



CÁLCULO DE IMPEDÂNCIAS E ADMITÂNCIAS INTERNAS DE CABOS  
ISOLADOS EMPREGANDO MODELOS ANALÍTICOS E ELEMENTOS FINITOS

Ana Carolina Nantes Pinheiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Rio de Janeiro  
Setembro de 2019

CÁLCULO DE IMPEDÂNCIAS E ADMITÂNCIAS INTERNAS DE CABOS  
ISOLADOS EMPREGANDO MODELOS ANALÍTICOS E ELEMENTOS FINITOS

Ana Carolina Nantes Pinheiro

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

---

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

---

Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2019

Pinheiro, Ana Carolina Nantes

Cálculo de Impedâncias e Admitâncias Internas de Cabos Isolados Empregando Modelos Analíticos e Elementos Finitos / Ana Carolina Nantes Pinheiro – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVIII, 145 p. il.; 29,7 cm

Orientador: Antônio Carlos Siqueira de Lima

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 120-122.

1. Transitórios Eletromagnéticos. 2. Cabos Isolados. 3. Elementos Finitos. I. Lima, Antônio Carlos Siqueira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

# AGRADECIMENTOS

Perseverança.

Neste momento da minha vida eu percebo que todo o caminho que trilhei para chegar até aqui se resume a esta palavra. Perseverança significa ter força e paciência para não desistir. A pessoa que persevera enfrenta dificuldades, desafios e tempos de espera sem desanimar para alcançar o seu objetivo.

A conclusão deste longo trabalho tem como base a perseverança. Muitos foram os acontecimentos que ocasionaram novos rumos para esta dissertação. Entretanto, nunca desisti. Muitas pessoas me ajudaram e me deram forças para concluir este trabalho e a elas gostaria de registrar minha eterna gratidão.

A Deus, por me guiar nesta jornada de conhecimento e crescimento pessoal.

Ao meu amado noivo, por toda compreensão, auxílio e carinho.

Aos meus pais e minha irmã por todo apoio e incentivo nesta jornada.

Ao professor Antonio Carlos Siqueira de Lima, por todo conhecimento, orientação e ensino que tenho a honra de receber desde a graduação. Além de toda paciência, cuidado e dedicação. O senhor confiou em mim e nunca me deixou desistir, mas principalmente muito obrigada por não desistir de mim e me incentivar.

Ao pesquisador Carlos Kleber da Costa Arruda pelos conselhos, ensinamentos e ideias que fizeram toda a diferença neste trabalho. Sempre prestativo em tirar minhas dúvidas mesmo quando eu já não estava mais no Cepel. Sou grata por toda compreensão e incentivo ao longo desta jornada.

Aos membros da banca, pela avaliação do meu trabalho e valiosas contribuições.

Sinto-me honrada em concluir o mestrado no Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ e não teria chegado até aqui sem a ajuda de cada um de vocês.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## CÁLCULO DE IMPEDÂNCIAS E ADMITÂNCIAS INTERNAS DE CABOS ISOLADOS EMPREGANDO MODELOS ANALÍTICOS E ELEMENTOS FINITOS

Ana Carolina Nantes Pinheiro

Setembro/2019

Orientador: Antônio Carlos Siqueira de Lima

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta o cálculo de impedâncias e admitâncias internas unitárias por meio do Método dos Elementos Finitos considerando diferentes topologias de cabos isolados. Os resultados obtidos através das formulações numéricas foram comparados com àqueles obtidos através de formulações analíticas entre 0,1 Hz e 1 MHz.

Inicialmente analisou-se um caso monofásico e a partir deste, novos casos foram implementados, considerando sistemas trifásicos envolvidos por uma tubulação em comum com objetivo de analisar a influência da disposição das veias de potência nos cálculos de parâmetros internos. Observou-se que quanto mais próximo da armadura está a blindagem, maior será a capacitância própria e variações na resistência ocorrem para altas frequências. Para os casos de cabos multifilamentares, observou-se que a consideração da camada semicondutora tem pouca influência nos cálculos de impedância, mas causam aumento nos valores de capacitância. Além disso, verificou-se que um cabo equivalente com condutor sólido e área igual a soma das áreas dos filamentos apresenta uma diferença percentual para capacitância menor que 17%, mas para resistência apresenta discrepâncias em altas frequências e para indutâncias apresenta discrepâncias para baixas frequências. Ao final, foi calculada a contribuição de um cabo de comunicação nas matrizes de impedância e capacitância.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CALCULATION OF INTERNAL IMPEDANCE AND ADMITTANCE OF  
INSULATED CABLES BY ANALYTICAL MODELS AND FINITE ELEMENT

Ana Carolina Nantes Pinheiro

September/2019

Advisor: Antônio Carlos Siqueira de Lima

Department: Electrical Engineering

This paper presents the calculation of internal impedances and admittances by Finite Element Method, varying cable configurations and material. The results obtained by the numerical formulations were compared with those obtained by analytical formulations between 0.1 Hz and 1 MHz.

Initially, a single-phase case was analyzed and from this, new cases were implemented, considering three-phase systems surrounded by a common pipe with the purpose of analyzing the influence of the arrangement of the power veins on the internal parameter calculations. It was observed that the closer the sheath is to the armor, the greater its own capacitance and resistance variations occur for high frequencies. For multifilament cable cases, it was observed that the insertion of a semiconductor layer has little influence on the impedance calculations, but causes an increase in capacitance values. Moreover, it was found that an equivalent cable with solid conductor and area equal to the sum of the filament areas has a maximum percentage difference for capacitance less than 17%, but for resistance has discrepancies at high frequencies and for inductances has discrepancies for low frequencies. At the end, the contribution of a communication cable in the impedance and capacitance matrices was calculated.

# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>IV</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1    MOTIVAÇÃO .....	1
1.2    REVISÃO DAS METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE PARÂMETROS INTERNOS DE CABOS ISOLADOS	
2	
1.3    OBJETIVOS.....	4
1.4    METODOLOGIA .....	4
1.5    ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	5
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>7</b>
<b>CABOS ELÉTRICOS</b> .....	<b>7</b>
2.1    ASPECTOS INTRODUTÓRIOS .....	7
2.1.1    Condutor.....	7
2.1.2    Isolação .....	9
2.1.3    Blindagem .....	13
2.1.4    Enchimento .....	16
2.1.5    Armadura.....	16
2.1.6    Cobertura ou Isolação Externa .....	17
2.1.7    Aplicação da Isolação Interna .....	17
2.2    CONFIGURAÇÕES DE INSTALAÇÃO NO SISTEMA .....	17
2.3    PARTICULARIDADES DE CABOS SUBMARINOS.....	19
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>21</b>
<b>FORMULAÇÕES ANALÍTICA E NUMÉRICA</b> .....	<b>21</b>
3.1    FORMULAÇÃO ANALÍTICA.....	21
3.1.1    Cálculo de Impedância para um Sistema de Cabos Coaxiais .....	22
3.1.2    Cálculo de Admitância para um Cabo Coaxial Monopolar .....	23
3.1.3    Cálculo de Impedância para um Cabo em Tubulação .....	25
3.1.4    Cálculo de Admitância para um Cabo em Tubulação .....	27

3.1.5	Problemas com a Abordagem Analítica para Altas Frequências.....	30
3.2	FORMULAÇÃO NUMÉRICA.....	31
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>33</b>
<b>CASOS TESTE.....</b>		<b>33</b>
4.1	CABO COAXIAL.....	33
4.1.1	Cálculo da Capacitância Interna por Unidade de Comprimento .....	34
4.1.2	Cálculo da Resistência e Indutância Internas por Unidade de Comprimento.....	38
4.2	CABO EM TUBULAÇÃO.....	44
4.2.1	Cálculo da Capacitância Interna por Unidade de Comprimento .....	48
4.2.2	Cálculo da Resistência e Indutância Internas por Unidade de Comprimento.....	51
4.2.2.1	Matriz $Z_p$ .....	52
4.2.2.2	Matriz $Z_c$ .....	63
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>71</b>
<b>CABO MULTIFILAMENTAR.....</b>		<b>71</b>
5.1.1	Cálculo da Capacitância Interna por Unidade de Comprimento .....	74
5.1.2	Cálculo da Resistência e Indutância Interna por Unidade de Comprimento .....	76
5.1.2.1	Matriz $Z_i$ .....	76
5.1.2.2	Matriz $Z_p$ .....	78
5.1.2.3	Matriz $Z_c$ .....	81
5.1.3	Cabo Equivalente .....	85
5.1.3.1	Capacitância.....	87
5.1.3.2	Matriz $Z_i$ .....	87
5.1.3.3	Matriz $Z_p$ .....	88
5.1.3.4	Matriz $Z_c$ .....	90
<b>CAPÍTULO 6.....</b>		<b>94</b>
<b>CABO SUBMARINO.....</b>		<b>94</b>
6.1.1	Cálculo da Capacitância Interna por Unidade de Comprimento .....	94
6.1.2	Cálculo da Resistência Interna por Unidade de Comprimento.....	96
6.1.2.1	Matriz $Z_i$ .....	96
6.1.2.2	Matriz $Z_p$ .....	104
6.1.2.3	Matriz $[Z_c]$ .....	111
<b>CAPÍTULO 7.....</b>		<b>116</b>
<b>CONCLUSÃO.....</b>		<b>116</b>
7.1	CONCLUSÕES GERAIS .....	116



7.2	TRABALHOS FUTUROS.....	118
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>120</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>		<b>123</b>
	CÁLCULO DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIA INTERNA PARA UM CABO COAXIAL .....	123
<b>APÊNDICE B.....</b>		<b>127</b>
	CÁLCULO DA MATRIZ DE ADMITÂNCIA INTERNA PARA UM CABO COAXIAL.....	127
<b>APÊNDICE C .....</b>		<b>129</b>
	MODELAGEM DOS CASOS NO SOFTWARE COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> .....	129
	C.1 CABO COAXIAL.....	129
	C.1.1 CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA E DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS.....	129
	C.1.2 MALHA	130
	C.2 CABO EM TUBULAÇÃO .....	131
	C.2.1 CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA E DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS.....	131
	C.2.2 MALHA	132
	C.3 CABO MULTIFILAMENTAR .....	133
	C.3.1 CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA E DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS.....	133
	C.3.2 MALHA	136
	C.4 CABO SUBMARINO .....	137

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM CABO MONOPOLAR. ....	8
FIGURA 2 - CONDUTOR REDONDO SÓLIDO. ....	9
FIGURA 3 - CONDUTOR REDONDO NORMAL. ....	9
FIGURA 4 – DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL ELÉTRICO PARA UM CABO SEM BLINDAGEM.....	14
FIGURA 5 – DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL ELÉTRICO PARA UM CABO COM BLINDAGEM. ....	15
FIGURA 6 – CABO EM TUBULAÇÃO ILUSTRANDO AS VEIAS DE POTÊNCIA (CABO COAXIAL), ENCHIMENTO, ARMADURA E CAPA EXTERNA. ....	16
FIGURA 7 - CONFIGURAÇÃO TRIFÓLIO. ....	18
FIGURA 8 - CONFIGURAÇÃO TRIFÓLIO HORIZONTAL PLANA COM ESPAÇAMENTO ENTRE CONDUTORES. ....	18
FIGURA 9 - CONFIGURAÇÃO TRIFÓLIO COM ESPAÇAMENTO ENTRE OS CONDUTORES. ....	18
FIGURA 10 - CONFIGURAÇÃO TRIANGULAR. ....	19
FIGURA 11 - CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E DE INSTALAÇÃO DO CABO EM TUBULAÇÃO.....	25
FIGURA 12 - EXPANSÃO REALIZADA PARA O PRODUTO DE DUAS FUNÇÕES DE BESSEL. ....	31
FIGURA 13 - EXEMPLO COMPARATIVO. ....	31
FIGURA 14 – CABO COAXIAL. ....	33
FIGURA 15 - MALHA GERADA PARA O CABO COAXIAL.....	34
FIGURA 16- CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO ELÉTRICA APLICADA AO LIMITE DO DOMÍNIO ELETROMAGNÉTICO. ....	35
FIGURA 17 - ROTINA DE SIMULAÇÃO APLICADA PARA OBTENÇÃO DA MATRIZ DE ADMITÂNCIAS. ....	36
FIGURA 18 - ELEMENTOS DA MATRIZ DE CAPACITÂNCIA PARA O CABO COAXIAL.....	37
FIGURA 19 - CAPACITÂNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM.....	38
FIGURA 20 - CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO MAGNÉTICA APLICADA AO LIMITE DO DOMÍNIO ELETROMAGNÉTICO. ....	39
FIGURA 21 - ROTINA DE SIMULAÇÃO APLICADA. ....	39
FIGURA 22 - RESISTÊNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO, PARA O CABO COAXIAL. ....	41
FIGURA 23 - INDUTÂNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO, PARA O CABO COAXIAL. ....	41
FIGURA 24 - RESISTÊNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO, PARA O CABO COAXIAL.....	42
FIGURA 25 - INDUTÂNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO, PARA O CABO COAXIAL.....	42
FIGURA 26 - RESISTÊNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO, PARA O CABO COAXIAL. ....	43
FIGURA 27 - INDUTÂNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO, PARA O CABO COAXIAL. ....	43
FIGURA 28 - SEÇÃO TRANSVERSAL DA CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	44
FIGURA 29 - SEÇÃO TRANSVERSAL DA CONFIGURAÇÃO 2 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	45
FIGURA 30 - SEÇÃO TRANSVERSAL DA CONFIGURAÇÃO 3 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	45
FIGURA 31 – MALHA GERADA NO PROGRAMA COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> REFERENTE A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO.....	46

FIGURA 32 - MALHA GERADA NO PROGRAMA COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> REFERENTE A CONFIGURAÇÃO 2 DO CABO EM TUBULAÇÃO.....	47
FIGURA 33 - MALHA GERADA NO PROGRAMA COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> REFERENTE A CONFIGURAÇÃO 3 DO CABO EM TUBULAÇÃO.....	47
FIGURA 34 - CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO ELÉTRICA APLICADA AO LIMITE DO DOMÍNIO ELETROMAGNÉTICO. ....	48
FIGURA 35- TENSÃO NA ARMADURA. ....	49
FIGURA 36 - ROTINA DE SIMULAÇÃO APLICADA. ....	49
FIGURA 37 - CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO MAGNÉTICA APLICADA AO LIMITE DO DOMÍNIO ELETROMAGNÉTICO. ....	53
FIGURA 38 - ROTINA DE SIMULAÇÃO APLICADA. ....	54
FIGURA 39 - RESISTÊNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	55
FIGURA 40 – INDUTÂNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	55
FIGURA 41 – RESISTÊNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	56
FIGURA 42 – INDUTÂNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	56
FIGURA 43 – RESISTÊNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO.....	57
FIGURA 44 – INDUTÂNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO.....	57
FIGURA 45 – DEMAIS RESISTÊNCIAS MÚTUAS POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	58
FIGURA 46 - DEMAIS RESISTÊNCIAS MÚTUAS POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	58
FIGURA 47 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO.....	59
FIGURA 48 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO.....	60
FIGURA 49 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO.....	60
FIGURA 50 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ <b>Z<sub>p</sub></b> , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	61

FIGURA 51 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $Z_p$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	61
FIGURA 52 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $Z_p$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	62
FIGURA 53 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS DEMAIS RESISTÊNCIAS MÚTUAS, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $Z_p$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	62
FIGURA 54 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS DEMAIS INDUTÂNCIAS MÚTUAS, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $Z_p$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	63
FIGURA 55 - RESISTÊNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c1}]$ , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	65
FIGURA 56 - INDUTÂNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c1}]$ , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	65
FIGURA 57 - RESISTÊNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c2}]$ , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	66
FIGURA 58 - INDUTÂNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c2}]$ , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	66
FIGURA 59 - RESISTÊNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c3}]$ , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	66
FIGURA 60 - INDUTÂNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c3}]$ , PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO. ....	67
FIGURA 61 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c1}]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	67
FIGURA 62 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c1}]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	68
FIGURA 63 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c2}]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	68
FIGURA 64 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c2}]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	69
FIGURA 65 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c3}]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	69
FIGURA 66 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL <i>MULTIPHYSICS</i> , POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c3}]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	70
FIGURA 67 - SEÇÃO TRANSVERSAL REFERENTE A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO FLOR. ....	71
FIGURA 68 - SEÇÃO TRANSVERSAL REFERENTE A CONFIGURAÇÃO 2 DO CABO FLOR. ....	72

FIGURA 69 - SEÇÃO TRANSVERSAL REFERENTE A CONFIGURAÇÃO 3 DO CABO FLOR.....	72
FIGURA 70 – MALHA GERADA PARA A CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO FLOR.....	73
FIGURA 71 - MALHA GERADA PARA A CONFIGURAÇÃO 2 DO CABO FLOR.....	73
FIGURA 72 - MALHA GERADA PARA A CONFIGURAÇÃO 3 DO CABO FLOR.....	74
FIGURA 73 - CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO ELÉTRICA APLICADA AO LIMITE DO DOMÍNIO ELETROMAGNÉTICO. ....	75
FIGURA 74 - TENSÃO NA ARMADURA. ....	75
FIGURA 75 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $Z_i$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR.....	78
FIGURA 76 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $Z_i$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR.....	78
FIGURA 77 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $Z_p$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR.....	80
FIGURA 78 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $Z_p$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR. ....	80
FIGURA 79 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS MÚTUAS ENTRE CONDUTORES, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $Z_p$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR.....	81
FIGURA 80 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS INDUTÂNCIAS MÚTUAS ENTRE CONDUTORES, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $Z_p$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR. ....	81
FIGURA 81 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c1}]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR. ....	82
FIGURA 82 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c1}]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR. ....	83
FIGURA 83 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c2}]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR. ....	83
FIGURA 84 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Z_{c2}]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR. ....	84

FIGURA 85 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zc3]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR. ....	84
FIGURA 86 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zc3]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR. ....	85
FIGURA 87 – CABO EQUIVALENTE 1, CUJO CONDUTOR CENTRAL POSSUI ÁREA IGUAL A SOMA DAS ÁREAS DOS 7 FILAMENTOS DO CABO FLOR.....	86
FIGURA 88 – CABO EQUIVALENTE 2, CUJO CONDUTOR CENTRAL POSSUI RAIOS IGUAIS AO DA CAMADA SEMICONDUTORA DO CABO FLOR.....	86
FIGURA 89 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zi]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	88
FIGURA 90 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zi]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	88
FIGURA 91 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	89
FIGURA 92 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	89
FIGURA 93 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTORES POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	90
FIGURA 94 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTORES POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	90
FIGURA 95 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zc1]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	91
FIGURA 96 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zc1]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	91
FIGURA 97 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zc2]$ , PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	92

FIGURA 98 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ [Zc2], PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	92
FIGURA 99 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ [Zc3], PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	93
FIGURA 100 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE INDUTÂNCIA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ [Zc3], PARA AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE CABO MULTIFILAMENTAR E AS DUAS CONFIGURAÇÕES EQUIVALENTES DE CABO EM TUBULAÇÃO. ....	93
FIGURA 101 – CABO SUBMARINO ESTUDO NESTA CAPÍTULO [9]. ....	94
FIGURA 102 - CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO ELÉTRICA APLICADA AO LIMITE DO DOMÍNIO ELETROMAGNÉTICO. ....	95
FIGURA 103 - TENSÃO NA ARMADURA. ....	95
FIGURA 104 – VEIA DE POTÊNCIA DO CABO SUBMARINO. ....	97
FIGURA 105 - CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO MAGNÉTICA APLICADA AO LIMITE DO DOMÍNIO ELETROMAGNÉTICO. ....	97
FIGURA 106 – MALHA GERADA PARA VEIA DE POTÊNCIA DO CABO SUBMARINO. ....	98
FIGURA 107 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A VEIA DE POTÊNCIA DO CABO SUBMARINO. ....	98
FIGURA 108 - RESULTADOS DE INDUTÂNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A VEIA DE POTÊNCIA DO CABO SUBMARINO. ....	99
FIGURA 109 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A VEIA DE POTÊNCIA DO CABO SUBMARINO. ....	99
FIGURA 110 - RESULTADOS DE INDUTÂNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A VEIA DE POTÊNCIA DO CABO SUBMARINO. ....	100
FIGURA 111 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A VEIA DE POTÊNCIA DO CABO SUBMARINO. ....	100
FIGURA 112 - RESULTADOS DE INDUTÂNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A VEIA DE POTÊNCIA DO CABO SUBMARINO. ....	101
FIGURA 113 – CONFIGURAÇÃO DA FIBRA ÓPTICA DO CABO SUBMARINO. ....	101
FIGURA 114 – MALHA GERADA PARA FIBRA ÓPTICA DO CABO SUBMARINO UTILIZANDO A CONFIGURAÇÃO EXTRA FINE, COM 3504 ELEMENTOS DE DOMÍNIO. ....	102
FIGURA 115 – DETALHE DA MALHA GERADA PARA FIBRA ÓPTICA DO CABO SUBMARINO. ....	102
FIGURA 116 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM DA FIBRA ÓPTICA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A VEIA DE POTÊNCIA DO CABO SUBMARINO. ....	103

FIGURA 117 - RESULTADOS DE INDUTÂNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM DA FIBRA ÓPTICA, OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL COMSOL MULTIPHYSICS, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A VEIA DE POTÊNCIA DO CABO SUBMARINO.....	103
FIGURA 118 - MALHA GERADA PARA FIBRA ÓPTICA DO CABO SUBMARINO UTILIZANDO A CONFIGURAÇÃO EXTRA FINE, COM 79258 ELEMENTOS DE DOMÍNIO. ....	104
FIGURA 119 - CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO MAGNÉTICA APLICADA AO LIMITE DO DOMÍNIO ELETROMAGNÉTICO. ....	105
FIGURA 120 - RESISTÊNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO.....	105
FIGURA 121 - INDUTÂNCIA PRÓPRIA DO CONDUTOR POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO.....	106
FIGURA 122 - RESISTÊNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO.....	106
FIGURA 123 - INDUTÂNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO.....	107
FIGURA 124 - RESISTÊNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO.....	107
FIGURA 125 - INDUTÂNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO.....	108
FIGURA 126 - RESISTÊNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTORES POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO. ....	108
FIGURA 127 - INDUTÂNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTORES POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO. ....	109
FIGURA 128 - RESISTÊNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM DA FIBRA ÓPTICA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO. ....	109
FIGURA 129 - INDUTÂNCIA MÚTUA ENTRE CONDUTOR E BLINDAGEM DA FIBRA ÓPTICA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO. ....	110
FIGURA 130 - RESISTÊNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM DA FIBRA ÓPTICA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO. ....	110
FIGURA 131 - INDUTÂNCIA PRÓPRIA DA BLINDAGEM DA FIBRA ÓPTICA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO REFERENTE A MATRIZ $[Zp]$ , PARA O CABO SUBMARINO.....	111
FIGURA 132 - CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO MAGNÉTICA APLICADA AO LIMITE DO DOMÍNIO ELETROMAGNÉTICO. ....	112
FIGURA 133 - RESISTÊNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Zc1]$ , PARA O CABO SUBMARINO. ....	113
FIGURA 134 - INDUTÂNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Zc1]$ , PARA O CABO SUBMARINO. ....	113
FIGURA 135 - RESISTÊNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Zc2]$ , PARA O CABO SUBMARINO. ....	114
FIGURA 136 – INDUTÂNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Zc2]$ , PARA O CABO SUBMARINO.....	114
FIGURA 137 - RESISTÊNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Zc3]$ , PARA O CABO SUBMARINO. ....	115
FIGURA 138 - INDUTÂNCIA REFERENTE A MATRIZ $[Zc3]$ , PARA O CABO SUBMARINO. ....	115
FIGURA 139 – CABO COAXIAL. ....	123



FIGURA 140 – CIRCUITO COM AS IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES DE UM CABO COAXIAL. ....	124
FIGURA 141 – CIRCUITO COM ADMITÂNCIAS EQUIVALENTES DE UM CABO COAXIAL. ....	127
FIGURA 142 – CABO COAXIAL COM CONDUTOR FILAMENTADO UTILIZADO NA CONFIGURAÇÃO 1 DE CABO MULTIFILAMENTAR. .....	134
FIGURA 143 – CABO COAXIAL COM CONDUTOR FILAMENTADO UTILIZADO NA CONFIGURAÇÃO 2 DE CABO MULTIFILAMENTAR. .....	134
FIGURA 144 – CABO COAXIAL COM CONDUTOR FILAMENTADO UTILIZADO NA CONFIGURAÇÃO 3 DE CABO MULTIFILAMENTAR. .....	135
FIGURA 145 – CABO COAXIAL RELATIVO A CADA VEIA DE POTÊNCIA. ....	137
FIGURA 146 – FIBRA ÓPTICA.....	138
FIGURA 147 – PARA AS ÁREAS DESTACADAS EM AZUL FOI DEFINIDO AR, CUJAS CARACTERÍSTICAS JÁ ESTÃO DEFINIDAS NA BIBLIOTECA DO COMSOL. ....	139
FIGURA 148 – PARA AS ÁREAS DESTACADAS EM AZUL FOI DEFINIDO COBRE, CUJAS CARACTERÍSTICAS JÁ ESTÃO DEFINIDAS NA BIBLIOTECA DO COMSOL. ....	139
FIGURA 149 – PARA AS ÁREAS DESTACADAS EM AZUL FOI DEFINIDO LIGA DE AÇO REFORÇADA. ....	140
FIGURA 150 – PARA AS ÁREAS DESTACADAS EM AZUL FOI DEFINIDO CHUMBO. ....	140
FIGURA 151 – PARA AS ÁREAS DESTACADAS EM AZUL FOI DEFINIDO POLIETILENO. ....	141
FIGURA 152 – PARA AS ÁREAS DESTACADAS EM AZUL FOI DEFINIDO POLIPROPILENO. ....	141
FIGURA 153 – PARA AS ÁREAS DESTACADAS EM AZUL FOI DEFINIDO UMA CAMADA SEMICONDUTORA. ....	142
FIGURA 154 – PARA AS ÁREAS DESTACADAS EM AZUL FOI DEFINIDO SILICA GLASS.....	142
FIGURA 155 – PARA AS ÁREAS DESTACADAS EM AZUL FOI DEFINIDO XLPE.....	143
FIGURA 156 – PARA AS ÁREAS DESTACADAS EM AZUL FOI DEFINIDO SOLO MARINHO SATURADO.....	143

# LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS ISOLANTES SÓLIDOS [2].	11
TABELA 2 - PERMISSIVIDADE RELATIVA DE ALGUNS MATERIAIS ISOLANTES [2].	12
TABELA 3 - DADOS DA GEOMETRIA [26].	129
TABELA 4 - PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DOS MATERIAIS [6].	130
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA.	131
TABELA 6 - DADOS DA GEOMETRIA DA TUBULAÇÃO. [26].	131
TABELA 7 - PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DOS MATERIAIS. [26] E [9].	131
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA PARA CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO EM TUBULAÇÃO.	132
TABELA 9 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA PARA CONFIGURAÇÃO 2 DO CABO EM TUBULAÇÃO.	132
TABELA 10 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA PARA CONFIGURAÇÃO 2 DO CABO EM TUBULAÇÃO.	133
TABELA 11 - DADOS DA GEOMETRIA DO CABO FLOR. [23].	133
TABELA 12 - DADOS DOS MATERIAIS. [23] E [26].	135
TABELA 13 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA PARA CONFIGURAÇÃO 1 DO CABO MULTIFILAMENTAR.	136
TABELA 14 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA PARA CONFIGURAÇÃO 2 DO CABO MULTIFILAMENTAR.	136
TABELA 15 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA PARA CONFIGURAÇÃO 3 DO CABO MULTIFILAMENTAR.	136
TABELA 16 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES REFERENTES AO CABO SUBMARINO [9].	144

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Esta dissertação apresenta o cálculo de impedâncias e admitâncias internas de cabos isolados por meio do método dos elementos finitos aplicando o *software* COMSOL Multiphysics e comparando, quando aplicável, com resultados obtidos através de formulações analíticas. Neste capítulo são abordados a motivação, revisão das metodologias de cálculo de parâmetros internos de cabos isolados, objetivos, metodologia e estrutura do trabalho.

### 1.1 Motivação

Com o crescimento dos centros urbanos a demanda energética também aumenta e, com isso, exigências quanto à qualidade do fornecimento de energia. Neste contexto, existem basicamente dois meios de transmissão de energia a serem considerados: sistemas convencionais e não-convencionais.

Sistemas convencionais são compostos por linhas aéreas de transmissão e sistemas de cabos subterrâneos. Estes sistemas são mais caros, porém altamente aplicados nos centros urbanos pela falta de espaço devido ao crescimento acelerado.

Como exemplo de aplicação de sistemas não convencionais pode-se mencionar a alimentação e interligação de plataformas. Nestes casos, cabos umbilicais são utilizados e no seu interior podem comportar sistemas de transmissão, comunicação, comando, refrigeração e cabos estruturais. O estudo de sistemas deste tipo é desafiador e mais complexo do que no caso de sistemas de distribuição convencionais.

Um projeto adequado de um sistema de transmissão subterrâneo depende da exatidão do modelo desenvolvido. Este modelo engloba parâmetros internos unitários, tais como impedância e admitância.

Neste trabalho, os cálculos de parâmetros internos são realizados no domínio da frequência, de modo a representar diretamente a variação destes parâmetros com a frequência.

## 1.2 Revisão das Metodologias de Cálculo de Parâmetros Internos de Cabos Isolados

Para a modelagem e estudos de cabos subterrâneos, valores de impedância e admitância variantes com a frequência são de extrema importância. Diferentes modelos foram desenvolvidos e estudados considerando essa variação.

A fundamentação para a modelagem de um sistema de distribuição subterrâneo, sob o ponto de vista da estimação de seus parâmetros unitários, é a solução das equações de Maxwell, atendendo determinadas condições de contorno. A formulação da impedância interna de um cabo isolado para estudos de transitórios foi sistematizada por WEDEPOHL e WILCOX [25] para configurações de cabos com blindagens e posteriormente por AMETANI [2] para cabos com armadura. A formulação apresentada nessa referência é tomada como base comparativa neste trabalho para o cálculo das matrizes de impedância e admitância internas, incluindo o caso onde os mesmos estão em tubulação e aplicadas no caso de cabo submarino. Posteriormente, AMETANI [3] realizou um estudo acerca da influência da camada semicondutora nas referidas matrizes. Tal influência será também analisada nesta dissertação através do método de elementos finitos.

Além do uso das formulações analíticas discutidas acima, existe a alternativa do emprego de métodos numéricos que possibilitam a consideração de irregularidades geométricas dos cabos e efeitos de proximidade. Pode-se citar três diferentes métodos: subdivisão de condutores [6], método dos momentos modificado (MoM-SO) [17] e elementos finitos [26].

O método baseado na subdivisão de condutores consiste na subdivisão de elementos condutores que compõem um cabo, em partes menores, denominadas subcondutores. Quanto maior o número de subdivisões, maior será a precisão dos resultados e maior será o tempo computacional.

O Método dos Momentos (MoM) consiste em um método de solução aproximada da equação integral para obtenção do campo eletromagnético para uma ampla faixa de frequências. Apesar de não estar diretamente relacionado ao tema deste trabalho, durante o período de pesquisa da dissertação foi produzido um artigo [21] no qual foi aplicado o MoM e apresentado o efeito da modelagem do solo e da segmentação do

condutor sobre a densidade de corrente elétrica em cada elemento e sobre a distribuição de potencial e campo elétrico no solo.

O MoM-SO é um MoM modificado que se baseia na discretização da superfície dos condutores, ao contrário das abordagens de segmentação de condutores e elementos finitos que necessitam de toda a seção transversal do cabo. Tal abordagem não foi aplicada no presente trabalho sendo sugerida para trabalhos futuros.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico utilizado para determinar soluções aproximadas de problemas de valores de contorno de equações diferenciais originadas da modelagem matemática de sistemas físicos. Sua aplicabilidade é extremamente ampla, sendo utilizado em mecânica estrutural, mecânica dos fluidos, vibrações, transferências de calor e eletromagnetismo.

Através da discretização do domínio em subdomínios este método fornece soluções aproximadas para cada um destes elementos. A divisão da geometria em pequenos elementos permite resolver um problema complexo, subdividindo-o em problemas mais simples.

Podem ser mencionados alguns trabalhos que aplicaram metodologias analíticas e metodologias numéricas para o cálculo de parâmetros elétricos de cabos. O desenvolvimento analítico dos cálculos de impedâncias longitudinais e admitâncias transversais por unidade de comprimento foi abordado por MANHÃES [16] desenvolvendo um programa computacional em Fortran para o cálculo desses parâmetros, levando-se em conta a influência da frequência, sensibilidade de convergência das funções de Bessel e das séries infinitas que envolvem o retorno pelo solo. ROCHA [20] aplica a metodologia considerada em MANHÃES [16] para propor um modelo alternativo para o cálculo de parâmetros longitudinais por unidade de comprimento de um cabo umbilical utilizando o *software* Mathematica. SILVA [23] propõe equações para cálculo das impedâncias e admitâncias de retorno para cabos imersos em meios dissipativos. Além disso, nesta tese é realizada a comparação da formulação analítica desenvolvida com resultados obtidos através da aplicação de métodos numéricos. HAFNER [13] desenvolveu uma modelagem numérica por meio do MEF para o cálculo de parâmetros unitários de cabos tripolares. Os resultados obtidos foram comparados com resultados analíticos, valores de fábrica e medições. SANTOS [22] apresenta o cálculo de impedâncias e admitâncias unitárias externas por meio do MEF com o objetivo de considerar a presença de dutos e túneis em sistemas de transmissão subterrâneos. Os estudos realizados nesta dissertação

evidenciaram a importância da escolha adequada do domínio para o cálculo que se deseja realizar.

De modo a complementar os estudos acerca do cálculo de impedância e admitância, o presente trabalho se propõe a calcular os parâmetros internos de cabos isolados através do MEF para diversas configurações e analisar as variações de geometria e materiais nos resultados, comparando, quando aplicável, com resultados obtidos através das formulações analíticas.

## 1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é implementar uma metodologia adequada ao cálculo de impedâncias e admitâncias internas unitárias por meio do Método dos Elementos Finitos, o qual pode ser visto como uma complementação dos métodos analíticos, agregando informações mais detalhadas e possibilitando análise de outros parâmetros e problemas físicos.

Além disso, este trabalho se propõe a apresentar o efeito de disposição das veias de potência dentro da tubulação, tipo de condutor e presença de camada semicondutora nos cálculos de parâmetros internos.

## 1.4 Metodologia

A partir da aplicação das formulações desenvolvidas por AMETANI [2] foram obtidos resultados de impedância e admitância internas para diversas configurações de cabos isolados. Estes resultados foram calculados com auxílio do programa computacional Mathematica versão 12 e foram utilizados como base comparativa. Através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, foram implementadas as formulações do MEF com as modificações necessárias para o cálculo dos parâmetros internos. Posteriormente, foram analisados novos casos que possibilitaram a verificação de influências da disposição das veias de potência dentro da tubulação, geometria do condutor e presença de camada semicondutora nos cálculos de parâmetros internos. Por fim, o método numérico foi aplicado em um cabo submarino com presença de cabos de comunicação de modo ilustrar a capacidade do programa em processar geometrias mais complexas.

## 1.5 Estrutura e organização do trabalho

O texto é estruturado em sete capítulos. Este primeiro refere-se à introdução do trabalho e os demais são organizados conforme discutido abaixo:

- **Capítulo 2:** Apresentação geral sobre cabos elétricos. São descritas as características construtivas e de instalação de diversas configurações.
- **Capítulo 3:** Apresenta os métodos analítico e numérico para o cálculo de parâmetros internos unitários de cabos isolados. Neste capítulo, são descritas a formulação baseada em AMETANI [2] e as formulações aplicadas por meio do Método de Elementos Finitos.
- **Capítulo 4:** É realizada aplicação e comparação das formulações analítica e numérica no cálculo de parâmetros internos de cabos isolados. Inicialmente é apresentado um caso teste, cujos resultados foram comparados com aqueles obtidos através da aplicação das formulações analíticas. A partir deste, novos casos foram implementados, considerando sistemas trifásicos envolvidos por uma tubulação em comum.
- **Capítulo 5:** São calculados parâmetros internos unitários de três diferentes configurações de Cabo Multifilamentar, o qual consiste em um sistema composto de três cabos monopolares, com sete filamentos cada, envoltos por um tubo em comum, capa externa envolvendo a tubulação e enchimento preenchendo o meio interno. Com a comparação dos resultados obtidos para as três configurações é analisada a influência da camada semicondutora nos resultados de capacitância e indutância obtidos por meio de elementos finitos. Além disso, configurações equivalentes de cabo em tubulação são avaliadas para verificação da possibilidade de representar um condutor redondo normal através de um condutor redondo sólido, desprezando-se a camada semicondutora.
- **Capítulo 6:** Mostra a aplicação direta da metodologia numérica utilizando elementos finitos para o cálculo de impedância e capacitância de uma configuração de cabo submarino.
- **Capítulo 7:** Apresenta as principais conclusões deste trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

Além disto, três apêndices complementam o trabalho com informações e detalhes adicionais de formulações analíticas e simulações computacionais.

- **Apêndice A:** Apresenta a formulação analítica para o cálculo da matriz de impedância de um cabo coaxial monopolar.
- **Apêndice B:** Apresenta a formulação analítica para o cálculo da matriz de capacitância de um cabo coaxial monopolar.
- **Apêndice C:** Descreve os detalhes de modelagem no programa computacional COMSOL Multiphysics.



# CAPÍTULO 2

## CABOS ELÉTRICOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar de forma geral os aspectos teóricos envolvendo cabos elétricos de potência. Serão discutidas características construtivas, configurações e métodos de instalação no sistema deste tipo de elemento.

### 2.1 Aspectos Introdutórios

Cabos elétricos são utilizados em diferentes sistemas, tais como transmissão, distribuição, instalações elétricas de baixa tensão, entre outros. Com o objetivo de adequar-se às características do sistema a que pertence de modo a garantir confiabilidade, diversos tipos de materiais podem ser empregados em sua confecção, assim como a escolha da geometria mais vantajosa.

Analisando os aspectos construtivos, os cabos elétricos de potência podem ser classificados de acordo com o material e geometria do condutor, isolamento elétrica, existência de blindagem e armadura.

#### 2.1.1 Condutor

O propósito da utilização de um condutor é transmitir a corrente necessária com mínimas perdas. Dois aspectos devem ser analisados: o material utilizado e a forma geométrica.

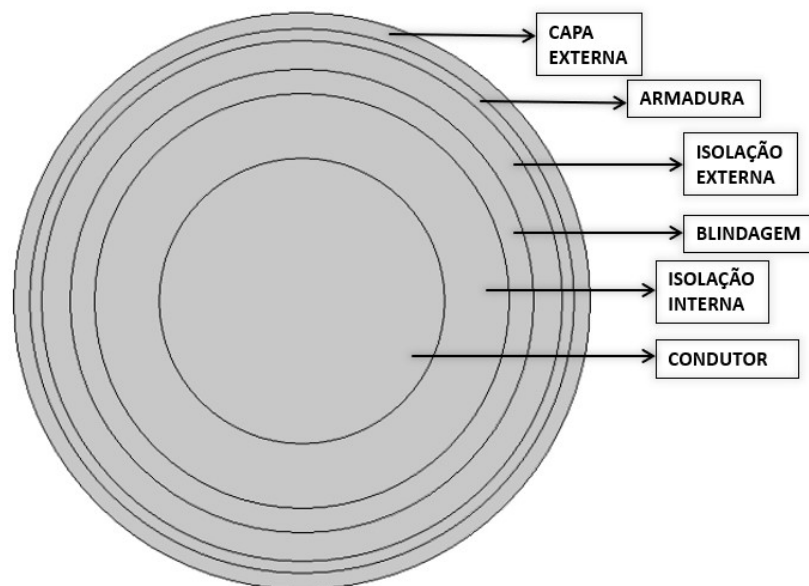
Alumínio e Cobre são dois metais utilizados na fabricação de condutores elétricos [20]. O emprego de cada um desses materiais depende do tipo de aplicação, possuindo vantagens e desvantagens se comparados entre si, como é discutido nos parágrafos seguintes.

O emprego do Alumínio na fabricação de condutores elétricos tem grande aplicação em redes e linhas aéreas de distribuição e transmissão de energia elétrica, devido ao baixo custo quando comparado com o Cobre.

Além disso, o alumínio possui massa específica mais baixa, facilitando o manuseio e transporte dessas linhas. Para um mesmo valor de perda ôhmica, o condutor de alumínio

possui um diâmetro 28% maior que o de cobre, porém pesando metade [20]. A NBR-5410 – Instalações elétricas em baixa tensão, só permite sua aplicação para seções iguais ou superiores a 10mm<sup>2</sup>. Para emprego em tensões mais elevadas, o custo do isolamento é maior como consequência do aumento no diâmetro do cabo. Em sistemas de cabos subterrâneos, independente da classe de tensão, existem problemas de corrosão em presença da umidade.

O problema citado anteriormente pode ser mitigado através do bloqueio de condutor e blindagem. Tal bloqueio, consiste em uma camada extrudada (camada de material semicondutor ou isolante aplicada em temperatura controlada, objetivando a eliminação de contaminantes e uma ligação a nível molecular entre as camadas) impermeabilizante aplicada entre o condutor e a blindagem do condutor e entre a blindagem da isolação e a blindagem metálica. Esta camada preenche vazios e evita a entrada de umidade no cabo, facilitando futuras manutenções em trechos danificados. Como pode ser observado na Figura 1, o cabo monopolar possui isolação entre a blindagem e o condutor.

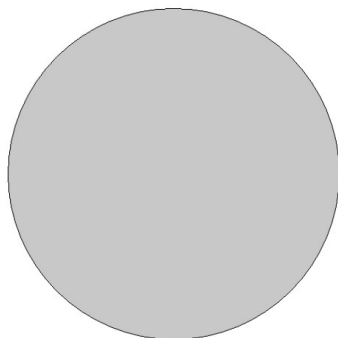


**Figura 1 - Principais componentes de um cabo monopolar.**

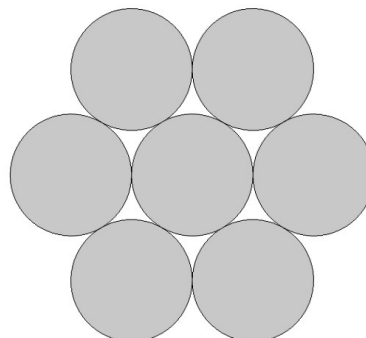
O emprego do Cobre também apresenta vantagens sobre o uso do alumínio no quesito de condutividade elétrica. Enquanto o alumínio apresenta uma condutividade de 34,2 S/mm<sup>2</sup> o cobre se mostra melhor condutor, tendo uma condutividade de 31,7 S/mm<sup>2</sup>, cerca de 80% maior que a do alumínio.

O cobre empregado em condutores elétricos deve ser purificado através de um processo de eletrólise (cobre eletrolítico), obtendo um grau de pureza mínima exigida de 99,9% e uma condutibilidade de 100% IACS (*International Annealed Copper Standard*). Posteriormente, pode ser submetido a um tratamento térmico dependendo da aplicabilidade.

Além dos tipos de materiais a serem empregados nos condutores, existem diversos tipos de geometria, como por exemplo os apresentados nas Figuras 2 e 3 e aplicados no presente trabalho. A Figura 2 ilustra um condutor do tipo redondo sólido, o qual possui ótima condutividade por aproveitar melhor o espaço disponível para condução de corrente elétrica. Entretanto, é pouco manobrável e para seções maiores que  $10\text{mm}^2$  perde sua praticidade. Por ser mais econômico, é empregado em sistemas de iluminação e força. A Figura 3 ilustra um condutor do tipo redondo normal, o qual é constituído de diversos condutores conectados em paralelo. Devido a sua alta flexibilidade, é muito difundido em instalações residenciais e industriais.



**Figura 2 - Condutor Redondo Sólido.**



**Figura 3 - Condutor Redondo Normal.**

## 2.1.2 Isolação

O propósito da isolação é proteger o condutor e garantir que não exista conexão entre os componentes condutores de corrente, como por exemplo o condutor e a blindagem metálica, tendo para isto uma característica de alta resistividade.

Os isolantes mais utilizados em cabos de potência são divididos basicamente em dois grupos:

- Dielétricos laminados ou estratificados;
- Dielétricos sólidos ou extrudados.

Os dielétricos laminados são constituídos de finas lâminas de papel distribuídas helicoidalmente sobre os condutores e impregnadas em óleo isolante sob pressão. Pode ser aplicada, posteriormente, uma camada de chumbo ou alumínio para evitar a fuga do óleo e a penetração de umidade. O papel impregnado em óleo destaca-se por ser um isolante de alta confiabilidade e tem sua aplicação mais difundida em cabos usados em sistemas de alta e extra-alta tensão, de 69 a 550 kV.

O papel impregnado com massa foi tradicionalmente utilizado em cabos de energia para baixa e média tensão. Este material vem sendo utilizado há anos, comprovando sua longa vida útil. O papel impregnado com óleo fluído sob pressão também tem apresentado uma vida útil excepcionalmente longa e é um dos isolamentos disponíveis para utilização em altíssima tensão. Os isolamentos estratificados, apresentam uma dispersão extremamente baixa da sua rigidez dielétrica, aumentando sua confiabilidade, o que apresenta menores probabilidades de falhas.

Para os dielétricos sólidos ou extrudados, geralmente são usados materiais poliméricos de cadeia linear, termoplásticos ou termofixos, colocados diretamente sobre os condutores ou sobre a blindagem.

Dentre os materiais termoplásticos, destaca-se o PVC (Cloro de Polivinila) e o PET (Polietileno). O PVC é bastante usado em aplicações de até 15 kV, e apresenta as seguintes propriedades:

- Baixa taxa de envelhecimento;
- Excelente resistência à ionização;
- Boas propriedades mecânicas;
- Boa flexibilidade;
- Não conduz chama quando adicionado aditivos químicos especiais;
- Baixa rigidez dielétrica com perdas dielétricas elevadas a partir de 20 kV;
- Baixa temperatura admissível; e
- Resistência regular à umidade.

O PET apresenta excelentes constantes de isolamento, alta rigidez dielétrica com valores baixos de perdas dielétricas e baixa resistência à ionização (medida de tempo necessário para o aparecimento de fissuras no material isolante quando este é exposto a descargas parciais).

