0.0001-j0.0008	0.0001-j0.0006
Linha 2	0.0000-j0.0006	0.0000-j0.0008
Linha 3	0.0000-j0.0002	0.0000-j0.0006
Linha 4	0.0001-j0.0011	0.0001-j0.0006
Linha 5	-0.1325-j0.0515	0.0000-j0.0011
Linha 6	0.0000+j0.0010	-0.1325-j0.0515
Linha 7	-0.0001-j0.0009	-0.0000-j0.0005
Linha 8	-0.0000-j0.0012	-0.0000-j0.0009
Linha 9	-0.0000-j0.0009	-0.0000-j0.0012
Linha 10	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 11	-0.1326-j0.0775	-0.0000+j0.0000
Linha 12	-0.0000-j0.0000	-0.1325-j0.0776
Linha 13	-0.0001-j0.0001	-0.0001+j0.0001
Linha 14	-0.0001-j0.0005	-0.0001-j0.0001
Linha 15	-0.0001-j0.0006	-0.0000-j0.0005
Linha 16	-0.0001+j0.0012	-0.0001+j0.0007
Linha 17	-0.1326-j0.0514	-0.0001+j0.0011
Linha 18	-0.0001-j0.0010	-0.1326-j0.0514

- **Matriz Z_D (18 x 18):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.2651+j0.1029	0.0000-j0.0000	0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 2	0.0000-j0.0000	0.2651+j0.1029	0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 3	0.0000-j0.0000	0.0000-j0.0000	0.2651+j0.1029	0.0000-j0.0000
Linha 4	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000	0.2651+j0.1029
Linha 5	-0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000
Linha 6	0.0000-j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000
Linha 7	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 8	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 9	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776	-0.0000+j0.0000
Linha 10	-0.0000+j0.0000	-0.0000-j0.0000	-0.0000-j0.0000	0.1325+j0.0776
Linha 11	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000-j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 12	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 13	0.1325+j0.0253	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 14	-0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0253	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 15	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0253	-0.0000+j0.0000
Linha 16	-0.0000+j0.0000	-0.0000-j0.0000	-0.0000-j0.0000	0.1325+j0.0253
Linha 17	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 18	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000

	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8
Linha 1	-0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000
Linha 2	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776
Linha 3	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 4	0.0000-j0.0000	0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 5	0.2651+j0.1029	0.0000-j0.0000	-0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 6	0.0000-j0.0000	0.2651+j0.1029	-0.0000-j0.0000	-0.0000-j0.0000
Linha 7	-0.0000-j0.0000	-0.0000-j0.0000	0.2651+j0.1552	0.0000+j0.0001
Linha 8	-0.0000+j0.0000	-0.0000-j0.0000	0.0000+j0.0001	0.2651+j0.1552
Linha 9	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0001
Linha 10	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 11	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 12	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776	-0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 13	-0.0000-j0.0000	-0.0000-j0.0000	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000
Linha 14	-0.0000+j0.0000	-0.0000-j0.0000	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776
Linha 15	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000

Linha 16	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000
Linha 17	0.1325+j0.0253	-0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 18	-0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0253	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000

	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha 1	0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 2	0.0000+j0.0000	-0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 3	0.1325+j0.0776	-0.0000-j0.0000	-0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 4	-0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 5	-0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000
Linha 6	-0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776
Linha 7	0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000-j0.0000
Linha 8	0.0000+j0.0001	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 9	0.2651+j0.1552	-0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 10	-0.0000-j0.0000	0.2651+j0.1552	0.0000+j0.0001	0.0000+j0.0000
Linha 11	-0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0001	0.2651+j0.1552	0.0000+j0.0001
Linha 12	-0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0001	0.2651+j0.1552
Linha 13	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000	0.0000-j0.0000
Linha 14	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000
Linha 15	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 16	0.0000-j0.0000	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 17	0.0000-j0.0000	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000
Linha 18	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776

	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Linha 1	0.1325+j0.0253	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 2	-0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0253	-0.0000+j0.0000	-0.0000-j0.0000
Linha 3	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0253	-0.0000-j0.0000
Linha 4	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0253
Linha 5	-0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 6	-0.0000-j0.0000	-0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 7	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 8	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000
Linha 9	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776	0.0000-j0.0000
Linha 10	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776
Linha 11	0.0000-j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 12	0.0000-j0.0000	0.0000-j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 13	0.2651+j0.1029	0.0000-j0.0000	0.0000-j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 14	0.0000-j0.0000	0.2651+j0.1029	0.0000-j0.0000	0.0000+j0.0000

Linha 15	0.0000-j0.0000	0.0000-j0.0000	0.2651+j0.1029	0.0000-j0.0000
Linha 16	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000	0.2651+j0.1029
Linha 17	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000
Linha 18	0.0000-j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000

	Coluna 17	Coluna 18
Linha 1	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 2	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 3	-0.0000-j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 4	-0.0000+j0.0000	-0.0000+j0.0000
Linha 5	0.1325+j0.0253	-0.0000+j0.0000
Linha 6	-0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0253
Linha 7	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 8	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 9	0.0000-j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 10	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 11	0.1325+j0.0776	0.0000+j0.0000
Linha 12	0.0000+j0.0000	0.1325+j0.0776
Linha 13	0.0000+j0.0000	0.0000-j0.0000
Linha 14	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 15	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
Linha 16	0.0000-j0.0000	0.0000-j0.0000
Linha 17	0.2651+j0.1029	0.0000-j0.0000
Linha 18	0.0000-j0.0000	0.2651+j0.1029

- **Matriz reduzida retirando o efeito dos cabos para-raio e dos subcondutores por fase (6 x 6):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.1379+j0.5617	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2192	0.1035+j0.2167
Linha 2	0.0984+j0.2669	0.1262+j0.5740	0.0894+j0.2768	0.0978+j0.2127
Linha 3	0.0940+j0.2192	0.0894+j0.2768	0.1193+j0.5818	0.0936+j0.1969
Linha 4	0.1035+j0.2167	0.0978+j0.2127	0.0936+j0.1969	0.1379+j0.5617
Linha 5	0.0978+j0.2127	0.0928+j0.2285	0.0892+j0.2224	0.0984+j0.2669
Linha 6	0.0936+j0.1969	0.0892+j0.2224	0.0861+j0.2362	0.0940+j0.2192

	Coluna 5	Coluna 6
Linha 1	0.0978+j0.2127	0.0936+j0.1969
Linha 2	0.0928+j0.2285	0.0892+j0.2224

Linha 3	0.0892+j0.2224	0.0861+j0.2362
Linha 4	0.0984+j0.2669	0.0940+j0.2192
Linha 5	0.1262+j0.5740	0.0894+j0.2768
Linha 6	0.0894+j0.2768	0.1193+j0.5818

C.4. Matriz de impedância série e componente simétrica.

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.0339+j0.3182	-0.0293+j0.0176	-0.0042-j0.0133	0.0006+j0.0165
Linha 2	0.0303+j0.0165	0.0339+j0.3182	0.0189-j0.0199	0.0117+j0.0060
Linha 3	0.0189-j0.0199	-0.0042-j0.0133	0.3156+j1.0810	0.0092-j0.0142
Linha 4	0.0006+j0.0165	-0.0110+j0.0069	0.0045-j0.0079	0.0339+j0.3182
Linha 5	0.0117+j0.0060	0.0006+j0.0165	0.0092-j0.0142	0.0303+j0.0165
Linha 6	0.0092-j0.0142	0.0045-j0.0079	0.2812+j0.6485	0.0189-j0.0199

	Coluna 5	Coluna 6
Linha 1	-0.0110+j0.0069	0.0045-j0.0079
Linha 2	0.0006+j0.0165	0.0092-j0.0142
Linha 3	0.0045-j0.0079	0.2812+j0.6485
Linha 4	-0.0293+j0.0176	-0.0042-j0.0133
Linha 5	0.0339+j0.3182	0.0189-j0.0199
Linha 6	-0.0042-j0.0133	0.3156+j1.081

APÊNDICE D – MATRIZES DO CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA DA LINHA

D.1. Matriz total dos coeficientes de potencial de Maxwell

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	11.3819 E+7	3.1618 E+7	1.5762 E+7	2.4783 E+7
Linha 2	3.1618 E+7	10.7566 E+7	2.4028 E+7	1.9652 E+7
Linha 3	1.5762 E+7	2.4028 E+7	9.7895 E+7	1.1700 E+7
Linha 4	2.4783 E+7	1.9652 E+7	1.1700 E+7	11.3819 E+7
Linha 5	1.9652 E+7	1.9085 E+7	1.3024 E+7	3.1618 E+7
Linha 6	1.1700 E+7	1.3024 E+7	1.1284 E+7	1.5762 E+7
Linha 7	10.4831 E+7	3.1408 E+7	1.5687 E+7	2.4683 E+7
Linha 8	3.1916 E+7	9.8593 E+7	2.3841 E+7	1.9656 E+7
Linha 9	1.5942 E+7	2.4349 E+7	8.8960 E+7	1.1772 E+7
Linha 10	2.4683 E+7	1.9535 E+7	1.1630 E+7	10.4831 E+7
Linha 11	1.9656 E+7	1.9005 E+7	1.2935 E+7	3.1916 E+7
Linha 12	1.1772 E+7	1.3056 E+7	1.1246 E+7	1.5942 E+7
Linha 13	9.8564 E+7	3.1611 E+7	1.5760 E+7	2.4516 E+7
Linha 14	3.1611 E+7	9.2311 E+7	2.4022 E+7	1.9460 E+7
Linha 15	1.5760 E+7	2.4022 E+7	8.2641 E+7	1.1609 E+7
Linha 16	2.4516 E+7	1.9460 E+7	1.1609 E+7	9.8564 E+7
Linha 17	1.9460 E+7	1.8835 E+7	1.2859 E+7	3.1611 E+7
Linha 18	1.1609 E+7	1.2859 E+7	1.1081 E+7	1.5760 E+7
Linha 19	10.4756 E+7	3.1829 E+7	1.5836 E+7	2.4614 E+7
Linha 20	3.1320 E+7	9.8487 E+7	2.4216 E+7	1.9455 E+7
Linha 21	1.5582 E+7	2.3707 E+7	8.8779 E+7	1.1537 E+7
Linha 22	2.4614 E+7	1.9576 E+7	1.1679 E+7	10.4756 E+7
Linha 23	1.9455 E+7	1.8912 E+7	1.2947 E+7	3.1320 E+7
Linha 24	1.1537 E+7	1.2826 E+7	1.1117 E+7	1.5582 E+7
Linha 25	3.3240 E+7	2.0474 E+7	1.1162 E+7	2.2704 E+7
Linha 26	2.2704 E+7	1.6054 E+7	0.9256 E+7	3.3240 E+7
	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8
Linha 1	1.9652 E+7	1.1700 E+7	10.4831 E+7	3.1916 E+7
Linha 2	1.9085 E+7	1.3024 E+7	3.1408 E+7	9.8593 E+7
Linha 3	1.3024 E+7	1.1284 E+7	1.5687 E+7	2.3841 E+7
Linha 4	3.1618 E+7	1.5762 E+7	2.4683 E+7	1.9656 E+7

Linha 5	10.7566 E+7	2.4028 E+7	1.9535 E+7	1.9005 E+7
Linha 6	2.4028 E+7	9.7895 E+7	1.1630 E+7	1.2935 E+7
Linha 7	1.9535 E+7	1.1630 E+7	11.3894 E+7	3.1706 E+7
Linha 8	1.9005 E+7	1.2935 E+7	3.1706 E+7	10.7671 E+7
Linha 9	1.3056 E+7	1.1246 E+7	1.5867 E+7	2.4161 E+7
Linha 10	3.1408 E+7	1.5687 E+7	2.4586 E+7	1.9540 E+7
Linha 11	9.8593 E+7	2.3841 E+7	1.9540 E+7	1.8927 E+7
Linha 12	2.4349 E+7	8.8960 E+7	1.1701 E+7	1.2968 E+7
Linha 13	1.9460 E+7	1.1609 E+7	10.4831 E+7	3.1916 E+7
Linha 14	1.8835 E+7	1.2859 E+7	3.1408 E+7	9.8593 E+7
Linha 15	1.2859 E+7	1.1081 E+7	1.5687 E+7	2.3841 E+7
Linha 16	3.1611 E+7	1.5760 E+7	2.4419 E+7	1.9463 E+7
Linha 17	9.2311 E+7	2.4022 E+7	1.9345 E+7	1.8757 E+7
Linha 18	2.4022 E+7	8.2641 E+7	1.1539 E+7	1.2772 E+7
Linha 19	1.9576 E+7	1.1679 E+7	9.8564 E+7	3.2134 E+7
Linha 20	1.8912 E+7	1.2947 E+7	3.1117 E+7	9.2310 E+7
Linha 21	1.2826 E+7	1.1117 E+7	1.5509 E+7	2.3527 E+7
Linha 22	3.1829 E+7	1.5836 E+7	2.4514 E+7	1.9579 E+7
Linha 23	9.8487 E+7	2.4216 E+7	1.9339 E+7	1.8833 E+7
Linha 24	2.3707 E+7	8.8779 E+7	1.1468 E+7	1.2738 E+7
Linha 25	1.6054 E+7	0.9256 E+7	3.3503 E+7	2.0631 E+7
Linha 26	2.0474 E+7	1.1162 E+7	2.2706 E+7	1.6104 E+7

	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha 1	1.5942 E+7	2.4683 E+7	1.9656 E+7	1.1772 E+7
Linha 2	2.4349 E+7	1.9535 E+7	1.9005 E+7	1.3056 E+7
Linha 3	8.8960 E+7	1.1630 E+7	1.2935 E+7	1.1246 E+7
Linha 4	1.1772 E+7	10.4831 E+7	3.1916 E+7	1.5942 E+7
Linha 5	1.3056 E+7	3.1408 E+7	9.8593 E+7	2.4349 E+7
Linha 6	1.1246 E+7	1.5687 E+7	2.3841 E+7	8.8960 E+7
Linha 7	1.5867 E+7	2.4586 E+7	1.9540 E+7	1.1701 E+7
Linha 8	2.4161 E+7	1.9540 E+7	1.8927 E+7	1.2968 E+7
Linha 9	9.8075 E+7	1.1701 E+7	1.2968 E+7	1.1209 E+7
Linha 10	1.1701 E+7	11.3894 E+7	3.1706 E+7	1.5867 E+7
Linha 11	1.2968 E+7	3.1706 E+7	10.7671 E+7	2.4161 E+7
Linha 12	1.1209 E+7	1.5867 E+7	2.4161 E+7	9.8075 E+7
Linha 13	1.5942 E+7	2.4419 E+7	1.9463 E+7	1.1679 E+7
Linha 14	2.4349 E+7	1.9345 E+7	1.8757 E+7	1.2890 E+7
Linha 15	8.8960 E+7	1.1539 E+7	1.2772 E+7	1.1045 E+7

Linha 16	1.1679 E+7	10.4831 E+7	3.1916 E+7	1.5942 E+7
Linha 17	1.2890 E+7	3.1408 E+7	9.8593 E+7	2.4349 E+7
Linha 18	1.1045 E+7	1.5687 E+7	2.3841 E+7	8.8960 E+7
Linha 19	1.6018 E+7	2.4514 E+7	1.9579 E+7	1.1749 E+7
Linha 20	2.4544 E+7	1.9339 E+7	1.8833 E+7	1.2978 E+7
Linha 21	8.2640 E+7	1.1468 E+7	1.2738 E+7	1.1079 E+7
Linha 22	1.1749 E+7	9.8564 E+7	3.2134 E+7	1.6018 E+7
Linha 23	1.2978 E+7	3.1117 E+7	9.2310 E+7	2.4544 E+7
Linha 24	1.1079 E+7	1.5509 E+7	2.3527 E+7	8.2640 E+7
Linha 25	1.1285 E+7	2.2706 E+7	1.6104 E+7	0.9328 E+7
Linha 26	0.9328 E+7	3.3503 E+7	2.0631 E+7	1.1285 E+7

	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Linha 1	9.8564 E+7	3.1611 E+7	1.5760 E+7	2.4516 E+7
Linha 2	3.1611 E+7	9.2311 E+7	2.4022 E+7	1.9460 E+7
Linha 3	1.5760 E+7	2.4022 E+7	8.2641 E+7	1.1609 E+7
Linha 4	2.4516 E+7	1.9460 E+7	1.1609 E+7	9.8564 E+7
Linha 5	1.9460 E+7	1.8835 E+7	1.2859 E+7	3.1611 E+7
Linha 6	1.1609 E+7	1.2859 E+7	1.1081 E+7	1.5760 E+7
Linha 7	10.4831 E+7	3.1408 E+7	1.5687 E+7	2.4419 E+7
Linha 8	3.1916 E+7	9.8593 E+7	2.3841 E+7	1.9463 E+7
Linha 9	1.5942 E+7	2.4349 E+7	8.8960 E+7	1.1679 E+7
Linha 10	2.4419 E+7	1.9345 E+7	1.1539 E+7	10.4831 E+7
Linha 11	1.9463 E+7	1.8757 E+7	1.2772 E+7	3.1916 E+7
Linha 12	1.1679 E+7	1.2890 E+7	1.1045 E+7	1.5942 E+7
Linha 13	11.3819 E+7	3.1618 E+7	1.5762 E+7	2.4255 E+7
Linha 14	3.1618 E+7	10.7566 E+7	2.4028 E+7	1.9270 E+7
Linha 15	1.5762 E+7	2.4028 E+7	9.7895 E+7	1.1517 E+7
Linha 16	2.4255 E+7	1.9270 E+7	1.1517 E+7	11.3819 E+7
Linha 17	1.9270 E+7	1.8590 E+7	1.2696 E+7	3.1618 E+7
Linha 18	1.1517 E+7	1.2696 E+7	1.0883 E+7	1.5762 E+7
Linha 19	10.4756 E+7	3.1829 E+7	1.5836 E+7	2.4350 E+7
Linha 20	3.1320 E+7	9.8487 E+7	2.4216 E+7	1.9265 E+7
Linha 21	1.5582 E+7	2.3707 E+7	8.8779 E+7	1.1447 E+7
Linha 22	2.4350 E+7	1.9384 E+7	1.1586 E+7	10.4756 E+7
Linha 23	1.9265 E+7	1.8665 E+7	1.2782 E+7	3.1320 E+7
Linha 24	1.1447 E+7	1.2663 E+7	1.0917 E+7	1.5582 E+7
Linha 25	3.3302 E+7	2.0491 E+7	1.1169 E+7	2.2536 E+7
Linha 26	2.2536 E+7	1.5961 E+7	0.9211 E+7	3.3302 E+7

	Coluna 17	Coluna 18	Coluna 19	Coluna 20
Linha 1	1.9460 E+7	1.1609 E+7	10.4756 E+7	3.1320 E+7
Linha 2	1.8835 E+7	1.2859 E+7	3.1829 E+7	9.8487 E+7
Linha 3	1.2859 E+7	1.1081 E+7	1.5836 E+7	2.4216 E+7
Linha 4	3.1611 E+7	1.5760 E+7	2.4614 E+7	1.9455 E+7
Linha 5	9.2311 E+7	2.4022 E+7	1.9576 E+7	1.8912 E+7
Linha 6	2.4022 E+7	8.2641 E+7	1.1679 E+7	1.2947 E+7
Linha 7	1.9345 E+7	1.1539 E+7	9.8564 E+7	3.1117 E+7
Linha 8	1.8757 E+7	1.2772 E+7	3.2134 E+7	9.2310 E+7
Linha 9	1.2890 E+7	1.1045 E+7	1.6018 E+7	2.4544 E+7
Linha 10	3.1408 E+7	1.5687 E+7	2.4514 E+7	1.9339 E+7
Linha 11	9.8593 E+7	2.3841 E+7	1.9579 E+7	1.8833 E+7
Linha 12	2.4349 E+7	8.8960 E+7	1.1749 E+7	1.2978 E+7
Linha 13	1.9270 E+7	1.1517 E+7	10.4756 E+7	3.1320 E+7
Linha 14	1.8590 E+7	1.2696 E+7	3.1829 E+7	9.8487 E+7
Linha 15	1.2696 E+7	1.0883 E+7	1.5836 E+7	2.4216 E+7
Linha 16	3.1618 E+7	1.5762 E+7	2.4350 E+7	1.9265 E+7
Linha 17	10.7566 E+7	2.4028 E+7	1.9384 E+7	1.8665 E+7
Linha 18	2.4028 E+7	9.7895 E+7	1.1586 E+7	1.2782 E+7
Linha 19	1.9384 E+7	1.1586 E+7	11.3744 E+7	3.1531 E+7
Linha 20	1.8665 E+7	1.2782 E+7	3.1531 E+7	10.7459 E+7
Linha 21	1.2663 E+7	1.0917 E+7	1.5656 E+7	2.3894 E+7
Linha 22	3.1829 E+7	1.5836 E+7	2.4447 E+7	1.9380 E+7
Linha 23	9.8487 E+7	2.4216 E+7	1.9380 E+7	1.8742 E+7
Linha 24	2.3707 E+7	8.8779 E+7	1.1516 E+7	1.2749 E+7
Linha 25	1.5961 E+7	0.9211 E+7	3.3044 E+7	2.0335 E+7
Linha 26	2.0491 E+7	1.1169 E+7	2.2532 E+7	1.5911 E+7