Dentre os diferentes tipos de polietileno termoplástico, duas variações são bastante comuns: o polietileno de baixa densidade (LDPE) e o polietileno de alta densidade (HDPE).

Os materiais termofixos são polímeros tridimensionais, produzidos por vulcanização a partir do polietileno reticulado (XLPE) e/ou etileno-propileno (EPR). O XLPE é obtido através de reticulação molecular do PET e possui alta rigidez dielétrica, baixa taxa de envelhecimento, baixa flexibilidade e é usado em cabos com tensão nominal de até 15 kV.

O EPR é um isolante sólido moderno e considerado um dos mais completos. Suas propriedades podem ser sumarizadas em:

- Alta rigidez dielétrica com baixas perdas dielétricas;
- Alta flexibilidade;
- Excelentes propriedades mecânicas;
- Elevada temperatura admissível; e
- Elevada resistência à ionização.

A Tabela 1 resume as principais características dos isolantes sólidos e a Tabela 2 compara a permissividade relativa de alguns materiais isolantes. A permissividade descreve como o campo elétrico afeta ou é afetado por um determinado meio. Quanto menor a permissividade de um meio, maior o valor do campo elétrico e do potencial de uma carga elétrica em um ponto deste meio.

**Tabela 1 - Comparação de características dos principais isolantes sólidos [2].**

Características Nominais	Isolantes Sólidos		
	Termoplásticos	Termofixos	
	PVC	XLPE	EPR
Rigidez Dielétrica	Baixa	Alta	Alta
Flexibilidade	Boa	Regular	Regular

Temperatura Máxima (°C)	Reg. Contínuo	70	90	90
	Emergência	110	130	130
	Curto-Circuito	160	250	250
Resistência à abrasão		Boa	Excelente	Excelente
Resistência à ionização		Excelente	Baixa	Excelente
Resistência mecânica		Excelente	Baixa	Elevada
Constante de Isolamento		370 M $\Omega$ km à 20°C	3.700 M $\Omega$ km à 20°C	3.700 M $\Omega$ km à 20°C

**Tabela 2 - Permissividade relativa de alguns materiais isolantes [2].**

MATERIAL ISOLANTE			PERMISSIVIDADE RELATIVA
SÓLIDOS (EXTRUDADOS)	TERMOPLÁSTICOS	PVC	5 a 7
		PET	2,3
	TERMOPLÁSTICOS	HDPE	2,3
		XLPE	2,3 a 2,6
		EPR	2,6 a 3
ESTRATIFICADOS		PAPEL IMPREGNADO COM MASSA	3,7
		PAPEL IMPREGNADO COM ÓLEO	3,7

Cabos com isolamento estratificado possuem alta confiabilidade ao longo de sua vida útil, mas possuem custo e peso superiores a cabos equivalentes de isolamento extrudado. Até o início da década de 90 eram muito utilizados, mas atualmente sua utilização fica restrita a aplicações especiais. [19]

A rigidez dielétrica é um dos parâmetros mais importantes na escolha do material isolante. A rigidez varia de seção para seção ao longo do comprimento do cabo, apresentando uma dispersão considerável em torno de um valor médio. Esta dispersão será aleatória e proporcional ao número de vazios ou impurezas localizadas no seio do isolamento. De acordo com ADERLDO [1], a dispersão de valores de rigidez é muito menor nos dielétricos estratificados do que nos dielétricos sólidos devido ao fato de que o método de aplicação do isolamento estratificado e subsequente impregnação, evita a presença de vazios localizados no isolamento, enquanto que o processo de preparação e aplicação dos dielétricos sólidos torna quase impossível garantir a total ausência destes vazios. Entretanto, a dispersão da rigidez nos dielétricos sólidos pode ser melhorada mediante um rígido controle de matérias primas, de um equipamento adequado e da limpeza dos locais de preparação e aplicação das massas isolantes.

A escolha do tipo de isolante sólido dependerá de algumas características importantes dos materiais utilizados. A constante de isolamento, ilustrada na Tabela 2, é uma propriedade física importante, pois se constitui de um fator limitante da capacidade de corrente, ampacidade, do cabo. A resistência à ionização é medida pelo tempo necessário ao aparecimento de fissuras em amostras do material isolante colocadas em célula especial de provas onde são submetidas a descargas parciais com ionizações intensas. [1]

### 2.1.3 Blindagem

Blindagem em cabos elétricos tem como finalidades confinar o campo eletrostático ou escoar as correntes induzidas e de curto-circuito. A blindagem pode ainda evitar as interferências de campos externos. Dependendo do tipo de aplicação, são compostas de materiais semicondutores ou condutores.

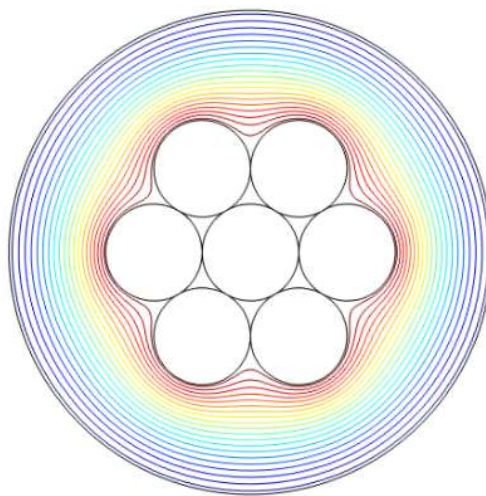
A blindagem mais próxima do condutor é conhecida como blindagem interna. No caso de cabos isolados de média e alta tensão, pode ser constituída de uma fita semicondutora (não metálica) ou por uma camada extrudada de compostos semicondutores, também não metálicos, ou pela combinação de ambos os processos, devendo estar intimamente unida

à superfície do condutor e à superfície interna da isolação interna, para garantir um ótimo desempenho.

Este tipo de blindagem tem como principais finalidades:

- Eliminar os espaços vazios entre o condutor e a isolação interna;
- Uniformizar as linhas do campo elétrico radial e longitudinal, permitindo sua forma perfeitamente cilíndrica; e
- Eliminar os gradientes de tensão em determinados pontos da isolação interna, garantindo uma solitação uniforme do dielétrico, aumentando a sua vida útil.

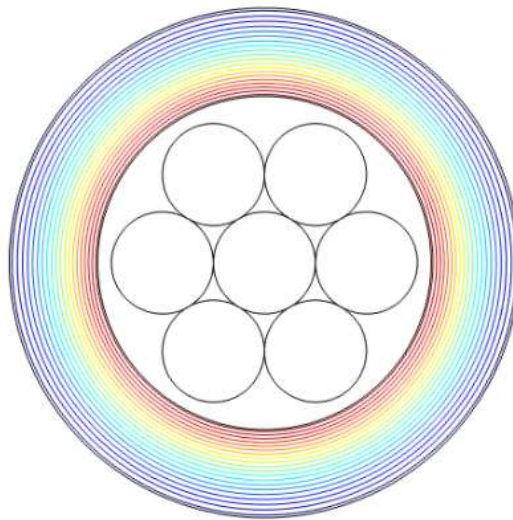
Para um cabo coaxial sem a presença de blindagem interna, a distribuição de potencial elétrico devido à energização assume uma forma distorcida, acompanhando as irregularidades da superfície do condutor, como ilustrado na Figura 4. Nessa condição, as solitações elétricas são concentradas em determinados pontos e podem exceder os limites permissíveis pelo isolamento, ocasionando uma depreciação na vida útil do cabo.



**Figura 4 – Distribuição de potencial elétrico para um cabo sem blindagem.**

Utilizando uma camada semicondutora, a distribuição de potencial elétrico se torna uniforme minimizando os problemas mencionados anteriormente, como pode ser observado na Figura 5.





**Figura 5 – Distribuição de potencial elétrico para um cabo com blindagem.**

A blindagem externa, também conhecida como blindagem da isolação, diferencia-se da blindagem interna pelo fato de ser geralmente composta da associação de blindagem semicondutora e blindagem metálica.

Um cabo sem blindagem externa apresenta distribuição irregular do campo elétrico, enquanto no cabo com blindagem externa, o campo elétrico distribui-se de forma equilibrada e radialmente em relação ao condutor como exemplificado para a blindagem interna. Este tipo de distribuição de campo é importante principalmente para tensões elevadas, pois garante solicitações elétricas uniformes em cada camada isolante. [1]

A blindagem externa deve ser utilizada em cabos isolados em XLPE a partir de 1.8kV, ou em cabos isolados em PVC e EPR a partir de 3.6 kV, sendo aplicada sobre a superfície da isolação interna. É composta, na maioria dos casos, pela associação de uma blindagem semicondutora e uma blindagem metálica, constituída de fita ou fios de cobre para o transporte da corrente induzida ou de curto circuito, devendo estar intimamente unida à superfície da isolação interna e da isolação externa para garantir um ótimo desempenho.

Este tipo de blindagem tem como principais finalidades:

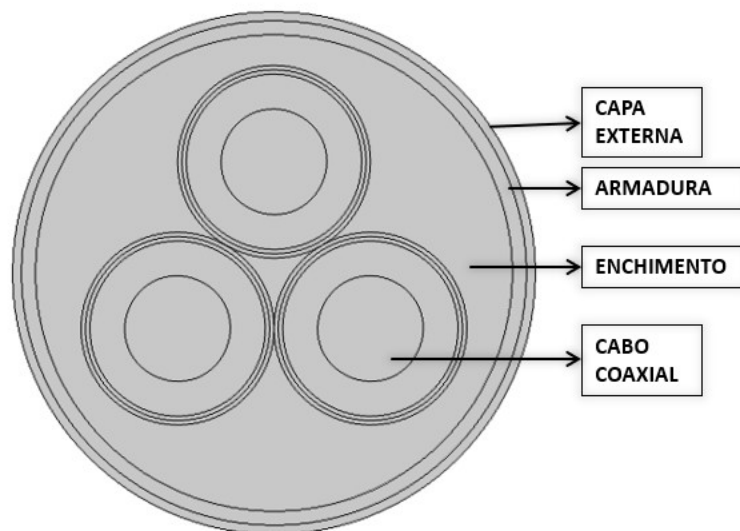
- Confinar o campo eletrostático dentro do cabo isolado obtendo uma distribuição radial e simétrica do mesmo, fazendo com que o dielétrico da isolação externa seja igualmente solicitado;

- A blindagem semicondutora sobre a isolação é responsável pela eliminação dos vazios ionizáveis entre a isolação e a blindagem metálica;
- Uniformizar as linhas do campo elétrico radial e longitudinal, permitindo sua forma perfeitamente cilíndrica; e
- Eliminar gradientes de tensão em determinados pontos da isolação externa, garantindo uma sollicitação uniforme do dielétrico e aumentando a sua vida útil.

## 2.1.4 Enchimento

Os enchimentos são usados para preencher os espaços entre os diversos componentes do cabo umbilical. São preenchimentos sólidos ou outros materiais como juta, algodão, fibra de vidro e geleia de petróleo.

A Figura 6 ilustra a presença de enchimento em um cabo em tubulação.



**Figura 6 – Cabo em Tubulação ilustrando as veias de potência (cabo coaxial), enchimento, armadura e capa externa.**

## 2.1.5 Armadura

A armadura pode ser considerada como um reforço mecânico, oferecendo resistência à esforços radiais e tração/compressão. Pode ser composta por fitas planas de aço aplicadas helicoidalmente em torno do cabo, fitas corrugadas de aço ou alumínio garantindo maior flexibilidade ou, ainda, fios aplicados longitudinalmente. A Figura 6 ilustra o posicionamento da armadura em relação aos demais componentes em cabo em tubulação.

## 2.1.6 Cobertura ou Isolação Externa

É uma camada não metálica que tem como objetivo proteger o núcleo contra agentes que venham a danificar o ambiente onde o cabo está instalado. Na maioria dos casos, a capa externa é de PVC, por ser um material mais econômico e que atende às solicitações. Em ambientes sujeitos a poluição, a capa de PVC é substituída por Neopreme. A Figura 6 ilustra a disposição da cobertura em relação aos demais componentes.

## 2.1.7 Aplicação da Isolação Interna

Durante o processo de fabricação é necessário ter um alto controle de qualidade das matérias primas e do processo de aplicação das camadas extrudadas da isolação, conforme mencionado no item 2.2.2, com o objetivo de evitar a presença de bolhas ou de agentes contaminantes que venham a comprometer a homogeneidade do dielétrico e com isso submeter o mesmo a solicitações acentuadas em algum ou alguns pontos, gerando gradientes de tensão que possam vir a reduzir a vida útil da camada isolante e/ou a perfuração da mesma.

Os cabos são produzidos pelo processo de tripla extrusão, que significa a aplicação simultânea da blindagem do condutor, da isolação e da camada semicondutora da blindagem da isolação, objetivando a eliminação de contaminantes e a obtenção de uma ligação a nível molecular das blindagens com a isolação.

## 2.2 Configurações de Instalação no Sistema

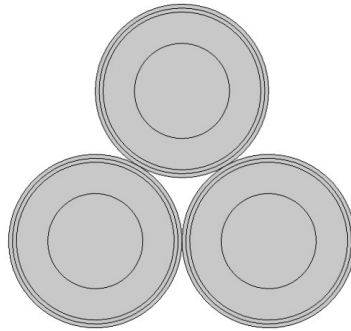
Um sistema de cabos é uma combinação de diferentes parâmetros que influenciam nas características elétricas, como por exemplo os componentes do cabo, configuração da instalação e métodos de aterramento.

Do ponto de vista do método de instalação no sistema, os cabos podem ser instalados em configuração triangular ou plana, unidos, ou não, das seguintes formas:

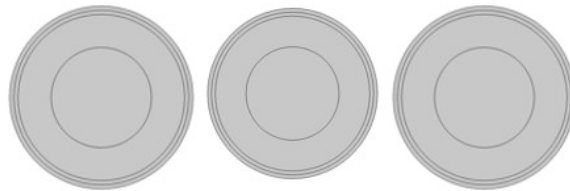
- Diretamente enterrado;
- Em bandejas, cercado por ar;
- Instalados em túneis, cercados por ar;
- Em dutos com os dutos cercados por ar ou diretamente enterrados;
- Instalados em um banco de dutos enterrado;

- Entre outros.

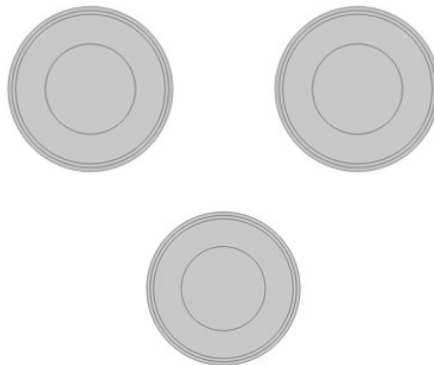
As Figuras 7-10 ilustram algumas das configurações de disposição de condutores.



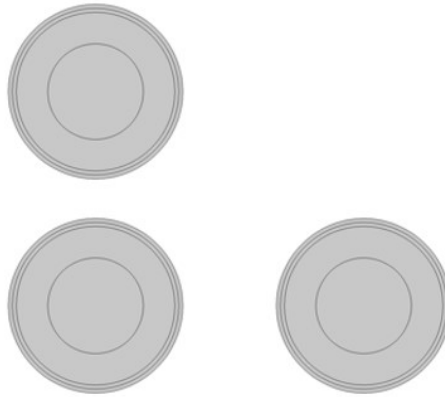
**Figura 7 - Configuração Trifólio.**



**Figura 8 - Configuração Trifólio horizontal plana com espaçamento entre condutores.**



**Figura 9 - Configuração Trifólio com espaçamento entre os condutores.**



**Figura 10 - Configuração Triangular.**

## 2.3 Particularidades de Cabos Submarinos

Quando analisados os aspectos construtivos de um cabo submarino, os mesmos podem apresentar complexidade maior quando comparados com aéreos ou subterrâneos. Este tipo de estrutura pode ser composta de condutores monopolares inseridos em um material dielétrico, enchimento, fibra óptica, entre outros. Estes elementos estão envolvidos por uma armadura.

Dependendo da aplicação e modo de instalação, o cabo submarino pode estar exposto a mais de um meio externo que precisam ser considerados nos estudos a serem realizados de modo que as impedâncias e admitâncias de retorno calculadas tenham a precisão necessária.

Na modelagem analítica desse tipo de cabo talvez seja necessária algumas simplificações e as análises a serem feitas podem ser complementadas por métodos numéricos como elementos finitos ou o método dos momentos.

Ainda sobre o meio externo ao cabo, existem incertezas quando esse meio é a água do mar por exemplo. Parâmetros como condutividade e temperatura, variam com a profundidade e região. Como mencionado em [18], a partir de determinada profundidade a temperatura tende a se estabilizar em torno dos 4 °C. Para a condutividade costuma-se adotar o valor de 4 ou 5 S/m. Para permissividade elétrica relativa é comum o uso do valor 81. Sobre as características elétricas do solo-marinho em [18] é mencionado que a atribuição de valores ocorre de forma aleatória.

Cabos submarinos também estão sujeitos a possível migração de água do mar para dentro da camada dielétrica mais externa. Tal ocorrência altera as características do material, tornando-o mais dispersivo.

No item 3.1.2 foi apresentada a expressão que representa a admitância de um cabo monopolar enterrado. Foi mencionado que é uma prática comum desconsiderar a parte condutiva da matriz de admitância interna, ou seja,  $[Y_{int}] \approx j\omega[C_{int}]$ . Entretanto, devido a particularidade dos cabos submarinos é necessário considerar que devido a contaminação por água, ocorre um aumento da condutividade efetiva do dielétrico. SILVA [23] trata da modificação das formulações analíticas de modo a considerar esse efeito.

# CAPÍTULO 3

## FORMULAÇÕES ANALÍTICA E NUMÉRICA

Este capítulo tem como finalidade apresentar as formulações analítica e numérica para composição das matrizes de impedâncias e admitâncias unitárias de cabos de potência, tanto aqueles formados por camadas condutoras concêntricas quanto os em tubulação ou armadura.

### 3.1 Formulação Analítica

A formulação matemática para cabos elétricos, em geral, é voltada para estimação de seus parâmetros elétricos, impedâncias longitudinais unitária e admitâncias transversais unitárias.

A impedância e admitância de um sistema de cabos pode ser definida a partir das seguintes equações matriciais:

$$d(V)/dx = -[Z](I) \tag{1}$$

$$d(I)/dx = -[Y](V) \tag{2}$$

onde,  $V$  e  $I$  são os vetores de tensões e correntes a uma distância  $x$  ao longo do cabo e  $[Z]$  e  $[Y]$  são as matrizes de impedância longitudinal por unidade de comprimento e admitância transversal por unidade de comprimento.

Todas as matrizes envolvidas nesse sistema são variantes na frequência devido aos efeitos peculiares, de proximidade e influências do meio externo, podendo inclusive apresentar comportamento não linear de camadas condutoras caso a permeabilidade magnética relativa das mesmas não seja unitária. Desprezando os efeitos não lineares e considerando que tanto tensões como correntes apresentam comportamento temporal harmônico, ou

seja, a variação temporal se dá por grandezas do tipo  $\exp(j\omega t)$ , pode-se reformular as equações (1) e (2):

$$d\mathbf{V}(x, s)/dx = -\mathbf{Z}\mathbf{I}(x, s) \quad (3)$$

$$d\mathbf{I}(x, s)/dx = -\mathbf{Y}\mathbf{V}(x, s) \quad (4)$$

onde,  $s = j\omega$ ,  $Z = R + j\omega L$  e  $Y = G + j\omega C$ .

De modo genérico e simplificado, como demonstrado por SILVA[23], duas parcelas distintas podem ser identificadas para as matrizes unitárias através das seguintes equações:

$$[\mathbf{Z}] = [\mathbf{Z}_{int}] + [\mathbf{Z}_0] \quad (5)$$

$$[\mathbf{Y}] = [\mathbf{Y}_{int}^{-1} + \mathbf{Y}_0^{-1}]^{-1} \quad (6)$$

onde as equações (5) e (6) representam, respectivamente, as matrizes de impedância e admitância.  $[\mathbf{Z}_{int}]$  e  $[\mathbf{Y}_{int}]$  são as matrizes de impedância e admitância interna e  $[\mathbf{Z}_0]$  e  $[\mathbf{Y}_0]$ , matrizes de impedância e admitância externa.

É válido ressaltar que neste trabalho serão abordados apenas os cálculos de impedância e admitância interna para diferentes geometrias e configurações de cabos elétricos. Nos itens a seguir serão apresentadas formulações de impedância e admitância desenvolvidas e aplicadas em [2], [4] e [23] para diferentes geometrias e sistemas de cabos.

### 3.1.1 Cálculo de Impedância para um Sistema de Cabos Coaxiais

Considerando um cabo monopolar composto de condutor e blindagem, a matriz de impedância, descrita de forma detalhada no Apêndice A, é dada por:

$$[\mathbf{Z}] = [\mathbf{Z}_{int}] + [\mathbf{Z}_0] \quad (7)$$



A matriz de impedância interna pode ser dada por:

$$[Z_{int}] = \begin{bmatrix} [Z_{i1}] & [0] & \cdots & [0] \\ [0] & [Z_{i2}] & \cdots & [0] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0] & [0] & \cdots & [Z_{in}] \end{bmatrix} \quad (8)$$

Cada submatriz da diagonal principal da equação (8) representa a matriz de impedância da fase  $j$  do cabo monopolar.

$$[Z_{ij}] = \begin{bmatrix} Z_{ccj} & Z_{csj} \\ Z_{csj} & Z_{ssj} \end{bmatrix} \quad (9)$$

A partir das equações desenvolvidas no Apêndice A, cada elemento da matriz apresentada em (9) pode ser calculado.

Neste trabalho é adotada a premissa de que o efeito da camada semicondutora é pequeno, como demonstrado por AMETANI [3], portanto a dimensão da matriz de impedância interna  $[Z_{int}]$  é igual ao número de camadas condutoras existentes em cada cabo monopolar. Como pode ser observado na equação (9), a dimensão da matriz é 2 estando relacionada aos dois elementos condutores presentes: condutor e blindagem.

### 3.1.2 Cálculo de Admitância para um Cabo Coaxial Monopolar

Como demonstrado no Apêndice B, a matriz de admitância interna para um cabo monopolar enterrado constituído de condutor, blindagem e armadura pode ser representada pela equação (10).

$$[Y_{int}] = \begin{bmatrix} y_{isol1} & -y_{isol1} \\ -y_{isol1} & (y_{isol1} + y_{isol2}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde,  $y_{isol1}$  é a admitância devido a isolação existente entre o condutor e a blindagem,  $y_{isol2}$  é a admitância devido a isolação existente entre a blindagem e o solo/água. As equações apresentadas no Apêndice B permitem o cálculo desses elementos da matriz de admitância interna.

Nas formulações apresentadas no Apêndice B, desconsiderou-se a parte condutiva da matriz de admitância interna, ou seja,  $Y_{int} \approx j\omega C_{int}$ . Entretanto, quando são estudados cabos submarinos é importante levar em conta a contaminação devido a água, ao menos nas camadas mais externas de dielétrico. Sendo necessário então, adicionar uma condutância na camada condutora mais externa, ou seja, armadura. Esta particularidade é desenvolvida por SILVA [23].

A matriz de admitâncias de um sistema de cabos pode ser avaliada a partir dos elementos da matriz de potencial, sendo inversamente proporcionais às admitâncias. Tal método será abordado e aplicado neste trabalho.

A matriz de coeficientes de potencial de Maxwell para um sistema de cabos enterrados é apresentada na equação (11).

$$[P] = [P_{int}] = \begin{bmatrix} [P_{i1}] & [0] & \cdots & [0] \\ [0] & [P_{i2}] & \cdots & [0] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [0] & [0] & \cdots & [P_{in}] \end{bmatrix} \quad (11)$$

Cada submatriz da diagonal principal da equação (11) representa a matriz de potencial de um cabo monopolar. Para o cabo monopolar constituído de condutor e blindagem, tem-se:

$$[P_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{cj} + p_{sj} & p_{sj} \\ p_{sj} & p_{sj} \end{bmatrix} \quad (12)$$

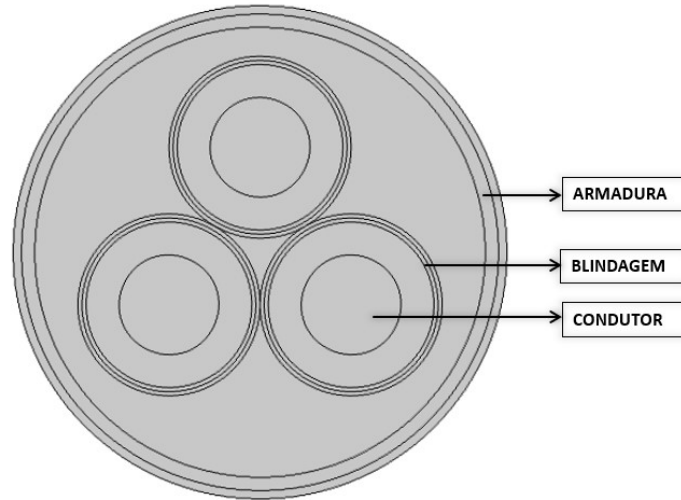
onde,

$$p_{cj} = \left( \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{i1}} \right) \cdot \ln(r_3/r_2)$$

$$p_{sj} = \left( \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{i2}} \right) \cdot \ln(r_5/r_4) \quad (13)$$

### 3.1.3 Cálculo de Impedância para um Cabo em Tubulação

Considere o apresentado na Figura 11, composto por um conjunto de cabos monopolares envoltos por uma tubulação em comum. Assume-se nesse estudo espessura finita para a tubulação e que cada fase é representada por um cabo monopolar.



**Figura 11 - Características construtivas e de instalação do Cabo em Tubulação.**

Com essas características, a matriz de impedância pode ser representada por:

$$[Z] = [Z_{i,sc}] + [Z_p] + [Z_c] + [Z_0] \quad (14)$$

onde,  $[Z_{i,sc}]$  é a matriz de impedância interna dos cabos monopolares,  $[Z_p]$  é a matriz de impedância interna da tubulação,  $[Z_c]$  é a matriz de impedância mútua, relacionada aos campos elétricos, entre as superfícies interna e externa da tubulação e  $[Z_0]$  é a matriz de impedância de retorno para terra. A composição de cada uma dessas matrizes é apresentada nas equações (15)-(18).

$$[Z_{i,sc}] = \begin{bmatrix} [Z_{i1}] & [0] & \cdots & [0] & 0 \\ [0] & [Z_{i2}] & \cdots & [0] & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ [0] & [0] & \cdots & [Z_{in}] & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[Z_p] = \begin{bmatrix} [Z_{p11}] & [Z_{p12}] & \cdots & [Z_{p1n}] & 0 \\ [Z_{p21}] & [Z_{p22}] & \cdots & [Z_{p2n}] & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ [Z_{p1n}] & [Z_{p2n}] & \cdots & [Z_{pnn}] & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[Z_c] = \begin{bmatrix} [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & \cdots & [Z_{c1}] & Z_{c2} \\ [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & \cdots & [Z_{c1}] & Z_{c2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & \cdots & [Z_{c1}] & Z_{c2} \\ Z_{c2} & Z_{c2} & \cdots & Z_{c2} & Z_{c3} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[Z_0] = \begin{bmatrix} [Z_0] & [Z_0] & \cdots & [Z_0] & Z_0 \\ [Z_0] & [Z_0] & \cdots & [Z_0] & Z_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ [Z_0] & [Z_0] & \cdots & [Z_0] & Z_0 \\ Z_0 & Z_0 & \cdots & Z_0 & Z_0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Cada submatriz da diagonal principal da equação (15) é dada pela equação (9).

Cada submatriz da diagonal principal da equação (16) é dada por:

$$[Z_{pjk}] = \begin{bmatrix} Z_{pjk} & Z_{pjk} \\ Z_{pjk} & Z_{pjk} \end{bmatrix} \quad (19)$$

onde,  $Z_{pjk}$  representa a impedância entre o condutor  $j$  e o condutor  $k$  da região compreendida dentro da tubulação. Essa impedância pode ser calculada através da equação (20) que envolve funções de Bessel.

$$Z_{pjk} = \left( \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \right) \cdot \left[ \frac{\mu_{ra} K_0(\gamma_a r_{ai})}{\gamma_a r_{ai} K_1(\gamma_a r_{ai})} + Q_{jk} + 2\mu_{ra} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{n(1+\mu_{ra}) + \gamma_a r_{ai} \frac{K_{n-1}(\gamma_a r_{ai})}{K_n(\gamma_a r_{ai})}} \right] \quad (20)$$

$$Z_{pjk} = \left( \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \right) \cdot \left[ \frac{\mu_{ra} K_0(\gamma_a r_{ai})}{\gamma_a r_{ai} K_1(\gamma_a r_{ai})} + Q_{jk} + 2\mu_{ra} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{n(1+\mu_{ra}) + \gamma_a r_{ai} \frac{K_{n-1}(\gamma_a r_{ai})}{K_n(\gamma_a r_{ai})}} \right] \quad (21)$$

onde são utilizadas as seguintes equações auxiliares:

$$Q_{jk} = \ln \left[ \frac{r_{p1}}{\sqrt{d_j^2 + d_k^2 - 2d_j d_k \cos \theta_{jk}}} \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{n} \quad (22)$$

$$Q_{jj} = \ln \left[ \left( \frac{r_{ai}}{r_j} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d_j}{r_{ai}} \right)^2 \right] \right]$$

$$C_n = \left( \frac{d_j d_k}{r_{p1}^2} \right)^n \cdot \cos(n\theta_{jk})$$

$$\gamma_a = \sqrt{j\omega\mu_a\sigma_a}$$

Os elementos da matriz apresentada em (17) são dados por:

$$Z_{c1} = Z_{ai} + Z_{ae} - 2z_{am} + Z_{ains}$$

$$Z_{c2} = Z_{ae} - z_{am} + Z_{ains} \quad (23)$$

$$Z_{c3} = Z_{ae} + Z_{ains}$$

Os elementos  $Z_{am}$ ,  $Z_{ai}$ ,  $Z_{ae}$  e  $Z_{ains}$  das equações apresentadas em (23) são dados por:

$$z_{am} = \frac{\rho_a}{[2\pi r_{ai} r_{ae} [I_1(\gamma_a r_{ae}) K_1(\gamma_a r_{ai}) - I_1(\gamma_a r_{ai}) K_1(\gamma_a r_{ae})]]}$$

$$z_{ai} = \frac{\gamma_a \rho_a [I_0(\gamma_a r_{ai}) K_1(\gamma_a r_{ae}) - I_1(\gamma_a r_{ae}) K_0(\gamma_a r_{ai})]}{[2\pi r_{ai} [I_1(\gamma_a r_{ae}) K_1(\gamma_a r_{ai}) - I_1(\gamma_a r_{ai}) K_1(\gamma_a r_{ae})]]} \quad (24)$$

$$z_{ae} = \frac{\gamma_a \rho_a [I_0(\gamma_a r_{ae}) K_1(\gamma_a r_{ai}) - I_1(\gamma_a r_{ai}) K_0(\gamma_a r_{ae})]}{[2\pi r_{ae} [I_1(\gamma_a r_{ae}) K_1(\gamma_a r_{ai}) - I_1(\gamma_a r_{ai}) K_1(\gamma_a r_{ae})]]}$$

$$z_{ains} = \left( \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \right) \cdot \ln \left( \frac{r_{ce}}{r_{ae}} \right)$$

A matriz  $[Z_0]$  em (18) é a impedância própria de retorno da tubulação.

### 3.1.4 Cálculo de Admitância para um Cabo em Tubulação

Considere o mesmo exemplo de Cabo PT apresentado na Figura 11. A matriz de admitância pode ser obtida de forma similar a matriz de impedância, sendo expressa pela equação (25). [20]

$$[Y] = \left[ [Y_{i,sc}]^{-1} + [Y_p]^{-1} + [Y_c]^{-1} + \frac{1}{Y_0} [M_1] \right]^{-1} \quad (25)$$

Onde  $[Y_{i,sc}]$  é a matriz de admitância interna dos cabos monopolares,  $[Y_p]$  é a matriz de admitância associada ao enchimento,  $[Y_c]$  é a matriz de admitância mútua relacionada as superfícies interna e externa da tubulação,  $Y_0$  é a admitância externa e  $[M_1]$  é uma matriz com todos os elementos iguais a um.

A admitância está relacionada à diferença de tensão entre os condutores separados por dielétrico e essa diferença de tensão é calculada a partir dos coeficientes de potencial de Maxwell,  $[P]$ . Dessa forma, a equação (25) é originada a partir de manipulações em termos de  $[P]$ .

A matriz de coeficientes de potencial de Maxwell para um Cabo PT é apresentada na equação (26).

$$[P] = [P_{i,sc}] + [P_p] + [P_c] \quad (26)$$

A composição de cada uma dessas matrizes é apresentada abaixo.

$$[P_{i,sc}] = \begin{bmatrix} [P_{i1}] & [0] & \dots & [0] & 0 \\ [0] & [P_{i2}] & \dots & [0] & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ [0] & [0] & \dots & [P_{in}] & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$[P_p] = \begin{bmatrix} [P_{p11}] & [P_{p12}] & \dots & [P_{p1n}] & 0 \\ [P_{p1}] & [P_{p2}] & \dots & [P_{p2n}] & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ [P_{p1n}] & [P_{p2n}] & \dots & [P_{pnn}] & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$[P_c] = \begin{bmatrix} [P_c] & [P_c] & \cdots & [P_c] & P_c \\ [P_c] & [P_c] & \cdots & [P_c] & P_c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ [P_c] & [P_c] & \cdots & [P_c] & P_c \\ P_c & P_c & \cdots & P_c & P_c \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$[P_0] = \begin{bmatrix} [P_0] & [P_0] & \cdots & [P_0] & P_0 \\ [P_0] & [P_0] & \cdots & [P_0] & P_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ [P_0] & [P_0] & \cdots & [P_0] & P_0 \\ P_0 & P_0 & \cdots & P_0 & P_0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Cada submatriz da diagonal principal da equação (28) é dada por:

$$[P_{pjk}] = \begin{bmatrix} P_{pjk} & P_{pjk} \\ P_{pjk} & P_{pjk} \end{bmatrix} \quad (31)$$

onde,  $P_{pjk}$  representa o coeficiente de potencial entre o condutor j e o condutor k da região compreendida dentro da tubulação.

$$P_{pjk} = \frac{Q_{jk}}{2\pi\epsilon_{p1}\epsilon_0} \quad (32)$$

$$P_{pjj} = \frac{Q_{jj}}{2\pi\epsilon_{p1}\epsilon_0} \quad (33)$$

Onde são utilizadas as seguintes equações auxiliares:

$$Q_{jk} = \ln \left[ \frac{r_{ai}}{\sqrt{d_j^2 + d_k^2 - 2d_j d_k \cos \theta_{jk}}} \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{n}$$

$$Q_{jj} = \ln \left[ \left( \frac{r_{ai}}{r_j} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d_j}{r_{ai}} \right)^2 \right] \right] \quad (34)$$

$$C_n = \left( \frac{d_j d_k}{r_{p1}^2} \right)^n \cdot \cos(n\theta_{jk})$$

Os elementos da matriz (29) são dados por:

$$[P_c] = \begin{bmatrix} P_c & P_c \\ P_c & P_c \end{bmatrix} \quad (35)$$

onde,

$$P_c = \frac{1}{2\pi\epsilon_{ce}\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{r_{ce}}{r_{ae}}\right) \quad (36)$$

### 3.1.5 Problemas com a Abordagem Analítica para Altas Frequências

O emprego das funções de Bessel nos cálculos da matriz  $Z_p$  em altas frequências apresenta problemas numéricos no Mathematica a partir da versão 12. Acredita-se que isso ocorre pois ao se tornar um aplicativo de 64 bits, limita-se a possibilidade de representação de números reais. Empregando-se 64 bits, o menor número real possível de ser representado no programa é próximo de  $2 \times 10^{-323}$ . O resultado da função de Bessel  $K_0(780)$  já produz um número inferior a isso. Versões anteriores do Mathematica representavam bem esse número, mas na versão 12 esses valores são substituídos por zero, conseqüentemente resultando em uma divisão por zero.

O problema apresentado acima não ocorre em versões anteriores, tanto que ROCHA [20] aplica o Mathematica em toda faixa de frequências. Um método desenvolvido para contornar esse tipo de problema é empregando expansão em série de potências das funções de Bessel. Entretanto, deve-se evitar o uso de apenas em uma função de Bessel, mas sim no produto ou razão entre as funções.

Como ilustrado na Figura 12, o produto de duas funções de Bessel foi substituído por uma expansão do produto.



```

besik[ni_, zi_, nk_, zk_] :=
If[Abs[zi] ≤ 300 || Abs[zk] ≤ 300,
|se |valor absoluto |valor absoluto
BesselI[ni, zi] BesselK[nk, zk],
|função I de Bessel |função K de Bessel
Exp[zi - zk] / (196 608 Sqrt[zi zk] zi^4) ×
|exponencial |raiz quadrada
(( -49 + 4 * ni^2) * (-25 + 4 * ni^2) * (-9 + 4 * ni^2) * (-1 + 4 * ni^2) +
32 * (25 - 4 * ni^2) * (9 - 4 * ni^2) * (1 - 4 * ni^2) * zi +
768 * (-9 + 4 * ni^2) * (-1 + 4 * ni^2) * zi^2 + 12 288 * (1 - 4 * ni^2) * zi^3 + 98 304 * zi^4) *
(1 + (( -49 + 4 * nk^2) * (-25 + 4 * nk^2) * (-9 + 4 * nk^2) * (-1 + 4 * nk^2)) / (98 304 * zk^4) +
((-25 + 4 * nk^2) * (-9 + 4 * nk^2) * (-1 + 4 * nk^2)) / (3072 * zk^3) +
(9 - 40 * nk^2 + 16 * nk^4) / (128 * zk^2) + (-1 + 4 * nk^2) / (8 * zk))
]

```

Figura 12 - Expansão realizada para o produto de duas funções de Bessel.

Como observado na Figura 13, utilizado a expansão o erro é da ordem de  $10^{-19}$ . Sendo assim, de modo a obter-se uma resposta em frequência para uma faixa de 0.1Hz a 1MHz e utilizar a versão 12 do Mathematica, decidiu-se aplicar essa expansão.

```

a = BesselI[0, 300. (1 + I)] BesselK[0, 300. (1 + I)]
|função I de Bessel |un- |função K de Bessel |unidade
0.000833333 - 0.000833334 i

b = besik[0, 300. (1. + I), 0, 300 (1. + I)]
|unidade imaginária |unidade
0.000833333 - 0.000833334 i

a - b
3.25261 × 10-19 + 1.0842 × 10-19 i

```

Figura 13 - Exemplo comparativo.

## 3.2 Formulação Numérica

Através da solução das equações de Maxwell, que descrevem o comportamento do campo elétrico e magnético, estabelecendo relações entre cargas e correntes elétricas com permeabilidade, permissividade e condutividade dos diversos materiais envolvidos, é possível calcular os parâmetros de cabos de potência.

Entretanto, a aplicação direta dessas equações em geometrias complexas com diversos tipos de materiais é difícil, sendo muitas vezes necessário recorrer a técnicas de cálculo

numérico. Diversos métodos numéricos podem ser aplicados para solucionar os campos eletromagnéticos necessários para o cálculo das matrizes de impedância e admitância. O método que será tratado neste trabalho é o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Com o MEF, um domínio limitado por condições de contorno é dividido em pequenos elementos, subdomínios, de modo que a distribuição de campo, originalmente desconhecida em cada elemento, possa ser aproximada por certas funções expressas em termos de variáveis de campo nos vértices de cada elemento. Os valores das variáveis de campo em cada vértice da malha de elementos podem, então, ser determinados usando o método variacional ou o método de Galerkin.

O sistema de equações lineares finais definidas no MEF é geralmente composto de matrizes simétricas, o que facilita a solução. Esse método é conhecido por conseguir manejar regiões com diferentes permeabilidades magnéticas, sendo também flexível aos tipos dos elementos assim como a ordem das funções de forma.

Não será desenvolvido neste trabalho o equacionamento utilizando o MEF e, sim, aplicando diretamente o software COMSOL que se baseia neste método.

O software COMSOL Multiphysics é uma plataforma de simulação que engloba todas as etapas do fluxo de trabalho de modelagem, desde a definição de geometrias, propriedades de materiais e físicas que descrevem fenômenos específicos até solução e pós-processamento de modelos para produzir resultados precisos e confiáveis. Entidades geométricas, como domínios de materiais e superfícies, podem ser agrupadas em seleções para uso posterior em definições nas físicas, malhas e gráficos.

Nos casos que serão estudados neste trabalho será utilizado o ambiente bidimensional, a geometria será construída no plano cartesiano e condições de contorno serão aplicadas a uma determinada região. Para serem calculadas as impedâncias e capacitâncias serão utilizadas excitações de corrente e tensão.

Além da geometria e condições de contorno, é necessário definir as fontes de campo e materiais associados. O software disponibiliza a de importação de geometria em diversos formatos e uma biblioteca para criação ou importação de novos materiais. Deve-se também definir quais objetos condutores devem ser considerados condutores de corrente elétrica, quais objetos devem ter as correntes parasitas consideradas e quais devem fazer parte do cálculo de impedância ou da admitância.

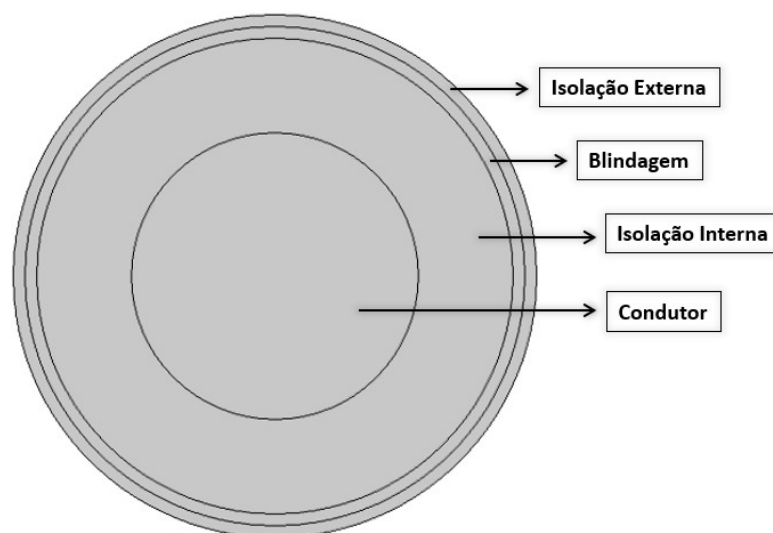
# CAPÍTULO 4

## CASOS TESTE

Este capítulo trata da aplicação e comparação das formulações analítica e numérica de cálculo de parâmetros internos de cabos isolados. Nos casos apresentados aqui, os resultados obtidos através das formulações analíticas são a base comparativa. Inicialmente é apresentado um caso teste, cujos resultados foram comparados com o modelo analítico aplicado. A partir deste, novos casos foram implementados, considerando sistemas trifásicos envolvidos por uma tubulação em comum.

### 4.1 Cabo Coaxial

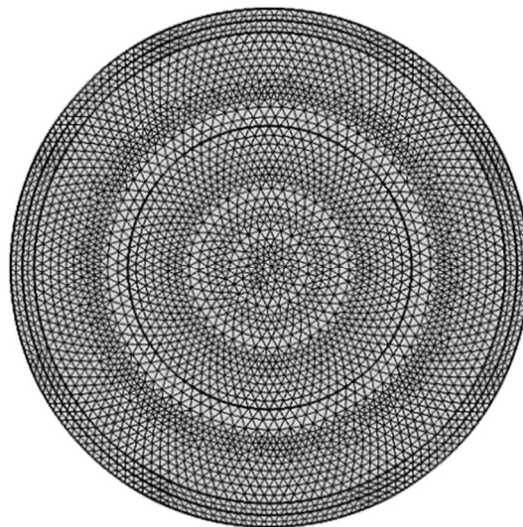
Com o objetivo de exemplificar a aplicação da formulação numérica utilizando o *software* COMSOL *Multiphysics* e comparar com resultados analíticos desenvolvidos no *software* Mathematica, foi utilizado para um estudo de caso inicial um cabo coaxial monopolar, ilustrado na Figura 14. Os dados referentes a geometria, materiais e construção da malha são apresentados no Apêndice C.1.



**Figura 14 – Cabo Coaxial.**

A formulação analítica foi desenvolvida no *software* Mathematica na versão 12, baseando-se nas equações descritas na Seção 3.1 e Apêndices A e B. Nas simulações descritas a seguir, considerou-se inicialmente uma faixa de frequências com 100 pontos logaritmicamente espaçados entre 0.1Hz e 1MHz. Entretanto, como já discutido na seção 3.1.5, para frequências mais altas as funções de Bessel tendem a infinito. Para evitar tal problema numérico, foi empregada expansão em série de potências para o produto e razão das funções de Bessel utilizadas nas formulações.

A construção da malha é um passo importante na rotina de simulação, pois garante acurácia dos resultados. A escolha do tipo de malha varia de acordo com as particularidades da geometria e do estudo a ser realizado. Neste trabalho, tanto para o cálculo da admitância quanto impedância escolheu-se a configuração *Extra Fine*, utilizando 6558 elementos de domínio. A malha gerada para este caso é ilustrada na Figura 15.



**Figura 15 - Malha gerada para o Cabo Coaxial.**

#### 4.1.1 Cálculo da Capacitância Interna por Unidade de Comprimento

Após a montagem da geometria, definição dos materiais e geração da malha, o próximo passo é a seleção da física mais adequada ao estudo que deseja ser realizado. De modo a obter a matriz de admitâncias e extrair as capacitâncias por unidade de comprimento, escolheu-se a física *Electric Currents* do COMSOL *Multiphysics*.

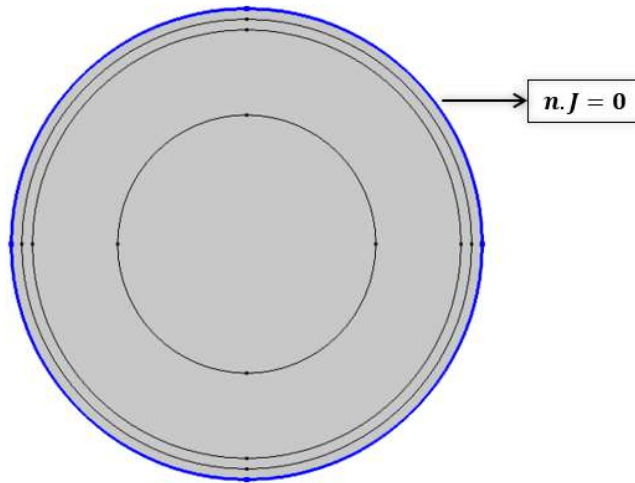
As equações aplicadas nesta física estão descritas na Equação (37).