	Coluna 21	Coluna 22	Coluna 23	Coluna 24
Linha 1	1.5582 E+7	2.4614 E+7	1.9455 E+7	1.1537 E+7
Linha 2	2.3707 E+7	1.9576 E+7	1.8912 E+7	1.2826 E+7
Linha 3	8.8779 E+7	1.1679 E+7	1.2947 E+7	1.1117 E+7
Linha 4	1.1537 E+7	10.4756 E+7	3.1320 E+7	1.5582 E+7
Linha 5	1.2826 E+7	3.1829 E+7	9.8487 E+7	2.3707 E+7
Linha 6	1.1117 E+7	1.5836 E+7	2.4216 E+7	8.8779 E+7
Linha 7	1.5509 E+7	2.4514 E+7	1.9339 E+7	1.1468 E+7
Linha 8	2.3527 E+7	1.9579 E+7	1.8833 E+7	1.2738 E+7

Linha 9	8.2640 E+7	1.1749 E+7	1.2978 E+7	1.1079 E+7
Linha 10	1.1468 E+7	9.8564 E+7	3.1117 E+7	1.5509 E+7
Linha 11	1.2738 E+7	3.2134 E+7	9.2310 E+7	2.3527 E+7
Linha 12	1.1079 E+7	1.6018 E+7	2.4544 E+7	8.2640 E+7
Linha 13	1.5582 E+7	2.4350 E+7	1.9265 E+7	1.1447 E+7
Linha 14	2.3707 E+7	1.9384 E+7	1.8665 E+7	1.2663 E+7
Linha 15	8.8779 E+7	1.1586 E+7	1.2782 E+7	1.0917 E+7
Linha 16	1.1447 E+7	10.4756 E+7	3.1320 E+7	1.5582 E+7
Linha 17	1.2663 E+7	3.1829 E+7	9.8487 E+7	2.3707 E+7
Linha 18	1.0917 E+7	1.5836 E+7	2.4216 E+7	8.8779 E+7
Linha 19	1.5656 E+7	2.4447 E+7	1.9380 E+7	1.1516 E+7
Linha 20	2.3894 E+7	1.9380 E+7	1.8742 E+7	1.2749 E+7
Linha 21	9.7713 E+7	1.1516 E+7	1.2749 E+7	1.0952 E+7
Linha 22	1.1516 E+7	11.3744 E+7	3.1531 E+7	1.5656 E+7
Linha 23	1.2749 E+7	3.1531 E+7	10.7459 E+7	2.3894 E+7
Linha 24	1.0952 E+7	1.5656 E+7	2.3894 E+7	9.7713 E+7
Linha 25	1.1046 E+7	2.2532 E+7	1.5911 E+7	0.9139 E+7
Linha 26	0.9139 E+7	3.3044 E+7	2.0335 E+7	1.1046 E+7

	Coluna 25	Coluna 26
Linha 1	3.3240 E+7	2.2704 E+7
Linha 2	2.0474 E+7	1.6054 E+7
Linha 3	1.1162 E+7	0.9256 E+7
Linha 4	2.2704 E+7	3.3240 E+7
Linha 5	1.6054 E+7	2.0474 E+7
Linha 6	0.9256 E+7	1.1162 E+7
Linha 7	3.3503 E+7	2.2706 E+7
Linha 8	2.0631 E+7	1.6104 E+7
Linha 9	1.1285 E+7	0.9328 E+7
Linha 10	2.2706 E+7	3.3503 E+7
Linha 11	1.6104 E+7	2.0631 E+7
Linha 12	0.9328 E+7	1.1285 E+7
Linha 13	3.3302 E+7	2.2536 E+7
Linha 14	2.0491 E+7	1.5961 E+7
Linha 15	1.1169 E+7	0.9211 E+7
Linha 16	2.2536 E+7	3.3302 E+7
Linha 17	1.5961 E+7	2.0491 E+7
Linha 18	0.9211 E+7	1.1169 E+7
Linha 19	3.3044 E+7	2.2532 E+7

Linha 20	2.0335 E+7	1.5911 E+7
Linha 21	1.1046 E+7	0.9139 E+7
Linha 22	2.2532 E+7	3.3044 E+7
Linha 23	1.5911 E+7	2.0335 E+7
Linha 24	0.9139 E+7	1.1046 E+7
Linha 25	17.4688 E+7	2.6414 E+7
Linha 26	2.6414 E+7	17.4688 E+7

D.2. Matrizes utilizadas na redução do efeito dos cabos para-raios

- **Matriz P_{condutor} (24 x 24):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	11.3819 E+7	3.1618 E+7	1.5762 E+7	2.4783 E+7
Linha 2	3.1618 E+7	10.7566 E+7	2.4028 E+7	1.9652 E+7
Linha 3	1.5762 E+7	2.4028 E+7	9.7895 E+7	1.1700 E+7
Linha 4	2.4783 E+7	1.9652 E+7	1.1700 E+7	11.3819 E+7
Linha 5	1.9652 E+7	1.9085 E+7	1.3024 E+7	3.1618 E+7
Linha 6	1.1700 E+7	1.3024 E+7	1.1284 E+7	1.5762 E+7
Linha 7	10.4831 E+7	3.1408 E+7	1.5687 E+7	2.4683 E+7
Linha 8	3.1916 E+7	9.8593 E+7	2.3841 E+7	1.9656 E+7
Linha 9	1.5942 E+7	2.4349 E+7	8.8960 E+7	1.1772 E+7
Linha 10	2.4683 E+7	1.9535 E+7	1.1630 E+7	10.4831 E+7
Linha 11	1.9656 E+7	1.9005 E+7	1.2935 E+7	3.1916 E+7
Linha 12	1.1772 E+7	1.3056 E+7	1.1246 E+7	1.5942 E+7
Linha 13	9.8564 E+7	3.1611 E+7	1.5760 E+7	2.4516 E+7
Linha 14	3.1611 E+7	9.2311 E+7	2.4022 E+7	1.9460 E+7
Linha 15	1.5760 E+7	2.4022 E+7	8.2641 E+7	1.1609 E+7
Linha 16	2.4516 E+7	1.9460 E+7	1.1609 E+7	9.8564 E+7
Linha 17	1.9460 E+7	1.8835 E+7	1.2859 E+7	3.1611 E+7
Linha 18	1.1609 E+7	1.2859 E+7	1.1081 E+7	1.5760 E+7
Linha 19	10.4756 E+7	3.1829 E+7	1.5836 E+7	2.4614 E+7
Linha 20	3.1320 E+7	9.8487 E+7	2.4216 E+7	1.9455 E+7
Linha 21	1.5582 E+7	2.3707 E+7	8.8779 E+7	1.1537 E+7
Linha 22	2.4614 E+7	1.9576 E+7	1.1679 E+7	10.4756 E+7
Linha 23	1.9455 E+7	1.8912 E+7	1.2947 E+7	3.1320 E+7
Linha 24	1.1537 E+7	1.2826 E+7	1.1117 E+7	1.5582 E+7
	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8

Linha 1	1.9652 E+7	1.1700 E+7	10.4831 E+7	3.1916 E+7
Linha 2	1.9085 E+7	1.3024 E+7	3.1408 E+7	9.8593 E+7
Linha 3	1.3024 E+7	1.1284 E+7	1.5687 E+7	2.3841 E+7
Linha 4	3.1618 E+7	1.5762 E+7	2.4683 E+7	1.9656 E+7
Linha 5	10.7566 E+7	2.4028 E+7	1.9535 E+7	1.9005 E+7
Linha 6	2.4028 E+7	9.7895 E+7	1.1630 E+7	1.2935 E+7
Linha 7	1.9535 E+7	1.1630 E+7	11.3894 E+7	3.1706 E+7
Linha 8	1.9005 E+7	1.2935 E+7	3.1706 E+7	10.7671 E+7
Linha 9	1.3056 E+7	1.1246 E+7	1.5867 E+7	2.4161 E+7
Linha 10	3.1408 E+7	1.5687 E+7	2.4586 E+7	1.9540 E+7
Linha 11	9.8593 E+7	2.3841 E+7	1.9540 E+7	1.8927 E+7
Linha 12	2.4349 E+7	8.8960 E+7	1.1701 E+7	1.2968 E+7
Linha 13	1.9460 E+7	1.1609 E+7	10.4831 E+7	3.1916 E+7
Linha 14	1.8835 E+7	1.2859 E+7	3.1408 E+7	9.8593 E+7
Linha 15	1.2859 E+7	1.1081 E+7	1.5687 E+7	2.3841 E+7
Linha 16	3.1611 E+7	1.5760 E+7	2.4419 E+7	1.9463 E+7
Linha 17	9.2311 E+7	2.4022 E+7	1.9345 E+7	1.8757 E+7
Linha 18	2.4022 E+7	8.2641 E+7	1.1539 E+7	1.2772 E+7
Linha 19	1.9576 E+7	1.1679 E+7	9.8564 E+7	3.2134 E+7
Linha 20	1.8912 E+7	1.2947 E+7	3.1117 E+7	9.2310 E+7
Linha 21	1.2826 E+7	1.1117 E+7	1.5509 E+7	2.3527 E+7
Linha 22	3.1829 E+7	1.5836 E+7	2.4514 E+7	1.9579 E+7
Linha 23	9.8487 E+7	2.4216 E+7	1.9339 E+7	1.8833 E+7
Linha 24	2.3707 E+7	8.8779 E+7	1.1468 E+7	1.2738 E+7

	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha 1	1.5942 E+7	2.4683 E+7	1.9656 E+7	1.1772 E+7
Linha 2	2.4349 E+7	1.9535 E+7	1.9005 E+7	1.3056 E+7
Linha 3	8.8960 E+7	1.1630 E+7	1.2935 E+7	1.1246 E+7
Linha 4	1.1772 E+7	10.4831 E+7	3.1916 E+7	1.5942 E+7
Linha 5	1.3056 E+7	3.1408 E+7	9.8593 E+7	2.4349 E+7
Linha 6	1.1246 E+7	1.5687 E+7	2.3841 E+7	8.8960 E+7
Linha 7	1.5867 E+7	2.4586 E+7	1.9540 E+7	1.1701 E+7
Linha 8	2.4161 E+7	1.9540 E+7	1.8927 E+7	1.2968 E+7
Linha 9	9.8075 E+7	1.1701 E+7	1.2968 E+7	1.1209 E+7
Linha 10	1.1701 E+7	11.3894 E+7	3.1706 E+7	1.5867 E+7
Linha 11	1.2968 E+7	3.1706 E+7	10.7671 E+7	2.4161 E+7
Linha 12	1.1209 E+7	1.5867 E+7	2.4161 E+7	9.8075 E+7
Linha 13	1.5942 E+7	2.4419 E+7	1.9463 E+7	1.1679 E+7