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{J} = Q_j \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_e \\ \mathbf{E} = -j\omega \nabla \phi \end{cases} \quad (38)$$

Com as seguintes relações constitutivas:

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \end{cases} \quad (39)$$

Como condições de contorno para o cálculo de capacitância atribui-se a condição de isolamento elétrica ( $n \cdot \mathbf{J} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético, como ilustrado na Figura 16.



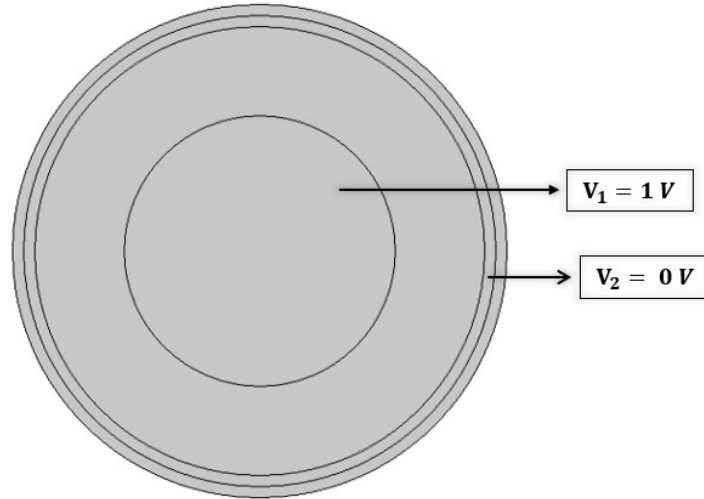
**Figura 16- Condição de Isolação Elétrica aplicada ao limite do domínio eletromagnético.**

Como descrito por SILVA[23] e desenvolvido no Apêndice B, para um cabo coaxial composto de condutor central, isolamento interna, blindagem e isolamento externa, a matriz de admitância interna pode ser descrita de acordo com a equação (40).

$$Y_i = \begin{bmatrix} y_{cb} & -y_{cb} \\ -y_{cb} & y_{cb} + y_b \end{bmatrix} \quad (40)$$

Onde  $y_{cb}$  é a admitância devida a isolamento que existe entre condutor e blindagem e  $y_b$  é devida à camada isolante que cobre a blindagem.

Para obter a matriz de admitâncias no COMSOL *Multiphysics* aplicou-se em cada parte metálica 1V e nas demais 0V, como ilustrado na Figura 17.



**Figura 17 - Rotina de simulação aplicada para obtenção da matriz de admitâncias.**

Com essas atribuições, o programa calcula a distribuição de campo elétrico no domínio eletromagnético, a qual é utilizada para o cálculo das admitâncias mútuas ( $Y_{ij}$ ) e próprias ( $Y_{ii}$ ) unitárias no domínio da frequência como mostrado na equação (41).

$$Y_{ij} = -\frac{Q_j}{2\pi f V_i}, \quad i, j = 1, 2, 3 \dots n \quad (41)$$

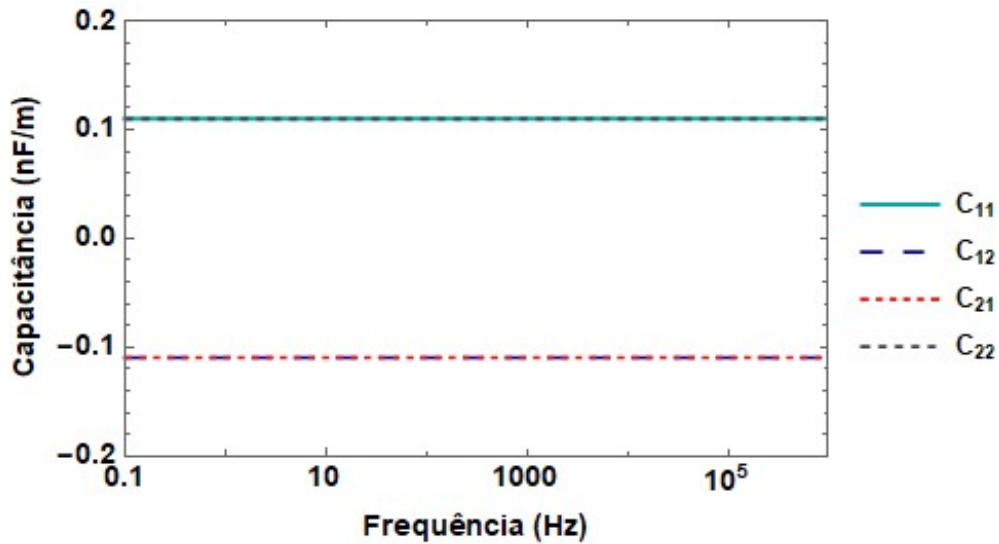
$$Y_{ii} = -\frac{Q_i}{2\pi f V_i}, \quad i = j = 1, 2, 3 \dots n$$

Sendo  $V$  a tensão aplicada,  $Q$  a densidade de corrente e  $n$  o número de partes metálicas.

Para o cabo coaxial apresentado nesta seção, a matriz de admitâncias possui dimensão 2 e cada elemento da matriz de capacitâncias por unidade de comprimento pode ser extraído utilizando a equação (42).

$$C_{ij} = \frac{\text{Im}g(Y_{ij})}{2\pi f} \quad (F/m), \quad i, j = 1, 2, 3 \dots n \quad (42)$$

Aplicando a rotina de simulação apresentada na Figura 17 e as equações descritas em (41) e (42), os resultados de capacitância são calculados para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1MHz. Os elementos da matriz de capacitância ao longo da frequência são ilustrados na Figura 18.



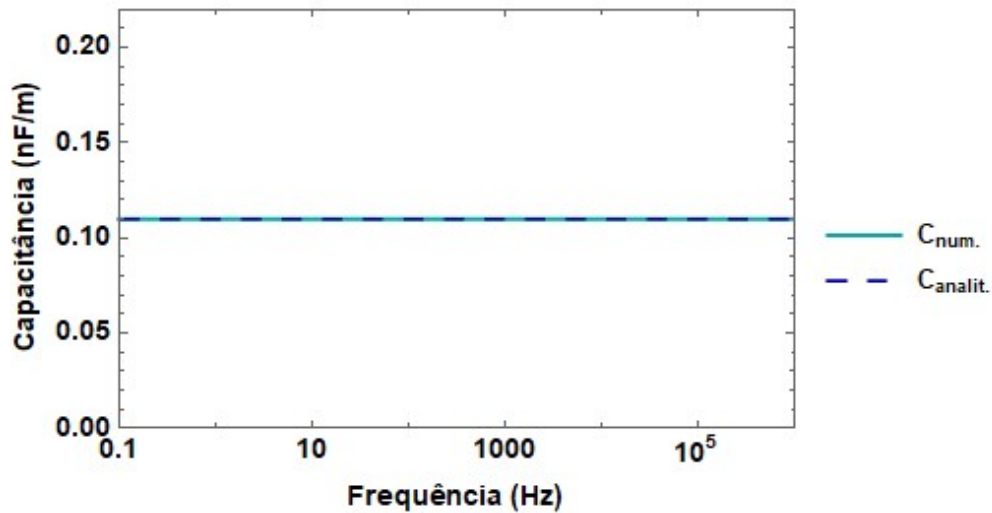
**Figura 18 - Elementos da matriz de capacitância para o cabo coaxial.**

De acordo com ANGELO [5] e LORENZO [15], a capacitância devida à isolamento existente entre condutor e blindagem, a capacitância própria do condutor e a própria da blindagem, podem ser calculadas através das equações descritas em (43).

$$\begin{aligned}
 C_{cb} &= -C_{12} \\
 C_{cc} &= C_{11} - C_{cb} \\
 C_{bb} &= C_{22} - C_{cb}
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

Analisando os resultados encontrados através da aplicação das equações descritas em (43), observou-se que, para o caso analisado, a única capacitância interna existente é aquela devida à existência de isolamento entre condutor e blindagem.

Como pode ser observado na Figura 19, a capacitância mantém-se constante para o intervalo de frequências considerado, com um valor de 109,795  $\mu\text{F}/\text{m}$ .



**Figura 19 - Capacitância mútua entre condutor e blindagem.**

O valor analítico encontrado utilizando-se as formulações descritas no Capítulo 3 para Cabo Coaxial é de 109,793  $\mu\text{F}/\text{m}$ . Com isso, o valor numérico possui uma diferença percentual de 0,0018%.

#### 4.1.2 Cálculo da Resistência e Indutância Internas por Unidade de Comprimento

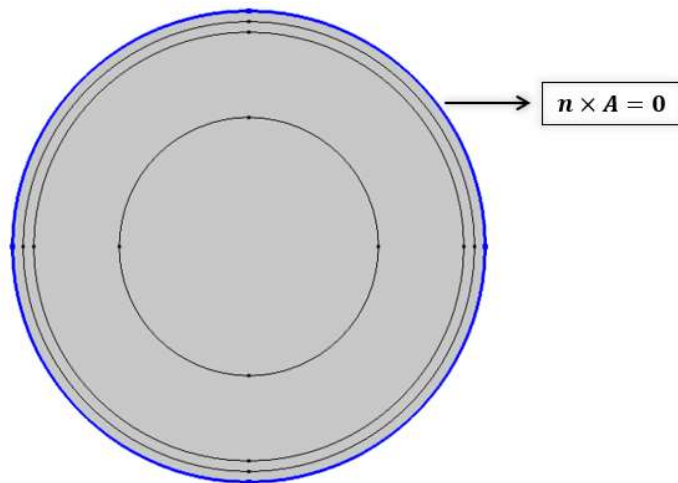
De modo a obter a matriz de impedância e extrair as resistências e indutâncias por unidade de comprimento, escolheu-se a física *Magnetic Fields* do COMSOL *Multiphysics*.

As equações aplicadas nesta física estão descritas em (44).

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_e \\ \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} \end{array} \right. \quad (44)$$

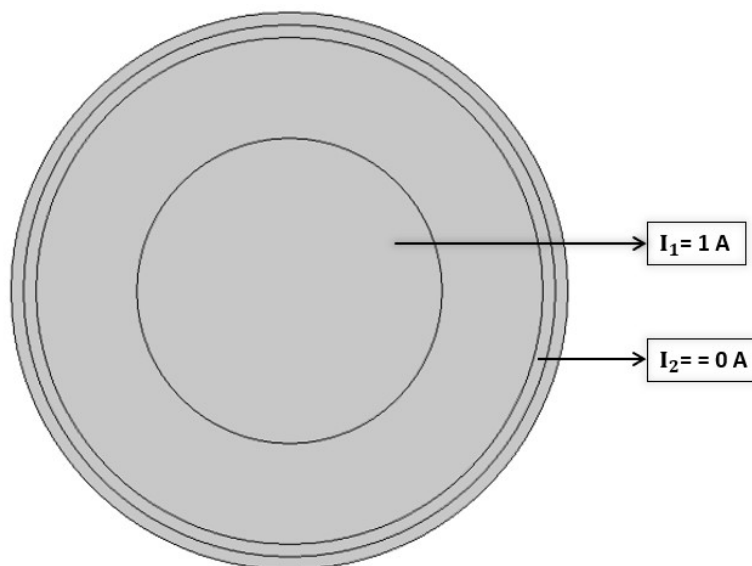
Como condições de contorno atribui-se a condição de isolamento magnética ( $n \times \mathbf{A} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético, como ilustrado na Figura 20.





**Figura 20 - Condição de Isolação Magnética aplicada ao limite do domínio eletromagnético.**

De modo a calcular as impedâncias próprias e mútuas de todas as partes metálicas do cabo, é aplicada uma corrente de 1A em um elemento metálico e medida a tensão induzida nesse elemento e nos demais, como ilustrado na Figura 21.



**Figura 21 - Rotina de simulação aplicada.**

A impedância própria é calculada dividindo-se a tensão induzida pela corrente no elemento em que a corrente foi aplicada. As impedâncias mútuas são encontradas

dividindo a tensão induzida nos elementos que não possuíam corrente pela corrente que produziu essa indução, como mostra as equações em (45).

$$Z_{ij} = \frac{V_{induzida j}}{I_i}, \quad i, j = 1, 2, 3 \dots n \quad (45)$$

$$Z_{ii} = \frac{V_{induzida i}}{I_i}, \quad i = j = 1, 2, 3 \dots n$$

As resistências e indutâncias podem ser calculadas através das equações (46) e (47).

$$R_{ij} = Real(Z_{ij}), \quad i, j = 1, 2, 3 \dots n \quad (46)$$

$$R_{ii} = Real(Z_{ii}), \quad i, j = 1, 2, 3 \dots n$$

$$L_{ij} = \frac{Img(Z_{ij})}{2\pi f}, \quad i, j = 1, 2, 3 \dots n \quad (47)$$

$$L_{ii} = \frac{Img(Z_{ii})}{2\pi f}, \quad i = j = 1, 2, 3 \dots n$$

Aplicando a rotina de simulação, descrita na Figura 21, e as equações descritas (45) e (46), os resultados de resistência interna por unidade de comprimento são calculados para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1MHz.

Os dados de resistência e indutância extraídos da matriz de impedância para o cabo coaxial são ilustrados nas Figuras 22-27. Como pode ser observado para os resultados de resistência própria da blindagem e mútua entre condutor e blindagem, a partir de  $f = 271,859$  kHz nota-se um afastamento entre o resultado numérico e analítico. Já para os resultados de indutância, o afastamento ocorre a partir de  $f = 443,062$  kHz. Nos gráficos correspondentes, a linha vertical tracejada vermelha indica a frequência onde ocorre o desvio.

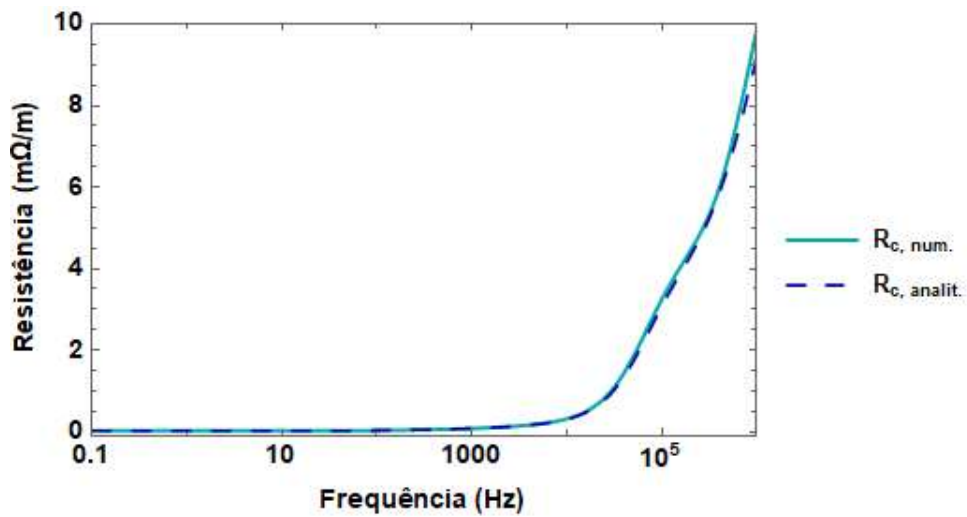


Figura 22 - Resistência própria do condutor por unidade de comprimento, para o cabo coaxial.

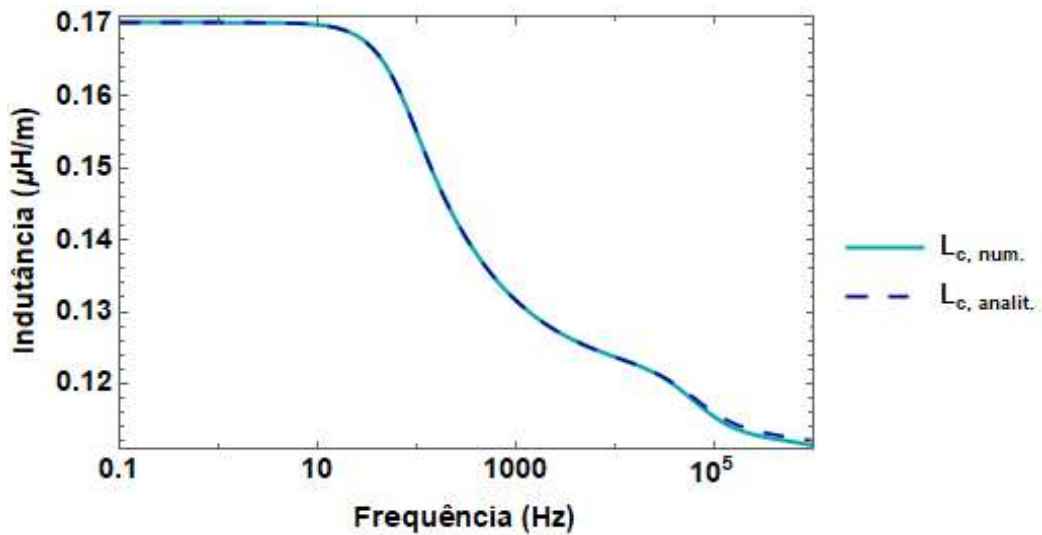


Figura 23 - Indutância própria do condutor por unidade de comprimento, para o cabo coaxial.

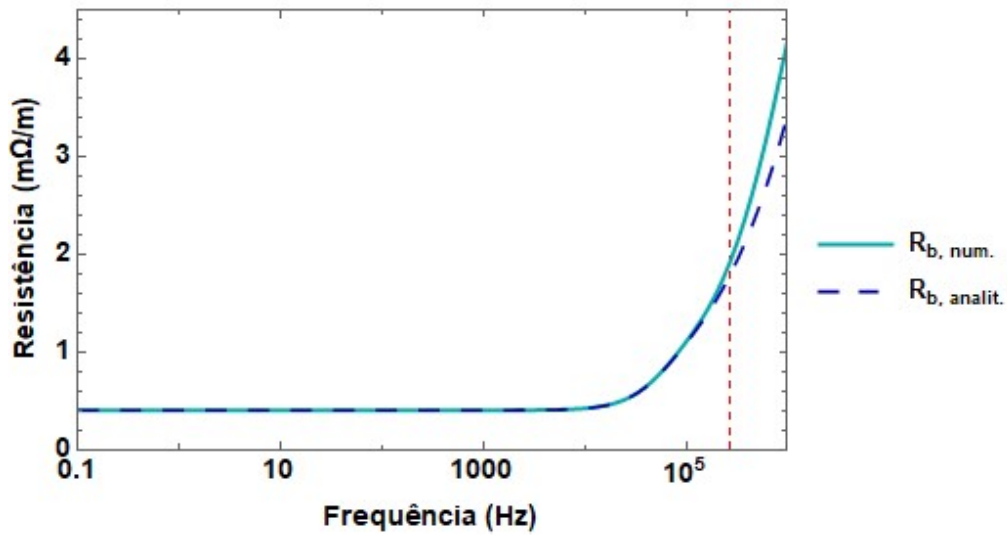


Figura 24 - Resistência própria da blindagem por unidade de comprimento, para o cabo coaxial.

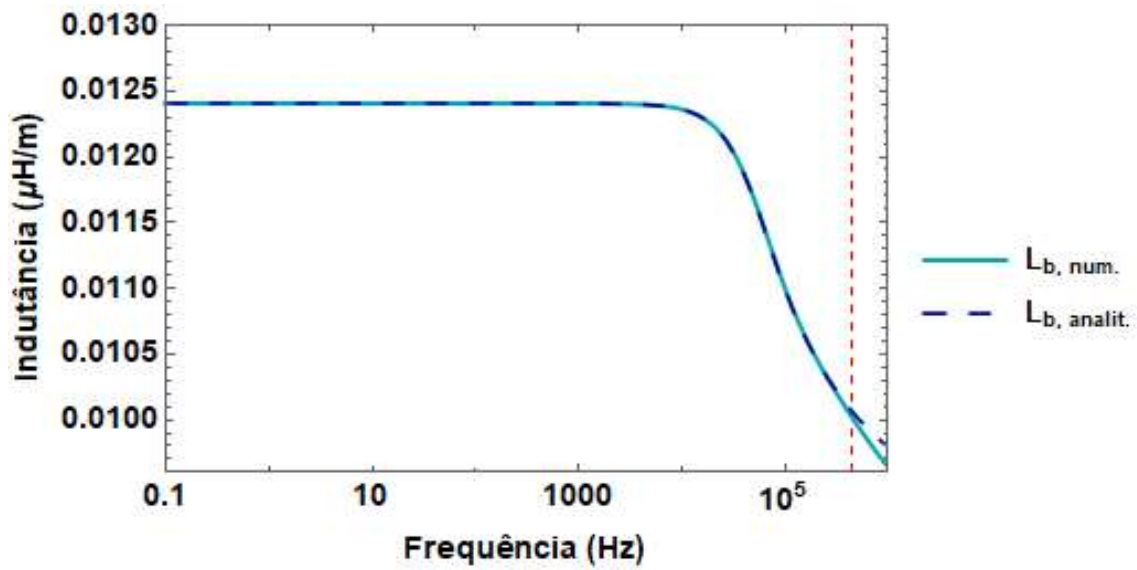


Figura 25 - Indutância própria da blindagem por unidade de comprimento, para o cabo coaxial.

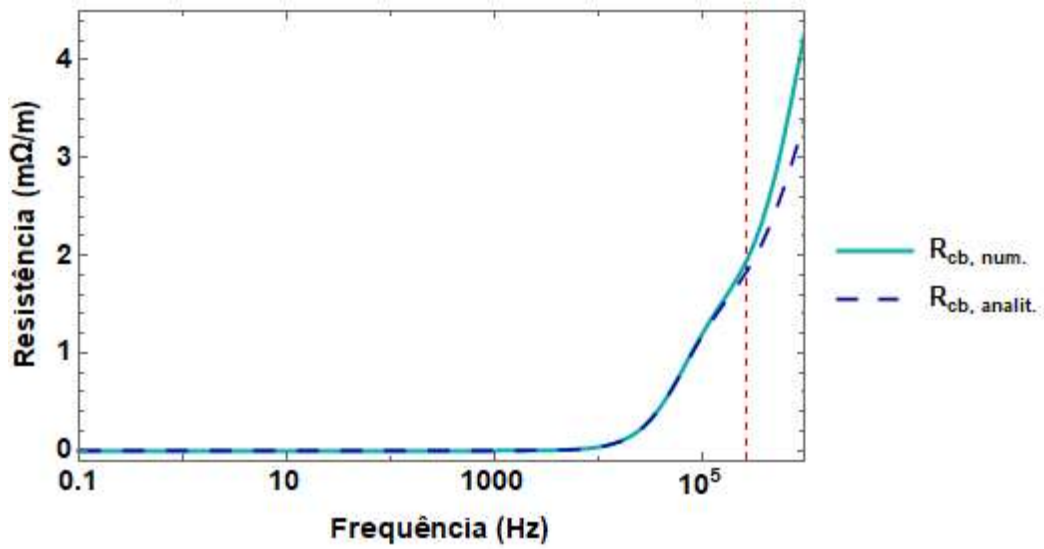


Figura 26 - Resistência mútua entre condutor e blindagem por unidade de comprimento, para o cabo coaxial.

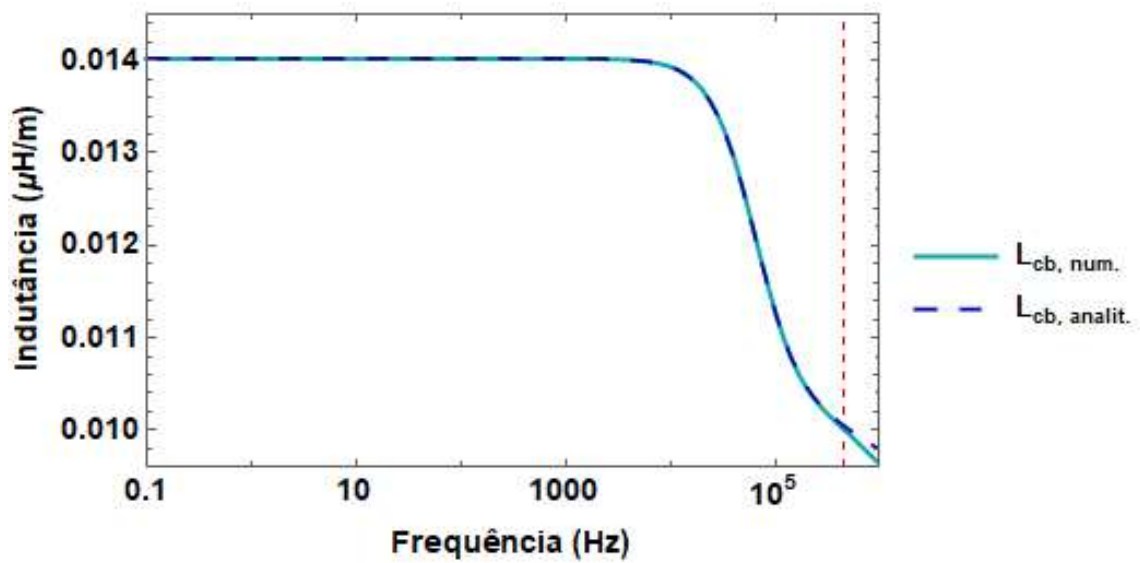
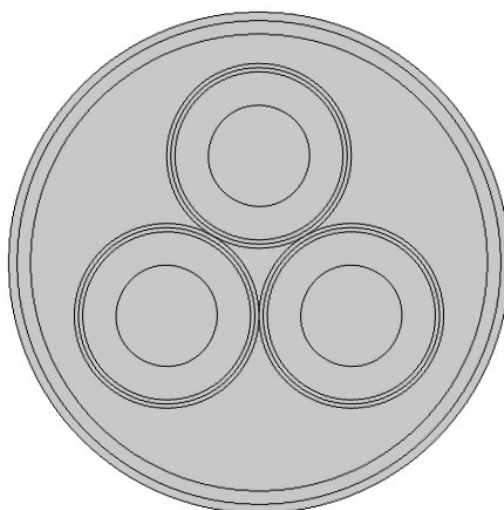


Figura 27 - Indutância mútua entre condutor e blindagem por unidade de comprimento, para o cabo coaxial.

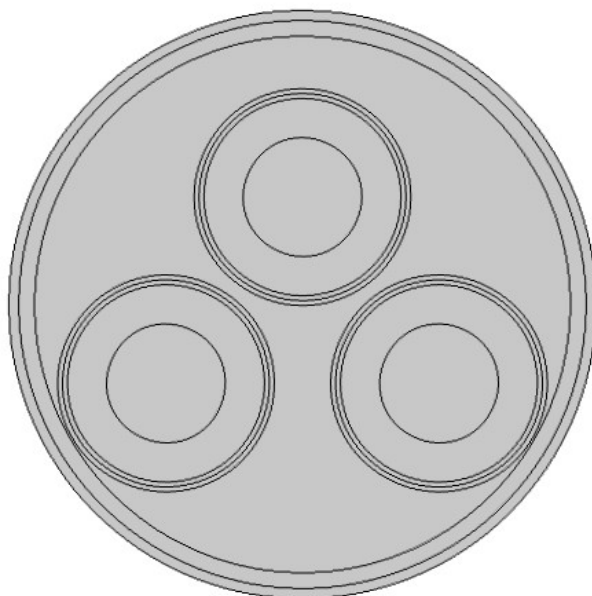
## 4.2 Cabo em Tubulação

Nesta seção serão calculados os parâmetros internos unitários de cabo em tubulação, o qual consiste em um sistema composto de três cabos monopolares, com características de geometria, materiais e construção de malha descritas no Apêndice C.2. Estes cabos monopolares estão envoltos por um tubo em comum, capa externa envolvendo o tubo e enchimento preenchendo o meio interno.

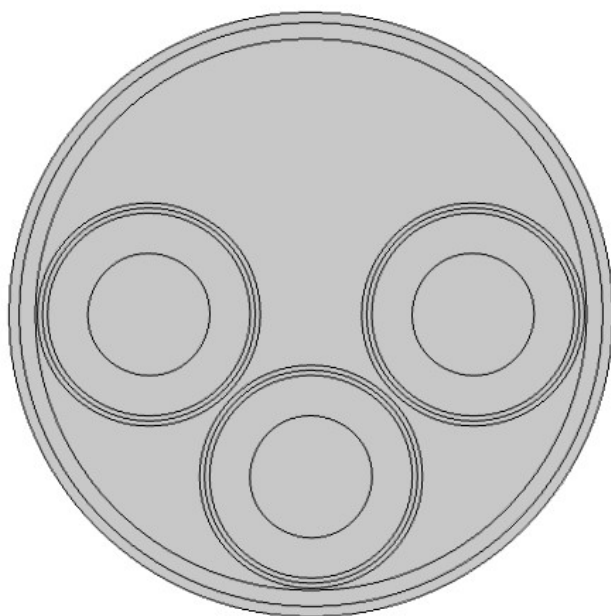
Serão estudadas nesta seção, três tipos diferentes de configurações de Cabo em Tubulação, com o objetivo de avaliar o efeito da disposição dos cabos monopolares no interior da tubulação no cálculo dos parâmetros internos. Além disso, os resultados obtidos através da metodologia numérica serão comparados com os dados analíticos. As Figuras 28-30 ilustram as diferentes configurações a serem estudadas.



**Figura 28 - Seção Transversal da Configuração 1 do Cabo em Tubulação.**



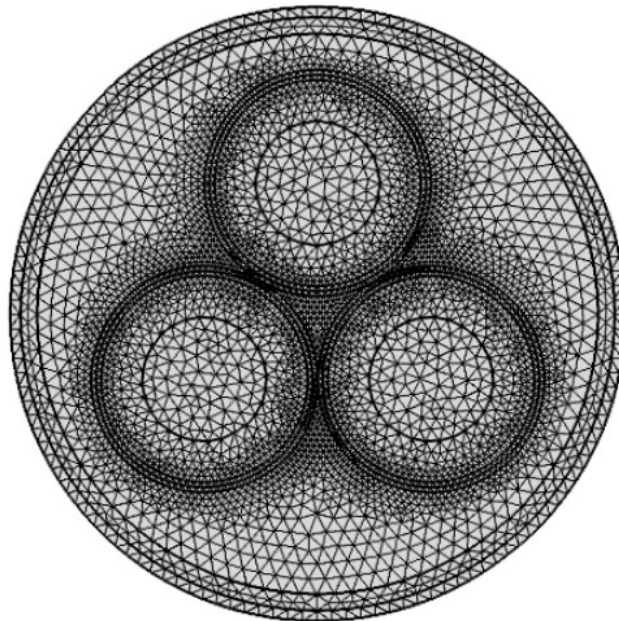
**Figura 29 - Seção Transversal da Configuração 2 do Cabo em Tubulação.**



**Figura 30 - Seção Transversal da Configuração 3 do Cabo em Tubulação.**

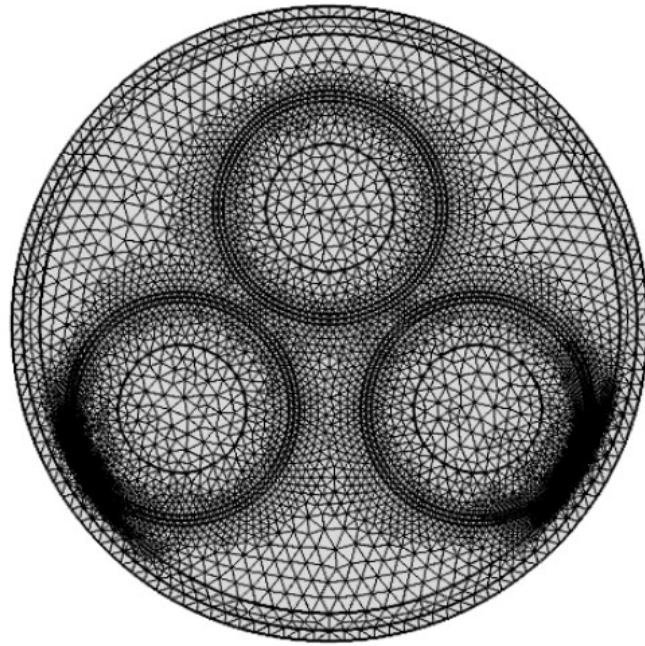
O domínio eletromagnético, que delimita o cálculo do MEF, considerado inicialmente para todas as configurações, possui dimensão igual o raio mais externo do Cabo PT. Posteriormente este domínio será alterado de acordo com o parâmetro que se deseja calcular.

Inicialmente, para aplicação da formulação numérica, tanto para o cálculo da admitância quanto impedância interna por unidade de comprimento, escolheu-se a configuração de malha *Extra Fine*, utilizando 10672 elementos de domínio para a Configuração 1, 10564 para a configuração 2 e 12086 para a Configuração 3. A malha foi gerada para todo domínio eletromagnético e é ilustrada em detalhe no cabo para cada configuração, nas Figuras 31-33.

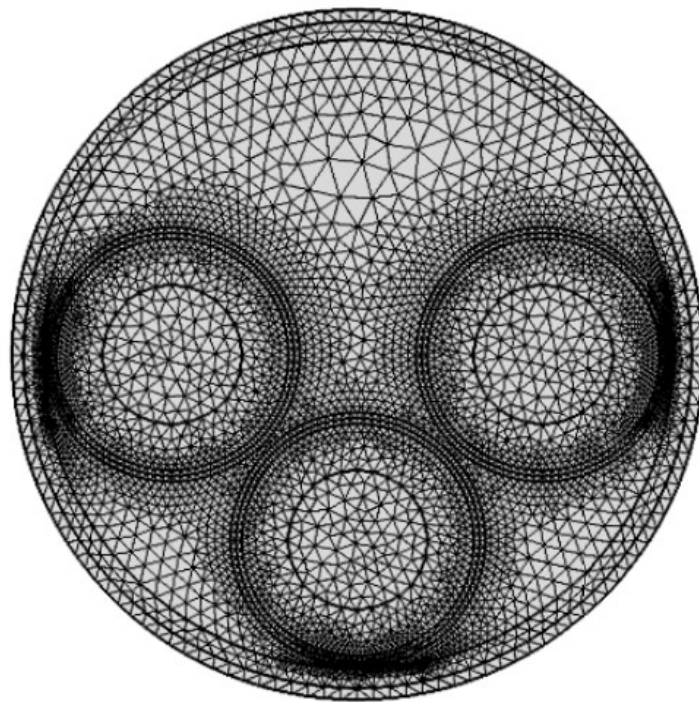


**Figura 31 – Malha gerada no programa COMSOL *Multiphysics* referente a Configuração 1 do Cabo em Tubulação.**





**Figura 32 - Malha gerada no programa COMSOL *Multiphysics* referente a Configuração 2 do Cabo em Tubulação.**



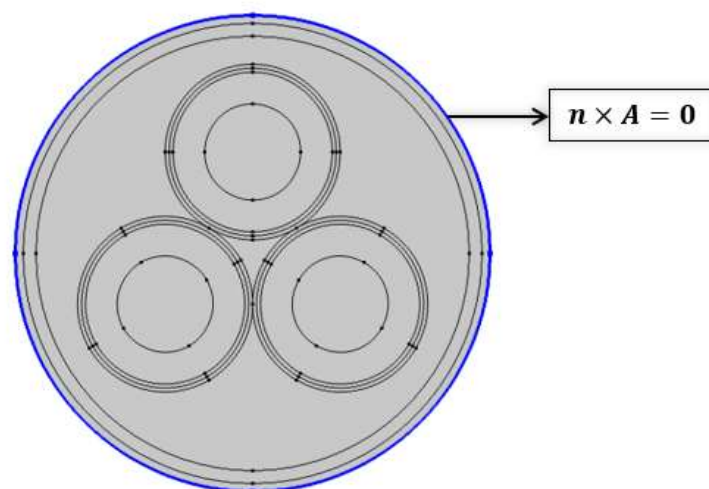
**Figura 33 - Malha gerada no programa COMSOL *Multiphysics* referente a Configuração 3 do Cabo em Tubulação.**

## 4.2.1 Cálculo da Capacitância Interna por Unidade de Comprimento

Assim como no caso do Cabo Coaxial, para obter a matriz de admitâncias e extrair as capacitâncias por unidade de comprimento para cada caso, escolheu-se a física *Electric Currents* do COMSOL *Multiphysics*.

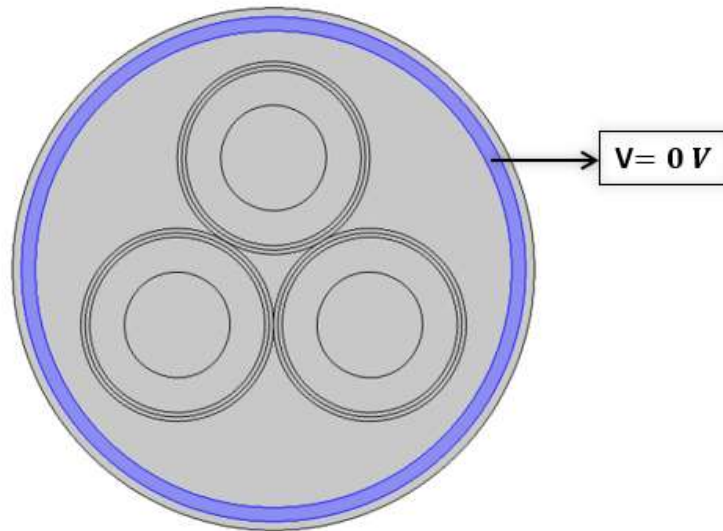
Como condições de contorno, para as três configurações, atribui-se a condição de isolamento elétrica ( $n \cdot \mathbf{J} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético, como ilustrado na Figura 34.

O domínio, considerado inicialmente, foi mantido, pois após testes observou-se que quanto maior o domínio, maiores eram as diferenças percentuais com a relação à base comparativa, ou seja, os resultados obtidos através das formulações analíticas.



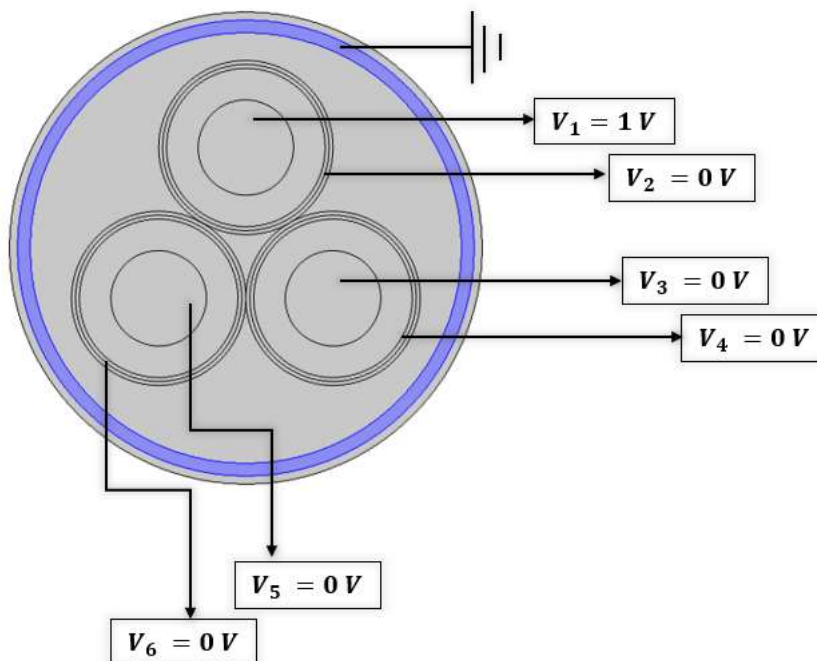
**Figura 34 - Condição de Isolação Elétrica aplicada ao limite do domínio eletromagnético.**

Além disso, para todos os cálculos de admitância, a tensão na armadura foi mantida em 0V, como ilustrado na Figura 35.



**Figura 35- Tensão na armadura.**

Para obter a matriz de admitâncias internas por unidade de comprimento, em cada configuração, no *COMSOL Multiphysics* aplicou-se em cada parte metálica 1V e nas demais 0V, como ilustrado na Figura 36. Dessa forma, obtém-se uma matriz de admitâncias de dimensão 6 cuja primeira, terceira e quinta coluna correspondem a contribuição dos condutores e a segunda, quarta e sexta correspondem a contribuição das blindagens. Para extrair a matriz de capacitâncias, a equação (42) foi aplicada.



**Figura 36 - Rotina de simulação aplicada.**

Aplicando a rotina de simulação, descrita na Figura 36 e as equações, descritas em (41) e (42), os resultados de capacitância interna por unidade de comprimento são calculados para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1MHz para cada configuração.

Após análise dos elementos da matriz de capacitâncias, observou-se que os valores de capacitância se mantêm praticamente constantes ao longo da faixa de frequências considerada. Decidiu-se, portanto, ilustrar neste trabalho a matriz de capacitância representativa de cada configuração, válida para toda faixa de frequências, e compará-la com os resultados analíticos calculados com base na formulação descrita na seção 3.1 para cabos em tubulação.

Para a Configuração 1, tem-se:

$$[C_{\text{analit.}}] = \begin{bmatrix} 109.793 & -109.793 & & & \\ -109.793 & 331.312 & & & \\ & & 109.793 & -109.793 & \\ & -66.859 & -109.793 & 331.12 & \\ & -66.859 & & -66.859 & 109.793 & -109.793 \\ & & & & -109.793 & 331.12 \end{bmatrix} \quad [\text{pF}]$$

$$[C_{\text{num.}}] = \begin{bmatrix} 109.80 & -109.80 & & & \\ -109.80 & 421.42 & & & \\ & & 109.80 & -109.80 & \\ & -89.374 & -109.80 & 421.42 & \\ & -89.374 & & -89.374 & 109.80 & 109.80 \\ & & & -89.374 & -109.80 & 421.42 \end{bmatrix} \quad [\text{pF}]$$

Para a Configuração 2, tem-se:

$$[C_{\text{analit.}}] = \begin{bmatrix} 109.793 & -109.793 & & & \\ -109.793 & 351.141 & & & \\ & & 109.793 & -109.793 & \\ & -84.6818 & -109.793 & 351.141 & \\ & -84.6818 & & -84.6818 & 109.793 & -109.793 \\ & & & & -109.793 & 351.141 \end{bmatrix} \quad [\text{pF}]$$

$$[C_{\text{num.}}] = \begin{bmatrix} 109.80 & -109.80 & & & \\ -109.80 & 350.98 & & & \\ & & 109.80 & -109.80 & \\ & -66.058 & -109.80 & 479.93 & \\ & -66.058 & & -27.826 & 109.80 & 109.80 \\ & & & -27.826 & -109.80 & 479.93 \end{bmatrix} \quad [\text{pF}]$$

Para a Configuração 3, tem-se:

$$[C_{analit.}] = \begin{bmatrix} 109.793 & -109.793 & & & & \\ -109.793 & 356.65 & & -56.196 & & -56.196 \\ & -56.196 & 109.793 & -109.793 & & \\ & & -56.196 & 356.65 & & -56.196 \\ & -56.196 & & -56.196 & 109.793 & -109.793 \\ & & & & -109.793 & 356.65 \end{bmatrix} \quad [pF]$$

$$[C_{num.}] = \begin{bmatrix} 109.80 & -109.80 & & & & \\ -109.80 & 483.13 & & -80.123 & & -80.123 \\ & -80.123 & 109.80 & -109.80 & & \\ & & -80.123 & 483.13 & & -15.192 \\ & -80.123 & & -15.192 & 109.80 & 109.80 \\ & & & & -109.80 & 483.13 \end{bmatrix} \quad [pF]$$

Quando os resultados numéricos e analíticos para capacitância própria do condutor são comparados observa-se uma diferença percentual de 0,0064% para as três configurações. O mesmo resultado é encontrado para a capacitância mútua entre condutor e blindagem. Para a capacitância própria da blindagem na Configuração 1 observa-se uma diferença percentual de 27,19%, 0,046% para Configuração 2 e 35,46% para Configuração 3. Para as demais capacitâncias mútuas, 33,67% para a Configuração 1, 21,99% para a Configuração 3 e 29,86% para a Configuração 3.

Analisando o impacto da disposição das veias de potência nos resultados numéricos, observa-se que quanto mais próximo da armadura está a blindagem, maior será a capacitância própria. Comparando a Configuração 1 com a Configuração 3, por exemplo, há um aumento de 7,65% no valor da capacitância. Analisando a capacitância mútua entre as blindagens na Configuração 3 há uma queda de 15,95% quando comparado com a Configuração 1.

## 4.2.2 Cálculo da Resistência e Indutância Internas por Unidade de Comprimento

Conforme apresentado no Capítulo 3 para Cabos em Tubulação, a matriz de impedância interna, desconsiderando efeitos do meio externo, pode ser representada por:

$$[Z_{int}] = [Z_i] + [Z_p] + [Z_c] \quad (48)$$

Onde,  $[Z_i]$  representa a matriz de impedância interna dos cabos monopolares que compõem o Cabo em Tubulação. Para os cabos ilustrados nas Figuras 30-32, esta matriz pode ser representada pela matriz descrita em (49).

$$[Z_i] = \begin{bmatrix} [Z_{i1}] & [0] & [0] & 0 \\ [0] & [Z_{i2}] & [0] & 0 \\ [0] & [0] & [Z_{in}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Cada submatriz descrita acima consiste em uma matriz de dimensão 2 (condutor e blindagem) e representa cada veia de potência. As últimas linha e coluna de  $Z_i$  compatibilizam a dimensão desta com a dimensão de  $Z_p$  e  $Z_c$ . Serão acrescentadas tantas linhas e colunas quantas forem as camadas metálicas envolvendo os três cabos monopolares.

O detalhamento da modelagem analítica para o cálculo das impedâncias internas dos cabos monopolares é descrito no Apêndice A e aplicado na seção 4.1.

Para as configurações de Cabo em Tubulação consideradas neste trabalho, os cabos monopolares são os mesmos descritos na seção 4.1. Portanto, os cálculos de resistência e indutância realizados, e comparados com analítico, são considerados aqui e utilizados no cálculo da matriz de impedância interna do sistema.