Linha 14	2.4349 E+7	1.9345 E+7	1.8757 E+7	1.2890 E+7
Linha 15	8.8960 E+7	1.1539 E+7	1.2772 E+7	1.1045 E+7
Linha 16	1.1679 E+7	10.4831 E+7	3.1916 E+7	1.5942 E+7
Linha 17	1.2890 E+7	3.1408 E+7	9.8593 E+7	2.4349 E+7
Linha 18	1.1045 E+7	1.5687 E+7	2.3841 E+7	8.8960 E+7
Linha 19	1.6018 E+7	2.4514 E+7	1.9579 E+7	1.1749 E+7
Linha 20	2.4544 E+7	1.9339 E+7	1.8833 E+7	1.2978 E+7
Linha 21	8.2640 E+7	1.1468 E+7	1.2738 E+7	1.1079 E+7
Linha 22	1.1749 E+7	9.8564 E+7	3.2134 E+7	1.6018 E+7
Linha 23	1.2978 E+7	3.1117 E+7	9.2310 E+7	2.4544 E+7
Linha 24	1.1079 E+7	1.5509 E+7	2.3527 E+7	8.2640 E+7

	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Linha 1	9.8564 E+7	3.1611 E+7	1.5760 E+7	2.4516 E+7
Linha 2	3.1611 E+7	9.2311 E+7	2.4022 E+7	1.9460 E+7
Linha 3	1.5760 E+7	2.4022 E+7	8.2641 E+7	1.1609 E+7
Linha 4	2.4516 E+7	1.9460 E+7	1.1609 E+7	9.8564 E+7
Linha 5	1.9460 E+7	1.8835 E+7	1.2859 E+7	3.1611 E+7
Linha 6	1.1609 E+7	1.2859 E+7	1.1081 E+7	1.5760 E+7
Linha 7	10.4831 E+7	3.1408 E+7	1.5687 E+7	2.4419 E+7
Linha 8	3.1916 E+7	9.8593 E+7	2.3841 E+7	1.9463 E+7
Linha 9	1.5942 E+7	2.4349 E+7	8.8960 E+7	1.1679 E+7
Linha 10	2.4419 E+7	1.9345 E+7	1.1539 E+7	10.4831 E+7
Linha 11	1.9463 E+7	1.8757 E+7	1.2772 E+7	3.1916 E+7
Linha 12	1.1679 E+7	1.2890 E+7	1.1045 E+7	1.5942 E+7
Linha 13	11.3819 E+7	3.1618 E+7	1.5762 E+7	2.4255 E+7
Linha 14	3.1618 E+7	10.7566 E+7	2.4028 E+7	1.9270 E+7
Linha 15	1.5762 E+7	2.4028 E+7	9.7895 E+7	1.1517 E+7
Linha 16	2.4255 E+7	1.9270 E+7	1.1517 E+7	11.3819 E+7
Linha 17	1.9270 E+7	1.8590 E+7	1.2696 E+7	3.1618 E+7
Linha 18	1.1517 E+7	1.2696 E+7	1.0883 E+7	1.5762 E+7
Linha 19	10.4756 E+7	3.1829 E+7	1.5836 E+7	2.4350 E+7
Linha 20	3.1320 E+7	9.8487 E+7	2.4216 E+7	1.9265 E+7
Linha 21	1.5582 E+7	2.3707 E+7	8.8779 E+7	1.1447 E+7
Linha 22	2.4350 E+7	1.9384 E+7	1.1586 E+7	10.4756 E+7
Linha 23	1.9265 E+7	1.8665 E+7	1.2782 E+7	3.1320 E+7
Linha 24	1.1447 E+7	1.2663 E+7	1.0917 E+7	1.5582 E+7

	Coluna 17	Coluna 18	Coluna 19	Coluna 20
--	-----------	-----------	-----------	-----------

Linha 1	1.9460 E+7	1.1609 E+7	10.4756 E+7	3.1320 E+7
Linha 2	1.8835 E+7	1.2859 E+7	3.1829 E+7	9.8487 E+7
Linha 3	1.2859 E+7	1.1081 E+7	1.5836 E+7	2.4216 E+7
Linha 4	3.1611 E+7	1.5760 E+7	2.4614 E+7	1.9455 E+7
Linha 5	9.2311 E+7	2.4022 E+7	1.9576 E+7	1.8912 E+7
Linha 6	2.4022 E+7	8.2641 E+7	1.1679 E+7	1.2947 E+7
Linha 7	1.9345 E+7	1.1539 E+7	9.8564 E+7	3.1117 E+7
Linha 8	1.8757 E+7	1.2772 E+7	3.2134 E+7	9.2310 E+7
Linha 9	1.2890 E+7	1.1045 E+7	1.6018 E+7	2.4544 E+7
Linha 10	3.1408 E+7	1.5687 E+7	2.4514 E+7	1.9339 E+7
Linha 11	9.8593 E+7	2.3841 E+7	1.9579 E+7	1.8833 E+7
Linha 12	2.4349 E+7	8.8960 E+7	1.1749 E+7	1.2978 E+7
Linha 13	1.9270 E+7	1.1517 E+7	10.4756 E+7	3.1320 E+7
Linha 14	1.8590 E+7	1.2696 E+7	3.1829 E+7	9.8487 E+7
Linha 15	1.2696 E+7	1.0883 E+7	1.5836 E+7	2.4216 E+7
Linha 16	3.1618 E+7	1.5762 E+7	2.4350 E+7	1.9265 E+7
Linha 17	10.7566 E+7	2.4028 E+7	1.9384 E+7	1.8665 E+7
Linha 18	2.4028 E+7	9.7895 E+7	1.1586 E+7	1.2782 E+7
Linha 19	1.9384 E+7	1.1586 E+7	11.3744 E+7	3.1531 E+7
Linha 20	1.8665 E+7	1.2782 E+7	3.1531 E+7	10.7459 E+7
Linha 21	1.2663 E+7	1.0917 E+7	1.5656 E+7	2.3894 E+7
Linha 22	3.1829 E+7	1.5836 E+7	2.4447 E+7	1.9380 E+7
Linha 23	9.8487 E+7	2.4216 E+7	1.9380 E+7	1.8742 E+7
Linha 24	2.3707 E+7	8.8779 E+7	1.1516 E+7	1.2749 E+7

	Coluna 21	Coluna 22	Coluna 23	Coluna 24
Linha 1	1.5582 E+7	2.4614 E+7	1.9455 E+7	1.1537 E+7
Linha 2	2.3707 E+7	1.9576 E+7	1.8912 E+7	1.2826 E+7
Linha 3	8.8779 E+7	1.1679 E+7	1.2947 E+7	1.1117 E+7
Linha 4	1.1537 E+7	10.4756 E+7	3.1320 E+7	1.5582 E+7
Linha 5	1.2826 E+7	3.1829 E+7	9.8487 E+7	2.3707 E+7
Linha 6	1.1117 E+7	1.5836 E+7	2.4216 E+7	8.8779 E+7
Linha 7	1.5509 E+7	2.4514 E+7	1.9339 E+7	1.1468 E+7
Linha 8	2.3527 E+7	1.9579 E+7	1.8833 E+7	1.2738 E+7
Linha 9	8.2640 E+7	1.1749 E+7	1.2978 E+7	1.1079 E+7
Linha 10	1.1468 E+7	9.8564 E+7	3.1117 E+7	1.5509 E+7
Linha 11	1.2738 E+7	3.2134 E+7	9.2310 E+7	2.3527 E+7
Linha 12	1.1079 E+7	1.6018 E+7	2.4544 E+7	8.2640 E+7
Linha 13	1.5582 E+7	2.4350 E+7	1.9265 E+7	1.1447 E+7

Linha 14	2.3707 E+7	1.9384 E+7	1.8665 E+7	1.2663 E+7
Linha 15	8.8779 E+7	1.1586 E+7	1.2782 E+7	1.0917 E+7
Linha 16	1.1447 E+7	10.4756 E+7	3.1320 E+7	1.5582 E+7
Linha 17	1.2663 E+7	3.1829 E+7	9.8487 E+7	2.3707 E+7
Linha 18	1.0917 E+7	1.5836 E+7	2.4216 E+7	8.8779 E+7
Linha 19	1.5656 E+7	2.4447 E+7	1.9380 E+7	1.1516 E+7
Linha 20	2.3894 E+7	1.9380 E+7	1.8742 E+7	1.2749 E+7
Linha 21	9.7713 E+7	1.1516 E+7	1.2749 E+7	1.0952 E+7
Linha 22	1.1516 E+7	11.3744 E+7	3.1531 E+7	1.5656 E+7
Linha 23	1.2749 E+7	3.1531 E+7	10.7459 E+7	2.3894 E+7
Linha 24	1.0952 E+7	1.5656 E+7	2.3894 E+7	9.7713 E+7

- **Matriz P_{condutor_para-raio} (24 x 2):**

	Coluna 1	Coluna 2
Linha 1	3.3240 E+7	2.2704 E+7
Linha 2	2.0474 E+7	1.6054 E+7
Linha 3	1.1162 E+7	0.9256 E+7
Linha 4	2.2704 E+7	3.3240 E+7
Linha 5	1.6054 E+7	2.0474 E+7
Linha 6	0.9256 E+7	1.1162 E+7
Linha 7	3.3503 E+7	2.2706 E+7
Linha 8	2.0631 E+7	1.6104 E+7
Linha 9	1.1285 E+7	0.9328 E+7
Linha 10	2.2706 E+7	3.3503 E+7
Linha 11	1.6104 E+7	2.0631 E+7
Linha 12	0.9328 E+7	1.1285 E+7
Linha 13	3.3302 E+7	2.2536 E+7
Linha 14	2.0491 E+7	1.5961 E+7
Linha 15	1.1169 E+7	0.9211 E+7
Linha 16	2.2536 E+7	3.3302 E+7
Linha 17	1.5961 E+7	2.0491 E+7
Linha 18	0.9211 E+7	1.1169 E+7
Linha 19	3.3044 E+7	2.2532 E+7
Linha 20	2.0335 E+7	1.5911 E+7
Linha 21	1.1046 E+7	0.9139 E+7
Linha 22	2.2532 E+7	3.3044 E+7
Linha 23	1.5911 E+7	2.0335 E+7
Linha 24	0.9139 E+7	1.1046 E+7