#### 4.2.2.1 Matriz $[Z_p]$

Essa matriz é relativa à superfície interna da armadura, ou seja, é uma matriz que representa a impedância interna do Cabo em Tubulação. Para os cabos ilustrados nas Figuras 28-30, essa matriz é obtida através da equação matricial (50).

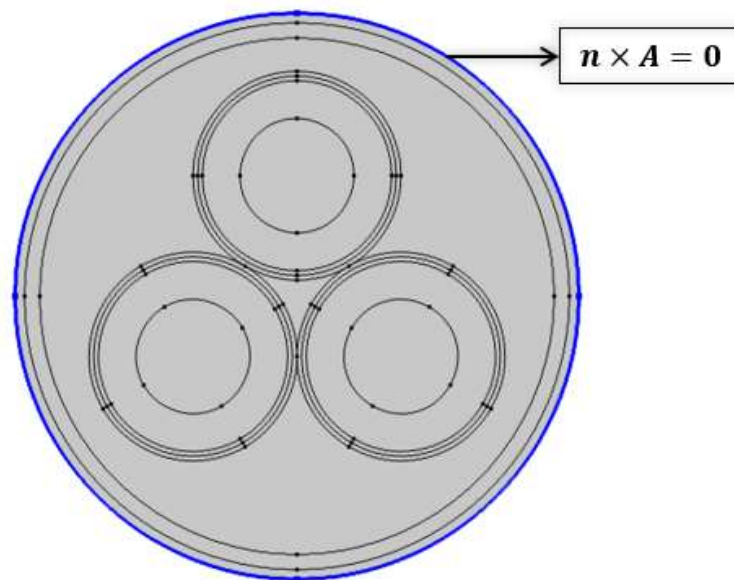
$$[Z_p] = \begin{bmatrix} [Z_{p11}] & [Z_{p12}] & [Z_{p13}] & 0 \\ [Z_{p12}] & [Z_{p22}] & [Z_{p23}] & 0 \\ [Z_{p13}] & [Z_{p23}] & [Z_{p33}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

A modelagem analítica descrita na seção 3.1 foi implementada e posteriormente comparada com resultados numéricos.

De modo a obter a matriz de impedância e extrair as resistências e indutâncias por unidade de comprimento referentes à matriz  $[Z_p]$  utilizando uma modelagem numérica, escolheu-se a física *Magnetic Fields* do *COMSOL Multiphysics*.

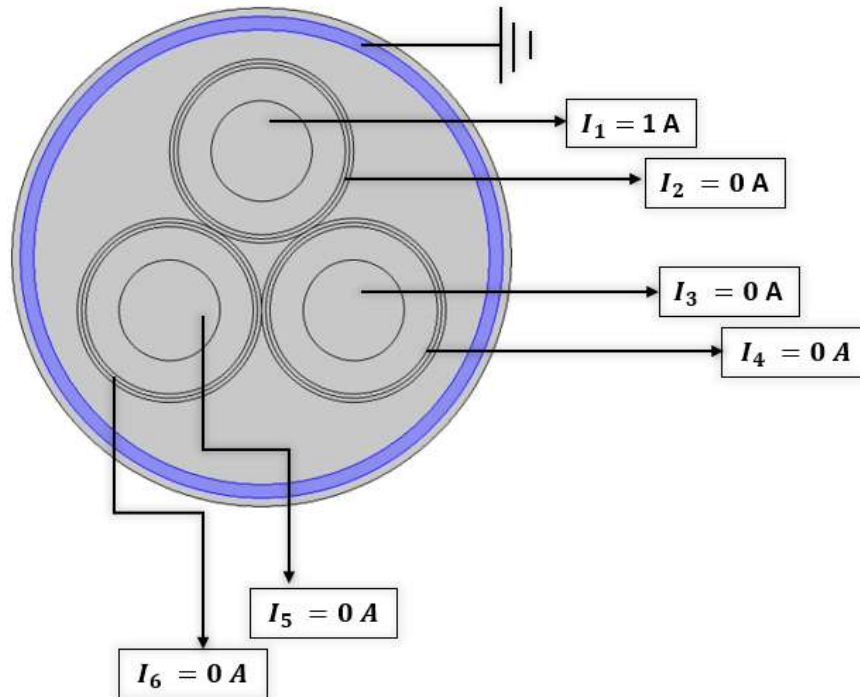
Após alguns testes realizados observou-se que, para obter um resultado numérico com menor diferença percentual quando comparado com os resultados analíticos para o cálculo de  $[Z_p]$ , deve-se considerar um domínio eletromagnético de dimensão igual o raio mais externo da tubulação. Com isso, a malha gerada inicialmente, e aplicada no cálculo da capacitância, foi utilizada nestas simulações.

Como condições de contorno atribui-se a condição de isolamento magnética ( $n \times \mathbf{A} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético, ilustrado na Figura 37.



**Figura 37 - Condição de Isolação Magnética aplicada ao limite do domínio eletromagnético.**

De modo a calcular cada elemento da matriz  $[Z_p]$ , é aplicada uma corrente de 1A em um elemento metálico e medida a tensão induzida nesse elemento e nos demais, como ilustrado na Figura 38. A armadura foi mantida aterrada neste caso.



**Figura 38 - Rotina de simulação aplicada.**

Aplicando a rotina de simulação, descrita na Figura 38, as equações (45) e (46), os resultados de resistência interna por unidade de comprimento referentes à matriz  $[Z_p]$  são calculados para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1MHz para cada uma das configurações.

Inicialmente é feita a comparação dos resultados obtidos através da formulação numérica com aqueles calculados através da formulação analítica para a Configuração 1, como ilustrado nas Figuras 39-46. Como pode ser observado para os resultados de resistência extraídos da matriz  $[Z_p]$ , a partir de  $f = 2,42$  kHz nota-se um afastamento entre o resultado numérico e analítico. Já para os resultados de indutância, o afastamento ocorre até  $f = 10$  Hz para os cálculos de indutância própria do condutor, da blindagem e mútua entre condutor e blindagem e até  $f = 210,5$  Hz para as demais indutâncias mútuas. Nos gráficos correspondentes, a linha vertical tracejada vermelha indica a frequência onde ocorre o desvio.



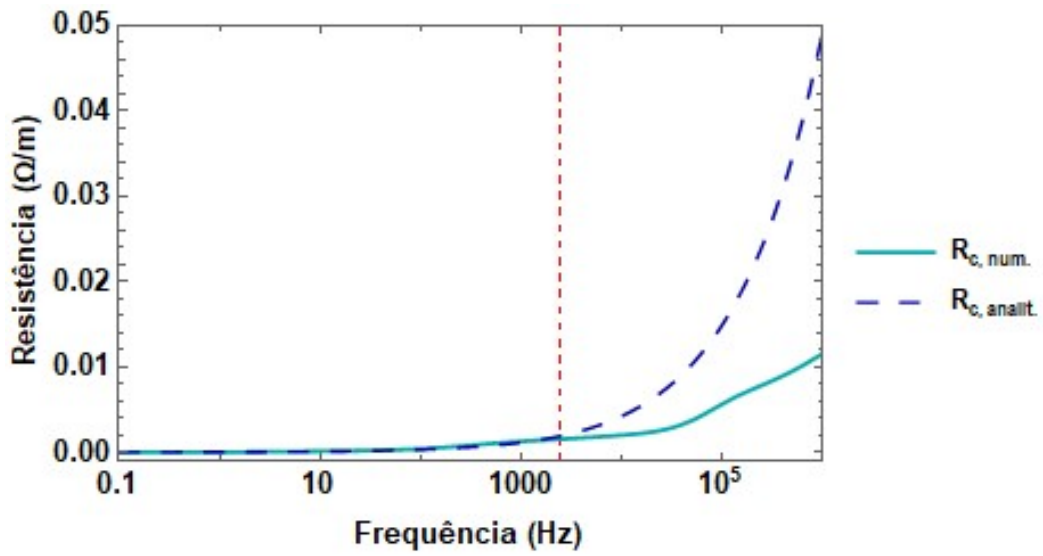


Figura 39 - Resistência própria do condutor por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para a configuração 1 do cabo em tubulação.

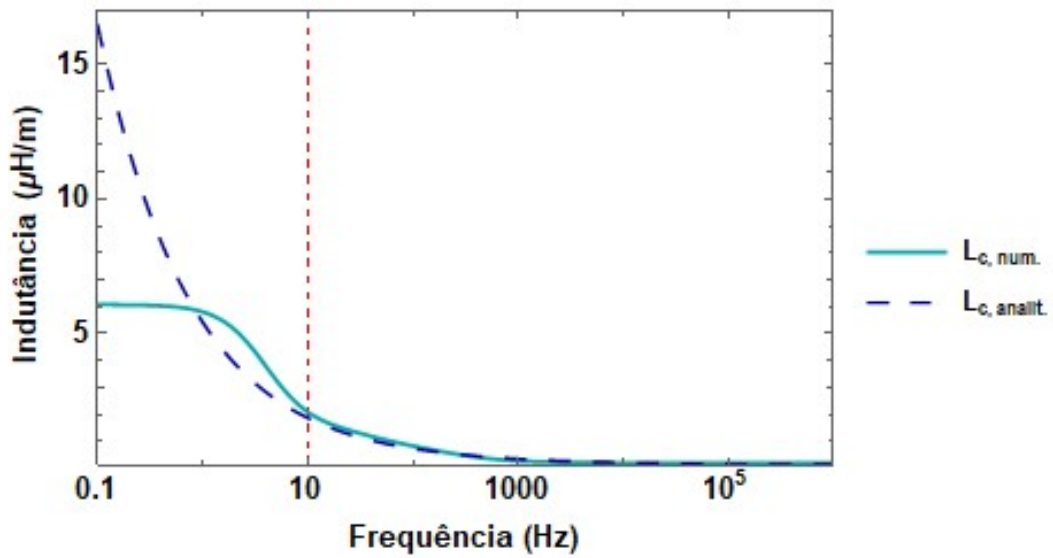


Figura 40 – Indutância própria do condutor por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para a configuração 1 do cabo em tubulação.

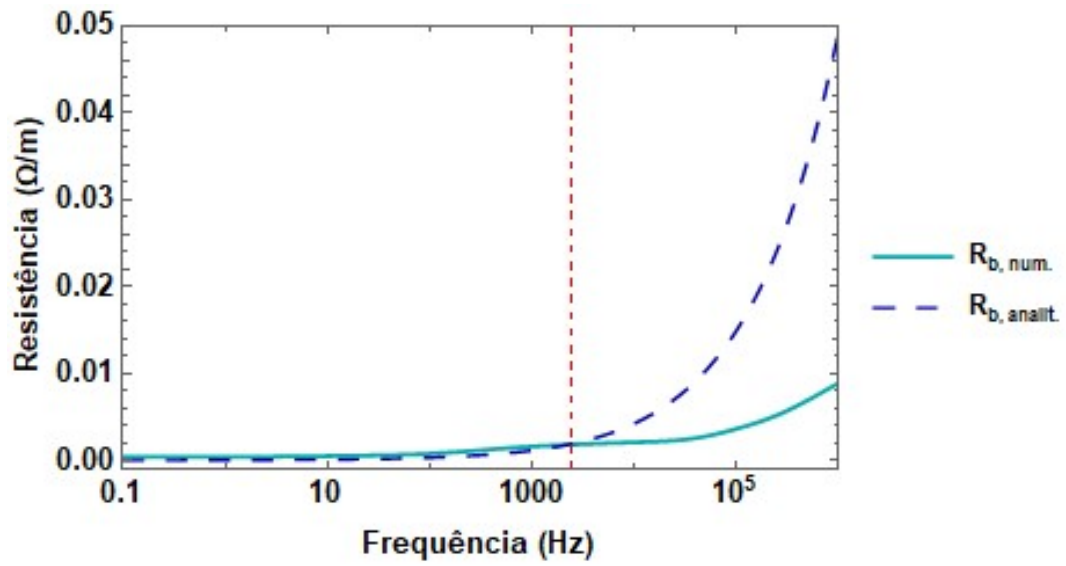


Figura 41 – Resistência própria da blindagem por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para a configuração 1 do cabo em tubulação.

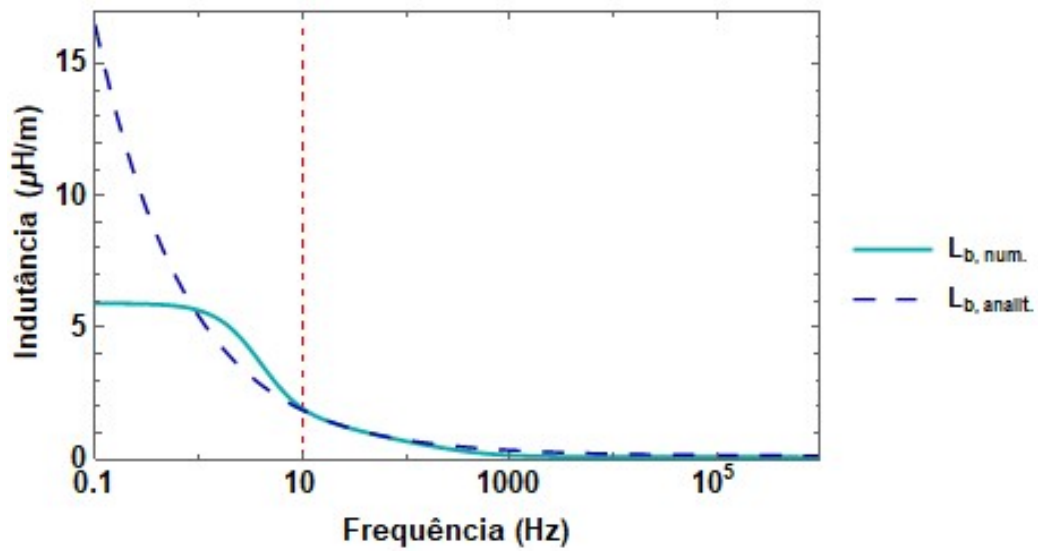


Figura 42 – Indutância própria da blindagem por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para a configuração 1 do cabo em tubulação.

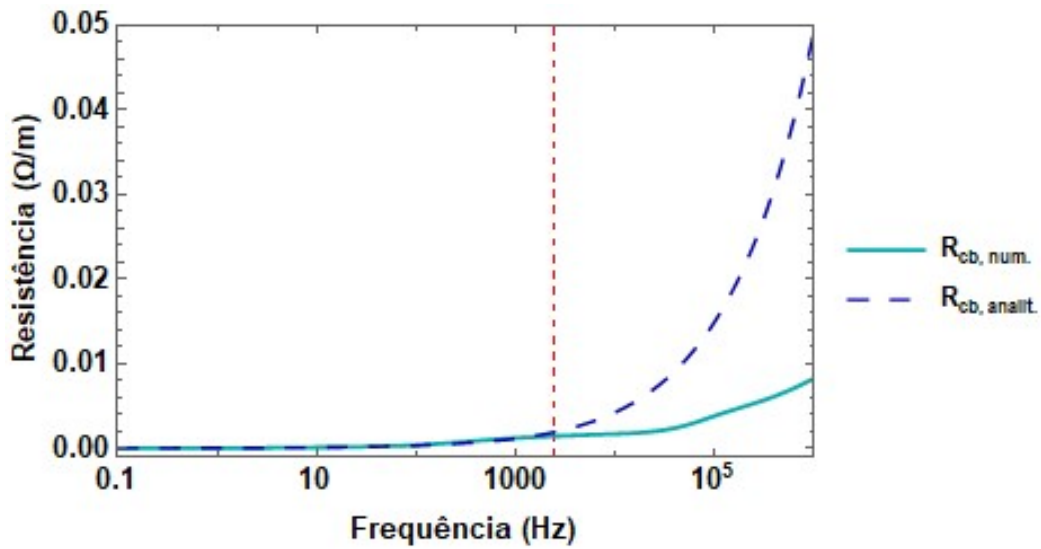


Figura 43 – Resistência mútua entre condutor e blindagem por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para a configuração 1 do cabo em tubulação.

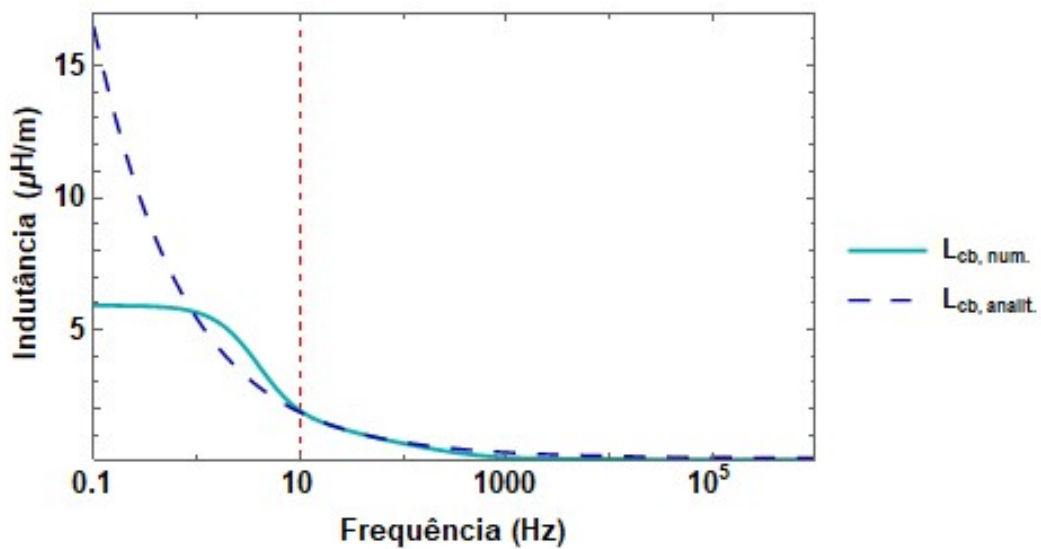


Figura 44 – Indutância mútua entre condutor e blindagem por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para a configuração 1 do cabo em tubulação.

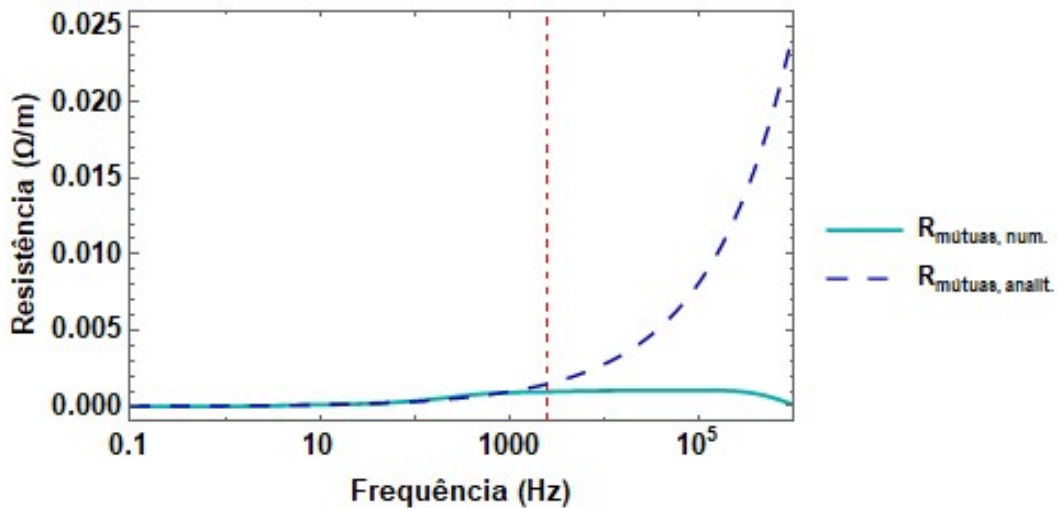


Figura 45 – Demais resistências mútuas por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para a configuração 1 do cabo em tubulação.

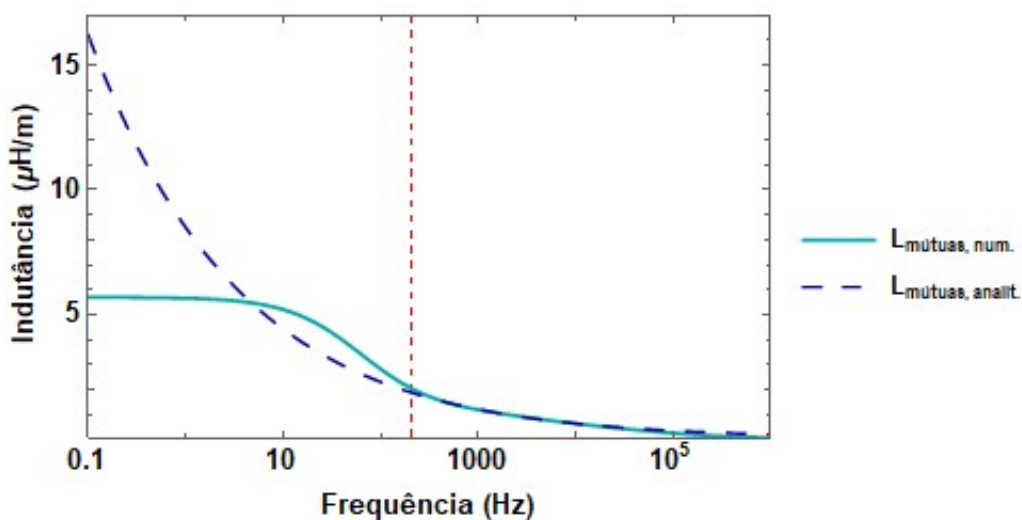


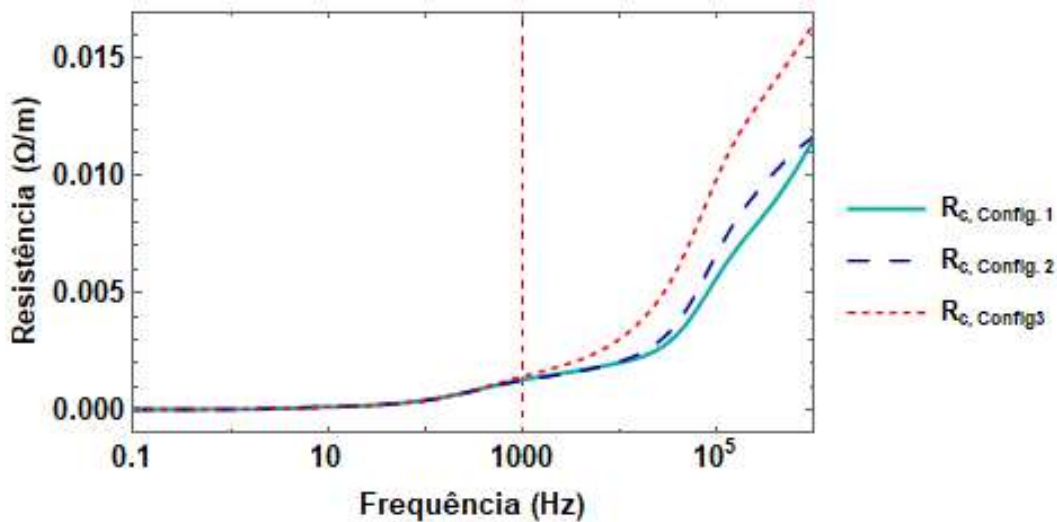
Figura 46 - Demais resistências mútuas por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para a configuração 1 do cabo em tubulação.

Após a análise dos resultados analíticos e numéricos referentes ao cálculo da matriz  $[Z_p]$  para a Configuração 1, decidiu-se realizar uma análise comparativa entre as demais configurações. Nas Figuras 47, 49 e 51 pode-se observar que a partir de  $f = 1$  kHz as resistências calculadas referente a Configuração 3 tem um crescimento elevado, atingindo para a  $f = 1$  MHz um valor de aproximadamente  $0,016 \Omega/m$  para a resistência própria do condutor,  $0,014 \Omega/m$  para a resistência própria da blindagem e  $0,013 \Omega/m$  para a resistência mútua entre condutor e blindagem. Outro comportamento observado é o das demais resistências mútuas na Configuração 1, ilustrado na Figura 53. Entre as

frequências de 1 kHz a 0,2 MHz, mantém-se constante e em seguida começa a ter decaimento. Nos gráficos correspondentes, as linhas verticais tracejadas vermelha e preta indicam a frequência onde ocorre o desvio.

Como pode ser observado nas Figuras 48 e 50, a indutância não variou expressivamente com a disposição das veias dentro da tubulação. A indutância mútua entre condutor e blindagem na Configuração 3, representada pela Figura 52, possui uma variação, diferente das demais configurações, para frequências menores que 10 Hz. Deve-se lembrar que na referida configuração, a blindagem do condutor 1 fica próximo da armadura. Sendo assim, para a faixa de frequência mencionada, o comportamento observado para indutância foi um crescimento até 10 Hz, representado pela linha vertical pontilhada vermelha, e em seguida decaimento se aproximando do comportamento das demais configurações.

Além do comportamento mencionado acima, observa-se na Figura 54 que o decaimento da indutância para a Configuração 1 é mais lento que nas demais configurações.



**Figura 47 – Comparação entre os resultados de resistência própria do condutor, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.**

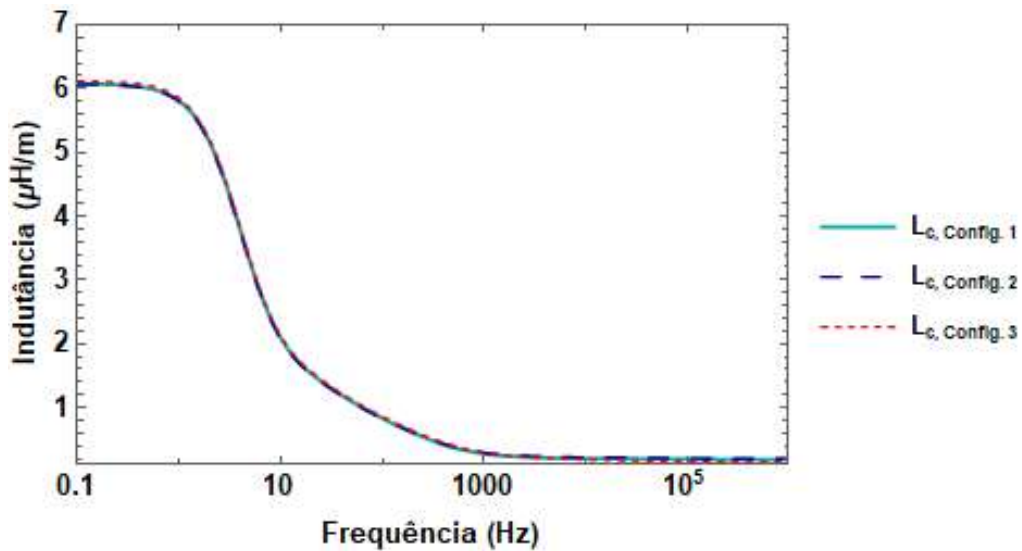


Figura 48 – Comparação entre os resultados de indutância própria do condutor, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.

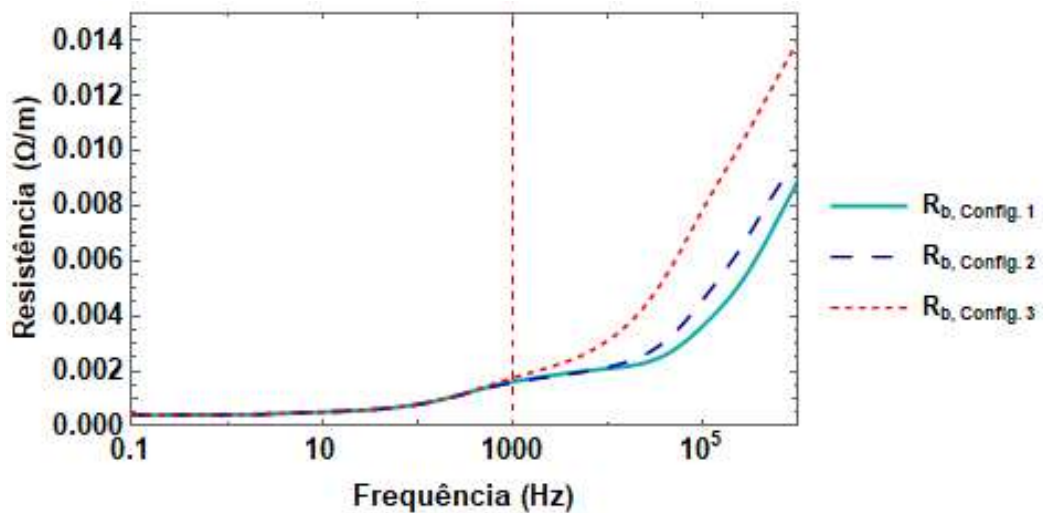


Figura 49 – Comparação entre os resultados de resistência própria da blindagem, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.

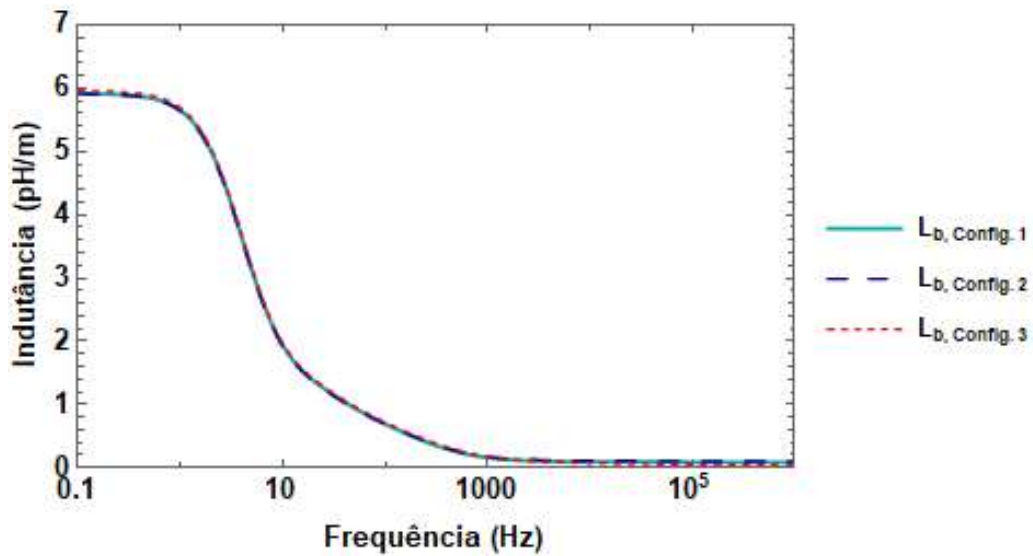


Figura 50 – Comparação entre os resultados de indutância própria da blindagem, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.

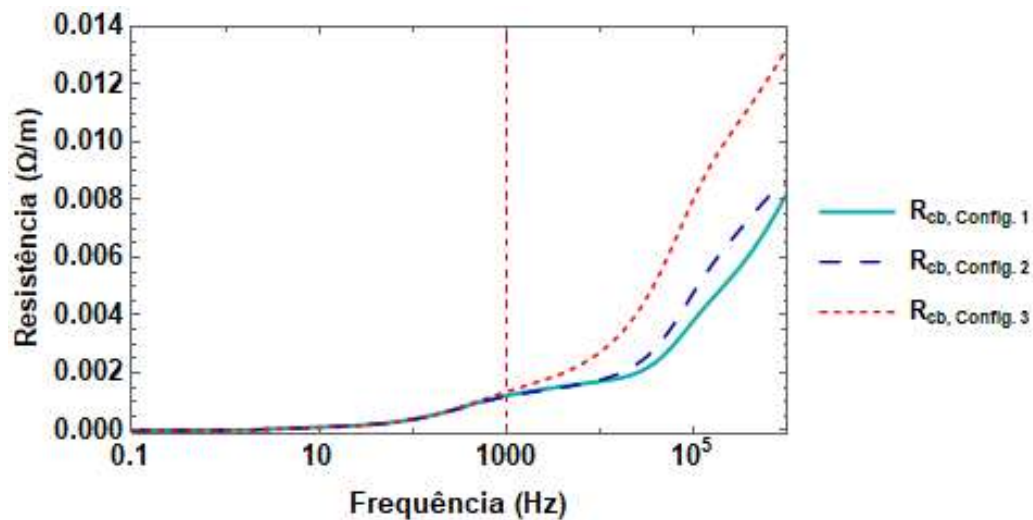


Figura 51 – Comparação entre os resultados de resistência mútua entre condutor e blindagem, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.

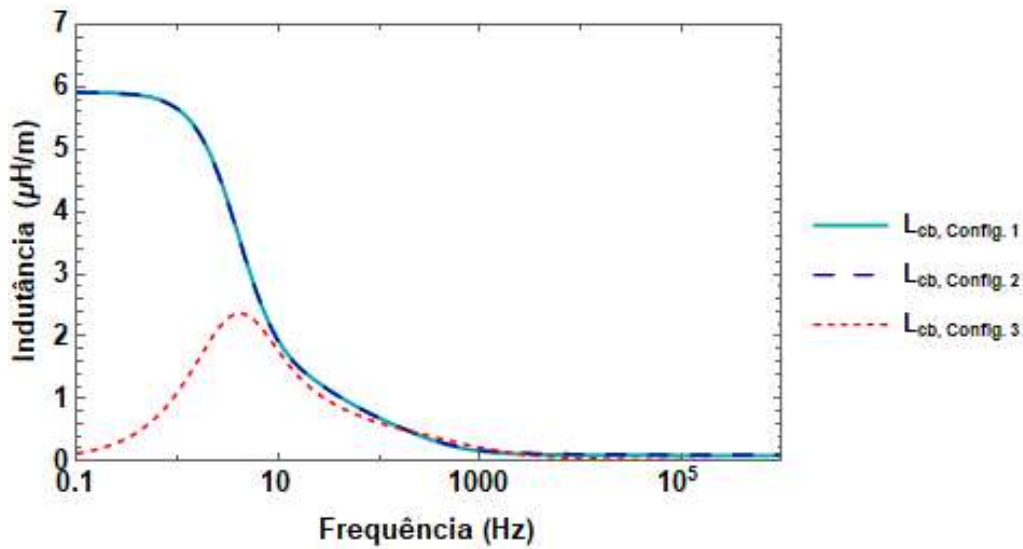


Figura 52 – Comparação entre os resultados de indutância mútua entre condutor e blindagem, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.

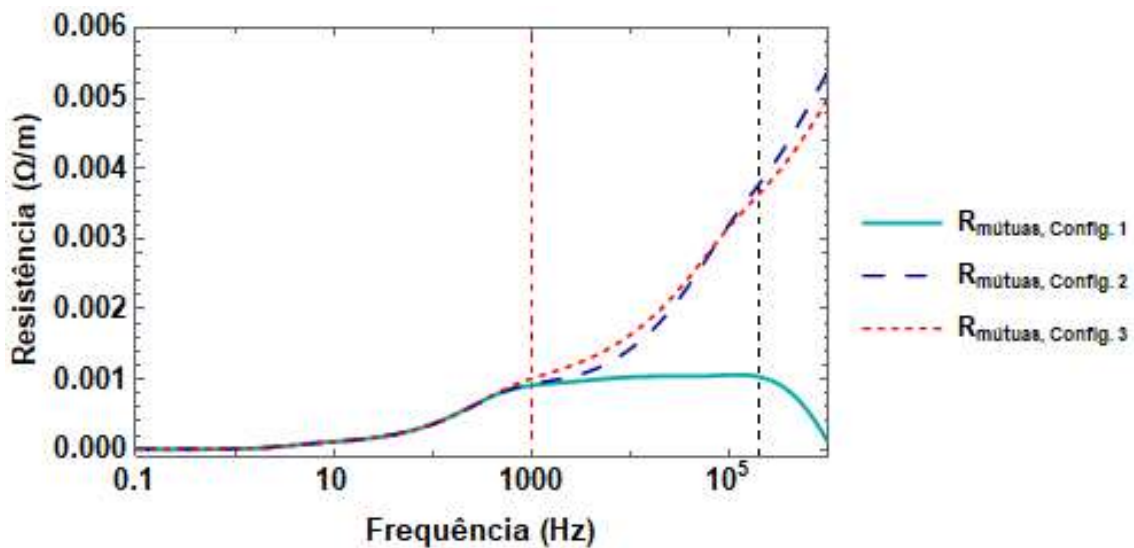


Figura 53 – Comparação entre os resultados das demais resistências mútuas, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.



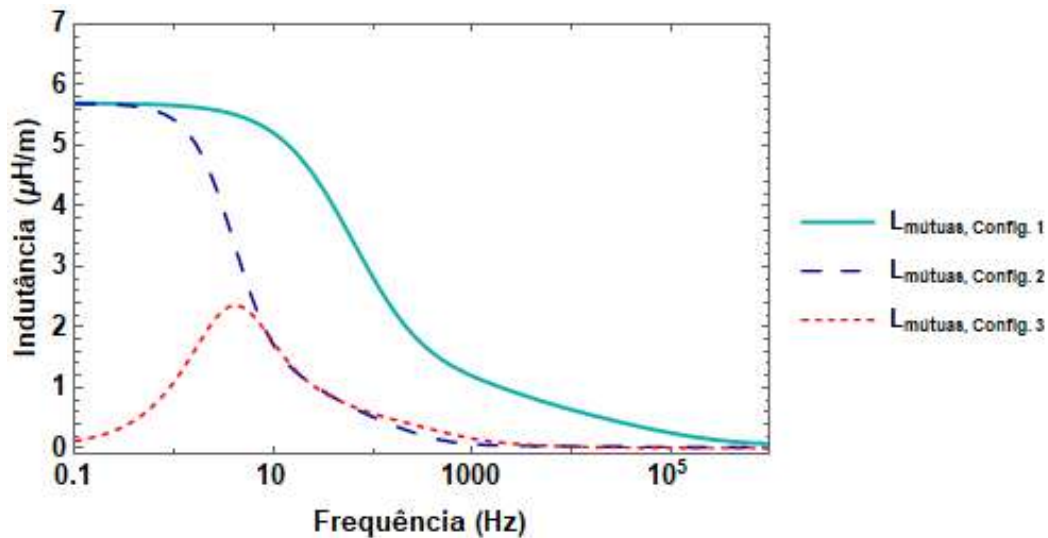


Figura 54 – Comparação entre os resultados das demais indutâncias mútuas, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.

#### 4.2.2.2 Matriz $[Z_c]$

Essa é uma matriz relativa ao acoplamento entre as superfícies interna e externa da armadura. Para o caso estudado, esta matriz pode ser representada pela equação matricial (51).

$$[Z_c] = \begin{bmatrix} [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & [Z_{c2}] \\ [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & [Z_{c2}] \\ [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & [Z_{c2}] \\ [Z_{c2}]^T & [Z_{c2}]^T & [Z_{c2}]^T & Z_{c3} \end{bmatrix} \quad (51)$$

Os termos  $Z_{c1}$ ,  $Z_{c2}$  e  $Z_{c3}$  são calculados utilizando a formulação analítica descrita no Capítulo 3 para cabos em tubulação.

A modelagem analítica descrita nesta seção e na seção 3.1 foi implementada e posteriormente comparada com resultados numéricos.

De modo a obter a matriz de impedância e extrair as resistências e indutâncias por unidade de comprimento referentes à matriz  $[Z_c]$  utilizando uma modelagem numérica, escolheu-se a física *Magnetic Fields* do COMSOL *Multiphysics*.

Após alguns testes realizados observou-se que, para obter um resultado numérico com menores diferenças percentuais quando comparados com o analítico, para o cálculo de  $[Z_c]$ , deve-se considerar diferentes tamanhos de domínio eletromagnético.

Para o cálculo de  $Z_{c1}$  o domínio utilizado possui dimensão trinta e nove vezes o raio mais externo da tubulação. Valores inferiores ou superiores de raio de domínio causavam maiores divergências nos resultados. Com isso, na malha gerada, na configuração *Extra Fine*, foram utilizados 18220 elementos de domínio para a Configuração 1, 22906 para a Configuração 2 e 19694 para a Configuração 3.

Já para o cálculo de  $Z_{c2}$  e  $Z_{c3}$ , o domínio utilizado possui dimensão vinte e nove vezes o raio mais externo da tubulação. Com isso, na malha gerada, na configuração *Extra Fine*, foram utilizados 17980 elementos de domínio para a Configuração 1, 22584 para a Configuração 2 e 19320 para a Configuração 3.

Em cada caso, como condições de contorno atribui-se a condição de isolamento magnética ( $n \times \mathbf{A} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético.

De modo a encontrar as impedâncias  $Z_{c2}$  e  $Z_{c3}$ , é aplicada uma corrente de 1A na armadura e medida a tensão induzida nesse elemento e nos demais. Para o cálculo de  $Z_{c1}$ , aplica-se 1A na blindagem de uma das veias de potência e 0A nas demais partes metálicas.

Inicialmente é feita a comparação dos resultados obtidos através da formulação numérica com aqueles calculados através da formulação analítica referentes à Configuração 1, como ilustrado nas Figuras 55-60.

Como pode ser observado para os resultados de resistência extraídos da matriz  $Z_c$ , a partir de  $f = 2,42 \text{ kHz}$  nota-se um afastamento entre o resultado numérico e analítico, porém convergem para um mesmo valor na frequência final. Já para os resultados de indutância, as curvas possuem um erro máximo de 17,12% para  $L_{c1}$ , 24,11 % para  $L_{c2}$  e 36,46% para  $L_{c3}$ . Nos gráficos correspondentes, a linha vertical tracejada vermelha indica a frequência onde ocorre o afastamento.

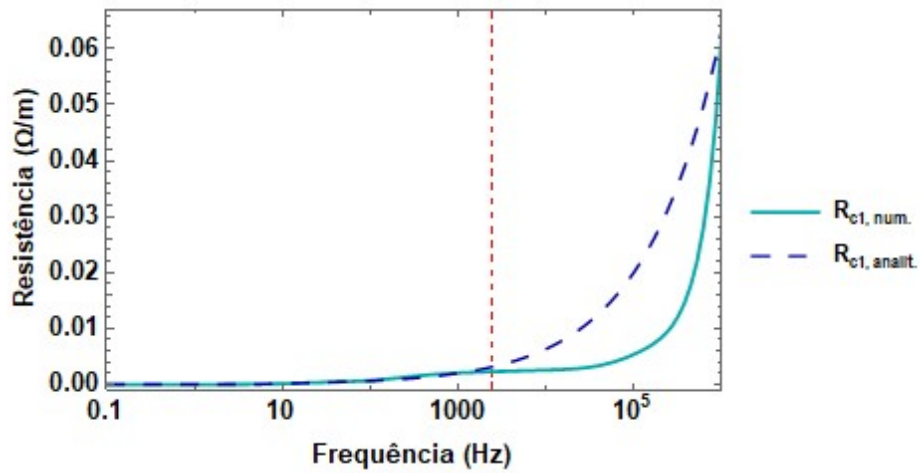


Figura 55 - Resistência referente a matriz  $[Z_{c1}]$ , para a Configuração 1 do cabo em tubulação.

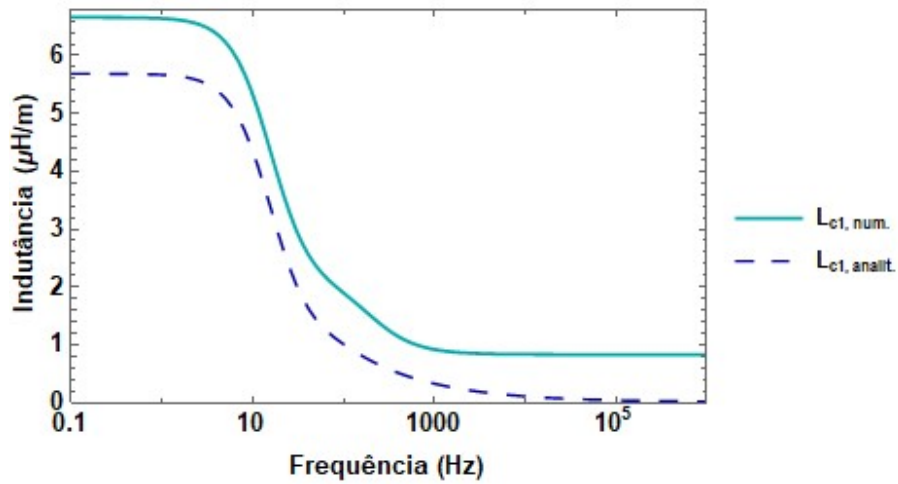


Figura 56 - Indutância referente a matriz  $[Z_{c1}]$ , para a Configuração 1 do cabo em tubulação.

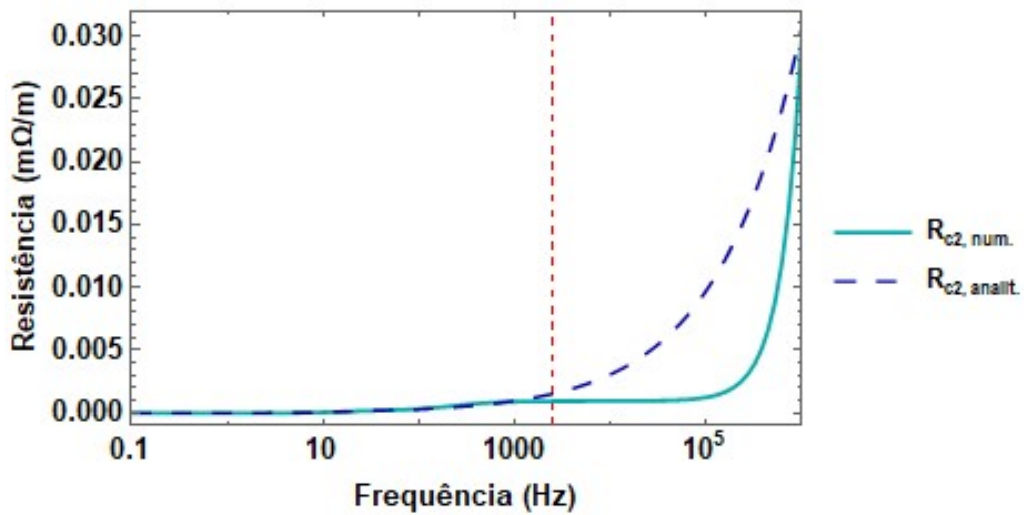


Figura 57 - Resistência referente a matriz  $[Z_{c2}]$ , para a Configuração 1 do cabo em tubulação.

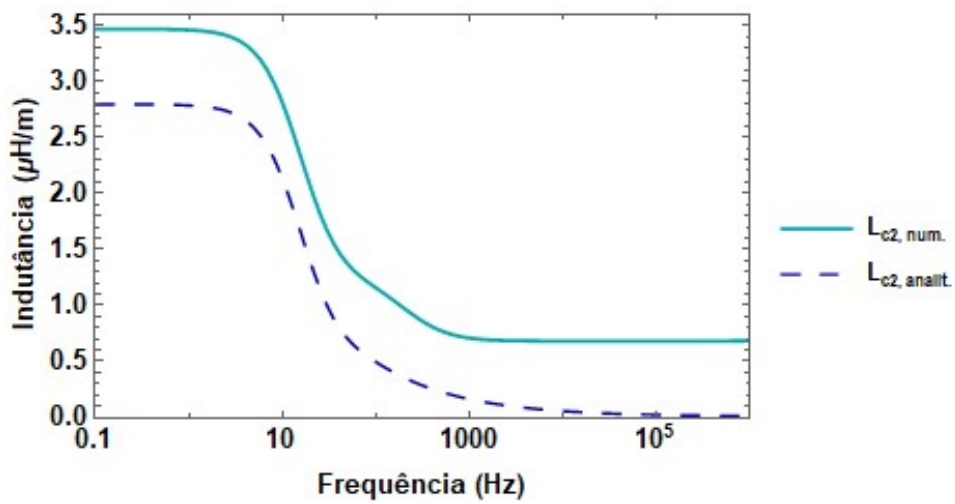


Figura 58 - Indutância referente a matriz  $[Z_{c2}]$ , para a Configuração 1 do cabo em tubulação.

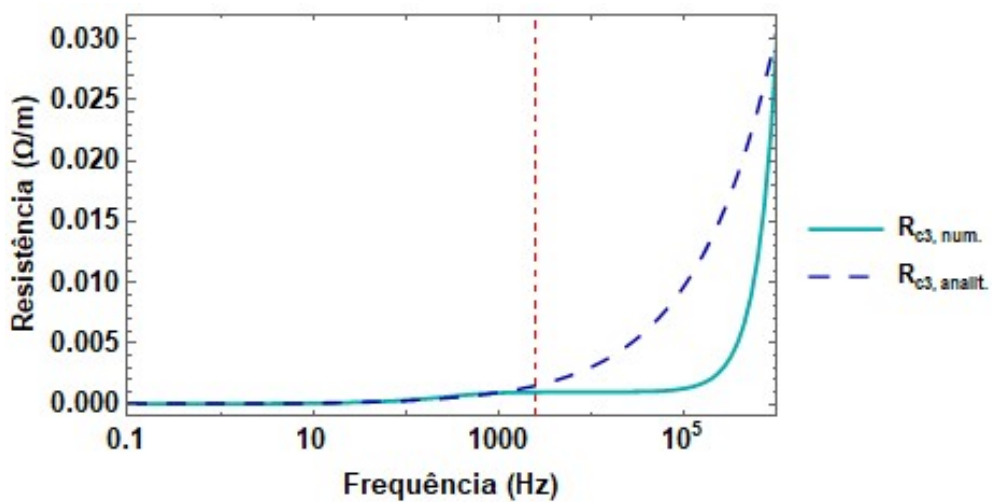
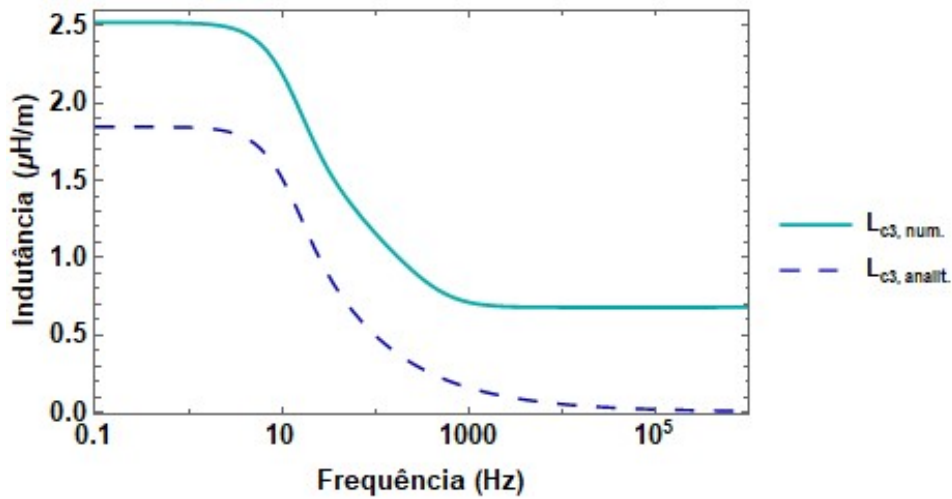
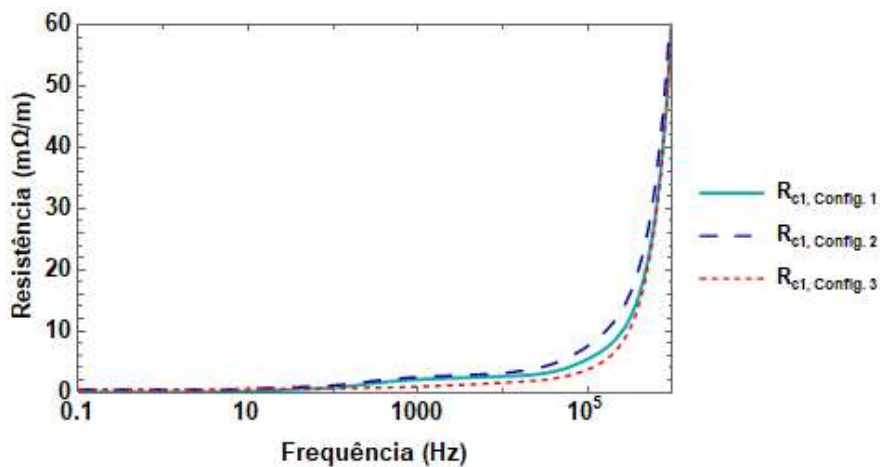


Figura 59 - Resistência referente a matriz  $[Z_{c3}]$ , para a Configuração 1 do cabo em tubulação.



**Figura 60 - Indutância referente a matriz  $[Z_{c3}]$ , para a Configuração 1 do cabo em tubulação.**

Após a análise dos resultados analíticos e numéricos referentes ao cálculo da matriz  $[Z_c]$  para a Configuração 1, decidiu-se realizar uma análise comparativa entre as demais configurações, conforme ilustrado nas Figuras 61-66. Com a variação da disposição das veias de potência no interior da tubulação, observa-se que apenas em  $Z_{c1}$  ocorre variação significativa nas curvas de resistência e indutância.



**Figura 61 - Comparação entre os resultados de resistência, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c1}]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.**

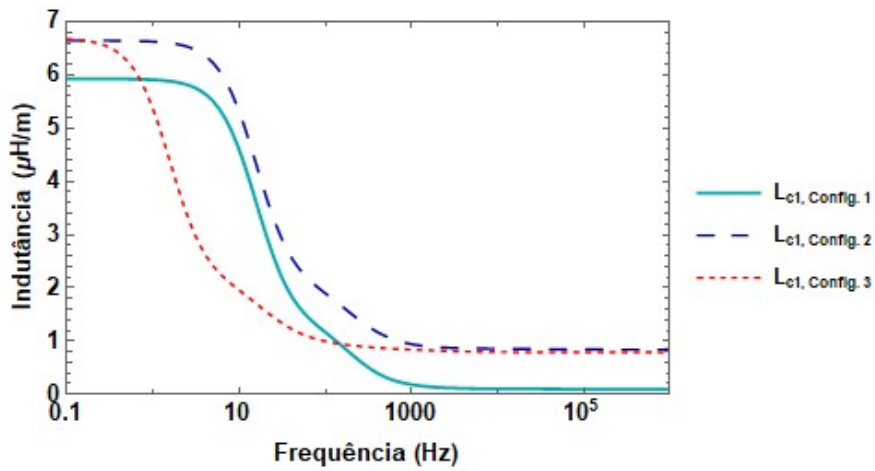


Figura 62 - Comparação entre os resultados de indutância, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c1}]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.

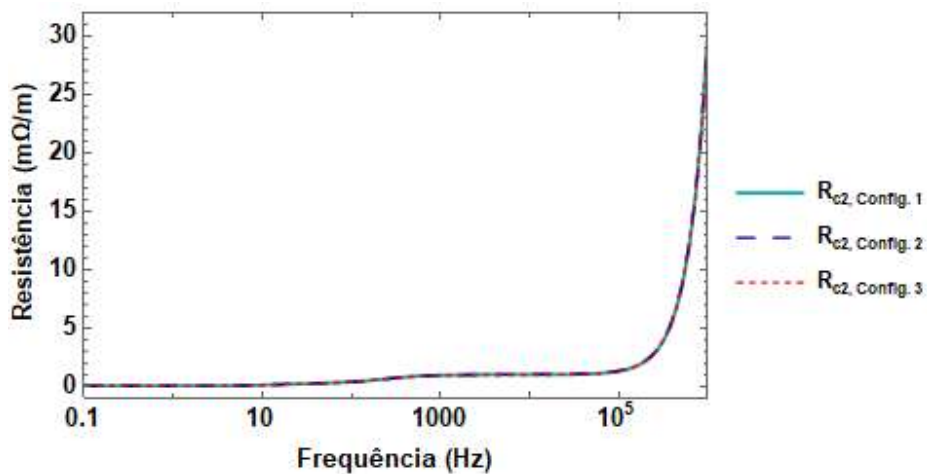


Figura 63 - Comparação entre os resultados de resistência, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c2}]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.

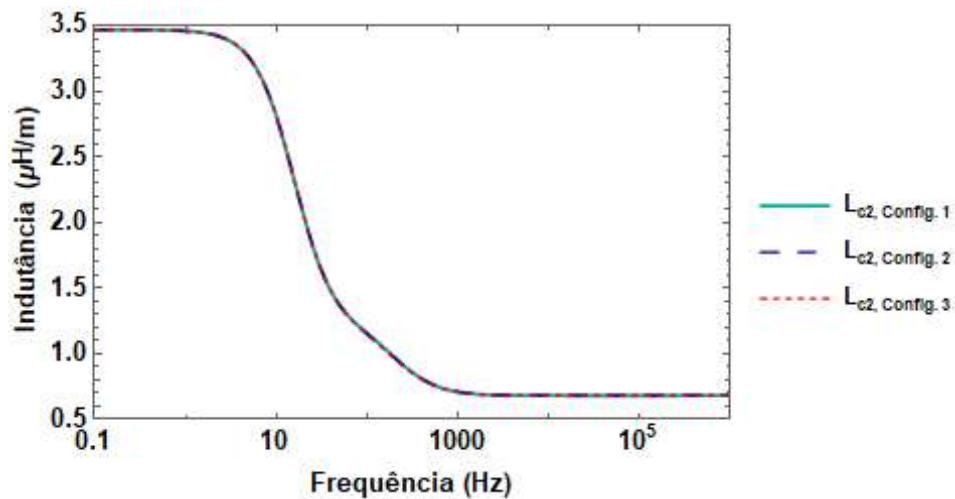


Figura 64 - Comparação entre os resultados de indutância, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c2}]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.

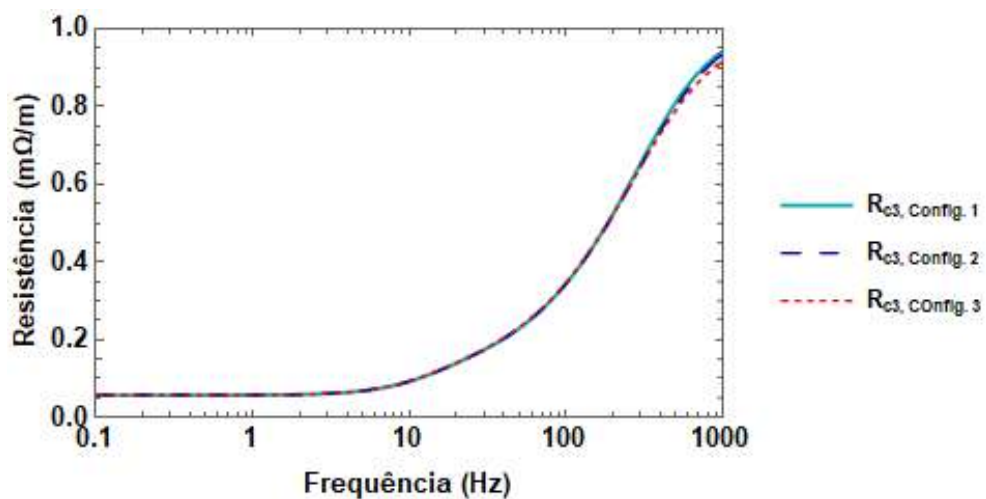


Figura 65 - Comparação entre os resultados de resistência, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c3}]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.

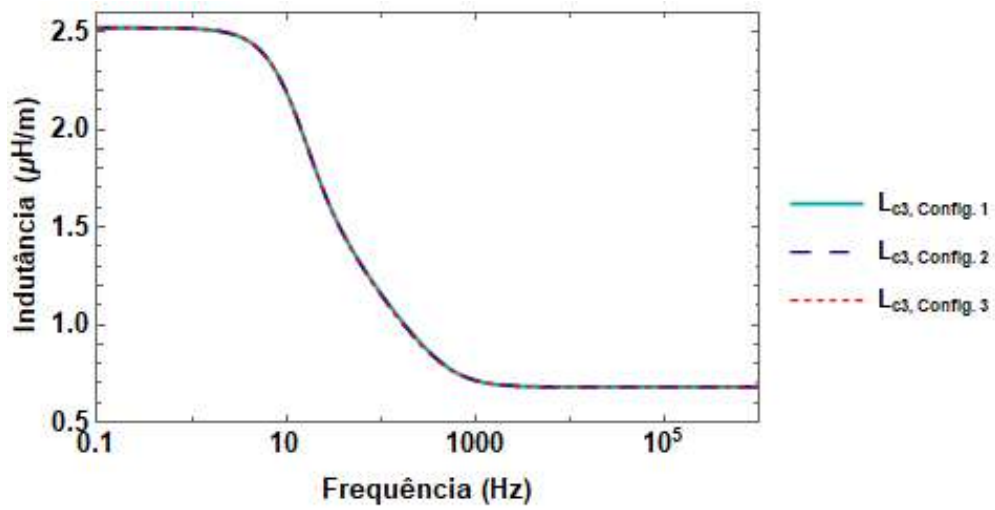


Figura 66 - Comparação entre os resultados de indutância, obtidos através do programa computacional COMSOL *Multiphysics*, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c3}]$ , para as três configurações de cabo em tubulação.

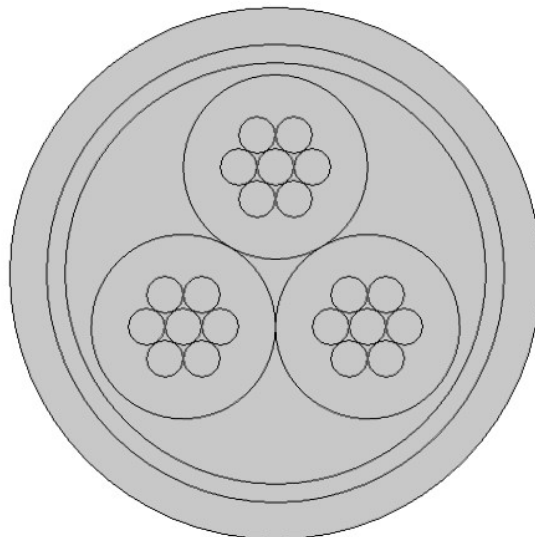


# CAPÍTULO 5

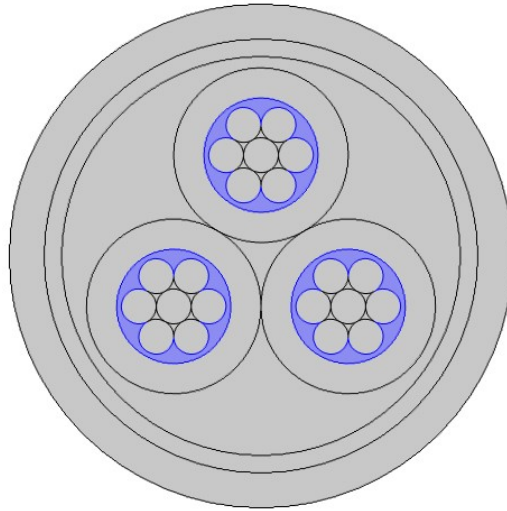
## Cabo Multifilamentar

Nesta seção serão calculados parâmetros internos unitários de um Cabo Multifilamentar, o qual consiste em um sistema composto de três cabos monopolares, com sete filamentos cada, envoltos por um tubo em comum, capa externa envolvendo a tubulação e enchimento preenchendo o meio interno.

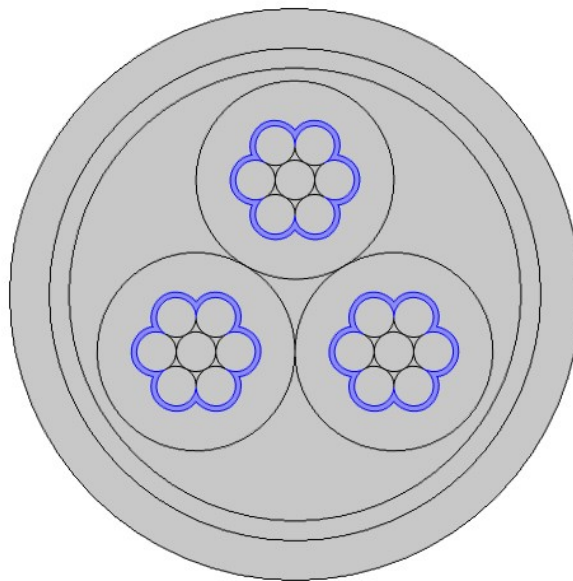
Serão estudadas nesta seção, três tipos diferentes de configurações, com o objetivo de avaliar o efeito da disposição dos cabos monopolares no interior da tubulação e o efeito da camada semicondutora nos cálculos de parâmetros internos, como ilustrado nas Figuras 67-69.



**Figura 67 - Seção Transversal referente a Configuração 1 do Cabo Flor.**



**Figura 68 - Seção Transversal referente a Configuração 2 do Cabo Flor.**

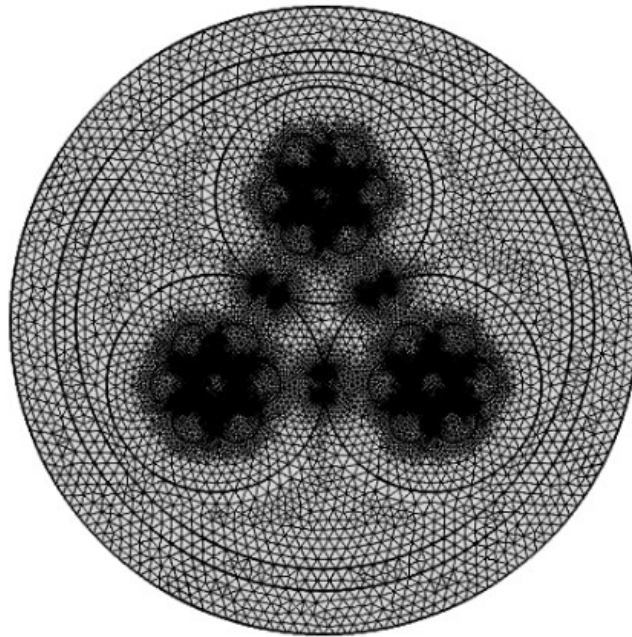


**Figura 69 - Seção Transversal referente a Configuração 3 do Cabo Flor.**

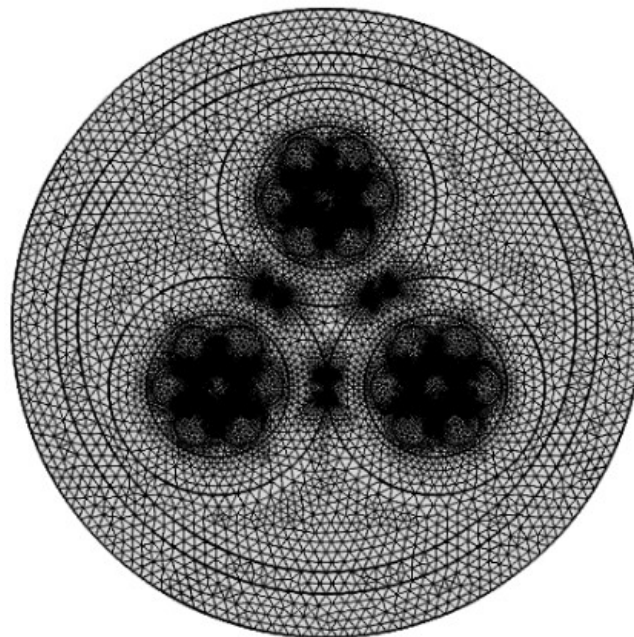
Como pode ser observado destacado em azul nas Figuras 68 e 69, foi inserida uma camada semicondutora entre o condutor e a isolação interna, variando-se sua geometria.

O domínio eletromagnético, que delimita o cálculo do MEF, considerado inicialmente para todas as configurações possui dimensão igual ao raio mais externo do cabo.

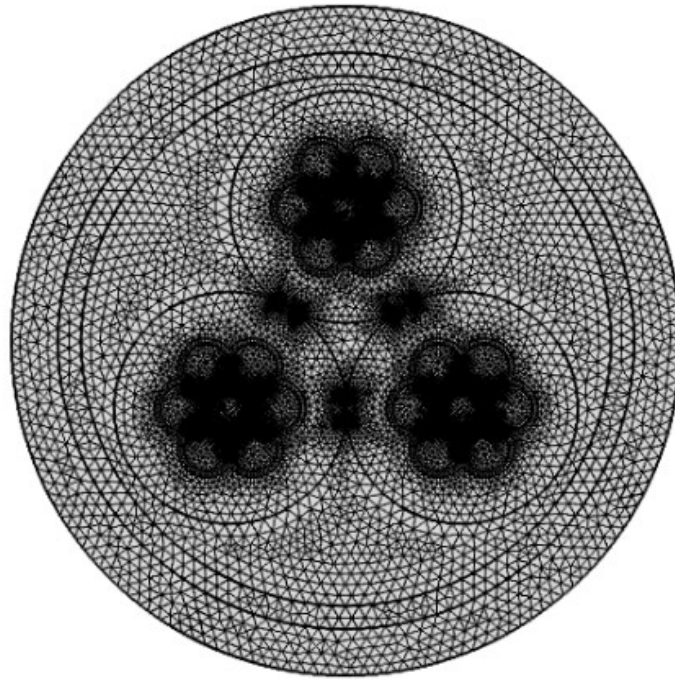
Inicialmente, tanto para o cálculo da admitância quanto impedância interna por unidade de comprimento escolheu-se a configuração *Extra Fine*, utilizando 18094 elementos de domínio para a Configuração 1, 17718 para a Configuração 2 e 17932 para a Configuração 3. A malha foi gerada para todo domínio eletromagnético e é ilustrada em detalhe no cabo para cada configuração, nas Figuras 70-72.



**Figura 70 – Malha gerada para a Configuração 1 do Cabo Flor.**



**Figura 71 - Malha gerada para a Configuração 2 do Cabo Flor.**

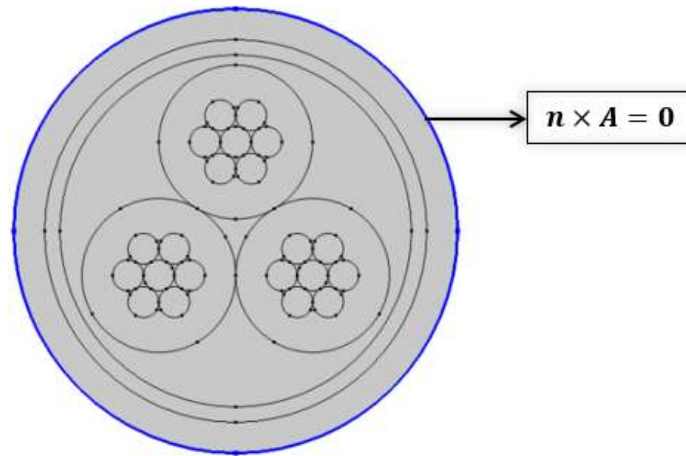


**Figura 72 - Malha gerada para a Configuração 3 do Cabo Flor.**

### 5.1.1 Cálculo da Capacitância Interna por Unidade de Comprimento

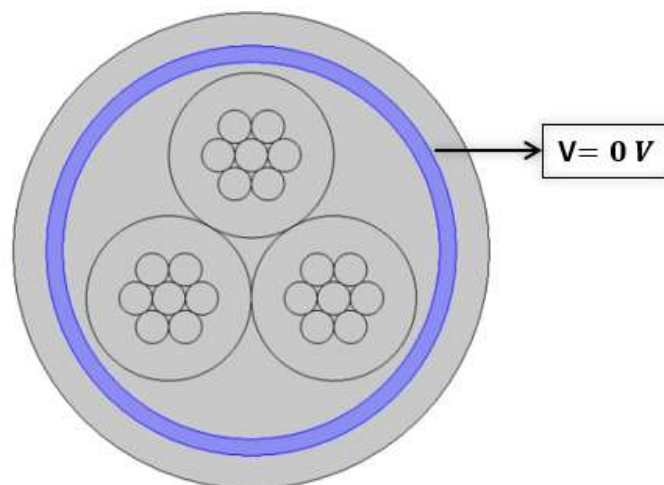
De modo a obter a matriz de admitâncias e extrair as capacitâncias por unidade de comprimento para cada caso, escolheu-se a física *Electric Currents* do COMSOL *Multiphysics*.

Como condições de contorno, para as três configurações, atribui-se a condição de isolamento elétrica ( $n \cdot \mathbf{J} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético, como ilustrado na Figura 73.



**Figura 73 - Condição de Isolação Elétrica aplicada ao limite do domínio eletromagnético.**

Além disso, para todos os cálculos de admitância, a tensão na armadura foi mantida em 0V, como ilustrado na Figura 74.



**Figura 74 - Tensão na armadura.**

Para obter a matriz de admitâncias internas por unidade de comprimento, em cada configuração, no COMSOL *Multiphysics* aplicou-se em cada parte metálica 1V e nas demais 0V, como realizado nas simulações de Cabo em Tubulação no Capítulo 4.

Aplicando a rotina de simulação e equações, descritas no capítulo 4, os resultados de capacitância interna por unidade de comprimento são calculados para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1 MHz para cada configuração.

Assim como nos casos de Cabo em Tubulação, observou-se que os valores de capacitância se mantêm praticamente constantes ao longo da faixa de frequências considerada. Decidiu-se, portanto, ilustrar neste trabalho a matriz de capacitância representativa desse sistema, válida para toda faixa de frequência.

Para a Configuração 1, tem-se:

$$[C_{\text{num.}}] = \begin{bmatrix} 137.85 & -22.24 & -22.24 \\ -22.24 & 137.85 & -22.24 \\ -22.24 & -22.24 & 137.85 \end{bmatrix} \quad [\text{pF}]$$

Para a Configuração 2, tem-se:

$$[C_{\text{num.}}] = \begin{bmatrix} 170.11 & -29.564 & -29.564 \\ -29.564 & 170.11 & -29.564 \\ -29.564 & -29.564 & 170.11 \end{bmatrix} \quad [\text{pF}]$$

Para a Configuração 3, tem-se:

$$[C_{\text{num.}}] = \begin{bmatrix} 157.02 & -26.571 & -26.571 \\ -26.571 & 157.02 & -26.571 \\ -26.571 & -26.571 & 157.02 \end{bmatrix} \quad [\text{pF}]$$

Quando os resultados numéricos das Configurações 2 e 3 para capacitância própria do condutor são comparados com os resultados da Configuração 1 observa-se uma discrepância de 23,4% e 13,9%. Para as demais capacitâncias mútuas, 32,93% e 19,47%. Com esses resultados, observa-se que com a inserção da camada semicondutora a capacitância aumenta.

## 5.1.2 Cálculo da Resistência e Indutância Interna por Unidade de Comprimento

### 5.1.2.1 Matriz $[Z_i]$

A matriz de impedância interna de um Cabo Multifilamentar, desconsiderando efeitos do meio externo, pode ser representada por:

$$[Z_{\text{int}}] = [Z_i] + [Z_p] + [Z_c] \quad (52)$$

Onde,  $[Z_i]$  representa a matriz de impedância interna dos cabos monopolares que compõem o cabo. Esta matriz pode ser representada pela matriz descrita em (53).

$$[Z_i] = \begin{bmatrix} [Z_{i1}] & [0] & [0] & 0 \\ [0] & [Z_{i2}] & [0] & 0 \\ [0] & [0] & [Z_{i3}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Cada submatriz descrita acima consiste em uma matriz de dimensão 1 (condutor central) e representa cada veia de potência. As últimas linha e coluna de  $[Z_i]$  compatibilizam a dimensão desta com a dimensão de  $[Z_p]$  e  $[Z_c]$ . Serão acrescentadas tantas linhas e colunas quantas forem as camadas metálicas envolvendo os três cabos monopolares.

De modo a obter a matriz de impedância interna de cada veia de potência e extrair as resistências e indutâncias por unidade de comprimento, escolheu-se a física *Magnetic Fields* do COMSOL *Multiphysics*.

As equações e condições de contorno aplicadas nestas simulações foram similares as descritas no Capítulo 4, com a diferença que neste caso temos apenas um elemento condutor em cada veia.

Os resultados de resistência e indutância interna do condutor por unidade de comprimento são calculados para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1 MHz e as três configurações são comparadas, como ilustrado nas Figuras 75 e 76.

Como pode ser observado, o efeito da inserção da camada semicondutora não é expressivo a ponto de causar algum impacto nos cálculos de resistência e indutância. Como demonstrado por AMETANI [3] através de formulações analíticas, a presença e espessura da camada semicondutora tem um efeito pequeno nos resultados de impedância. Tal fato pôde também ser observado nas simulações utilizando método dos elementos finitos.

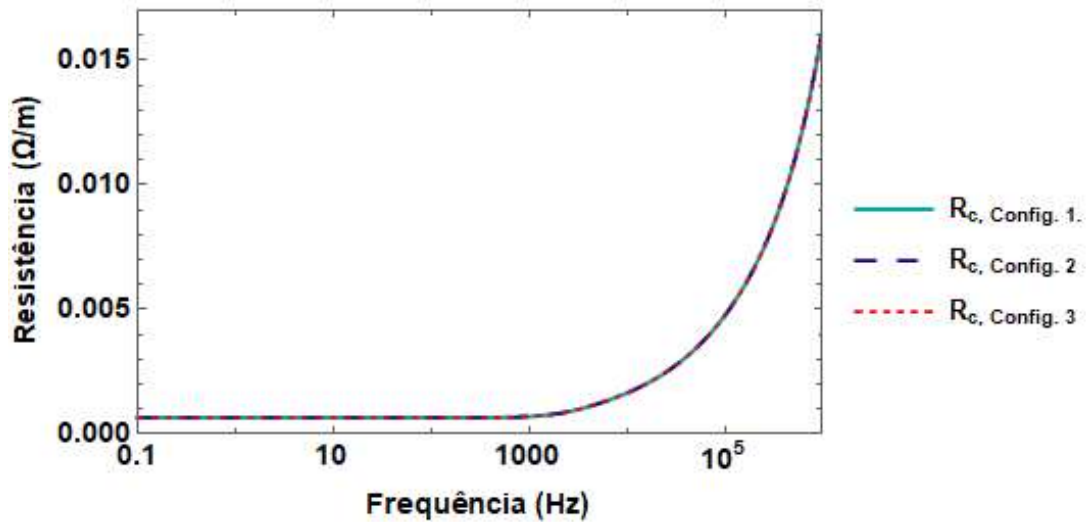


Figura 75 - Comparação entre os resultados de resistência, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_i]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.

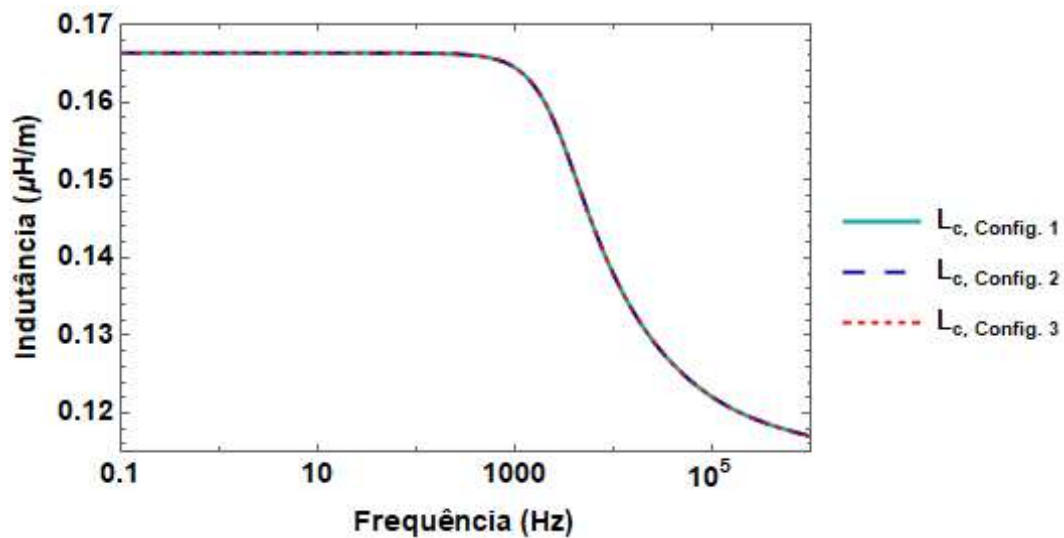


Figura 76 - Comparação entre os resultados de indutância, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_i]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.

### 5.1.2.2 Matriz $[Z_p]$

A matriz  $[Z_p]$  é uma matriz relativa à superfície interna da armadura, ou seja, é uma matriz que representa a impedância interna do Cabo Multifilamentar. O equacionamento descrito no Capítulo 3 e implementado no Cabo em Tubulação também é aplicado neste caso.



De modo a obter a matriz de impedância e extrair as resistências e indutâncias por unidade de comprimento referentes à matriz  $[Z_p]$  utilizando uma modelagem numérica, escolheu-se a física *Magnetic Fields* do COMSOL *Multiphysics*.

Para o cálculo de  $[Z_p]$ , considera-se neste trabalho um domínio eletromagnético de dimensão igual o raio mais externo da tubulação, assim como foi feito para o cabo em tubulação. Com isso, a malha gerada inicialmente para o cálculo de capacitância, foi utilizada nestas simulações.

Como condições de contorno atribui-se a condição de isolamento magnética ( $n \times \mathbf{A} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético.

De modo a encontrar cada elemento da matriz  $[Z_p]$ , é aplicada uma corrente de 1A em um elemento metálico e medida a tensão induzida nesse elemento e nos demais. A armadura foi mantida aterrada neste caso.

Aplicando a rotina de simulação, descrita anteriormente, as equações descritas no capítulo 4, os resultados de resistência interna por unidade de comprimento referentes à matriz  $[Z_p]$  são calculados para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1 MHz para cada uma das configurações e os resultados das comparações são ilustrados nas Figuras 77-80. Assim como no cálculo da impedância interna, não foi observada alteração significativa dos resultados com a inserção da camada semicondutora.

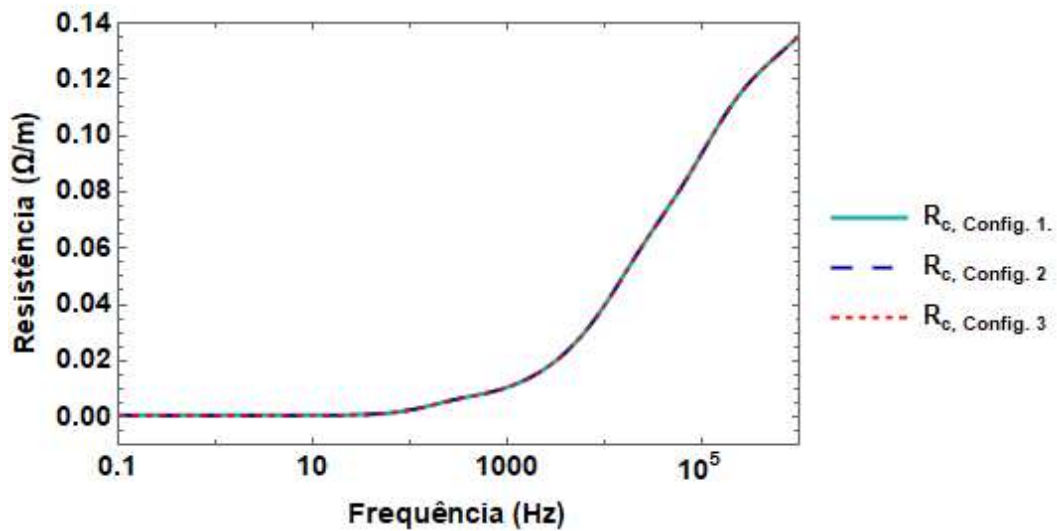


Figura 77 - Comparação entre os resultados de resistência própria do condutor, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.

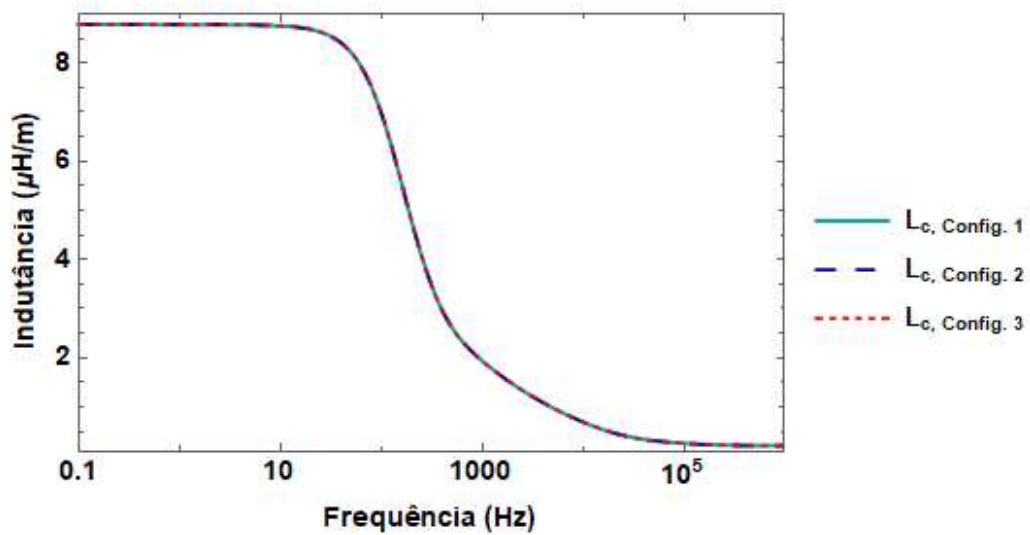


Figura 78 - Comparação entre os resultados de indutância própria do condutor, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.

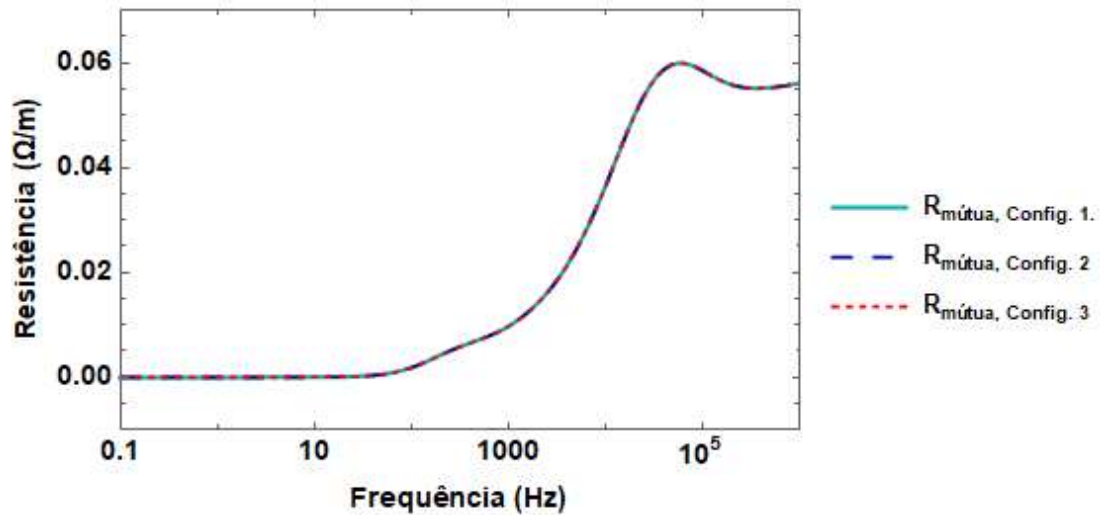


Figura 79 - Comparação entre os resultados das resistências mútuas entre condutores, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.

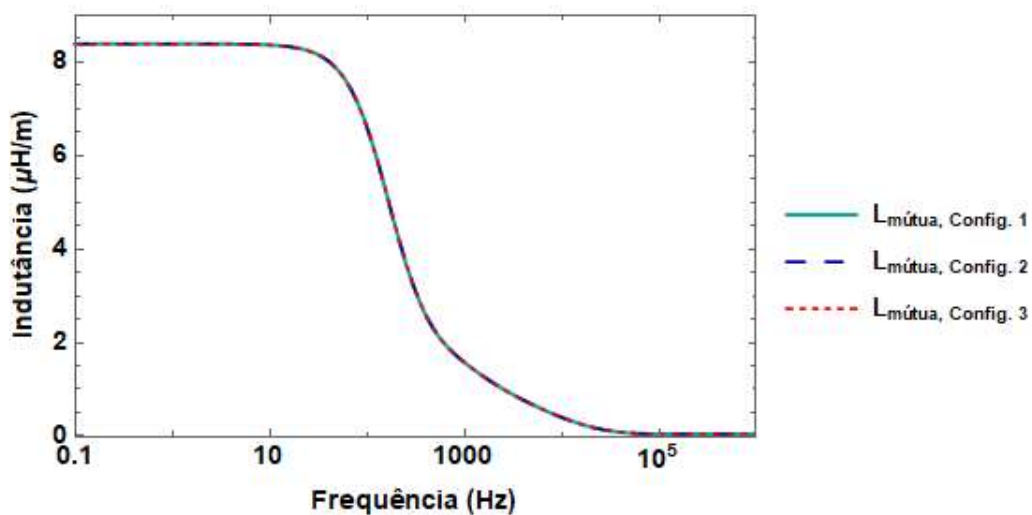


Figura 80 - Comparação entre os resultados das indutâncias mútuas entre condutores, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.

### 5.1.2.3 Matriz $[Z_c]$

De modo a obter a matriz de impedância e extrair as resistências e indutâncias por unidade de comprimento referentes à matriz  $[Z_c]$  utilizando uma modelagem numérica, escolheu-se a física *Magnetic Fields* do COMSOL *Multiphysics*.

Para melhor definição do domínio, foram realizados alguns testes observou-se que, para o cálculo de  $Z_{c1}$ , um domínio eletromagnético de dimensão vinte vezes o raio mais externo da tubulação é minimamente suficiente para não causar variações significativas

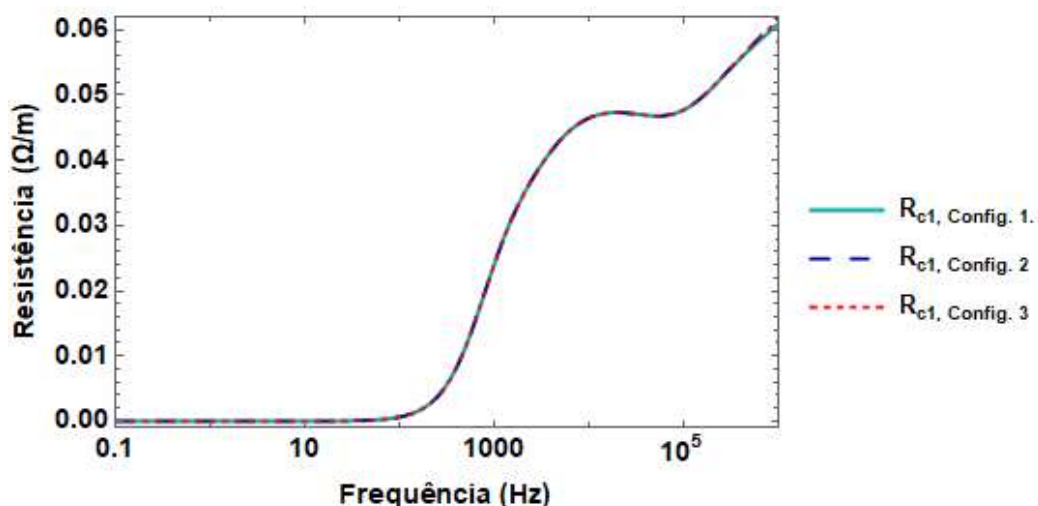
nos resultados obtidos. Com isso, na malha gerada, na configuração *Extra Fine*, foram utilizados 20576 elementos de domínio para a Configuração 1, 19958 para a Configuração 2 e 20370 para a Configuração 3.

Para o cálculo de  $Z_{c2}$  e  $Z_{c3}$ , um domínio eletromagnético de dimensão dez vezes o raio mais externo da tubulação é minimamente suficiente para não causar variações significativas nos resultados obtidos. Com isso, na malha gerada, na configuração *Extra Fine*, foram utilizados 20426 elementos de domínio para a Configuração 1, 19806 para a Configuração 2 e 20214 para a Configuração 3.

Como condições de contorno atribui-se a condição de isolamento magnética ( $n \times \mathbf{A} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético.

De modo a encontrar as impedâncias  $[Z_{c2}]$  e  $[Z_{c3}]$ , é aplicada uma corrente de 1A na armadura e medida a tensão induzida nesse elemento e nos demais. Para o cálculo de  $[Z_{c1}]$ , aplica-se 1A na blindagem de uma das veias de potência e 0A nas demais partes metálicas.

Os resultados foram calculados para 100 pontos de frequência logarithmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1 MHz para cada uma das configurações e os resultados das comparações são ilustrados nas Figuras 81-86. Com a inserção da camada semicondutora, apenas as curvas de  $L_{c2}$  e  $L_{c3}$  tiveram uma alteração em relação a Configuração 1.