- **Matriz $P_{\text{para-raio_condutor}}$ (2 x 24):**

		Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha	1	3.3240 E+7	2.0474 E+7	1.1162 E+7	2.2704 E+7
Linha	2	2.2704 E+7	1.6054 E+7	0.9256 E+7	3.3240 E+7
		Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8
Linha	1	1.6054 E+7	0.9256 E+7	3.3503 E+7	2.0631 E+7
Linha	2	2.0474 E+7	1.1162 E+7	2.2706 E+7	1.6104 E+7
		Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha	1	1.1285 E+7	2.2706 E+7	1.6104 E+7	0.9328 E+7
Linha	2	0.9328 E+7	3.3503 E+7	2.0631 E+7	1.1285 E+7
		Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Linha	1	3.3302 E+7	2.0491 E+7	1.1169 E+7	2.2536 E+7
Linha	2	2.2536 E+7	1.5961 E+7	0.9211 E+7	3.3302 E+7
		Coluna 17	Coluna 18	Coluna 19	Coluna 20
Linha	1	1.5961 E+7	0.9211 E+7	3.3044 E+7	2.0335 E+7
Linha	2	2.0491 E+7	1.1169 E+7	2.2532 E+7	1.5911 E+7
		Coluna 21	Coluna 22	Coluna 23	Coluna 24
Linha	1	1.1046 E+7	2.2532 E+7	1.5911 E+7	0.9139 E+7
Linha	2	0.9139 E+7	3.3044 E+7	2.0335 E+7	1.1046 E+7

- **Matriz $P_{\text{para-raio}}$ (2 x 2):**

		Coluna 1	Coluna 2
Linha	1	17.4688 E+7	2.6414 E+7
Linha	2	2.6414 E+7	17.4688 E+7

- **Matriz reduzida do efeito dos cabos para-raios (24 x 24):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	10.5663 E+7	2.6381 E+7	1.2854 E+7	1.7376 E+7
Linha 2	2.6381 E+7	10.4182 E+7	2.2146 E+7	1.4728 E+7
Linha 3	1.2854 E+7	2.2146 E+7	9.6846 E+7	0.8928 E+7
Linha 4	1.7376 E+7	1.4728 E+7	0.8928 E+7	10.5663 E+7
Linha 5	1.4728 E+7	1.5834 E+7	1.1198 E+7	2.6381 E+7
Linha 6	0.8928 E+7	1.1198 E+7	1.0259 E+7	1.2854 E+7
Linha 7	9.6629 E+7	2.6142 E+7	1.2765 E+7	1.7249 E+7
Linha 8	2.6646 E+7	9.5189 E+7	2.1947 E+7	1.4707 E+7
Linha 9	1.3005 E+7	2.2448 E+7	8.7901 E+7	0.8974 E+7
Linha 10	1.7249 E+7	1.4591 E+7	0.8846 E+7	9.6629 E+7
Linha 11	1.4707 E+7	1.5736 E+7	1.1099 E+7	2.6646 E+7
Linha 12	0.8974 E+7	1.1213 E+7	1.0212 E+7	1.3005 E+7
Linha 13	9.0415 E+7	2.6380 E+7	1.2856 E+7	1.7132 E+7
Linha 14	2.6380 E+7	8.8933 E+7	2.2142 E+7	1.4551 E+7
Linha 15	1.2856 E+7	2.2142 E+7	8.1593 E+7	0.8843 E+7
Linha 16	1.7132 E+7	1.4549 E+7	0.8843 E+7	9.0415 E+7
Linha 17	1.4551 E+7	1.5592 E+7	1.1037 E+7	2.6380 E+7
Linha 18	0.8843 E+7	1.1037 E+7	1.0059 E+7	1.2856 E+7
Linha 19	9.6652 E+7	2.6625 E+7	1.2947 E+7	1.7257 E+7
Linha 20	2.6122 E+7	9.5129 E+7	2.2347 E+7	1.4570 E+7
Linha 21	1.2706 E+7	2.1846 E+7	8.7742 E+7	0.8797 E+7
Linha 22	1.7257 E+7	1.4685 E+7	0.8925 E+7	9.6652 E+7
Linha 23	1.4570 E+7	1.5686 E+7	1.1135 E+7	2.6122 E+7
Linha 24	0.8797 E+7	1.1021 E+7	1.0104 E+7	1.2706 E+7

	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8
Linha 1	1.4728 E+7	0.8928 E+7	9.6629 E+7	2.6646 E+7
Linha 2	1.5834 E+7	1.1198 E+7	2.6142 E+7	9.5189 E+7
Linha 3	1.1198 E+7	1.0259 E+7	1.2765 E+7	2.1947 E+7
Linha 4	2.6381 E+7	1.2854 E+7	1.7249 E+7	1.4707 E+7
Linha 5	10.4182 E+7	2.2146 E+7	1.4591 E+7	1.5736 E+7
Linha 6	2.2146 E+7	9.6846 E+7	0.8846 E+7	1.1099 E+7
Linha 7	1.4591 E+7	0.8846 E+7	10.5645 E+7	2.6407 E+7
Linha 8	1.5736 E+7	1.1099 E+7	2.6407 E+7	10.4247 E+7
Linha 9	1.1213 E+7	1.0212 E+7	1.2915 E+7	2.2249 E+7

Linha 10	2.6142 E+7	1.2765 E+7	1.7124 E+7	1.4571 E+7
Linha 11	9.5189 E+7	2.1947 E+7	1.4571 E+7	1.5641 E+7
Linha 12	2.2448 E+7	8.7901 E+7	0.8892 E+7	1.1115 E+7
Linha 13	1.4549 E+7	0.8843 E+7	9.6635 E+7	2.6652 E+7
Linha 14	1.5592 E+7	1.1037 E+7	2.6149 E+7	9.5194 E+7
Linha 15	1.1037 E+7	1.0059 E+7	1.2768 E+7	2.1950 E+7
Linha 16	2.6380 E+7	1.2856 E+7	1.7008 E+7	1.4528 E+7
Linha 17	8.8933 E+7	2.2142 E+7	1.4416 E+7	1.5497 E+7
Linha 18	2.2142 E+7	8.1593 E+7	0.8762 E+7	1.0940 E+7
Linha 19	1.4685 E+7	0.8925 E+7	9.0414 E+7	2.6898 E+7
Linha 20	1.5686 E+7	1.1135 E+7	2.5890 E+7	8.8932 E+7
Linha 21	1.1021 E+7	1.0104 E+7	1.2619 E+7	2.1654 E+7
Linha 22	2.6625 E+7	1.2947 E+7	1.7130 E+7	1.4663 E+7
Linha 23	9.5129 E+7	2.2347 E+7	1.4435 E+7	1.5590 E+7
Linha 24	2.1846 E+7	8.7742 E+7	0.8717 E+7	1.0924 E+7

	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha 1	1.3005 E+7	1.7249 E+7	1.4707 E+7	0.8974 E+7
Linha 2	2.2448 E+7	1.4591 E+7	1.5736 E+7	1.1213 E+7
Linha 3	8.7901 E+7	0.8846 E+7	1.1099 E+7	1.0212 E+7
Linha 4	0.8974 E+7	9.6629 E+7	2.6646 E+7	1.3005 E+7
Linha 5	1.1213 E+7	2.6142 E+7	9.5189 E+7	2.2448 E+7
Linha 6	1.0212 E+7	1.2765 E+7	2.1947 E+7	8.7901 E+7
Linha 7	1.2915 E+7	1.7124 E+7	1.4571 E+7	0.8892 E+7
Linha 8	2.2249 E+7	1.4571 E+7	1.5641 E+7	1.1115 E+7
Linha 9	9.7006 E+7	0.8892 E+7	1.1115 E+7	1.0166 E+7
Linha 10	0.8892 E+7	10.5645 E+7	2.6407 E+7	1.2915 E+7
Linha 11	1.1115 E+7	2.6407 E+7	10.4247 E+7	2.2249 E+7
Linha 12	1.0166 E+7	1.2915 E+7	2.2249 E+7	9.7006 E+7
Linha 13	1.3009 E+7	1.7008 E+7	1.4528 E+7	0.8888 E+7
Linha 14	2.2451 E+7	1.4416 E+7	1.5497 E+7	1.1052 E+7
Linha 15	8.7902 E+7	0.8762 E+7	1.0940 E+7	1.0013 E+7
Linha 16	0.8888 E+7	9.6635 E+7	2.6652 E+7	1.3009 E+7
Linha 17	1.1052 E+7	2.6149 E+7	9.5194 E+7	2.2451 E+7
Linha 18	1.0013 E+7	1.2768 E+7	2.1950 E+7	8.7902 E+7
Linha 19	1.3100 E+7	1.7130 E+7	1.4663 E+7	0.8970 E+7
Linha 20	2.2657 E+7	1.4435 E+7	1.5590 E+7	1.1149 E+7
Linha 21	8.1593 E+7	0.8717 E+7	1.0924 E+7	1.0057 E+7
Linha 22	0.8970 E+7	9.0414 E+7	2.6898 E+7	1.3100 E+7

Linha 23	1.1149 E+7	2.5890 E+7	8.8932 E+7	2.2657 E+7
Linha 24	1.0057 E+7	1.2619 E+7	2.1654 E+7	8.1593 E+7

	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Linha 1	9.0415 E+7	2.6380 E+7	1.2856 E+7	1.7132 E+7
Linha 2	2.6380 E+7	8.8933 E+7	2.2142 E+7	1.4549 E+7
Linha 3	1.2856 E+7	2.2142 E+7	8.1593 E+7	0.8843 E+7
Linha 4	1.7132 E+7	1.4551 E+7	0.8843 E+7	9.0415 E+7
Linha 5	1.4549 E+7	1.5592 E+7	1.1037 E+7	2.6380 E+7
Linha 6	0.8843 E+7	1.1037 E+7	1.0059 E+7	1.2856 E+7
Linha 7	9.6635 E+7	2.6149 E+7	1.2768 E+7	1.7008 E+7
Linha 8	2.6652 E+7	9.5194 E+7	2.1950 E+7	1.4528 E+7
Linha 9	1.3009 E+7	2.2451 E+7	8.7902 E+7	0.8888 E+7
Linha 10	1.7008 E+7	1.4416 E+7	0.8762 E+7	9.6635 E+7
Linha 11	1.4528 E+7	1.5497 E+7	1.0940 E+7	2.6652 E+7
Linha 12	0.8888 E+7	1.1052 E+7	1.0013 E+7	1.3009 E+7
Linha 13	10.5676 E+7	2.6393 E+7	1.2861 E+7	1.6894 E+7
Linha 14	2.6393 E+7	10.4193 E+7	2.2151 E+7	1.4374 E+7
Linha 15	1.2861 E+7	2.2151 E+7	9.6849 E+7	0.8759 E+7
Linha 16	1.6894 E+7	1.4374 E+7	0.8759 E+7	10.5676 E+7
Linha 17	1.4374 E+7	1.5355 E+7	1.0879 E+7	2.6393 E+7
Linha 18	0.8759 E+7	1.0879 E+7	0.9864 E+7	1.2861 E+7
Linha 19	9.6659 E+7	2.6631 E+7	1.2950 E+7	1.7016 E+7
Linha 20	2.6128 E+7	9.5135 E+7	2.2350 E+7	1.4394 E+7
Linha 21	1.2710 E+7	2.1849 E+7	8.7743 E+7	0.8714 E+7
Linha 22	1.7016 E+7	1.4507 E+7	0.8839 E+7	9.6659 E+7
Linha 23	1.4394 E+7	1.5447 E+7	1.0974 E+7	2.6128 E+7
Linha 24	0.8714 E+7	1.0863 E+7	0.9907 E+7	1.2710 E+7

	Coluna 17	Coluna 18	Coluna 19	Coluna 20
Linha 1	1.4551 E+7	0.8843 E+7	9.6652 E+7	2.6122 E+7
Linha 2	1.5592 E+7	1.1037 E+7	2.6625 E+7	9.5129 E+7
Linha 3	1.1037 E+7	1.0059 E+7	1.2947 E+7	2.2347 E+7
Linha 4	2.6380 E+7	1.2856 E+7	1.7257 E+7	1.4570 E+7
Linha 5	8.8933 E+7	2.2142 E+7	1.4685 E+7	1.5686 E+7
Linha 6	2.2142 E+7	8.1593 E+7	0.8925 E+7	1.1135 E+7
Linha 7	1.4416 E+7	0.8762 E+7	9.0414 E+7	2.5890 E+7
Linha 8	1.5497 E+7	1.0940 E+7	2.6898 E+7	8.8932 E+7
Linha 9	1.1052 E+7	1.0013 E+7	1.3100 E+7	2.2657 E+7

Linha 10	2.6149 E+7	1.2768 E+7	1.7130 E+7	1.4435 E+7
Linha 11	9.5194 E+7	2.1950 E+7	1.4663 E+7	1.5590 E+7
Linha 12	2.2451 E+7	8.7902 E+7	0.8970 E+7	1.1149 E+7
Linha 13	1.4374 E+7	0.8759 E+7	9.6659 E+7	2.6128 E+7
Linha 14	1.5355 E+7	1.0879 E+7	2.6631 E+7	9.5135 E+7
Linha 15	1.0879 E+7	0.9864 E+7	1.2950 E+7	2.2350 E+7
Linha 16	2.6393 E+7	1.2861 E+7	1.7016 E+7	1.4394 E+7
Linha 17	10.4193 E+7	2.2151 E+7	1.4507 E+7	1.5447 E+7
Linha 18	2.2151 E+7	9.6849 E+7	0.8839 E+7	1.0974 E+7
Linha 19	1.4507 E+7	0.8839 E+7	10.5692 E+7	2.6365 E+7
Linha 20	1.5447 E+7	1.0974 E+7	2.6365 E+7	10.4127 E+7
Linha 21	1.0863 E+7	0.9907 E+7	1.2799 E+7	2.2047 E+7
Linha 22	2.6631 E+7	1.2950 E+7	1.7140 E+7	1.4528 E+7
Linha 23	9.5135 E+7	2.2350 E+7	1.4528 E+7	1.5542 E+7
Linha 24	2.1849 E+7	8.7743 E+7	0.8794 E+7	1.0959 E+7

	Coluna 21	Coluna 22	Coluna 23	Coluna 24
Linha 1	1.2706 E+7	1.7257 E+7	1.4570 E+7	0.8797 E+7
Linha 2	2.1846 E+7	1.4685 E+7	1.5686 E+7	1.1021 E+7
Linha 3	8.7742 E+7	0.8925 E+7	1.1135 E+7	1.0104 E+7
Linha 4	0.8797 E+7	9.6652 E+7	2.6122 E+7	1.2706 E+7
Linha 5	1.1021 E+7	2.6625 E+7	9.5129 E+7	2.1846 E+7
Linha 6	1.0104 E+7	1.2947 E+7	2.2347 E+7	8.7742 E+7
Linha 7	1.2619 E+7	1.7130 E+7	1.4435 E+7	0.8717 E+7
Linha 8	2.1654 E+7	1.4663 E+7	1.5590 E+7	1.0924 E+7
Linha 9	8.1593 E+7	0.8970 E+7	1.1149 E+7	1.0057 E+7
Linha 10	0.8717 E+7	9.0414 E+7	2.5890 E+7	1.2619 E+7
Linha 11	1.0924 E+7	2.6898 E+7	8.8932 E+7	2.1654 E+7
Linha 12	1.0057 E+7	1.3100 E+7	2.2657 E+7	8.1593 E+7
Linha 13	1.2710 E+7	1.7016 E+7	1.4394 E+7	0.8714 E+7
Linha 14	2.1849 E+7	1.4507 E+7	1.5447 E+7	1.0863 E+7
Linha 15	8.7743 E+7	0.8839 E+7	1.0974 E+7	0.9907 E+7
Linha 16	0.8714 E+7	9.6659 E+7	2.6128 E+7	1.2710 E+7
Linha 17	1.0863 E+7	2.6631 E+7	9.5135 E+7	2.1849 E+7
Linha 18	0.9907 E+7	1.2950 E+7	2.2350 E+7	8.7743 E+7
Linha 19	1.2799 E+7	1.7140 E+7	1.4528 E+7	0.8794 E+7
Linha 20	2.2047 E+7	1.4528 E+7	1.5542 E+7	1.0959 E+7
Linha 21	9.6688 E+7	0.8794 E+7	1.0959 E+7	0.9952 E+7
Linha 22	0.8794 E+7	10.5692 E+7	2.6365 E+7	1.2799 E+7

Linha 23	1.0959 E+7	2.6365 E+7	10.4127 E+7	2.2047 E+7
Linha 24	0.9952 E+7	1.2799 E+7	2.2047 E+7	9.6688 E+7

D.3. Matrizes da redução dos subcondutores por fase:

- **Matriz P_A (6 x 6):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	10.5663 E+7	2.6381 E+7	1.2854 E+7	1.7376 E+7
Linha 2	2.6381 E+7	10.4182 E+7	2.2146 E+7	1.4728 E+7
Linha 3	1.2854 E+7	2.2146 E+7	9.6846 E+7	0.8928 E+7
Linha 4	1.7376 E+7	1.4728 E+7	0.8928 E+7	10.5663 E+7
Linha 5	1.4728 E+7	1.5834 E+7	1.1198 E+7	2.6381 E+7
Linha 6	0.8928 E+7	1.1198 E+7	1.0259 E+7	1.2854 E+7

	Coluna 5	Coluna 6
Linha 1	1.4728 E+7	0.8928 E+7
Linha 2	1.5834 E+7	1.1198 E+7
Linha 3	1.1198 E+7	1.0259 E+7
Linha 4	2.6381 E+7	1.2854 E+7
Linha 5	10.4182 E+7	2.2146 E+7
Linha 6	2.2146 E+7	9.6846 E+7

- **Matriz P_B (6 x 18):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	-9.0344 E+6	0.2653 E+6	0.1509 E+6	-0.1271 E+6
Linha 2	-0.2384 E+6	-8.9931 E+6	0.3024 E+6	-0.1375 E+6
Linha 3	-0.0894 E+6	-0.1986 E+6	-8.9452 E+6	-0.0820 E+6
Linha 4	-0.1271 E+6	-0.0209 E+6	0.0459 E+6	-9.0344 E+6
Linha 5	-0.1375 E+6	-0.0971 E+6	0.0151 E+6	-0.2384 E+6
Linha 6	-0.0820 E+6	-0.0991 E+6	-0.0477 E+6	-0.0894 E+6

	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8
Linha 1	-0.0209 E+6	0.0459 E+6	-15.2485 E+6	-0.0004 E+6
Linha 2	-0.0971 E+6	0.0151 E+6	-0.0008 E+6	-15.2497 E+6
Linha 3	-0.0991 E+6	-0.0477 E+6	0.0024 E+6	-0.0036 E+6
Linha 4	0.2653 E+6	0.1509 E+6	-0.2434 E+6	-0.1777 E+6
Linha 5	-8.9931 E+6	0.3024 E+6	-0.1791 E+6	-0.2417 E+6

Linha 6	-0.1986 E+6	-8.9452 E+6	-0.0849 E+6	-0.1608 E+6
	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha 1	0.0020 E+6	-0.2434 E+6	-0.1777 E+6	-0.0846 E+6
Linha 2	-0.0040 E+6	-0.1791 E+6	-0.2417 E+6	-0.1612 E+6
Linha 3	-15.2527 E+6	-0.0849 E+6	-0.1608 E+6	-0.2004 E+6
Linha 4	-0.0846 E+6	-15.2485 E+6	-0.0004 E+6	0.0020 E+6
Linha 5	-0.1612 E+6	-0.0008 E+6	-15.2497 E+6	-0.0040 E+6
Linha 6	-0.2004 E+6	0.0024 E+6	-0.0036 E+6	-15.2527 E+6
	Coluna 13	Coluna 14	Coluna 15	Coluna 16
Linha 1	-9.0108 E+6	-0.2589 E+6	-0.1476 E+6	-0.1190 E+6
Linha 2	0.2442 E+6	-9.0529 E+6	-0.2998 E+6	-0.0429 E+6
Linha 3	0.0931 E+6	0.2017 E+6	-9.1043 E+6	-0.0032 E+6
Linha 4	-0.1190 E+6	-0.1579 E+6	-0.1307 E+6	-9.0108 E+6
Linha 5	-0.0429 E+6	-0.1471 E+6	-0.1775 E+6	0.2442 E+6
Linha 6	-0.0032 E+6	-0.0630 E+6	-0.1552 E+6	0.0931 E+6
	Coluna 17	Coluna 18		
Linha 1	-0.1579 E+6	-0.1307 E+6		
Linha 2	-0.1471 E+6	-0.1775 E+6		
Linha 3	-0.0630 E+6	-0.1552 E+6		
Linha 4	-0.2589 E+6	-0.1476 E+6		
Linha 5	-9.0529 E+6	-0.2998 E+6		
Linha 6	0.2017 E+6	-9.1043 E+6		