**Figura 81 - Comparação entre os resultados de resistência, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c1}]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.**

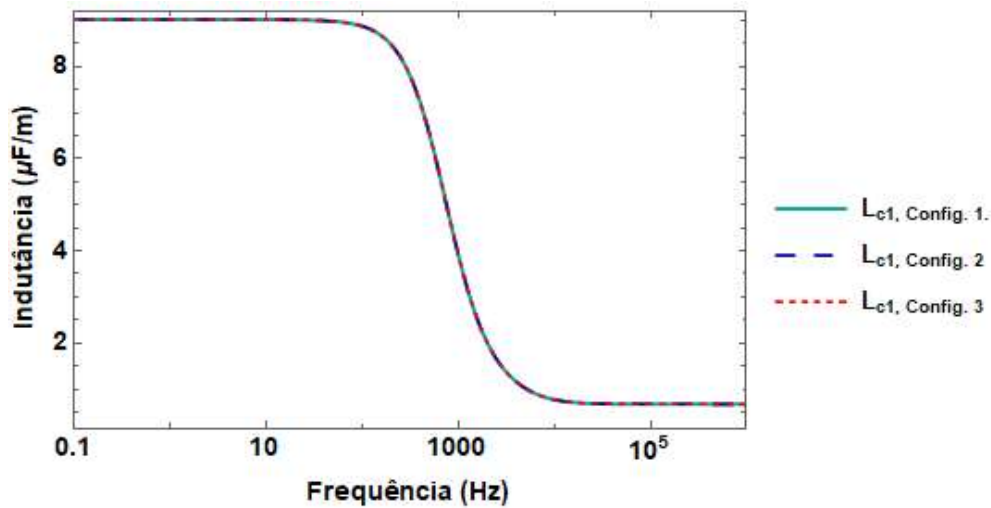


Figura 82 - Comparação entre os resultados de indutância, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c1}]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.

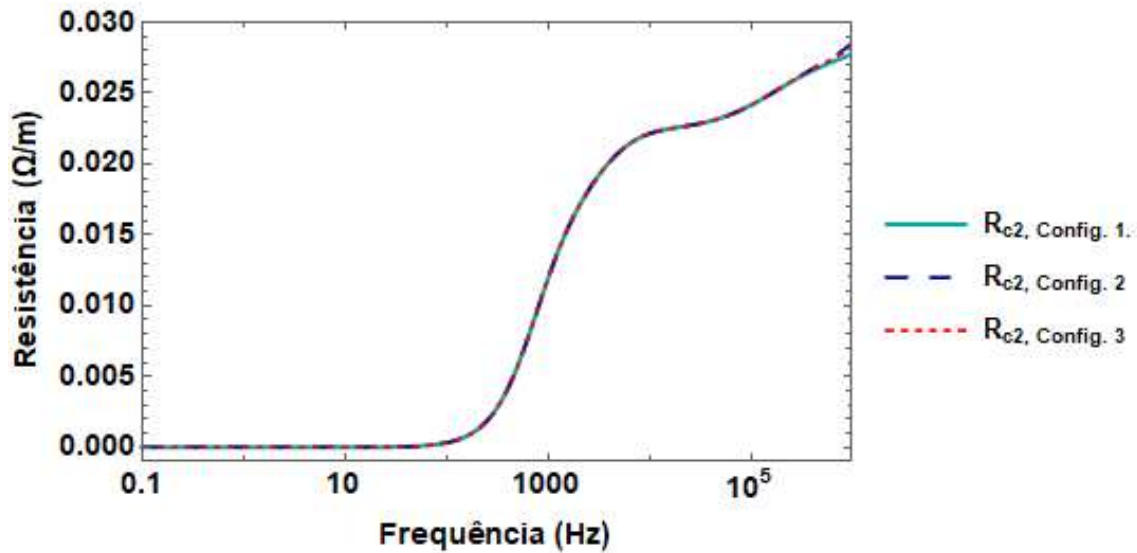


Figura 83 - Comparação entre os resultados de resistência, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c2}]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.

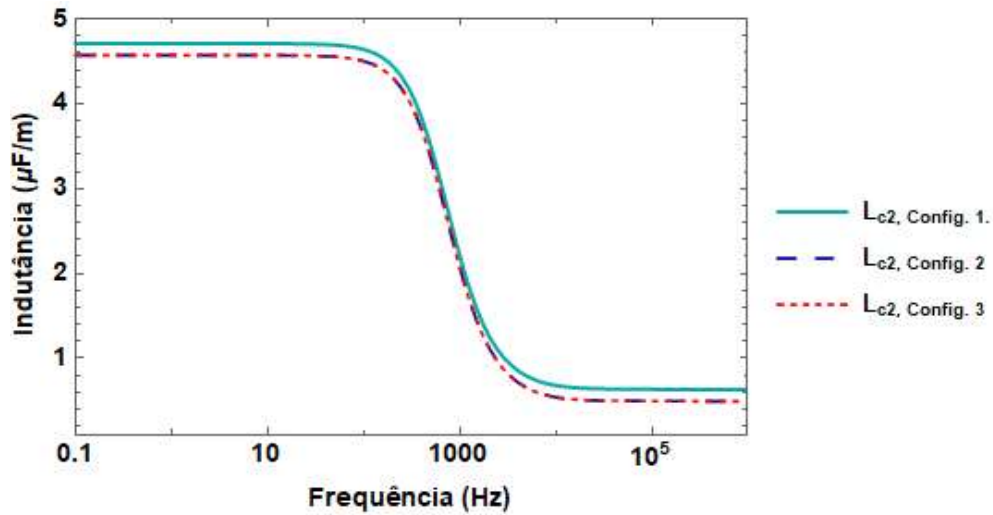


Figura 84 - Comparação entre os resultados de indutância, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c2}]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.

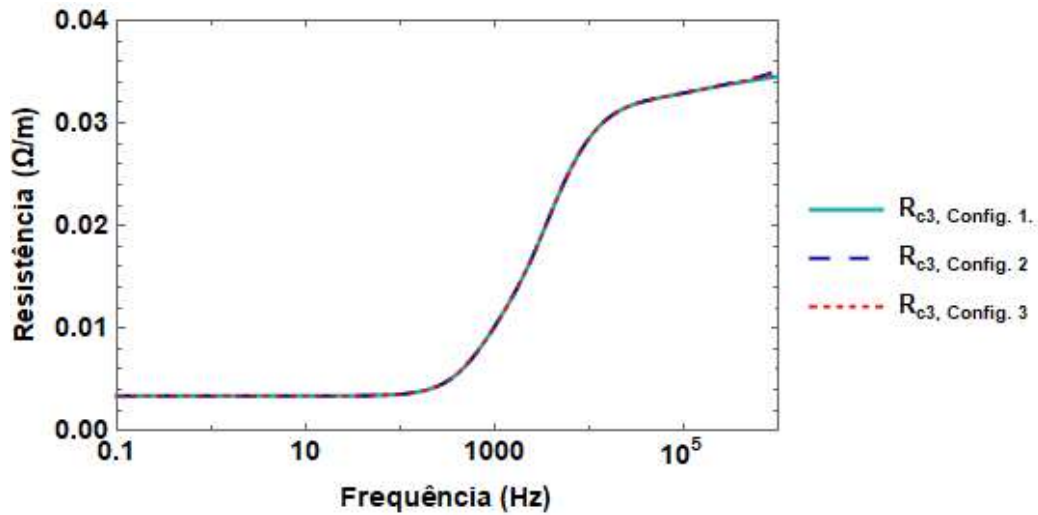


Figura 85 - Comparação entre os resultados de resistência, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c3}]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.

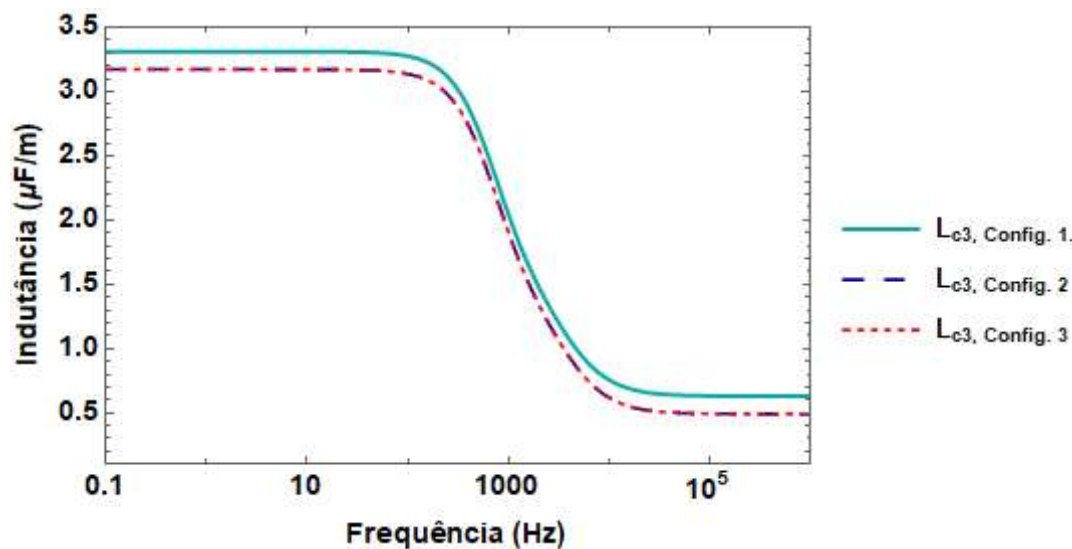


Figura 86 - Comparação entre os resultados de indutância, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c3}]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar.

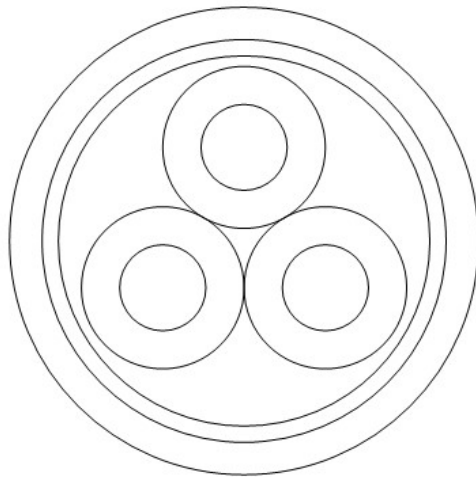
### 5.1.3 Cabo Equivalente

Camadas semicondutoras estão em contato com um elemento condutor e conforme demonstrado por AMETANI [3] e SILVA [23] utilizando formulações analíticas é ilustrado seu pouco efeito em cálculos de impedância devido sua pequena condutividade quando comparado com o condutor central. Aplicando a metodologia numérica utilizada neste trabalho no programa computacional, observa-se também a pouca influência da camada semicondutora no cálculo da impedância. O mesmo não ocorre em cálculos de capacitância, conforme discutido na seção 5.1.1.

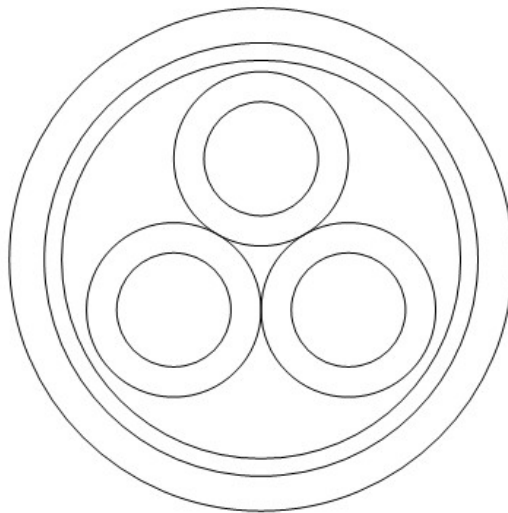
Nesta seção as configurações de cabo multifilamentar serão comparadas com configurações equivalentes nas quais a camada semicondutora é removida e o cabo equivalente teria apenas o condutor central do tipo redondo sólido, variando-se sua dimensão. Os cálculos de impedância e admitância serão realizados utilizando a formulação analítica utilizada no Cabo em Tubulação.

A aproximação por um condutor cilíndrico de um condutor com uma seção transversal de formato arbitrário já vem sendo utilizada em diversos trabalhos baseados nos estudos realizados por AMETANI [4].

Duas configurações de cabo equivalente serão consideradas neste estudo. A Figura 87 ilustra o cabo no qual a camada semicondutora foi retirada e o condutor central possui área igual a soma das áreas dos filamentos. A Figura 88 ilustra o cabo no qual a camada semicondutora foi retirada e o condutor central possui raio igual ao da camada semicondutora e resistividade  $\rho_c = 1.33 \times 10^{-8} \Omega.m$



**Figura 87 – Cabo Equivalente 1, cujo condutor central possui área igual a soma das áreas dos 7 filamentos do cabo flor.**



**Figura 88 – Cabo Equivalente 2, cujo condutor central possui raio igual ao da camada semicondutora do cabo flor.**



### 5.1.3.1 Capacitância

As matrizes de capacitância correspondentes aos cabos equivalentes 1 e 2 são representados abaixo:

$$[C_{\text{analit.}}] = \begin{bmatrix} 113.565 & -26.495 & -26.495 \\ -26.495 & 113.565 & -26.495 \\ -26.495 & -26.495 & 113.565 \end{bmatrix} \quad [\text{pF}]$$

$$[C_{\text{analit.}}] = \begin{bmatrix} 142.562 & -40.58 & -40.58 \\ -40.58 & 142.5625 & -40.58 \\ -40.58 & -40.58 & 142.5625 \end{bmatrix} \quad [\text{pF}]$$

Observa-se, tomando como referência a Configuração 1 de Cabo Multifilamentar, que para a capacitância própria do condutor possui uma diferença percentual de 16,617% para o cabo equivalente 1 e 3,42% para o cabo equivalente 2. Para as demais capacitâncias mútuas, observa-se uma diferença percentual de 19,13% para o cabo equivalente 1 e 82,464% para o cabo equivalente 2.

### 5.1.3.2 Matriz $[Z_i]$

Os resultados de resistência e indutância extraídos da matriz  $[Z_i]$  são ilustrados nas Figuras 89 e 90. Para a resistência, o cabo equivalente 2 é o que possui resultados mais próximos daqueles obtidos para as três configurações de cabo multifilamentar. Já no caso da resistência o cabo equivalente 1 possui resultados com menor diferença percentual.

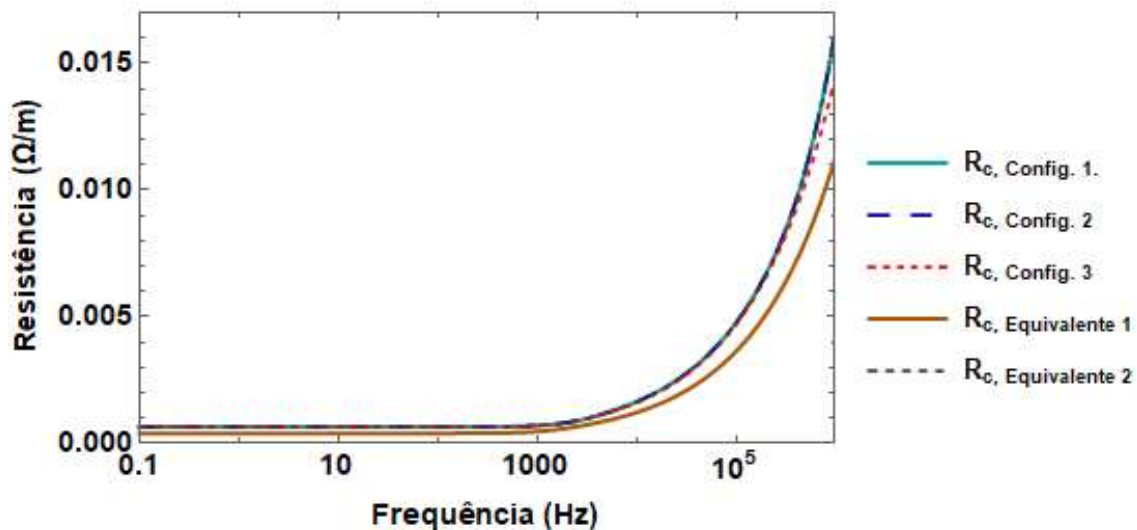


Figura 89 - Comparação entre os resultados de resistência por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_i]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

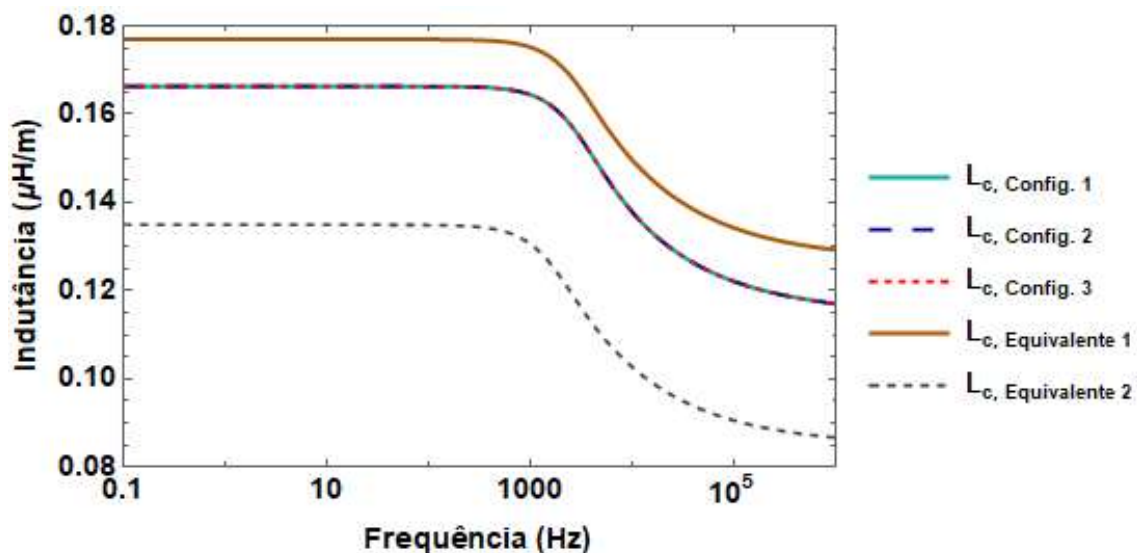


Figura 90 - Comparação entre os resultados de indutância por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_i]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

### 5.1.3.3 Matriz $[Z_p]$

Os resultados de resistência e indutância extraídos da matriz  $[Z_p]$  são ilustrados nas Figuras 90-94. Para a resistência, até a frequência de 2,06 kHz os resultados dos cabos equivalentes são compatíveis com as três configurações. A partir da referida frequência

os resultados possuem discrepâncias. Já para indutância, os resultados dos cabos equivalentes são compatíveis com as três configurações a partir de  $f = 290 \text{ Hz}$ .

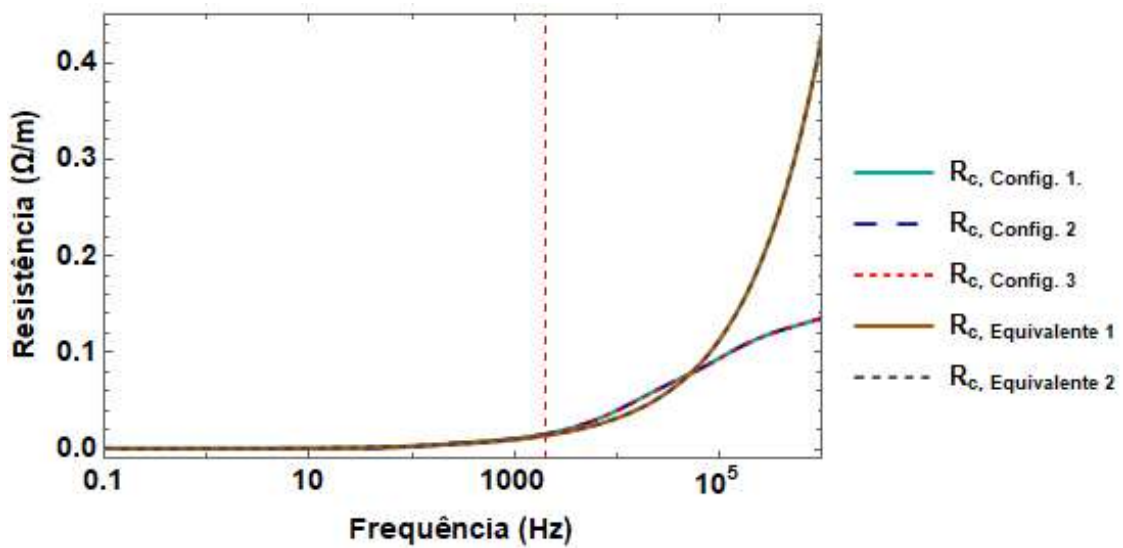


Figura 91 - Comparação entre os resultados de resistência própria do condutor por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

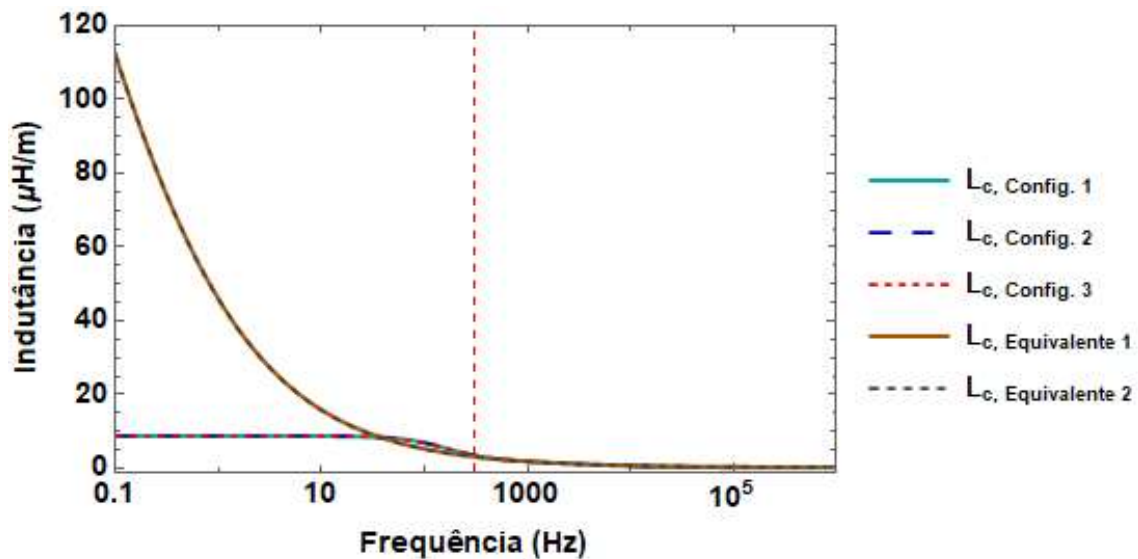


Figura 92 - Comparação entre os resultados de indutância própria do condutor por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

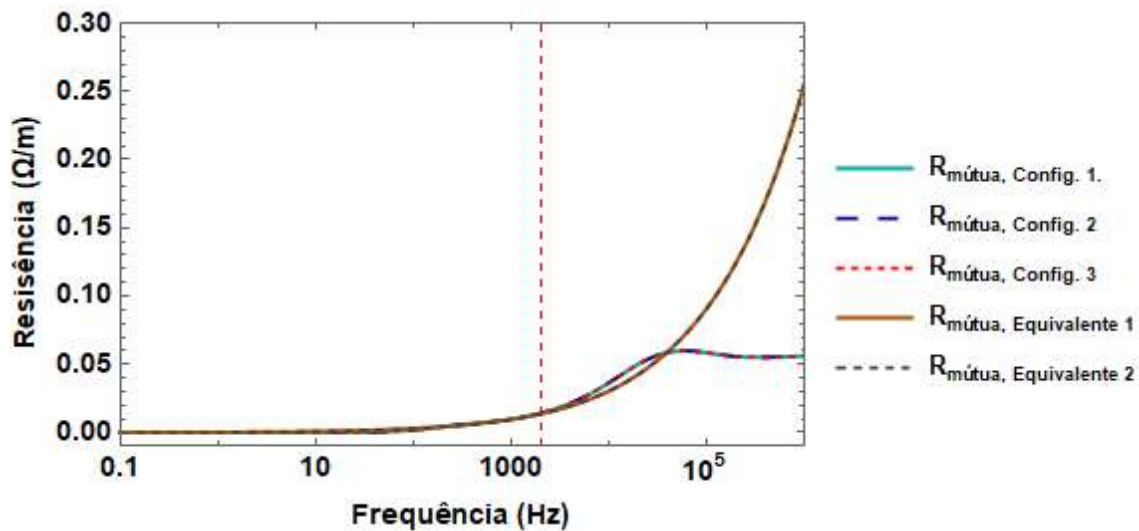


Figura 93 - Comparação entre os resultados de resistência mútua entre condutores por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

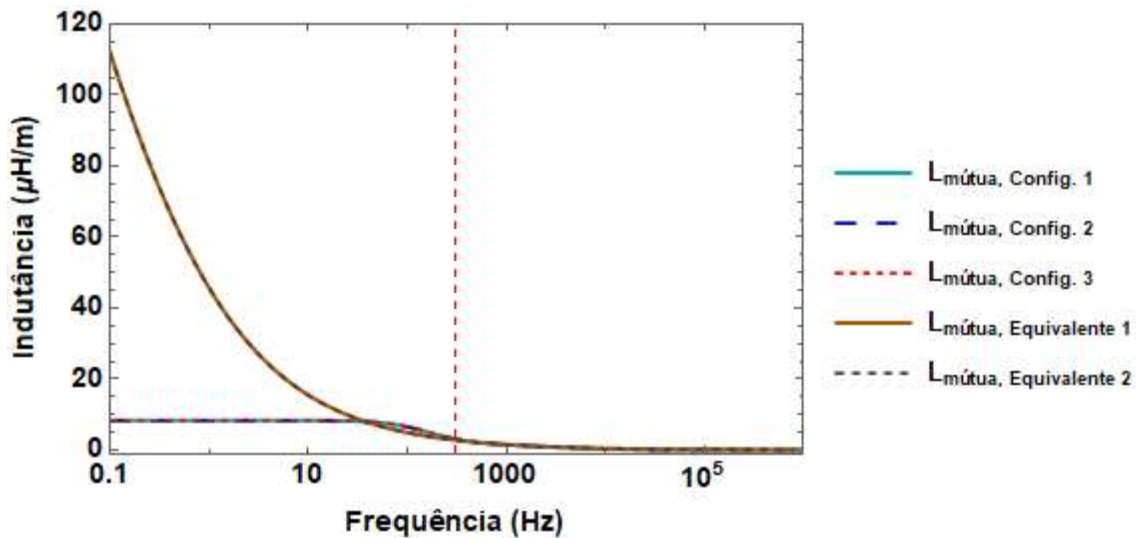


Figura 94 - Comparação entre os resultados de indutância mútua entre condutores por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

### 5.1.3.4 Matriz $[Z_c]$

Os resultados de resistência e indutância extraídos da matriz  $[Z_c]$  são ilustrados nas Figuras 95-100. Para a resistência, até a frequência de 5 kHz os resultados dos cabos equivalentes são compatíveis com as três configurações. Já para indutância, os resultados dos cabos equivalentes possuem o mesmo comportamento e possuem um comportamento similar as demais configurações.

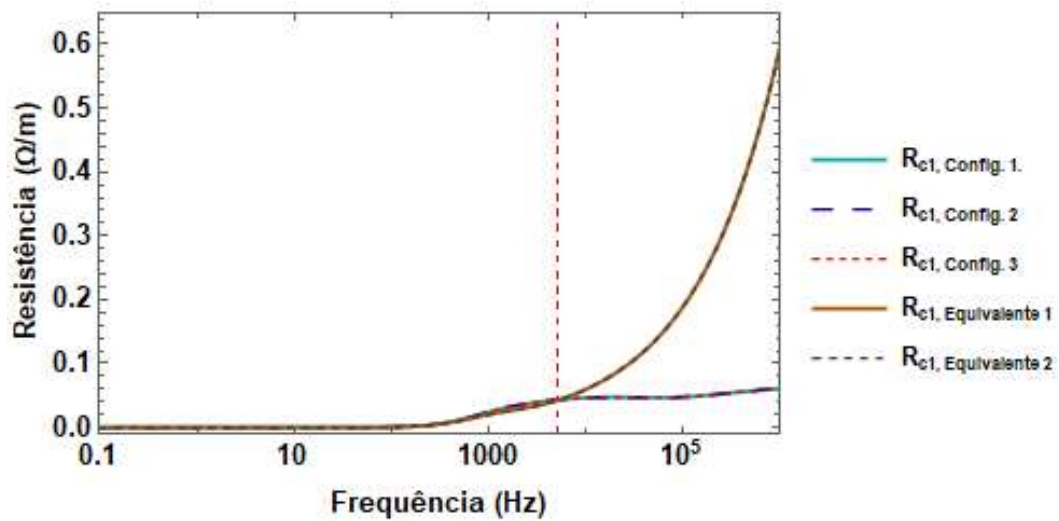


Figura 95 - Comparação entre os resultados de resistência por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c1}]$ , para as três configurações de cabo multifilar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

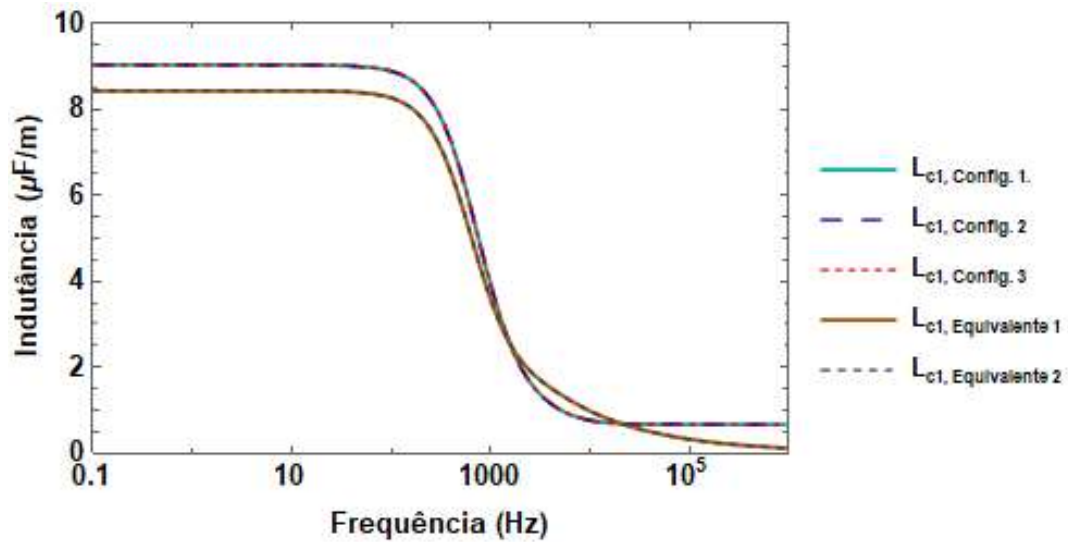


Figura 96 - Comparação entre os resultados de indutância por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c1}]$ , para as três configurações de cabo multifilar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

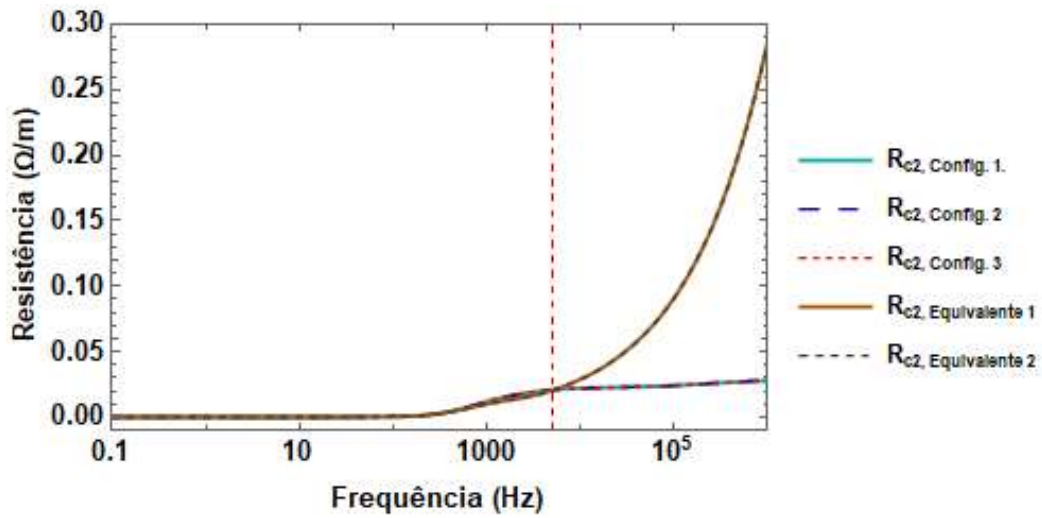


Figura 97 - Comparação entre os resultados de resistência por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c2}]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

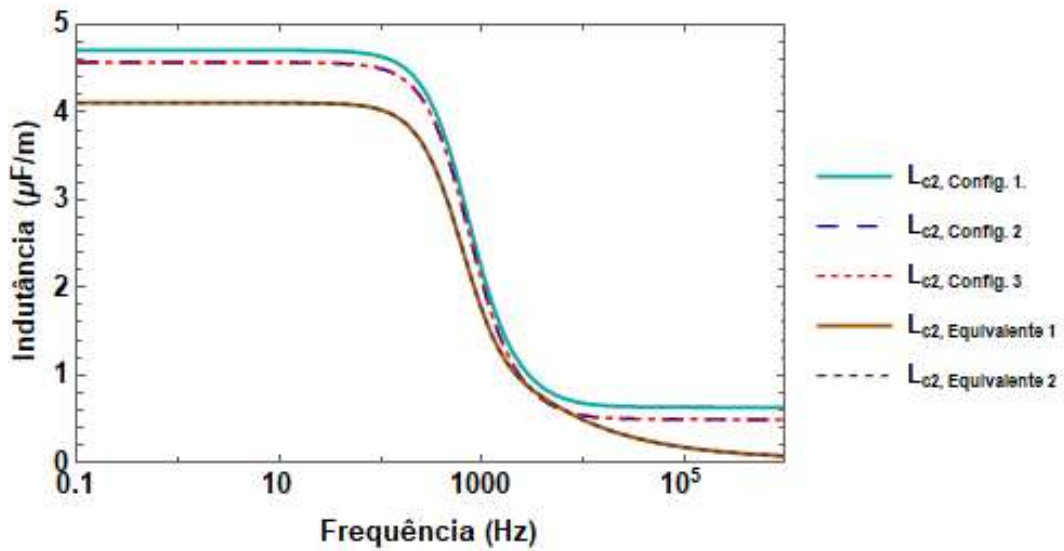


Figura 98 - Comparação entre os resultados de indutância por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c2}]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

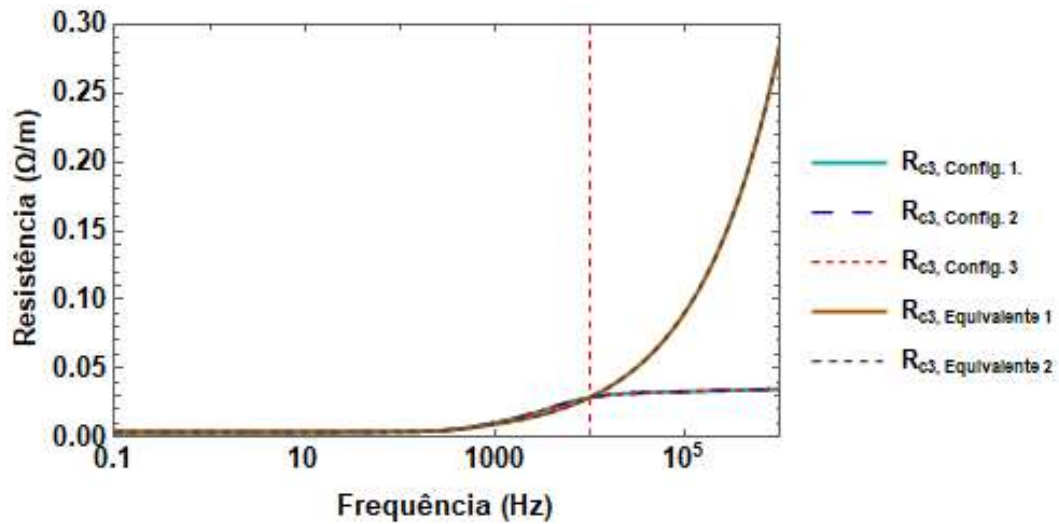


Figura 99 - Comparação entre os resultados de resistência por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c3}]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

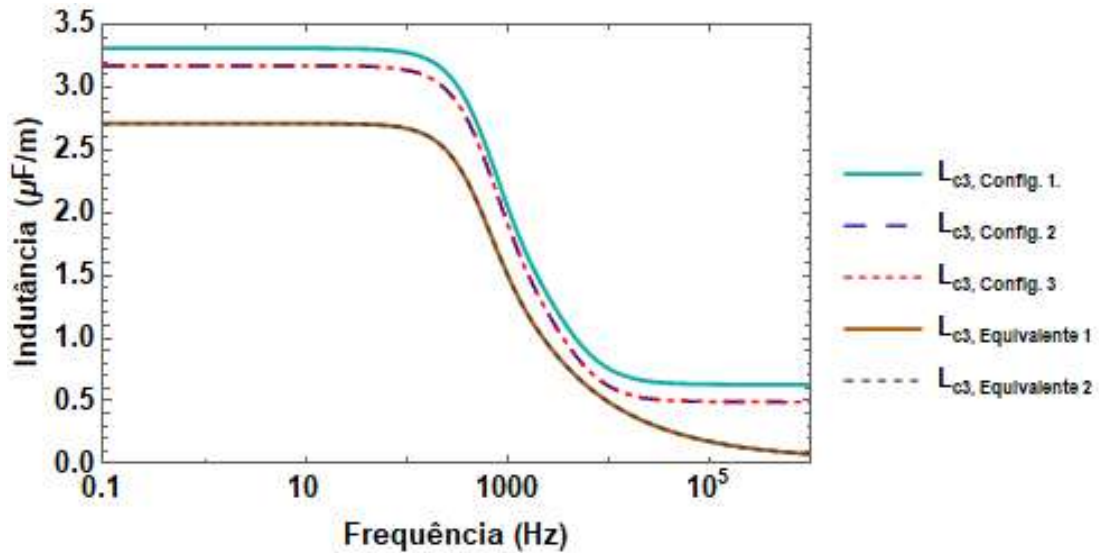


Figura 100 - Comparação entre os resultados de indutância por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_{c3}]$ , para as três configurações de cabo multifilamentar e as duas configurações equivalentes de cabo em tubulação.

# CAPÍTULO 6

## Cabo Submarino

Nesta seção serão calculados parâmetros internos unitários de uma configuração de Cabo Umbilical comumente empregado em cabos submarinos. A geometria é descrita na Figura 101 e sua montagem e informações dos materiais utilizados são descritos no Apêndice C.4.

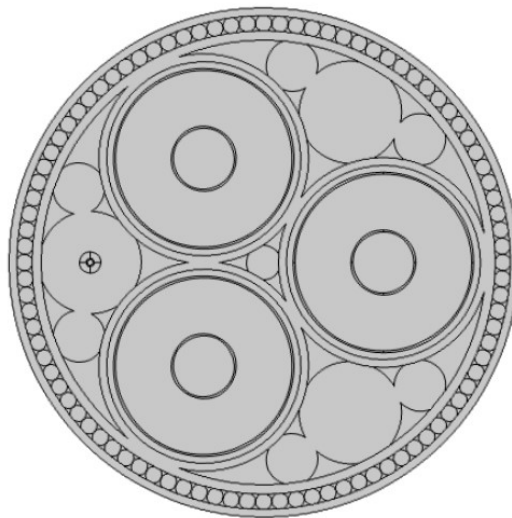


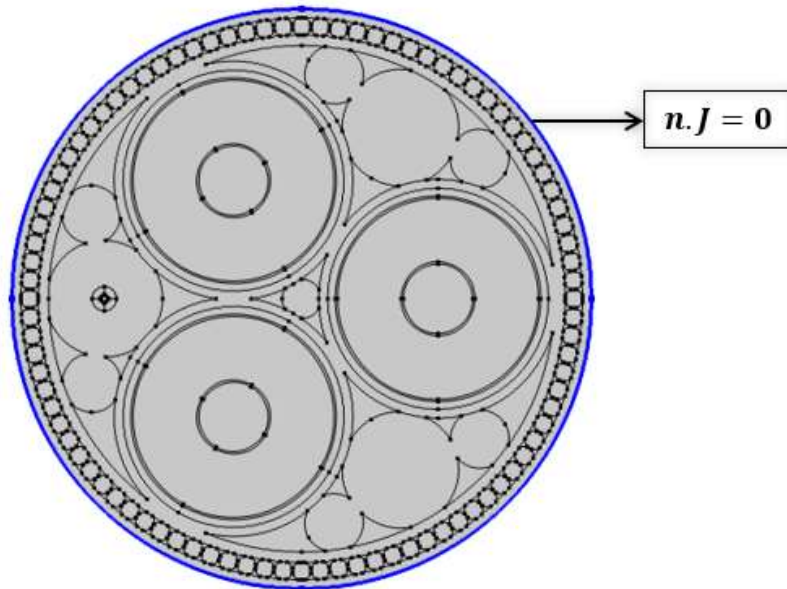
Figura 101 – Cabo submarino estudo nesta capítulo [9].

### 6.1.1 Cálculo da Capacitância Interna por Unidade de Comprimento

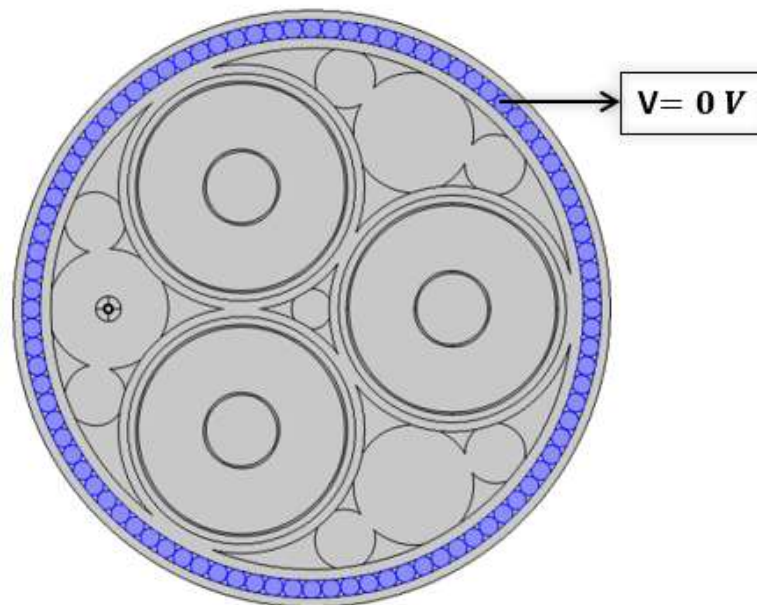
Após a montagem da geometria de cada configuração, definição dos materiais e geração da malha, o próximo passo é a seleção da física mais adequada ao estudo que deseja ser realizado. De modo a obter a matriz de admitâncias e extrair as capacitâncias por unidade de comprimento para cada caso, escolheu-se a física *Electric Currents* do COMSOL *Multiphysics*.

Como condições de contorno, para as três configurações, atribui-se a condição de isolamento elétrica ( $n \cdot \mathbf{J} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético, como ilustrado na Figura 102.





**Figura 102 - Condição de Isolação Elétrica aplicada ao limite do domínio eletromagnético.**  
Além disso, para todos os cálculos de admitância, a tensão na armadura foi mantida em 0V, como ilustrado na Figura 103.



**Figura 103 - Tensão na armadura.**

Para obter a matriz de admitâncias internas por unidade de comprimento, no COMSOL *Multiphysics*, aplicou-se em cada parte metálica 1V e nas demais 0V, como realizado nas simulações anteriores.

Os resultados de capacitância interna por unidade de comprimento são calculados para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1 MHz para cada configuração e a matriz de capacitância representativa desse sistema, válida para toda faixa de frequência é representada abaixo:

$$[C_{\text{analit.}}] = \begin{bmatrix} 138.97 & -138.97 & & & & & \\ -138.97 & 568.73 & & & & & \\ & & 138.97 & -138.97 & & & \\ & & -105.93 & -138.97 & 568.73 & & \\ & & & & & 138.97 & -138.97 \\ & & & & & -138.97 & 568.73 \\ & & & & & & & -1.28 \times 10^{-8} \\ & & & & & & & & -13.05 \\ & & & & & & & & & -13.05 \\ & & & & & & & & & & 45.634 \end{bmatrix} \text{ [pF]}$$

## 6.1.2 Cálculo da Resistência Interna por Unidade de Comprimento

### 6.1.2.1 Matriz $[Z_i]$

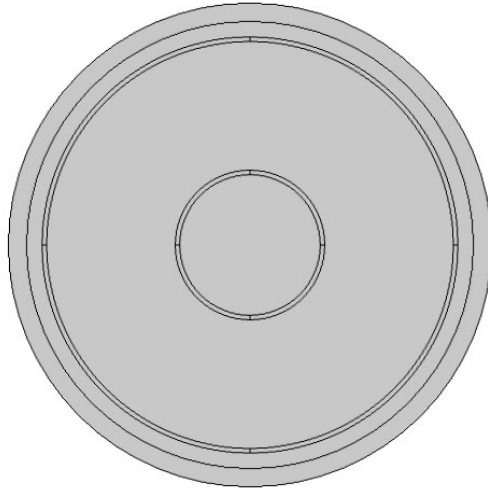
A matriz de impedância interna deste caso, desconsiderando efeitos do meio externo, pode ser representada por:

$$[Z_{\text{int}}] = [Z_i] + [Z_p] + [Z_c] \quad (54)$$

Onde,  $[Z_i]$  representa a matriz de impedância interna dos cabos monopolares que compõem o cabo. Esta matriz pode ser representada pela matriz descrita em (55).

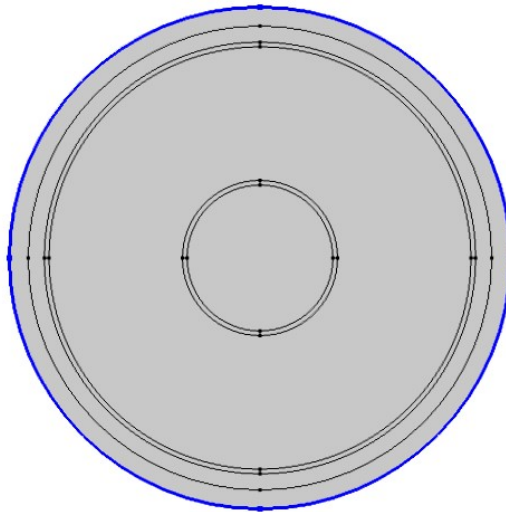
$$[Z_i] = \begin{bmatrix} [Z_{i1}] & [0] & [0] & 0 & 0 \\ [0] & [Z_{i2}] & [0] & 0 & 0 \\ [0] & [0] & [Z_{i3}] & 0 & 0 \\ [0] & [0] & [0] & [Z_{\text{fibra}}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (55)$$

De modo a obter a matriz de impedância interna de cada veia de potência, blindagem da fibra e extrair as resistências e indutâncias por unidade de comprimento, escolheu-se a física *Magnetic Fields* do COMSOL *Multiphysics*.



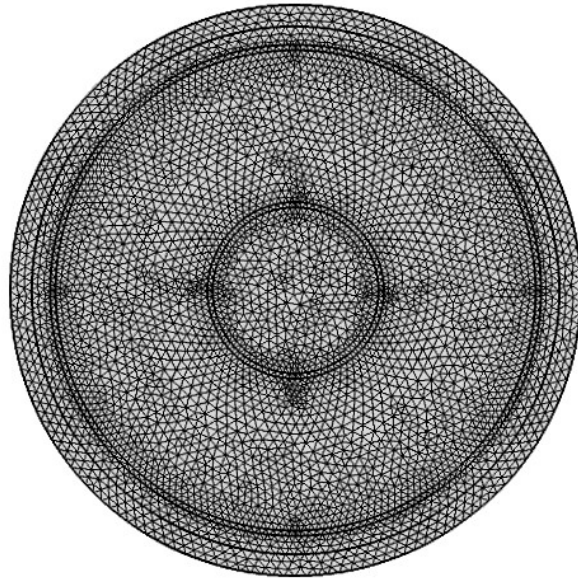
**Figura 104 – Veia de potência do cabo submarino.**

Como condições de contorno atribui-se a condição de isolamento magnética ( $n \times \mathbf{A} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético, como ilustrado na Figura 105.



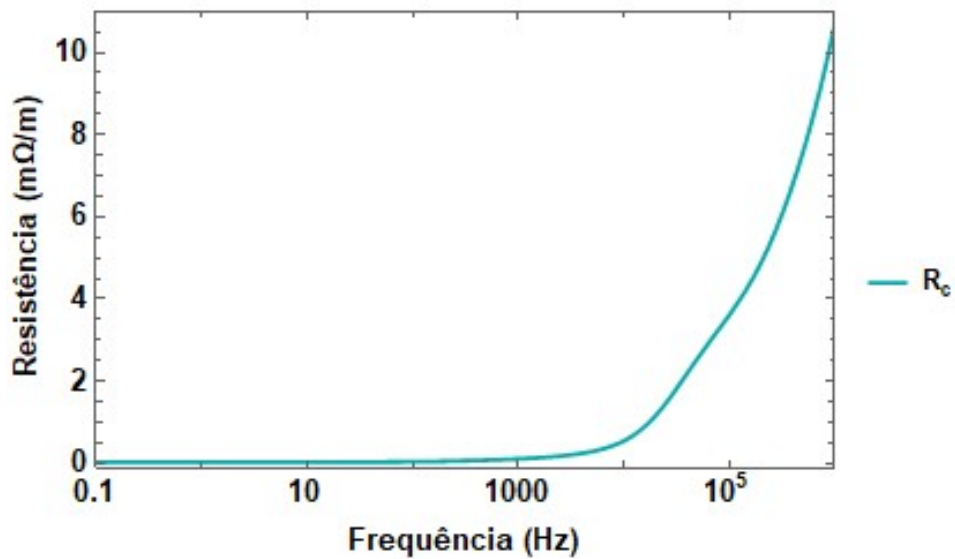
**Figura 105 - Condição de Isolação Magnética aplicada ao limite do domínio eletromagnético.**

Neste caso, a malha foi gerada utilizando-se a configuração *Extra Fine*, com 826 elementos de domínio, como ilustrado na Figura 6.



**Figura 106 – Malha gerada para veia de potência do cabo submarino.**

Primeiramente são calculados os resultados de resistência e indutância interna das veias de potência por unidade de comprimento para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1 MHz, ilustrados nas Figuras 107-112.



**Figura 107 - Resultados de resistência própria do condutor, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a veia de potência do cabo submarino.**

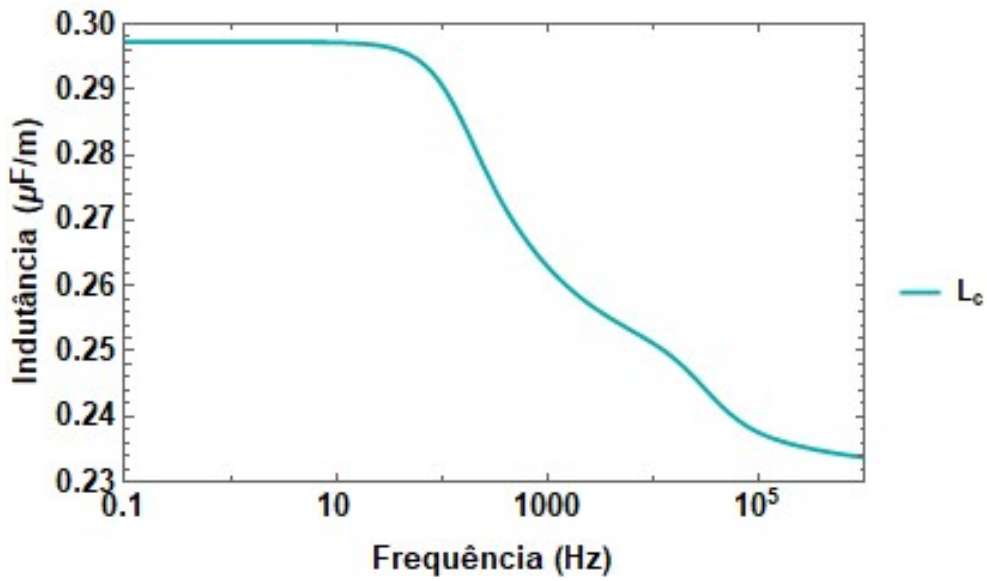


Figura 108 - Resultados de indutância própria do condutor, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a veia de potência do cabo submarino.

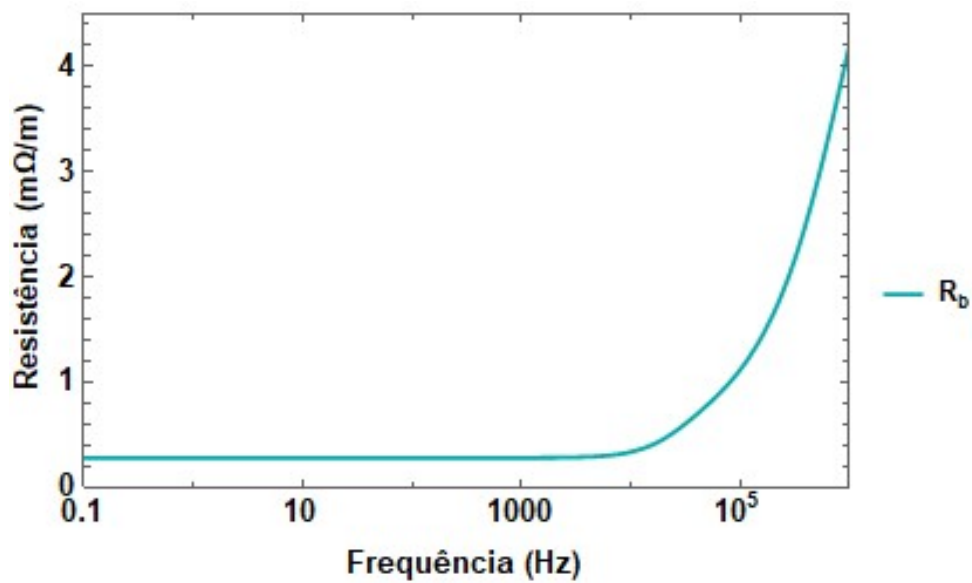


Figura 109 - Resultados de resistência própria da blindagem, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a veia de potência do cabo submarino.

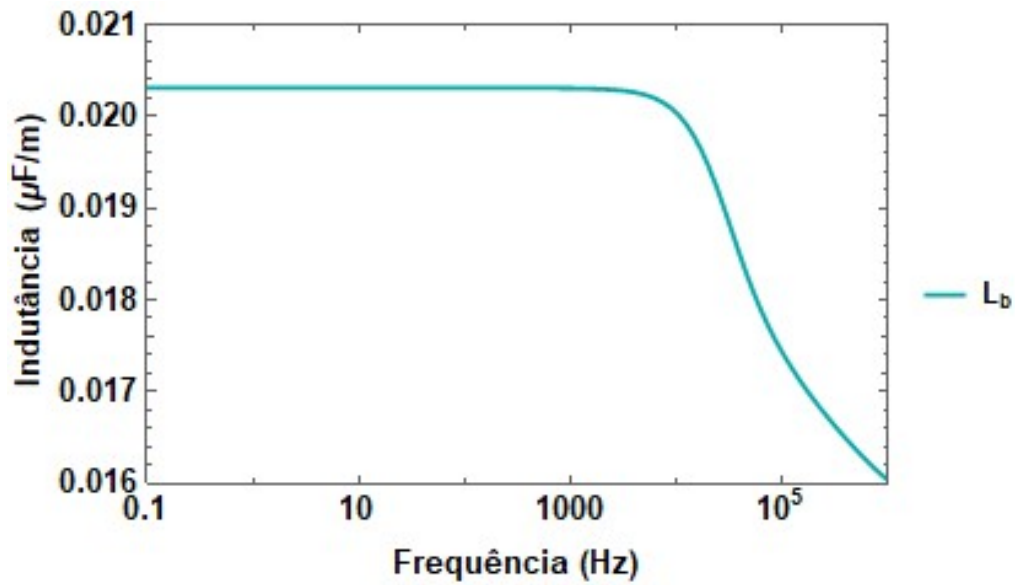


Figura 110 - Resultados de indutância própria da blindagem, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a veia de potência do cabo submarino.

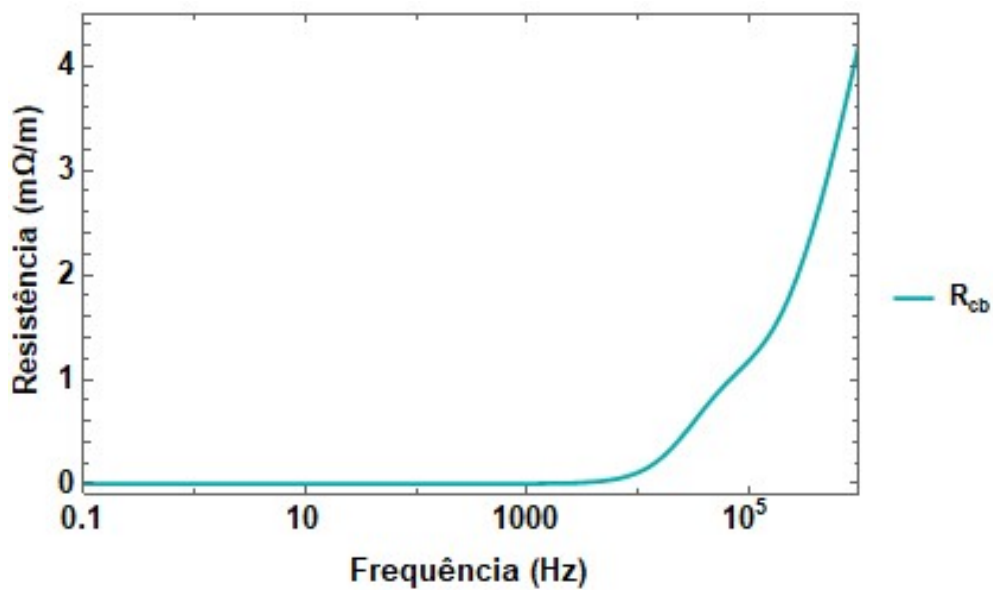
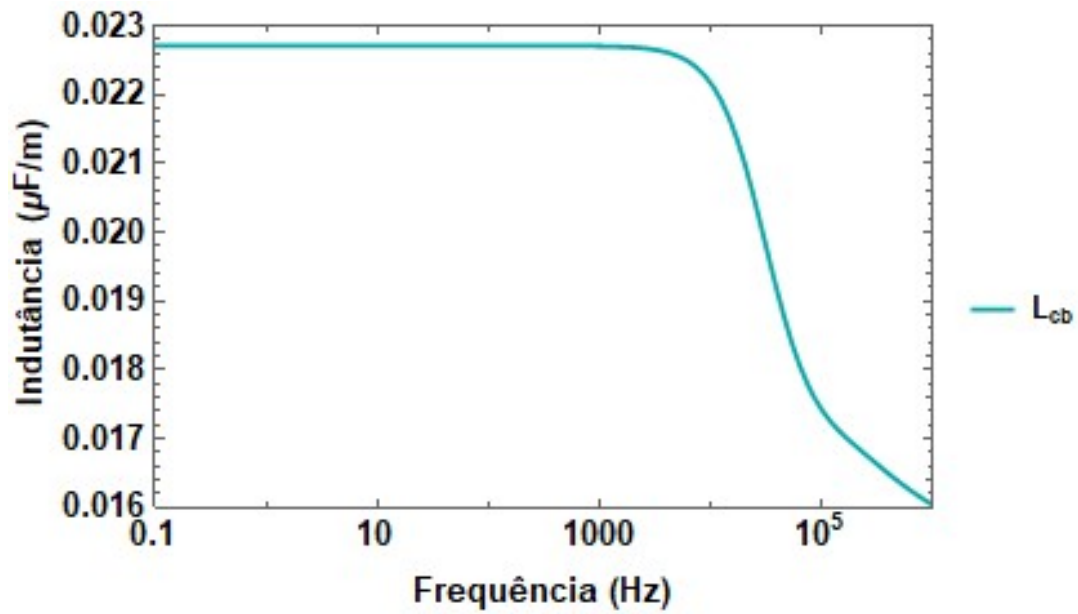
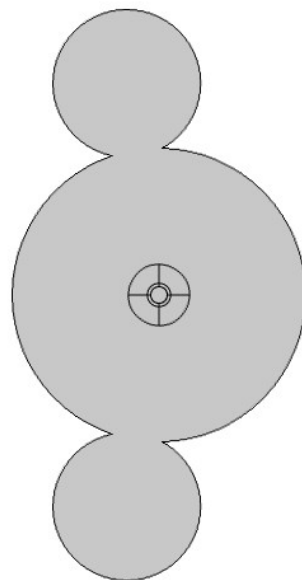


Figura 111 - Resultados de resistência mútua entre condutor e blindagem, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a veia de potência do cabo submarino.

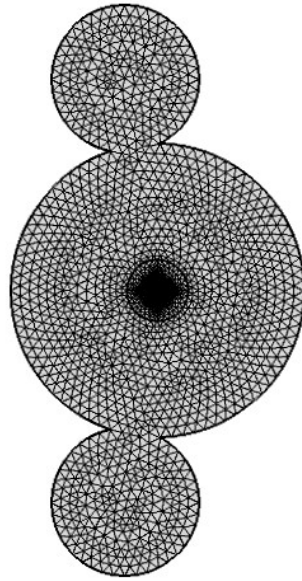


**Figura 112 - Resultados de indutância mútua entre condutor e blindagem, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a veia de potência do cabo submarino.**

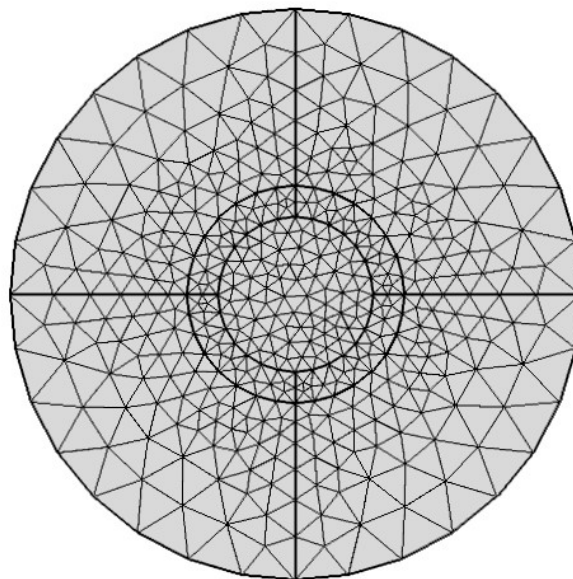
Após analisar as veias de potência, serão calculadas as resistências e indutâncias internas relacionados a blindagem da fibra óptica.



**Figura 113 – Configuração da fibra óptica do cabo submarino.**



**Figura 114 – Malha gerada para fibra óptica do cabo submarino utilizando a configuração Extra Fine, com 3504 elementos de domínio.**



**Figura 115 – Detalhe da malha gerada para fibra óptica do cabo submarino.**

Os resultados de resistência e indutância interna da blindagem da fibra óptica por unidade de comprimento são calculados para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1 MHz, ilustrados nas Figuras 116 e 117.



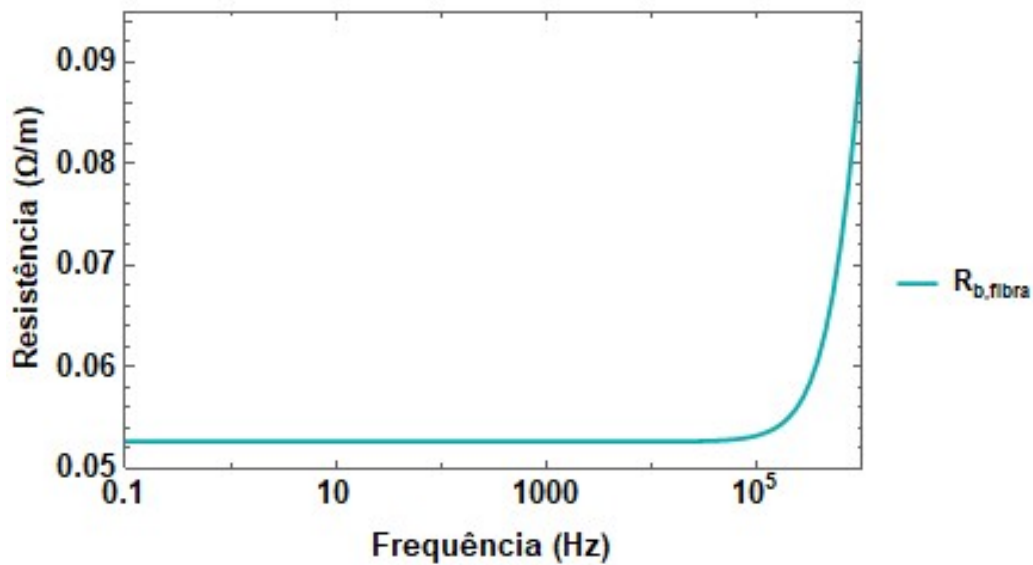


Figura 116 - Resultados de resistência própria da blindagem da fibra óptica, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a veia de potência do cabo submarino.

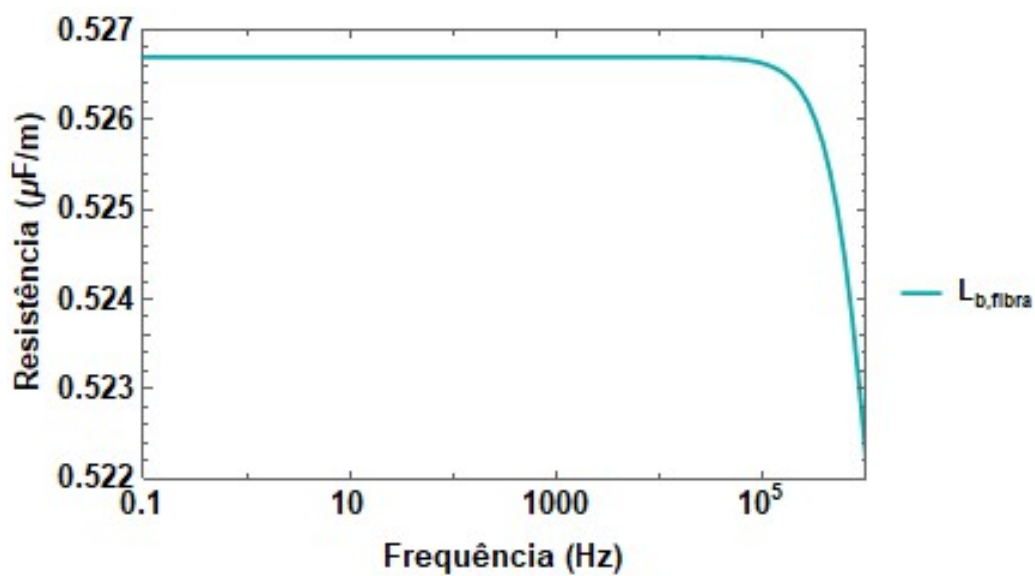


Figura 117 - Resultados de indutância própria da blindagem da fibra óptica, obtidos através do programa computacional COMSOL Multiphysics, por unidade de comprimento referente a veia de potência do cabo submarino.

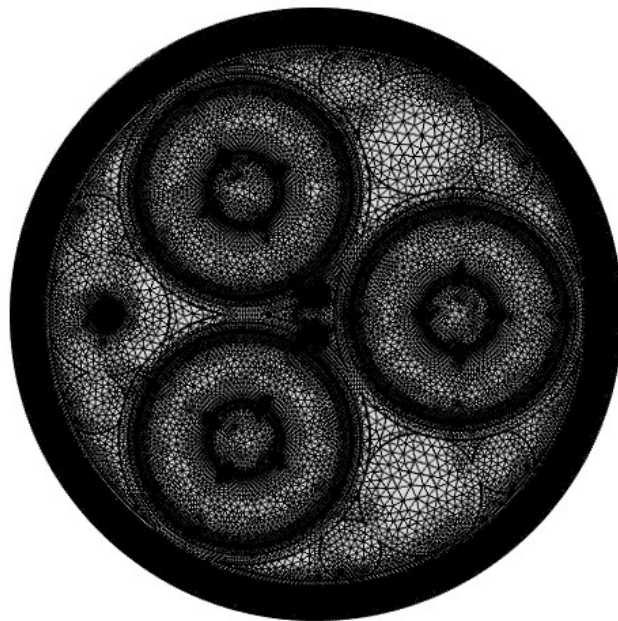
### 6.1.2.2 Matriz $[Z_p]$

Como descreve ROCHA [20], a matriz  $[Z_p]$  para cabos submarinos com presença de cabos de comunicação, pode ser obtida através da equação matricial (56).

$$[Z_p] = \begin{bmatrix} [Z_{p\_veias}] & [Z_{p\_mútua}] & 0 \\ [Z_{p\_mútua}^T] & [Z_{p\_fibra}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (56)$$

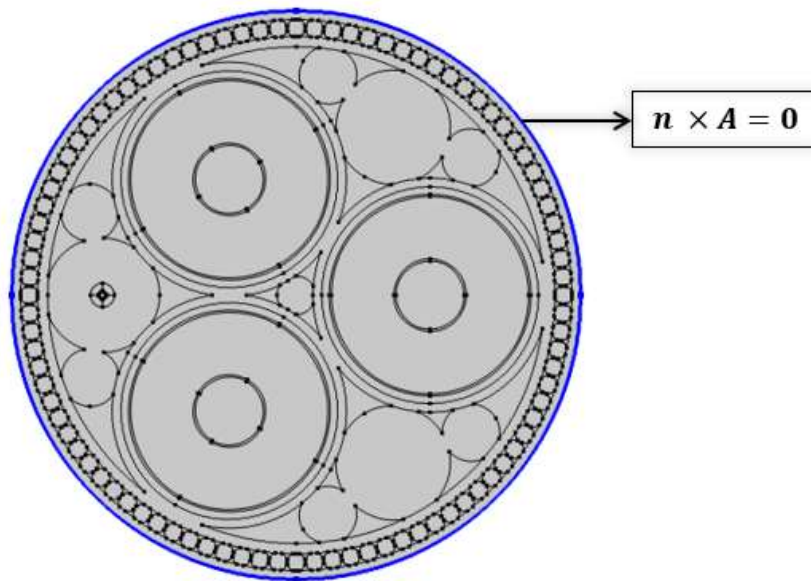
De modo a obter a matriz de impedância e extrair as resistências e indutâncias por unidade de comprimento referentes à matriz  $[Z_p]$  utilizando uma modelagem numérica, escolheu-se a física *Magnetic Fields* do COMSOL *Multiphysics*.

Após alguns testes realizados observou-se que, para obter um resultado numérico mais próximo do analítico para o cálculo de  $[Z_p]$ , deve-se considerar um domínio eletromagnético de dimensão igual o raio mais externo da tubulação. Com isso, a malha gerada inicialmente utilizada nestas simulações é representada na Figura 118.



**Figura 118 - Malha gerada para fibra óptica do cabo submarino utilizando a configuração Extra Fine, com 79258 elementos de domínio.**

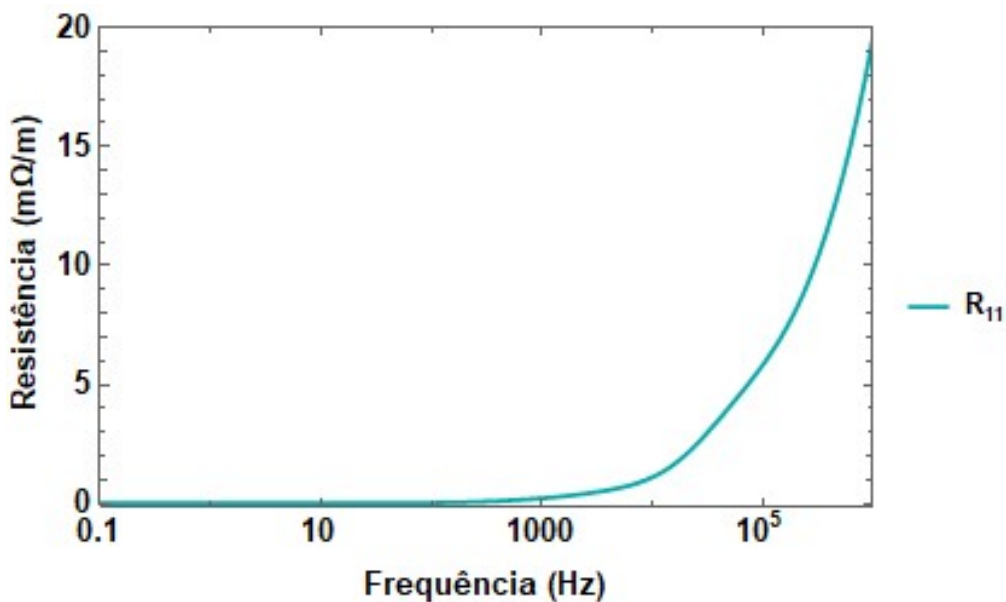
Como condições de contorno atribui-se a condição de isolamento magnética ( $n \times \mathbf{A} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético, ilustrado na Figura 119.



**Figura 119 - Condição de Isolação Magnética aplicada ao limite do domínio eletromagnético.**

De modo a calcular cada elemento da matriz  $[Z_p]$ , é aplicada uma corrente de 1A em um elemento metálico e medida a tensão induzida nesse elemento e nos demais.

Os resultados de resistência interna por unidade de comprimento referentes à matriz  $[Z_p]$  são calculados para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1MHz, ilustrados nas Figuras 120-131.



**Figura 120 - Resistência própria do condutor por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.**

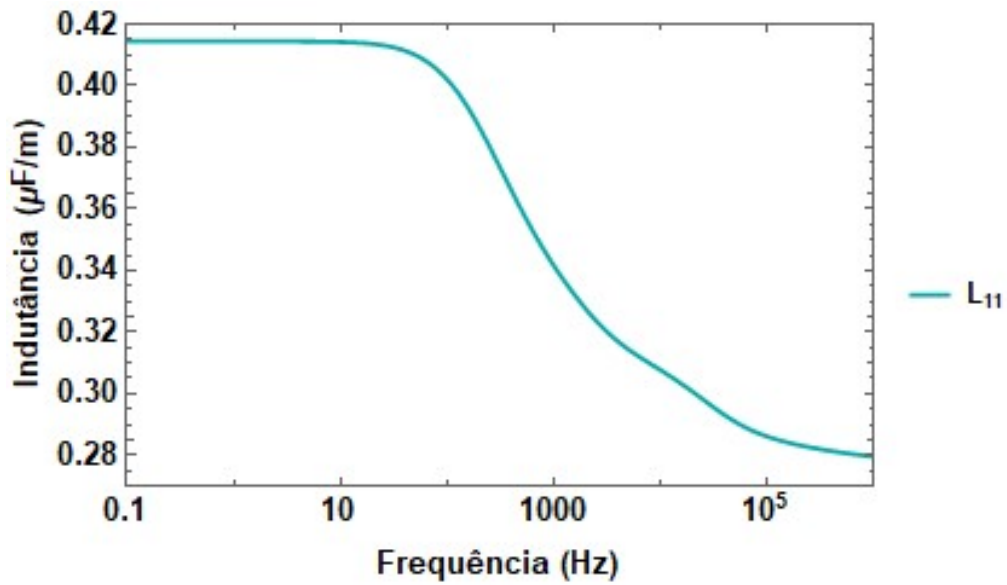


Figura 121 - Indutância própria do condutor por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.

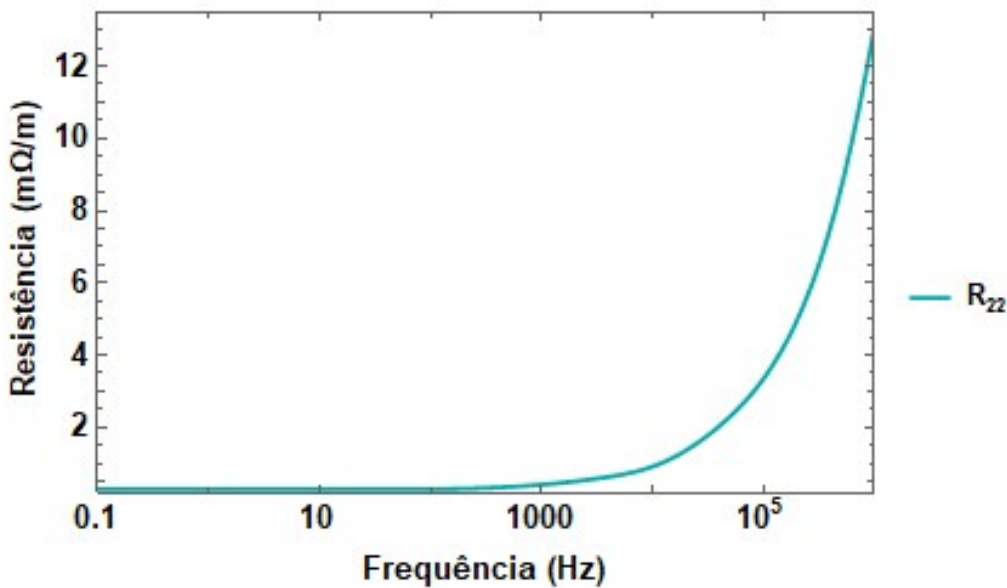


Figura 122 - Resistência própria da blindagem por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.

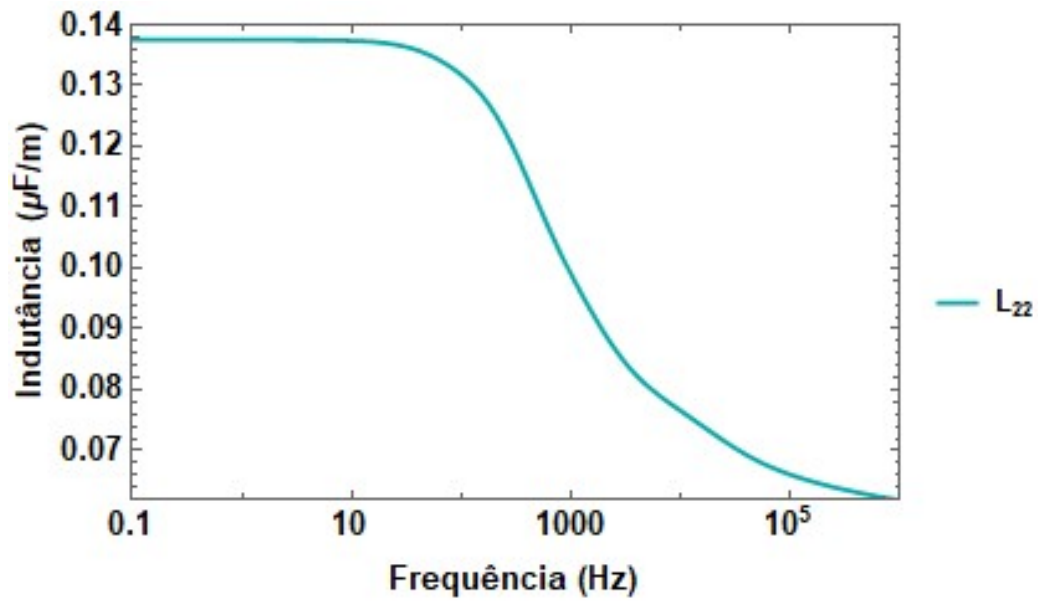


Figura 123 - Indutância própria da blindagem por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.

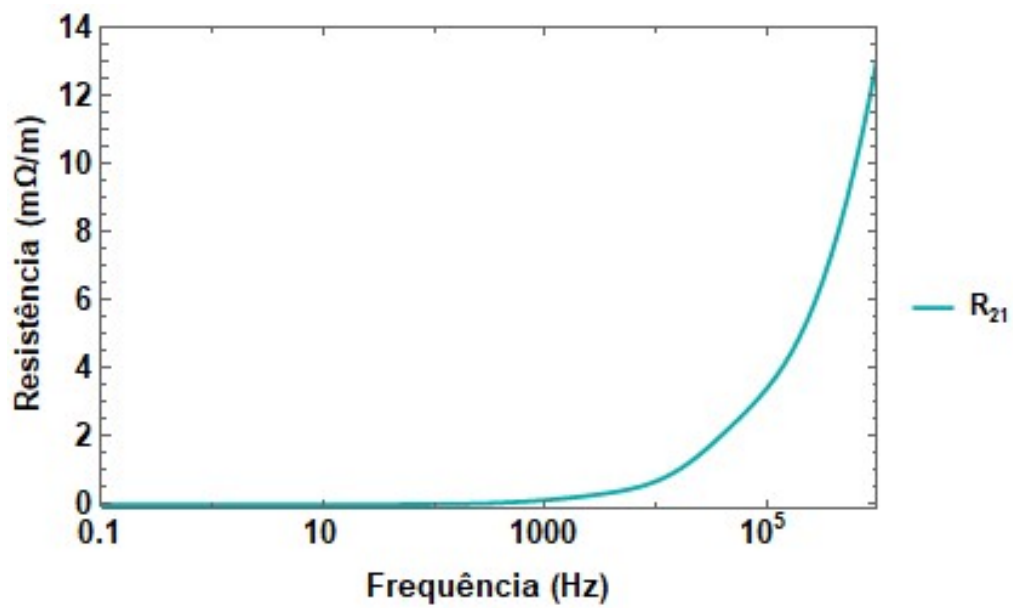


Figura 124 - Resistência mútua entre condutor e blindagem por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.

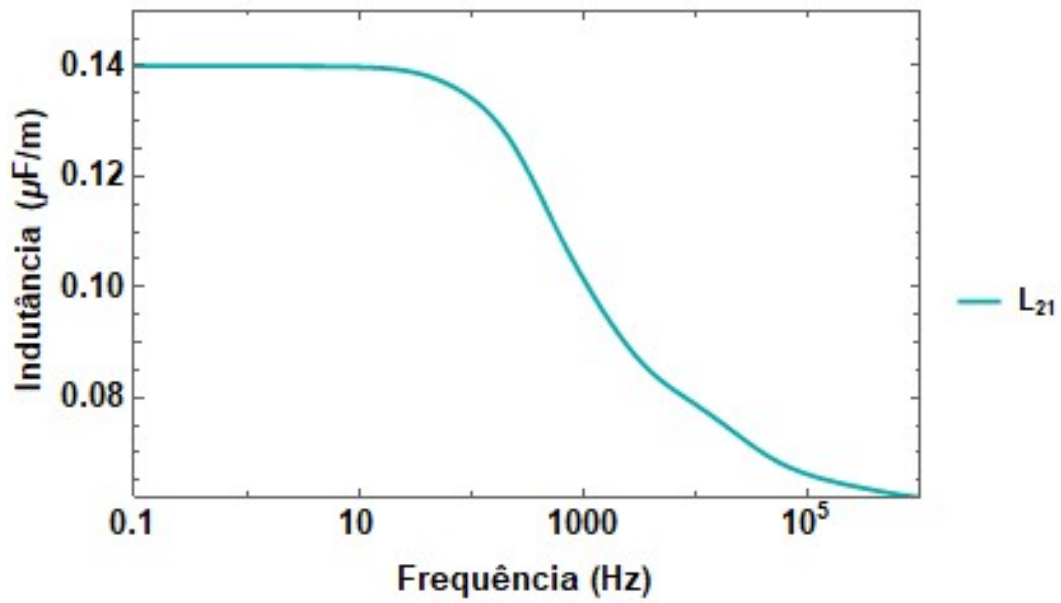


Figura 125 - Indutância mútua entre condutor e blindagem por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.

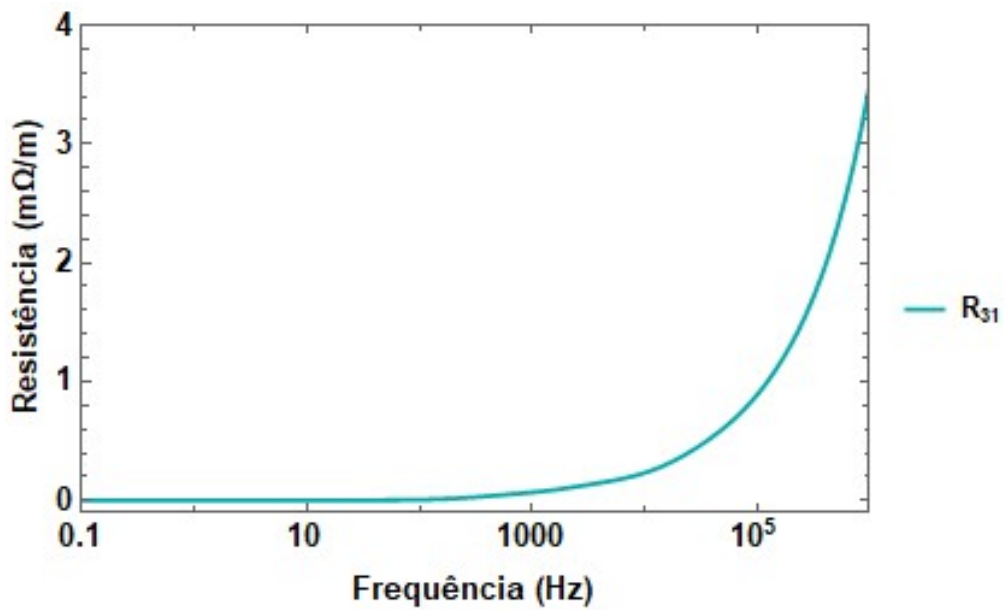


Figura 126 - Resistência mútua entre condutores por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.

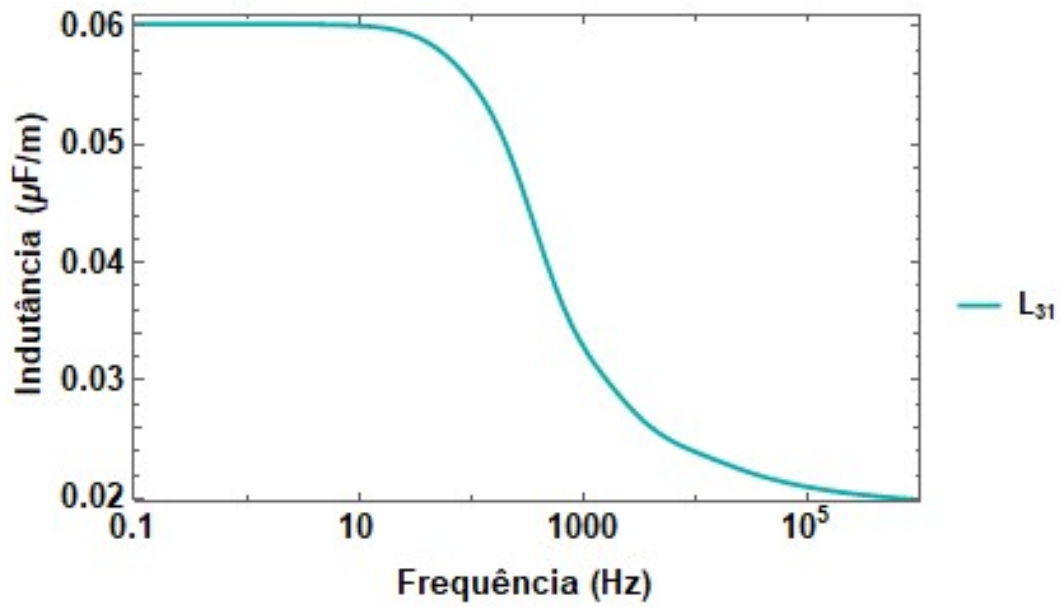


Figura 127 - Indutância mútua entre condutores por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.

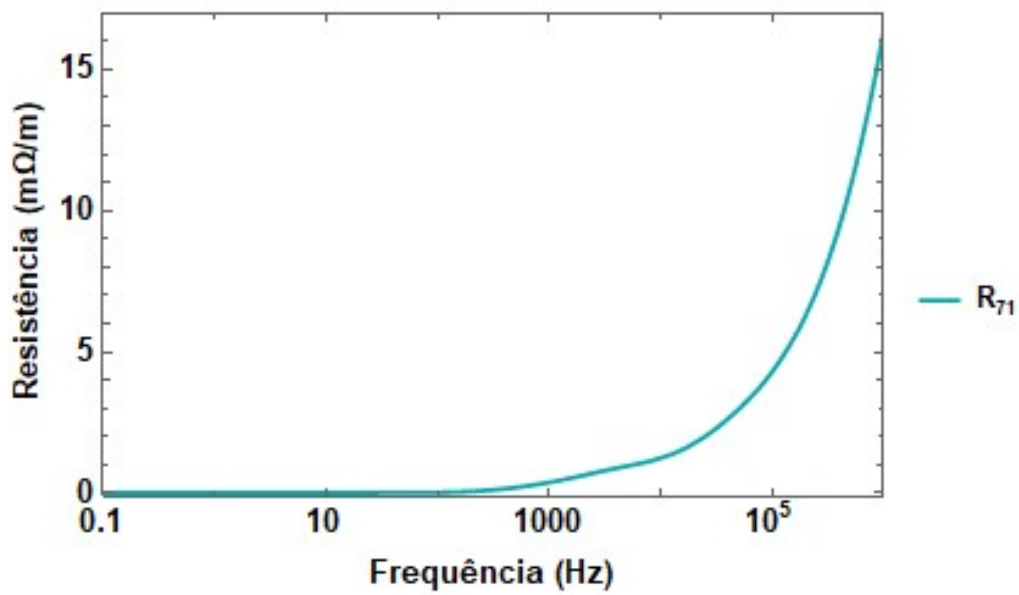


Figura 128 - Resistência mútua entre condutor e blindagem da fibra óptica por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.

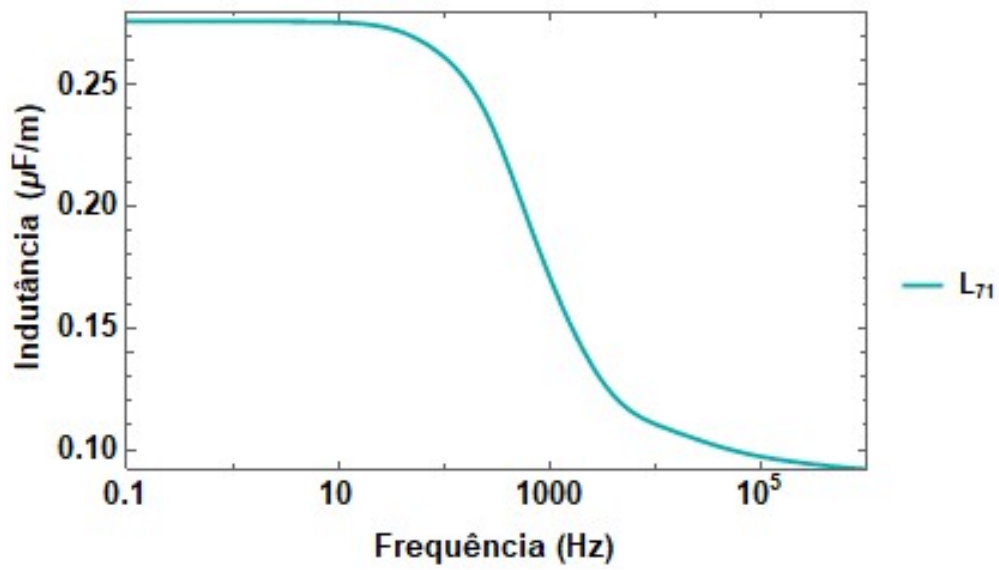


Figura 129 - Indutância mútua entre condutor e blindagem da fibra óptica por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.