- **Matriz Pc (18 x 6):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	-9.0344 E+6	-0.2384 E+6	-0.0894 E+6	-0.1271 E+6
Linha 2	0.2653 E+6	-8.9931 E+6	-0.1986 E+6	-0.0209 E+6
Linha 3	0.1509 E+6	0.3024 E+6	-8.9452 E+6	0.0459 E+6
Linha 4	-0.1271 E+6	-0.1375 E+6	-0.0820 E+6	-9.0344 E+6
Linha 5	-0.0209 E+6	-0.0971 E+6	-0.0991 E+6	0.2653 E+6
Linha 6	0.0459 E+6	0.0151 E+6	-0.0477 E+6	0.1509 E+6
Linha 7	-15.2485 E+6	-0.0008 E+6	0.0024 E+6	-0.2434 E+6
Linha 8	-0.0004 E+6	-15.2497 E+6	-0.0036 E+6	-0.1777 E+6
Linha 9	0.0020 E+6	-0.0040 E+6	-15.2527 E+6	-0.0846 E+6

Linha 10	-0.2434 E+6	-0.1791 E+6	-0.0849 E+6	-15.2485 E+6
Linha 11	-0.1777 E+6	-0.2417 E+6	-0.1608 E+6	-0.0004 E+6
Linha 12	-0.0846 E+6	-0.1612 E+6	-0.2004 E+6	0.0020 E+6
Linha 13	-9.0108 E+6	0.2442 E+6	0.0931 E+6	-0.1190 E+6
Linha 14	-0.2589 E+6	-9.0529 E+6	0.2017 E+6	-0.1579 E+6
Linha 15	-0.1476 E+6	-0.2998 E+6	-9.1043 E+6	-0.1307 E+6
Linha 16	-0.1190 E+6	-0.0429 E+6	-0.0032 E+6	-9.0108 E+6
Linha 17	-0.1579 E+6	-0.1471 E+6	-0.0630 E+6	-0.2589 E+6
Linha 18	-0.1307 E+6	-0.1775 E+6	-0.1552 E+6	-0.1476 E+6

	Coluna 5	Coluna 6
Linha 1	-0.1375 E+6	-0.0820 E+6
Linha 2	-0.0971 E+6	-0.0991 E+6
Linha 3	0.0151 E+6	-0.0477 E+6
Linha 4	-0.2384 E+6	-0.0894 E+6
Linha 5	-8.9931 E+6	-0.1986 E+6
Linha 6	0.3024 E+6	-8.9452 E+6
Linha 7	-0.1791 E+6	-0.0849 E+6
Linha 8	-0.2417 E+6	-0.1608 E+6
Linha 9	-0.1612 E+6	-0.2004 E+6
Linha 10	-0.0008 E+6	0.0024 E+6
Linha 11	-15.2497 E+6	-0.0036 E+6
Linha 12	-0.0040 E+6	-15.2527 E+6
Linha 13	-0.0429 E+6	-0.0032 E+6
Linha 14	-0.1471 E+6	-0.0630 E+6
Linha 15	-0.1775 E+6	-0.1552 E+6
Linha 16	0.2442 E+6	0.0931 E+6
Linha 17	-9.0529 E+6	0.2017 E+6
Linha 18	-0.2998 E+6	-9.1043 E+6

- **Matriz P_D (18 x 18):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	18.0505 E+6	-0.0004 E+6	-0.0005 E+6	0.0022 E+6
Linha 2	-0.0004 E+6	18.0506 E+6	-0.0006 E+6	0.0007 E+6
Linha 3	-0.0005 E+6	-0.0006 E+6	18.0501 E+6	-0.0004 E+6
Linha 4	0.0022 E+6	0.0007 E+6	-0.0004 E+6	18.0505 E+6
Linha 5	0.0007 E+6	0.0020 E+6	0.0005 E+6	-0.0004 E+6

Linha 6	-0.0004 E+6	0.0005 E+6	0.0016 E+6	-0.0005 E+6
Linha 7	15.2550 E+6	0.0069 E+6	0.0015 E+6	0.0026 E+6
Linha 8	0.0069 E+6	15.2549 E+6	0.0067 E+6	0.0025 E+6
Linha 9	0.0015 E+6	0.0067 E+6	15.2543 E+6	0.0010 E+6
Linha 10	0.0026 E+6	-0.0004 E+6	-0.0010 E+6	15.2550 E+6
Linha 11	0.0025 E+6	0.0024 E+6	-0.0005 E+6	0.0069 E+6
Linha 12	0.0010 E+6	0.0023 E+6	0.0020 E+6	0.0015 E+6
Linha 13	2.7961 E+6	0.0076 E+6	0.0020 E+6	0.0004 E+6
Linha 14	0.0072 E+6	2.7960 E+6	0.0075 E+6	0.0018 E+6
Linha 15	0.0019 E+6	0.0071 E+6	2.7960 E+6	0.0013 E+6
Linha 16	0.0004 E+6	-0.0011 E+6	-0.0006 E+6	2.7961 E+6
Linha 17	0.0018 E+6	0.0004 E+6	-0.0011 E+6	0.0072 E+6
Linha 18	0.0013 E+6	0.0018 E+6	0.0004 E+6	0.0019 E+6

	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8
Linha 1	0.0007 E+6	-0.0004 E+6	15.2550 E+6	0.0069 E+6
Linha 2	0.0020 E+6	0.0005 E+6	0.0069 E+6	15.2549 E+6
Linha 3	0.0005 E+6	0.0016 E+6	0.0015 E+6	0.0067 E+6
Linha 4	-0.0004 E+6	-0.0005 E+6	0.0026 E+6	0.0025 E+6
Linha 5	18.0506 E+6	-0.0006 E+6	-0.0004 E+6	0.0024 E+6
Linha 6	-0.0006 E+6	18.0501 E+6	-0.0010 E+6	-0.0005 E+6
Linha 7	-0.0004 E+6	-0.0010 E+6	30.5100 E+6	0.0138 E+6
Linha 8	0.0024 E+6	-0.0005 E+6	0.0138 E+6	30.5098 E+6
Linha 9	0.0023 E+6	0.0020 E+6	0.0029 E+6	0.0134 E+6
Linha 10	0.0069 E+6	0.0015 E+6	0.0048 E+6	0.0022 E+6
Linha 11	15.2549 E+6	0.0067 E+6	0.0022 E+6	0.0049 E+6
Linha 12	0.0067 E+6	15.2543 E+6	0.0002 E+6	0.0023 E+6
Linha 13	-0.0011 E+6	-0.0006 E+6	15.2550 E+6	0.0069 E+6
Linha 14	0.0004 E+6	-0.0011 E+6	0.0069 E+6	15.2549 E+6
Linha 15	0.0018 E+6	0.0004 E+6	0.0014 E+6	0.0066 E+6
Linha 16	0.0076 E+6	0.0020 E+6	0.0023 E+6	-0.0004 E+6
Linha 17	2.7960 E+6	0.0075 E+6	0.0025 E+6	0.0026 E+6
Linha 18	0.0071 E+6	2.7960 E+6	0.0012 E+6	0.0029 E+6

	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11	Coluna 12
Linha 1	0.0015 E+6	0.0026 E+6	0.0025 E+6	0.0010 E+6
Linha 2	0.0067 E+6	-0.0004 E+6	0.0024 E+6	0.0023 E+6
Linha 3	15.2543 E+6	-0.0010 E+6	-0.0005 E+6	0.0020 E+6
Linha 4	0.0010 E+6	15.2550 E+6	0.0069 E+6	0.0015 E+6

Linha 5	0.0023 E+6	0.0069 E+6	15.2549 E+6	0.0067 E+6
Linha 6	0.0020 E+6	0.0015 E+6	0.0067 E+6	15.2543 E+6
Linha 7	0.0029 E+6	0.0048 E+6	0.0022 E+6	0.0002 E+6
Linha 8	0.0134 E+6	0.0022 E+6	0.0049 E+6	0.0023 E+6
Linha 9	30.5087 E+6	0.0002 E+6	0.0023 E+6	0.0050 E+6
Linha 10	0.0002 E+6	30.5100 E+6	0.0138 E+6	0.0029 E+6
Linha 11	0.0023 E+6	0.0138 E+6	30.5098 E+6	0.0134 E+6
Linha 12	0.0050 E+6	0.0029 E+6	0.0134 E+6	30.5087 E+6
Linha 13	0.0015 E+6	0.0023 E+6	-0.0004 E+6	-0.0008 E+6
Linha 14	0.0067 E+6	0.0025 E+6	0.0026 E+6	0.0000 E+6
Linha 15	15.2543 E+6	0.0012 E+6	0.0029 E+6	0.0031 E+6
Linha 16	-0.0008 E+6	15.2550 E+6	0.0069 E+6	0.0015 E+6
Linha 17	0.0000 E+6	0.0069 E+6	15.2549 E+6	0.0067 E+6
Linha 18	0.0031 E+6	0.0014 E+6	0.0066 E+6	15.2543 E+6

Coluna 13

Coluna 14

Coluna 15

Coluna 16

Linha 1	2.7961 E+6	0.0072 E+6	0.0019 E+6	0.0004 E+6
Linha 2	0.0076 E+6	2.7960 E+6	0.0071 E+6	-0.0011 E+6
Linha 3	0.0020 E+6	0.0075 E+6	2.7960 E+6	-0.0006 E+6
Linha 4	0.0004 E+6	0.0018 E+6	0.0013 E+6	2.7961 E+6
Linha 5	-0.0011 E+6	0.0004 E+6	0.0018 E+6	0.0076 E+6
Linha 6	-0.0006 E+6	-0.0011 E+6	0.0004 E+6	0.0020 E+6
Linha 7	15.2550 E+6	0.0069 E+6	0.0014 E+6	0.0023 E+6
Linha 8	0.0069 E+6	15.2549 E+6	0.0066 E+6	-0.0004 E+6
Linha 9	0.0015 E+6	0.0067 E+6	15.2543 E+6	-0.0008 E+6
Linha 10	0.0023 E+6	0.0025 E+6	0.0012 E+6	15.2550 E+6
Linha 11	-0.0004 E+6	0.0026 E+6	0.0029 E+6	0.0069 E+6
Linha 12	-0.0008 E+6	0.0000 E+6	0.0031 E+6	0.0015 E+6
Linha 13	18.0506 E+6	-0.0005 E+6	-0.0005 E+6	0.0020 E+6
Linha 14	-0.0005 E+6	18.0506 E+6	-0.0007 E+6	0.0007 E+6
Linha 15	-0.0005 E+6	-0.0007 E+6	18.0500 E+6	-0.0001 E+6
Linha 16	0.0020 E+6	0.0007 E+6	-0.0001 E+6	18.0506 E+6
Linha 17	0.0007 E+6	0.0022 E+6	0.0010 E+6	-0.0005 E+6
Linha 18	-0.0001 E+6	0.0010 E+6	0.0027 E+6	-0.0005 E+6

Coluna 17

Coluna 18

Linha 1	0.0018 E+6	0.0013 E+6
Linha 2	0.0004 E+6	0.0018 E+6
Linha 3	-0.0011 E+6	0.0004 E+6

Linha 4	0.0072 E+6	0.0019 E+6
Linha 5	2.7960 E+6	0.0071 E+6
Linha 6	0.0075 E+6	2.7960 E+6
Linha 7	0.0025 E+6	0.0012 E+6
Linha 8	0.0026 E+6	0.0029 E+6
Linha 9	0.0000 E+6	0.0031 E+6
Linha 10	0.0069 E+6	0.0014 E+6
Linha 11	15.2549 E+6	0.0066 E+6
Linha 12	0.0067 E+6	15.2543 E+6
Linha 13	0.0007 E+6	-0.0001 E+6
Linha 14	0.0022 E+6	0.0010 E+6
Linha 15	0.0010 E+6	0.0027 E+6
Linha 16	-0.0005 E+6	-0.0005 E+6
Linha 17	18.0506 E+6	-0.0007 E+6

- **Matriz reduzida dos subcondutores (6 x 6):**

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	97.3261 E+6	26.3749 E+6	12.8600 E+6	17.1243 E+6
Linha 2	26.3749 E+6	95.8359 E+6	22.1396 E+6	14.5433 E+6
Linha 3	12.8600 E+6	22.1396 E+6	88.5109 E+6	8.8436 E+6
Linha 4	17.1243 E+6	14.5433 E+6	8.8436 E+6	97.3261 E+6
Linha 5	14.5433 E+6	15.5814 E+6	11.0332 E+6	26.3749 E+6
Linha 6	8.8436 E+6	11.0332 E+6	10.0562 E+6	12.8600 E+6

	Coluna 5	Coluna 6
Linha 1	14.5433 E+6	8.8436 E+6
Linha 2	15.5814 E+6	11.0332 E+6
Linha 3	11.0332 E+6	10.0562 E+6
Linha 4	26.3749 E+6	12.8600 E+6
Linha 5	95.8359 E+6	22.1396 E+6
Linha 6	22.1396 E+6	88.5109 E+6

D.4. Matriz de capacitância de fase.

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.1146 E-6	-0.0262 E-6	-0.0074 E-6	-0.0130 E-6

Linha 2	-0.0262 E-6	0.1204 E-6	-0.0237 E-6	-0.0079 E-6
Linha 3	-0.0074 E-6	-0.0237 E-6	0.1220 E-6	-0.0035 E-6
Linha 4	-0.0130 E-6	-0.0079 E-6	-0.0035 E-6	0.1146 E-6
Linha 5	-0.0079 E-6	-0.0093 E-6	-0.0062 E-6	-0.0262 E-6
Linha 6	-0.0035 E-6	-0.0062 E-6	-0.0081 E-6	-0.0074 E-6

	Coluna 5	Coluna 6
Linha 1	-0.0079 E-6	-0.0035 E-6
Linha 2	-0.0093 E-6	-0.0062 E-6
Linha 3	-0.0062 E-6	-0.0081 E-6
Linha 4	-0.0262 E-6	-0.0074 E-6
Linha 5	0.1204 E-6	-0.0237 E-6
Linha 6	-0.0237 E-6	0.1220 E-6

D.5. Matriz de capacitância de sequência.

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Linha 1	0.1381 E-6	-0.0068 E-6	0.0001 E-6	-0.0042 E-6
Linha 2	-0.0068 E-6	0.1381 E-6	0.0001 E-6	-0.0018 E-6
Linha 3	0.0001 E-6	0.0001 E-6	0.0808 E-6	-0.0012 E-6
Linha 4	-0.0042 E-6	-0.0018 E-6	-0.0012 E-6	0.1381 E-6
Linha 5	-0.0018 E-6	-0.0042 E-6	-0.0012 E-6	-0.0068 E-6
Linha 6	-0.0012 E-6	-0.0012 E-6	-0.0219 E-6	0.0001 E-6

	Coluna 5	Coluna 6
Linha 1	-0.0018 E-6	-0.0012 E-6
Linha 2	-0.0042 E-6	-0.0012 E-6
Linha 3	-0.0012 E-6	-0.0219 E-6
Linha 4	-0.0068 E-6	0.0001 E-6
Linha 5	0.1381 E-6	0.0001 E-6
Linha 6	0.0001 E-6	0.0808 E-6

APÊNDICE E – RELATÓRIO TÉCNICO ELABORADO PELO LTCALC PARA O ESTUDO DE CASO

Folha: 1/2



Relatório Técnico

Relatório Técnico: Dados de Entrada e Resultados Obtidos
Software Produzido por: Obed L. Vieira e Marcus S. de Medeiros

Dados de Entrada

Dados do Cabo Condutor			
Nome:	T-Eagle	Bitola:	556,5 AWG
Fabricante:	Nexans	Diâmetro Externo [cm]:	24,21
Raio Interno [cm]:	5,19	Relação T/D:	0,2856
Dados para Cálculo da Resistência			
Resistência CC [ohm/km]:	0,1047	Resistência CC corrigida [ohm/km]:	0,1321
Temperatura Atual [°C]:	20,0	Temperatura Desejada [°C]:	85,0

Dados do Cabo Para-raio			
Nome:	OPGW 125M 11.2TC	Bitola:	73 mm ²
Fabricante:	Telcon	Diâmetro Externo [cm]:	1,12
Raio Interno [cm]:	0,0	Relação T/D:	0,5000
Dados para Cálculo da Resistência			
Resistência CC [ohm/km]:	1,154	Resistência CC corrigida [ohm/km]:	1,4565
Temperatura Atual [°C]:	20,0	Temperatura Desejada [°C]:	85,0

Dados da Estrutura Linha 500 kV					
Distância da Fase A ao centro da estrutura [m]:	-9,0	Distância da Fase B ao centro da estrutura [m]:	-9,0	Distância da Fase C ao centro da estrutura [m]:	-9,0
Altura da Fase A na torre ao solo [m]:	46,5	Altura da Fase B na torre ao solo [m]:	36,5	Altura da Fase C na torre ao solo [m]:	26,5
Altura da Fase A no meio do vão ao solo [m]:	27,8	Altura da Fase B no meio do vão ao solo [m]:	17,8	Altura da Fase C no meio do vão ao solo [m]:	7,8
Subcondutores por Fase					
Nº Subcondutores:	4	Angulo [°]:	0,0	Distância [cm]:	20,0
Número de Cabos Para-raios = 2					
Distância do cabo para-raio 1 ao centro da estrutura [m]:	-11,0	Altura do cabo para-raio 1 na torre ao solo [m]:	56,0	Altura do cabo para-raio 1 no meio do vão ao solo [m]:	41,8
Distância do cabo para-raio 2 ao centro da estrutura [m]:	11,0	Altura do cabo para-raio 2 na torre ao solo [m]:	56,0	Altura do cabo para-raio 2 no meio do vão ao solo [m]:	41,8
Circuito Duplo: Sim					

Resultados

Impedâncias	
Impedância Sequência Zero [ohm/km]:	0.3156+i*1.081
Impedância Sequência Positiva [ohm/km]:	0.0339+i*0.3182
Impedância Sequência Negativa [ohm/km]:	0.0339+i*0.3182
Impedância Mútua Sequência Zero [ohm/km]:	0.2812+i*0.6485
Impedância Sequência Zero [pu]:	0.3156+i*0.0227
Impedância Sequência Positiva [pu/km]:	0.0339+i*0.0067
Impedância Sequência Negativa [pu/km]:	0.0339+i*0.0067
Impedância Mútua Sequência Zero [pu/km]:	0.2812+i*0.0136
Susceptâncias	
Susceptância Sequência Positiva [mho/km]:	5.2067E-6
Susceptância Sequência Negativa [mho/km]:	5.2067E-6
Susceptância Sequência Zero [mho/km]:	3.0478E-6
Susceptância Sequência Positiva [pu/km]:	2.478892E-4
Susceptância Sequência Negativa [pu/km]:	2.478892E-4
Susceptância Sequência Zero [pu/km]:	1.451065E-4

ANEXO A – CARTÃO DE ENTRADA CONSTRUÍDO PELO LINE CONSTANT

BEGIN NEW DATA CASE

LINE CONSTANTS

\$ERASE

\$UNITS, 60., 60.

BRANCH IN__AOUT__AIN__BOUT__BIN__COUT__CIN__DOUT__DIN__EOUT__EIN__FOUT__F

METRIC

10.286	0.1321	4	24.21	-9.	46.5	27.8	20.	0.0	4	
20.286	0.1321	4	24.21	-9.	36.5	17.8	20.	0.0	4	
30.286	0.1321	4	24.21	-9.	26.5	7.8	20.	0.0	4	
40.286	0.1321	4	24.21	9.	26.5	7.8	20.	0.0	4	
50.286	0.1321	4	24.21	9.	36.5	17.8	20.	0.0	4	
60.286	0.1321	4	24.21	9.	46.5	27.8	20.	0.0	4	
0	0.5	1.4564	4	1.12	11.	56.	41.8	0.0	0.0	0
0	0.5	1.4564	4	1.12	-11.	56.	41.8	0.0	0.0	0

BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS

100. 60. 111111 111111 0 1. 44

\$PUNCH

BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS

BLANK CARD ENDING LINE CONSTANT

BEGIN NEW DATA CASE

BLANK CARD

ANEXO B – RESUMO DO CARTÃO DE SAÍDA DO LINE CONSTANT PARA O ESTUDO DE CASO

Sequence	Surge impedance		Attenuation	velocity	Wavelength	Resistance	Reactance	Susceptance
	magnitude(ohm)	angle(degr.)	db/km	km/sec	km	ohm/km	ohm/km	mho/km
Zero :	6.07732E+02	-8.14611E+00	2.27971E-03	2.05605E+05	3.42675E+03	3.15793E-01	1.08047E+00	3.04782E-06
Positive:	2.47911E+02	-3.03972E+00	5.94537E-04	2.92473E+05	4.87455E+03	3.38906E-02	3.18203E-01	5.20667E-06