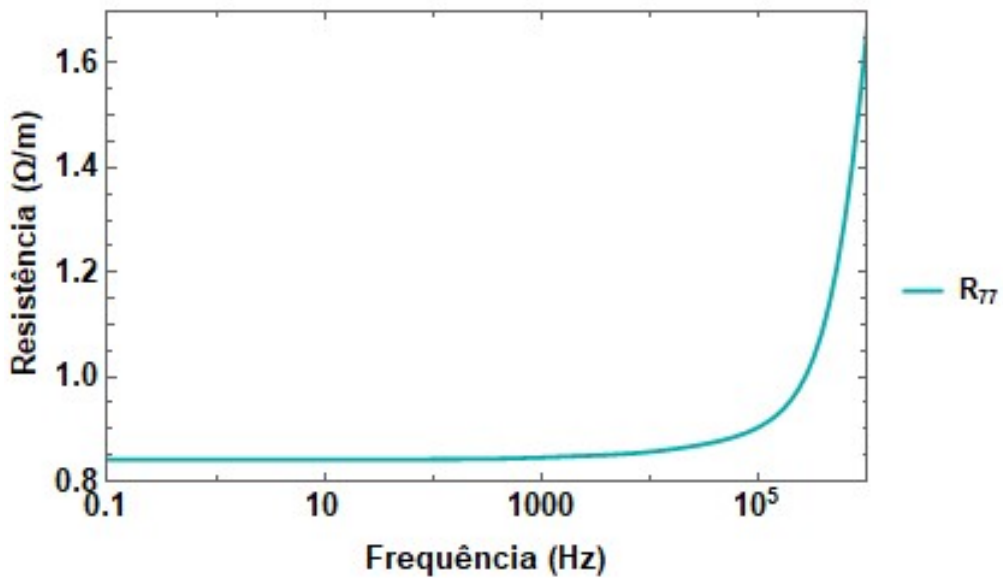
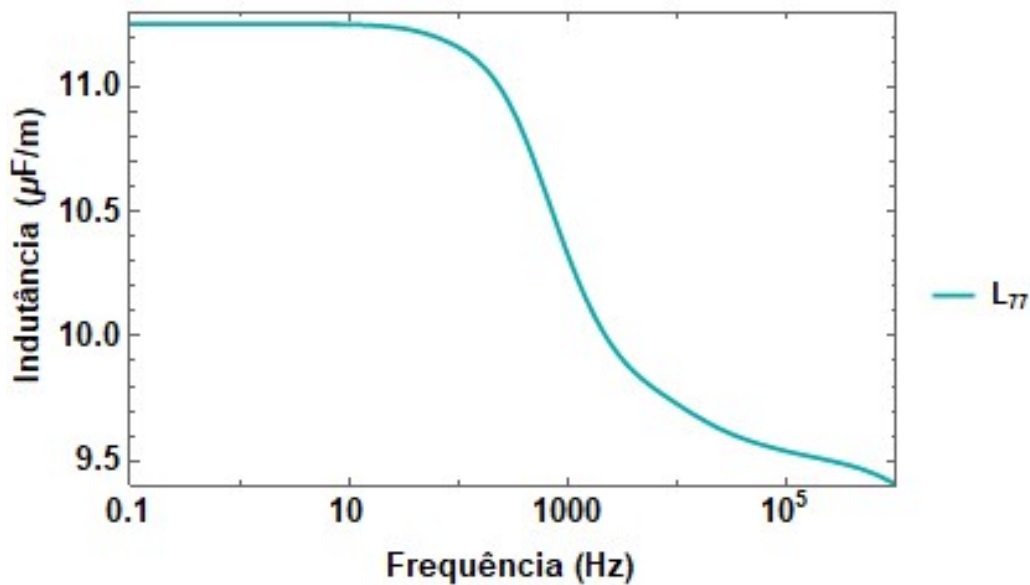


Figura 130 - Resistência própria da blindagem da fibra óptica por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.





**Figura 131 - Indutância própria da blindagem da fibra óptica por unidade de comprimento referente a matriz  $[Z_p]$ , para o cabo submarino.**

### 6.1.2.3 Matriz $[Z_c]$

A matriz  $[Z_c]$  é uma matriz relativa ao acoplamento entre as superfícies interna e externa da armadura. Para o caso estudado, esta matriz pode ser representada pela equação matricial (57).

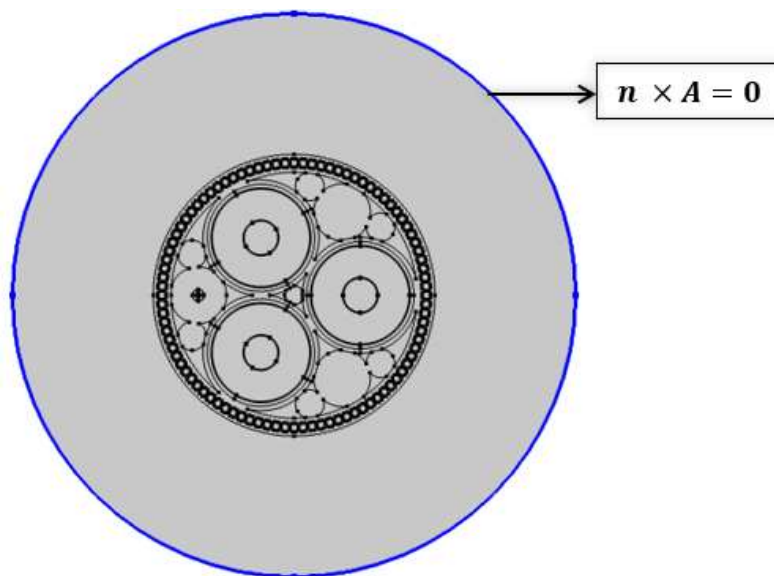
$$[Z_c] = \begin{bmatrix} [Z_{c1}]_{7 \times 7} & [Z_{c2}]_{6 \times 1} \\ [Z_{c2}]_{1 \times 6} & Z_{c3} \end{bmatrix} \quad (57)$$

De modo a obter a matriz de impedância e extrair as resistências e indutâncias por unidade de comprimento referentes à matriz  $[Z_c]$  utilizando uma modelagem numérica, escolheu-se a física *Magnetic Fields* do COMSOL *Multiphysics*.

Para melhor definição do domínio, foram realizados alguns testes observou-se que, para o cálculo de  $Z_{c1}$ , um domínio eletromagnético de dimensão cinquenta vezes o raio mais externo da tubulação é minimamente suficiente para não causar variações significativas nos resultados obtidos. Com isso, na malha gerada, na configuração *Extra Fine*, foram utilizados 100168 elementos de domínio.

Para o cálculo de  $Z_{c2}$  e  $Z_{c3}$ , um domínio eletromagnético de dimensão quarenta vezes o raio mais externo da tubulação é minimamente suficiente para não causar variações significativas nos resultados obtidos. Com isso, na malha gerada, na configuração *Extra Fine*, foram utilizados 100334 elementos de domínio.

Como condições de contorno atribui-se a condição de isolamento magnética ( $n \times \mathbf{A} = 0$ ) ao limite do domínio eletromagnético, ilustrado na Figura 132.



**Figura 132 - Condição de Isolação Magnética aplicada ao limite do domínio eletromagnético.**

De modo a encontrar as impedâncias  $[Z_{c2}]$  e  $[Z_{c3}]$ , é aplicada uma corrente de 1A na armadura e medida a tensão induzida nesse elemento e nos demais. Para o cálculo de  $[Z_{c1}]$ , aplica-se 1A na blindagem de uma das veias de potência e 0A nas demais partes metálicas.

Os resultados foram calculados para 100 pontos de frequência logaritmicamente espaçados entre 0,1Hz e 1 MHz para cada uma das configurações e os resultados das comparações são ilustrados nas Figuras 133-138.

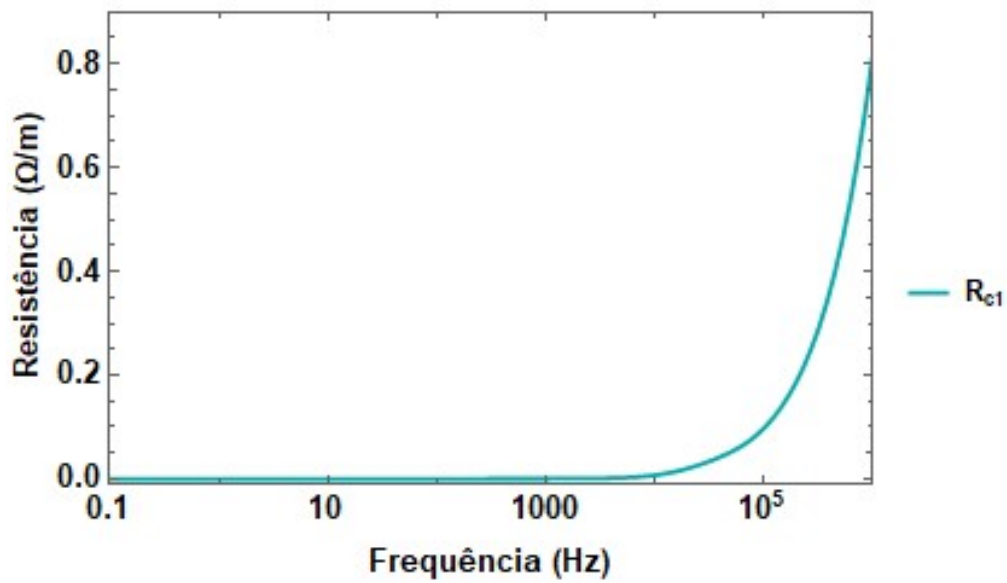


Figura 133 - Resistência referente a matriz  $[Z_{c1}]$ , para o cabo submarino.

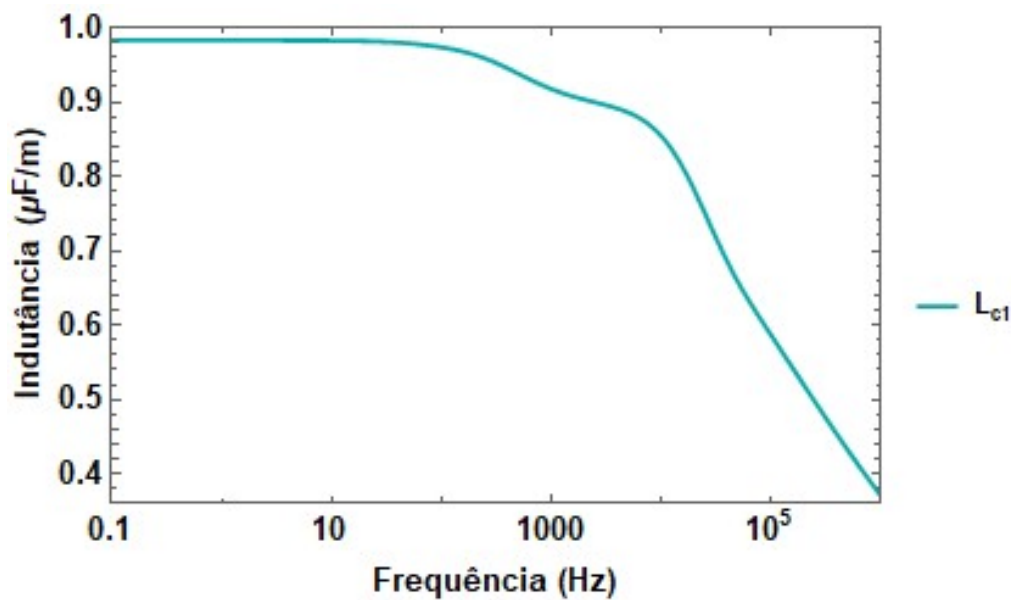


Figura 134 - Indutância referente a matriz  $[Z_{c1}]$ , para o cabo submarino.

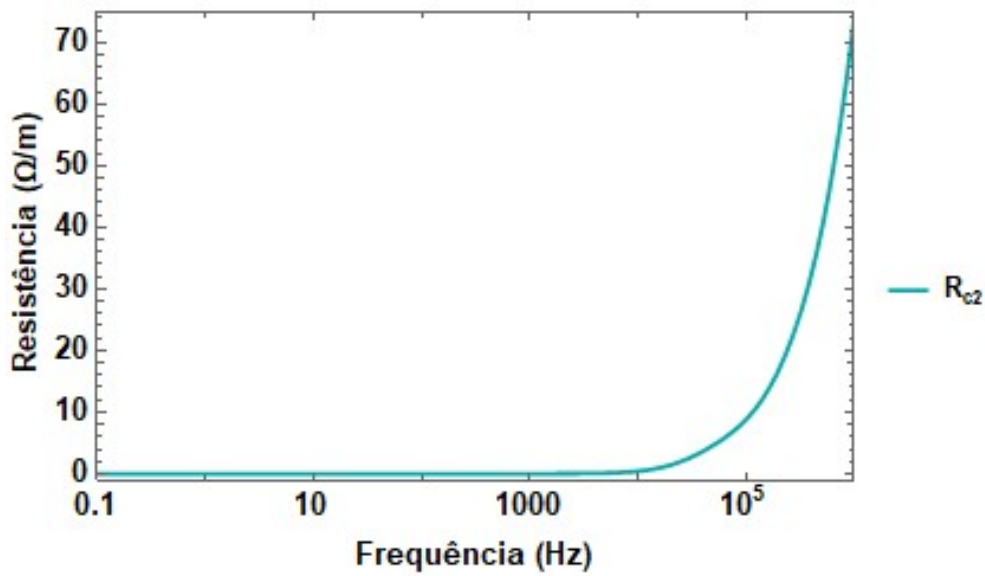


Figura 135 - Resistência referente a matriz  $[Z_{c2}]$ , para o cabo submarino.

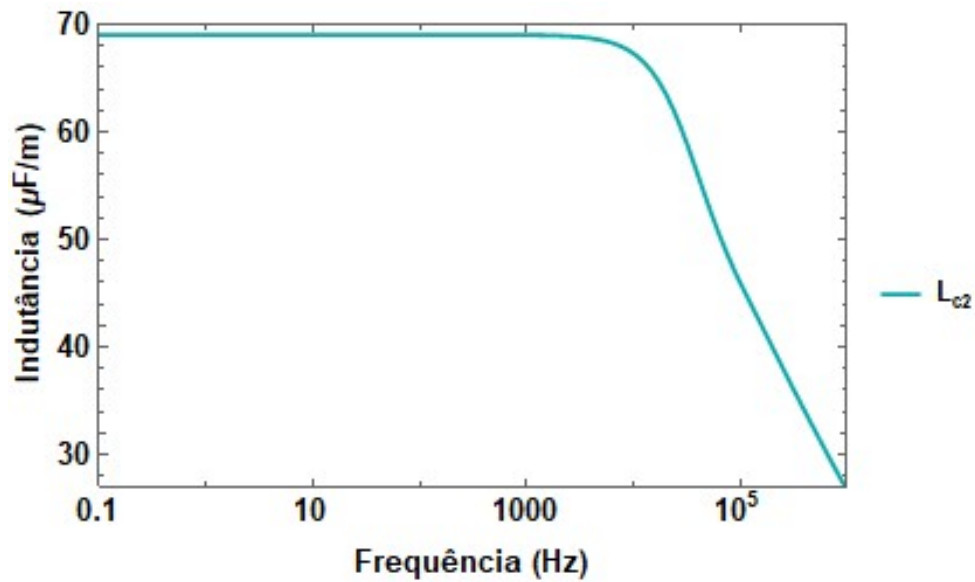


Figura 136 – Indutância referente a matriz  $[Z_{c2}]$ , para o cabo submarino.

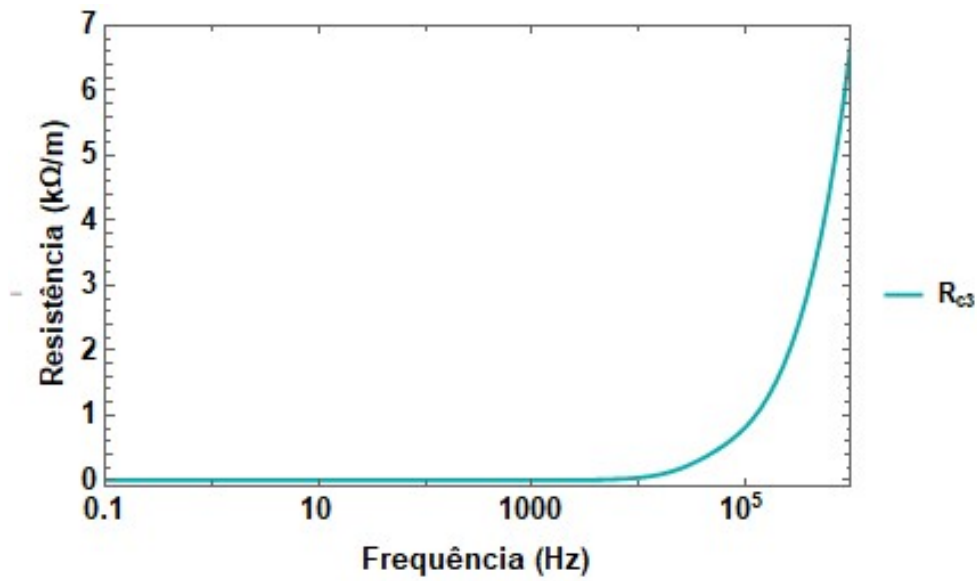


Figura 137 - Resistência referente a matriz  $[Z_{c3}]$ , para o cabo submarino.

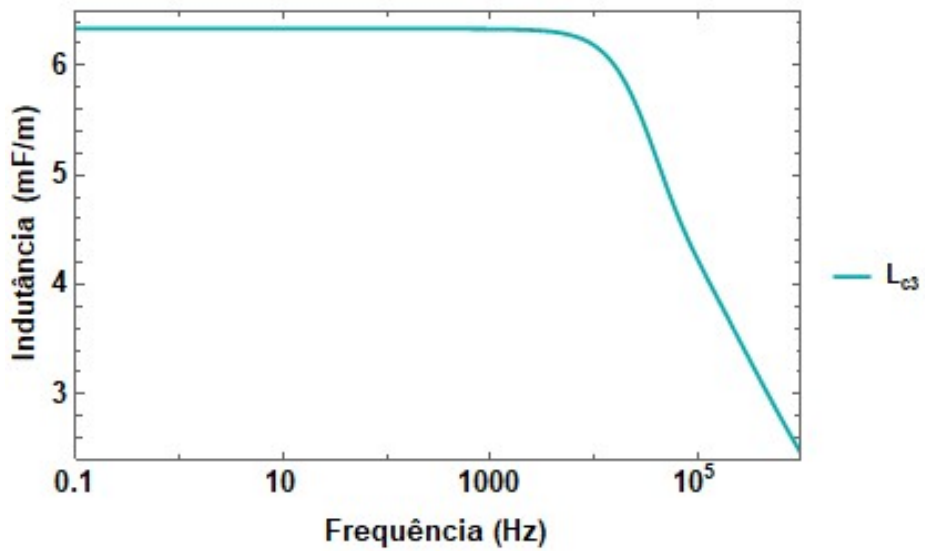


Figura 138 - Indutância referente a matriz  $[Z_{c3}]$ , para o cabo submarino.

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSÃO

### 7.1 Conclusões Gerais

Neste trabalho foram calculadas admitâncias e impedâncias internas de sistemas subterrâneos através da aplicação do Método de Elementos Finitos no *software* COMSOL. A metodologia numérica implementada teve como base comparativa, os resultados analíticos implementados, quando cabível, através das formulações desenvolvidas por AMETANI [2]. Cada submatriz destas formulações foi comparada separadamente para diferentes configurações e tipos de cabos isolados.

As simulações iniciais na faixa de frequência de 0,1Hz a 1MHz apontaram uma limitação na versão 12 do Mathematica quanto ao emprego das funções de Bessel em altas frequências associada a representação numérica usando apenas sistemas de 64 bits. Sendo assim, para explorar novos casos analíticos implementou-se a expansão em série de potências do produto ou razão das funções de Bessel, como discutido em 3.1.5.

O primeiro teste realizado empregou um cabo coaxial monopolar, cujas características são apresentadas no Apêndice C.1. Para capacitância interna foi obtido um resultado bem próximo do analítico com uma diferença percentual máxima de 0,0018%. Para os resultados de resistência própria da blindagem e mútua entre condutor e blindagem, a partir de 270 kHz nota-se um afastamento entre o resultado numérico e analítico. Já para os resultados de indutância, o afastamento ocorre a partir de 440 kHz.

Os resultados iniciais para o cabo coaxial mostraram-se bastante satisfatórios e decidiu-se simular um caso trifásico de cabo em tubulação, cujas veias de potência possuem as mesmas características do cabo coaxial. Foram simuladas três diferentes configurações, variando-se a disposição das veias dentro da tubulação. Metodologias de simulação no *software* COMSOL foram desenvolvidas separadamente para o cálculo de capacitâncias e das matrizes  $[Z_p]$  e  $[Z_c]$ . Quando os resultados numéricos e analíticos para capacitância própria do condutor são comparados observa-se uma diferença percentual de 0,0064% para as três configurações. O mesmo resultado é encontrado para a capacitância mútua

entre condutor e blindagem. Para a capacitância própria da blindagem na Configuração 1 observa-se um erro de 27,19%, 0,046% para Configuração 2 e 35,46% para Configuração 3. Para as demais capacitâncias mútuas, 33,67% para a Configuração 1, 21,99% para a Configuração 3 e 29,86% para a Configuração 3.

Nos resultados de resistência extraídos da matriz  $[Z_p]$ , a partir de 2,4 kHz nota-se um afastamento entre o resultado numérico e analítico. Já para os resultados de indutância, o afastamento ocorre até 10 Hz para os cálculos de indutância própria do condutor, da blindagem e mútua entre condutor e blindagem e até 210 Hz para as demais indutâncias mútuas. Para os resultados de resistência extraídos da matriz  $[Z_c]$ , a partir de 2,4 kHz nota-se um afastamento entre o resultado numérico e analítico. Já para os resultados de indutância, as curvas possuem um erro máximo de 17,12% para  $[L_{c1}]$ , 24,11% para  $[L_{c2}]$  e 36,46% para  $[L_{c3}]$ .

Quando os resultados para as três configurações são comparados nota-se que os valores de resistência extraídos da matriz  $[Z_p]$ , a partir de 1 kHz, as resistências calculadas referente a Configuração 3 tem um crescimento elevado, atingindo para a 1 MHz um valor de aproximadamente 0,016  $\Omega/m$  para a resistência própria do condutor, 0,014  $\Omega/m$  para a resistência própria da blindagem e 0,013  $\Omega/m$  para a resistência mútua entre condutor e blindagem. Outro comportamento observado é o das demais resistências mútuas na Configuração 1. Entre as frequências de 1kHz a 2 MHz, mantém-se constante e em seguida começa a ter decaimento. Já a indutância não variou expressivamente com a disposição das veias dentro da tubulação. A indutância mútua entre condutor e blindagem na Configuração 3, possui uma variação, diferente das demais configurações, para frequências menores que 10 Hz. Deve-se lembrar que na referida configuração, a blindagem do condutor 1 fica próximo da armadura. Sendo assim, para a faixa de frequência mencionada, o comportamento observado para indutância foi um crescimento até 10Hz e em seguida decaimento se aproximando do comportamento das demais configurações.

Em seguida, decidiu-se simular um caso de cabo multifilar considerando um condutor redondo normal de sete filamentos e compará-lo com um condutor redondo sólido, Além disso, decidiu-se verificar o efeito da camada semicondutora na admitância e impedância interna. Foram desenvolvidos três tipos diferentes de configurações e aplicando uma camada semicondutora em duas das configurações. Primeiramente,

observou-se que assim como no caso analítico apresentado por AMETANI [3], a camada semicondutora não possui influência significativa nos resultados extraídos da matriz de impedância. Já na matriz de capacitância, tem seus valores aumentados com a inserção da camada semicondutora

Outro aspecto analisado no caso de cabo multifilar foi o desenvolvimento de modelos analíticos equivalentes utilizando condutor sólido. As simulações foram realizadas para extrair a matriz  $[Z_i]$  de cada modelo. Utilizando um condutor de mesma condutividade e área igual ao somatório das áreas dos sete filamentos apresentou para a capacitância própria do condutor possui uma diferença percentual de 23,4% e para as demais capacitâncias mútuas, observa-se uma diferença percentual de 32,93%. Já um condutor de resistividade  $1.33 \times 10^{-8}$ , observa-se uma diferença percentual de 13,9% para capacitância própria do condutor e 19,47% para as demais capacitâncias mútuas.

O último estudo realizado neste trabalho foi utilizando um cabo do tipo umbilical, utilizado em sistemas de transmissão não convencional, como por exemplo na alimentação de plataformas de petróleo e outras aplicações industriais onde estão conjugados cabos de controle, telecomunicação, cabos estruturais entre outros. A modelagem analítica de um sistema com estas características é bem desafiadora devido a composição com diferentes elementos. Neste cenário a utilização do MEF torna a análise dos parâmetros internos viável e utilizando a metodologia de simulação desenvolvida neste trabalho, a influência de cada elemento que compõe o cabo umbilical nas matrizes de capacitância e impedância pode ser analisada.

Pode-se concluir então que é possível obter resultados satisfatórios de cálculo de parâmetros internos através do MEF para cabos isolados, desde que sejam observadas as faixas de frequência na qual a metodologia é melhor aplicada e refino necessário da malha para cada caso. Adicionalmente, deve-se considerar que a aplicação do MEF é uma complementação dos métodos analíticos, agregando informações mais detalhadas e possibilitando análise de outros parâmetros e problemas físicos.

## 7.2 Trabalhos Futuros

De modo a dar continuidade a pesquisa realizada, é listado aqui algumas sugestões de aplicação e aprimoramento das formulações:



- Definição de malhas específicas para cálculo de admitâncias e impedâncias internas;
- Validação dos resultados analíticos e numéricos a partir de comparação com resultados experimentais;
- Desenvolvimento de metodologias específicas que utilizam em conjunto formulações analíticas e numéricas;
- Investigação e mitigação das possíveis causas das discrepâncias entre os resultados calculados por elementos finitos e aqueles obtidos pelo modelo analítico adaptado para a faixa de frequências considerada utilizando a versão 12 do Mathematica;
- Cálculo de solicitações mecânicas e térmicas durante curtos-circuitos para diferentes configurações de cabos em tubulação aqui apresentadas e análise da proximidade com a armadura;
- Análise do efeito de temperatura nos cabos umbilicais;
- Análise da disposição geométrica para cabos umbilicais com mais de um grupo trifásico; e
- Aplicação de outros métodos numéricos, como por exemplo o MoM-SO.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADERALDO, S. A. Desenvolvimento de Software para dimensionamento de Cabos Isolados de Parques Eólicos, Considerando Critérios Técnico e Econômico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, 2017.
- [2] AMETANI, A. “A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-99, n. 3, pp. 902–910, jun. 1980.
- [3] AMETANI, A., MIYAMOTO, Y., NAGAOKA, N., “Semiconducting layer impedance and its effect on cable wave-propagation and transient characteristics,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1523–1531, Oct 2004.
- [4] AMETANI, A., OHNO, T., NAGAOKA, N., Cable System Transients Theory, Modeling and Simulation. IEEE, 2015.
- [5] ANGELO, Impedance and Admittance Calculations of a Three-Core Power Cable by Finite Element Method.
- [6] ARIZON, P., DOMMEL, H. W. “Computation of Cable Impedances Based on Subdivision of Conductors”, IEEE Transactions on Power Delivery, v. PWRD-2, n. 1, pp. 21–27, jan. 1987.
- [7] CIGRE. Cable Systems Electrical Characteristics. Brochura Técnica 531, CIGRE WG B1.30, 2013.
- [8] COMSOL. AC/DC Module User’s Guide. 2015.
- [9] COMSOL. Cable Tutorial Series. 2017.
- [10] COMSOL. COMSOL Multiphysics Reference Guide. 2011.
- [11] COMSOL. RF Module User’s Guide. 2012.
- [12] GUSTAVSEN, B., BRUASET, A., BREMMES, J. J., HASSEL, A. “A Finite-Element Approach for Calculating Electrical Parameters of Umbilical Cables”. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 24, i. 4, oct. 2009.

- [13] HAFNER, A. A. Contribuição à Modelagem Analítica e Numérica de Cabos de Potência Tripolares. Tese de D.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2016.
- [14] HAFNER, A. A., DA LUZ, M. V. F., CARPES JR., W. P., et al. “Aplicação do Método de Elementos Finitos no Cálculo da Impedância Distribuída em Cabos de Potência Tripolares”, 16 SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11 CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, v. MOMAG 2014, pp. 228–233, ago./set. 2014.
- [15] LORENZO, E. “The Maxwell Capacitance Matrix”, pp. 1-3, 2011.
- [16] MANHÃES, R. S. T. Formulação e Cálculo dos Parâmetros Elétricos de um Sistema de Cabos em Função da Frequência. Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil, 1992.
- [17] PATEL, U. R., TRIVERIO, P., “Accurate impedance calculation for underground and submarine power cables using mom-so and a multilayer ground model,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2015.
- [18] PERCEBON, L. A. Cálculo de Parâmetros Elétricos Série de Cabos Umbilicais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2013.
- [19] PRYSMIAN. Cabos de Energia: construção e dimensionamento. Santo André, 2012. Disponível em: [http://br.prysmiangroup.com/br/files/Cabos\\_en\\_construcao\\_dimens.pdf](http://br.prysmiangroup.com/br/files/Cabos_en_construcao_dimens.pdf). Acesso em: 20 de junho de 2019.
- [20] ROCHA, P. E. D. Modelagem de Cabos Subterrâneos e Submarinos para Estudos de Transitórios. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [21] SANTOS, A. A. S., PINHEIRO, A. C. N., LIMA, A. C. S., et al. “Segmentation Issues in a Horizontal Buried Cable Considering Frequency Dependent Soil Models”, 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), v. IEEE, n. 361, mai. 2018.
- [22] SANTOS, A. A. S. Cálculo de Parâmetros Externos Unitários de Sistemas de Transmissão Subterrâneos por Meio do Método dos Elementos Finitos. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019.

[23] SILVA, J. C. L. V. Estimação dos Parâmetros Elétricos de Cabos de Potência Submarinos Considerando Meios Dispersivos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

[24] SOUZA, W. L. de. Cálculo de Parâmetros de Cabos Isolados por meio da Análise de Elementos Finitos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2015.

[25] WEDEPOHL, L.; WILCOX, D., “Transient analysis of underground powertransmission system - System model and wave propagation characteristics,” Proc. of the Institution of Electrical Engineers, vol. 120, no. 2, pp. 253-260, 1973.

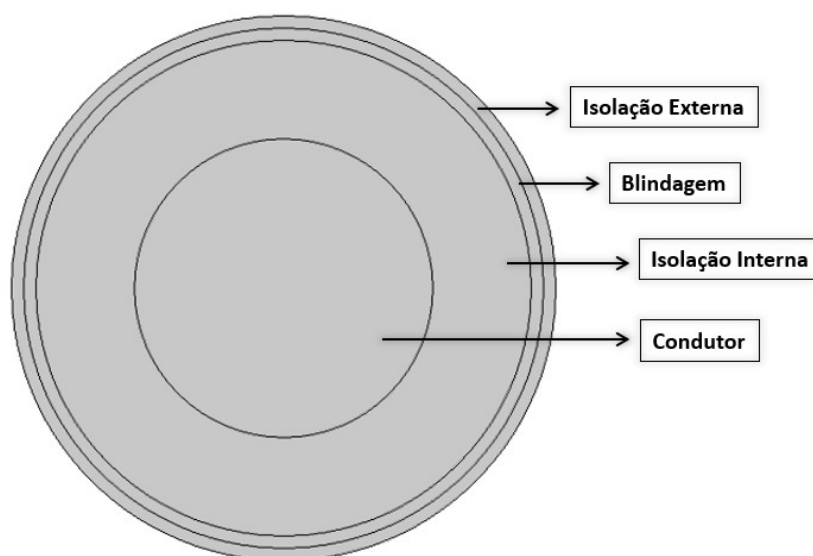
[26] YIN, Y. Calculation of Frequency-Dependent Parameters of Underground Power Cables with Finite Element Method. Tese de Ph.D., The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1990.

[27] YIN, Y., DOMMEL, H. W. “Calculation of Frequency-Dependent Parameters of Underground Power Cables with Finite Element Method”, IEEE Transactions on Magnetics, v. 25, n. 4, pp. 3025–3027, jul. 1989.

# Apêndice A

## Cálculo da Matriz de Impedância Interna para um Cabo Coaxial

Considere um cabo coaxial constituído por um condutor central, isolamento interna, blindagem e isolamento externa, como ilustrado na Figura 139.



**Figura 139 – Cabo Coaxial.**

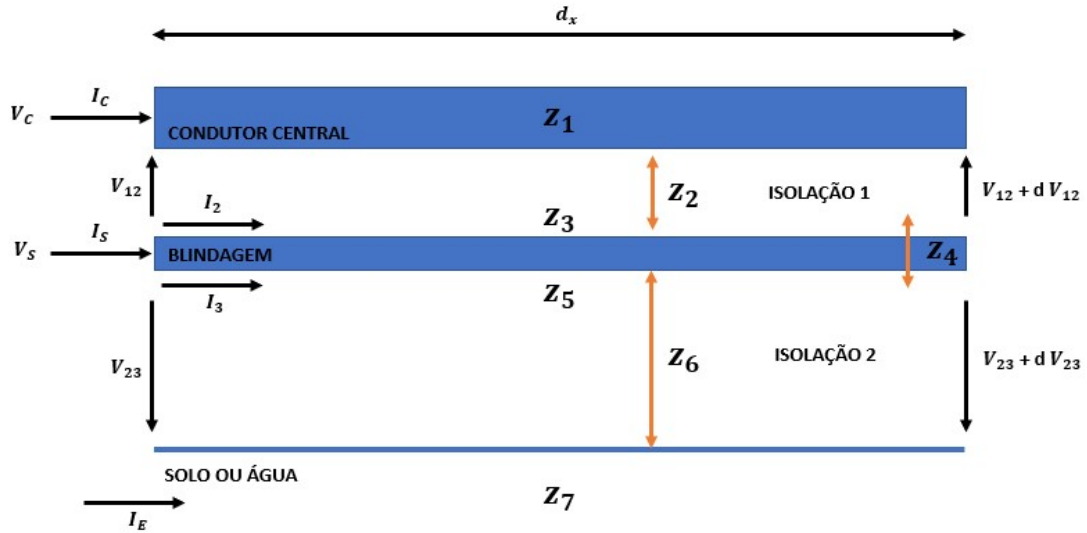
Como discutido em [8] e [14], neste tipo de cabo tensões induzidas entre as superfícies condutoras são estabelecidas originando loops de corrente entre essas superfícies. Com isso, estabelecem-se malhas de corrente fluindo pelo condutor central e retornando pela blindagem, e o outro fluindo pela blindagem e retornando pelo solo.

As malhas de corrente existentes entre as superfícies condutoras podem ser descritas por um sistema matricial de equações. Tal sistema permite descrever cada uma das tensões e correntes existente em função das impedâncias e admitâncias do sistema. Com os dados de impedância e admitância entre os elementos constituintes de um cabo, podem ser obtidos os parâmetros elétricos do mesmo tais como resistência, indutância, capacitância e condutância, fundamentais para análise sistêmica e foco deste trabalho.

Conforme descrito na Figura 140, considere  $I_C$ ,  $I_S$  e  $I_E$  as correntes que circulam no condutor, blindagem, e meio externo, respectivamente, e  $I_2$  a corrente que circula na

superfície interna da blindagem,  $I_3$  a corrente que circula na superfície externa da blindagem. Analisando o sentido das correntes, pode-se observar que:

$$\begin{cases} I_2 = -I_C \\ I_3 = -I_E \end{cases} \quad (58)$$



**Figura 140 – Circuito com as impedâncias equivalentes de um cabo coaxial.**

Pode-se deduzir as seguintes equações:

$$\begin{cases} I_S = I_2 + I_3 = -(I_C + I_E) \\ I_E = -(I_C + I_S) \end{cases} \quad (59)$$

Considerando a tensão do meio externo como referência, ( $V_E = 0$ ), pode-se observar que:

$$\begin{cases} V_S = -V_{23} \\ V_C = -V_{12} + V_S \end{cases} \quad (60)$$

Multiplicando ambos os lados da equação (60) por  $-\left(\frac{\Delta}{\Delta x}\right)$ , tem-se:

$$\begin{cases} -\frac{\Delta V_S}{\Delta x} = \frac{\Delta V_{23}}{\Delta x} \\ -\frac{\Delta V_C}{\Delta x} = \frac{\Delta V_{12}}{\Delta x} - \frac{\Delta V_S}{\Delta x} \end{cases} \quad (61)$$

Analisando o laço referente à corrente que circula pelo condutor central e retorna pela blindagem, tem-se:

$$V_{12} = Z_1 \cdot \Delta x \cdot I_C - Z_2 \cdot \Delta x \cdot I_2 - Z_3 \cdot \Delta x \cdot I_2 - Z_4 \cdot \Delta x \cdot I_3 + V_{12} + \Delta V_{12} \quad (62)$$

$$\therefore -\Delta V_{12}/\Delta x = (Z_1 + Z_2 + Z_3) \cdot I_C + Z_4 \cdot I_E$$

Analisando o laço referente à corrente que circula na blindagem e retorna pelo solo, tem-se:

$$-\Delta V_{23}/\Delta x = (Z_5 + Z_6 + Z_7) \cdot I_C + Z_4 \cdot I_C \quad (63)$$

Substituindo as equações (62) e (63) nas equações (60) e (61), tem-se:

$$-\Delta V_s/\Delta x = (Z_5 + Z_6 - Z_7 - Z_4) \cdot I_C + (Z_5 + Z_6 + Z_7) \cdot I_s \quad (64)$$

$$\begin{aligned} -\Delta V_c/\Delta x &= (Z_1 + Z_2 - Z_3 + Z_5 + Z_6 + Z_7 - 2Z_4) \cdot I_C \\ &+ (Z_5 + Z_6 + Z_7 - Z_4) \cdot I_s \end{aligned} \quad (65)$$

A partir das equações (64) e (65) e com  $x \rightarrow 0$ ,

$$d(V)/dx = -[Z] \cdot (I) \quad (66)$$

onde a matriz  $[Z]$  é dada por:

$$[Z] = [Z_i] + [Z_0] \quad (67)$$

As matrizes do lado direito da equação (67) são dadas por:

$$[Z_i] = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_6 - 2Z_4 & Z_5 + Z_6 - Z_4 \\ Z_5 + Z_6 - Z_4 & Z_5 + Z_6 \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$[Z_0] = \begin{bmatrix} Z_7 & Z_7 \\ Z_7 & Z_7 \end{bmatrix} \quad (69)$$

Conforme desenvolvido por AMETANI [2] e estudado por SILVA [23], cada elemento da matriz de impedância interna  $[Z_i]$  pode ser calculado através das equações descritas abaixo:

$$\begin{aligned}
Z_1 &= \frac{\gamma_c [I_0(r_c \gamma_c)]}{2\pi \sigma_c r_c I_c(r_c \gamma_c)} \\
Z_2 &= \frac{j\omega \mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{bi}}{r_c}\right) \\
Z_3 &= \frac{\gamma_b \left[ \frac{I_0(\gamma_b r_{bi}) K_1(\gamma_b r_{be}) + K_0(\gamma_b r_{bi}) I_1(\gamma_b r_{be})}{2\pi r_{bi} [I_1(\gamma_b r_{be}) K_1(\gamma_b r_{bi}) - I_1(\gamma_b r_{bi}) K_1(\gamma_b r_{be})]} \right]}{\sigma_b} \\
Z_4 &= \frac{1}{\sigma_b 2\pi r_{bi} r_{be} [I_1(\gamma_b r_{be}) K_1(\gamma_b r_{bi}) - I_1(\gamma_b r_{bi}) K_1(\gamma_b r_{be})]} \\
Z_5 &= \frac{\gamma_b \left[ \frac{I_0(\gamma_b r_{be}) K_1(\gamma_b r_{bi}) + K_0(\gamma_b r_{be}) I_1(\gamma_b r_{bi})}{2\pi r_{be} [I_1(\gamma_b r_{be}) K_1(\gamma_b r_{bi}) - I_1(\gamma_b r_{bi}) K_1(\gamma_b r_{be})]} \right]}{\sigma_b} \\
Z_6 &= \frac{j\omega \mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{ce}}{r_{be}}\right)
\end{aligned} \tag{70}$$

Nas quais,  $Z_1$  é devido ao campo elétrico que se estabelece na superfície do condutor pela passagem de corrente no mesmo,  $Z_2$  é devido à variação do campo magnético na primeira camada isolante,  $Z_3$  é devido ao campo elétrico que se estabelece na superfície interna da blindagem pela passagem de corrente na mesma,  $Z_4$  é devido ao campo elétrico que se estabelece na superfície interna da blindagem pela passagem de corrente na superfície externa,  $Z_5$  é devido ao campo elétrico que se estabelece na superfície externa da blindagem pela passagem de corrente na mesma e  $Z_6$  é devido à variação do campo magnético na segunda camada isolante. Além disso,  $r_c$  é o raio do condutor central,  $\gamma_c$  é a constante de propagação do condutor central,  $r_{bi}$  é o raio interno da blindagem e  $r_{be}$  é o raio externo da blindagem.



## Apêndice B

### Cálculo da Matriz de Admitância Interna para um Cabo Coaxial

Considere o mesmo cabo enterrado, cujo corte transversal foi apresentado na Figura 139 do Apêndice A e o circuito equivalente da Figura 141.

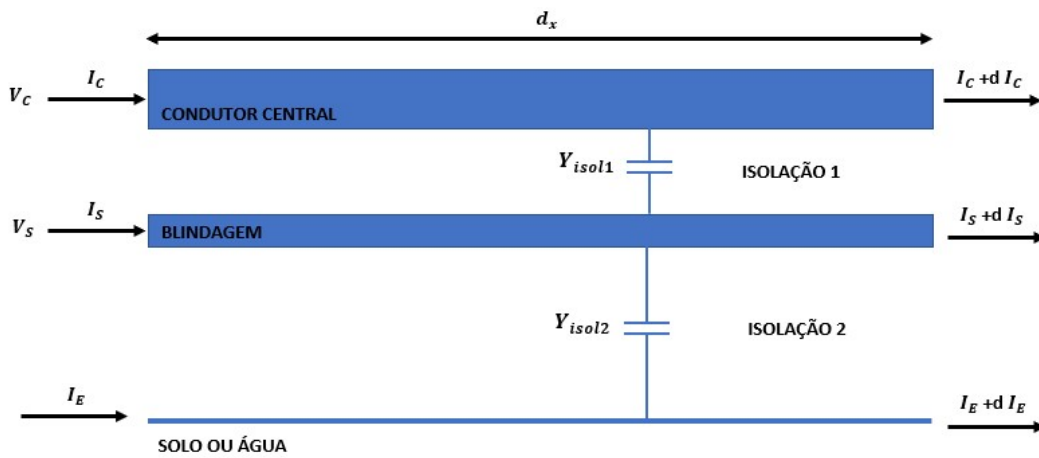


Figura 141 – Circuito com admitâncias equivalentes de um cabo coaxial.

Pode-se equacionar as seguintes relações para as correntes do condutor e blindagem:

$$\begin{aligned} I_c &= Y_{isol1} \Delta x (V_c - V_s) + I_c + \Delta I_c \\ I_s &= Y_{isol2} \Delta x (V_s - V_c) + I_s + \Delta I_s \end{aligned} \quad (71)$$

Reescrevendo as equações descritas em (71), tem-se:

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta I_c}{\Delta x} &= Y_{isol1} V_c - Y_{isol1} V_s \\ -\frac{\Delta I_s}{\Delta x} &= -Y_{isol2} V_c + (Y_{isol1} + Y_{isol2}) V_s \end{aligned} \quad (72)$$

Com  $x \rightarrow 0$  em (72), tem-se a seguinte equação matricial:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} I_c \\ I_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{isol1} & -Y_{isol1} \\ -Y_{isol1} & (Y_{isol1} + Y_{isol2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ V_s \end{bmatrix} = -[Y_i](V) \quad (73)$$

onde  $[Y_i]$  é a matriz de admitância interna. Como demonstrado por AMETANI [4], os elementos dessa matriz podem ser calculados através das seguintes equações:

$$Y_{isol1} = \frac{s2\pi\epsilon_0\epsilon_{i1}}{\ln(r_3/r_2)}$$

$$Y_{isol2} = \frac{s2\pi\epsilon_0\epsilon_{i2}}{\ln(r_5/r_4)} \quad (74)$$

onde  $\epsilon$  representa a permissividade dos meios.

Através da matriz de admitâncias pode ser extraída a matriz de potenciais de Maxwell, pois:

$$P_i = Y_i^{-1} \quad (75)$$

Com isso, tem-se:

$$[P_i] = \begin{bmatrix} P_c + P_s & P_s \\ P_s & P_s \end{bmatrix} \quad (76)$$

Sendo  $P_c$  o coeficiente de potencial do condutor central e  $P_s$  o coeficiente de potencial da blindagem.

# APÊNDICE C

## MODELAGEM DOS CASOS NO SOFTWARE COMSOL *MULTIPHYSICS*

Este apêndice apresenta os dados utilizados para construção da geometria, materiais e construção da malha aplicados na modelagem de cabos isolados no software COMSOL *Multiphysics* para o cálculo de impedâncias e admitâncias internas.

### C.1 CABO COAXIAL

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos por meio do MEF com os resultados obtidos através da aplicação de formulações analíticas, um cabo coaxial foi objeto de estudo no Capítulo 4. Este cabo é composto de quatro elementos: condutor central, isolamento interna, blindagem e isolamento externa.

#### C.1.1 CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA E DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

A geometria do cabo coaxial foi construída utilizando o modelo bidimensional do COMSOL *Multiphysics* e dados extraídos da tese de YIN[26], como pode ser observado na Tabela 3.

**Tabela 3 - Dados da Geometria [26].**

Raio do Condutor Central	$r_c = 24.25mm$
Raio da Isolação Interna	$r_{int} = 40.25mm$
Raio da Blindagem	$r_b = 42.25mm$
Raio da Isolação Externa	$r_{ext} = 44.25mm$

Os materiais foram definidos para cada domínio criado e são ilustrados na Tabela 4. É válido mencionar que o COMSOL *Multiphysics* permite que sejam utilizados tanto materiais já definidos em sua biblioteca quanto criar novos materiais e editá-los, como foi o caso desta dissertação.

**Tabela 4 - Propriedades eletromagnéticas dos materiais [6].**

<b>Condutor Central</b>		<b>Blindagem</b>	
Resistividade	$\rho_c = 29.36 \times 10^{-9} \Omega.m$	Resistividade	$\rho_b = 20.83 \times 10^{-8} \Omega.m$
Permissividade Relativa	$\epsilon_{rc} = 1$	Permissividade Relativa	$\epsilon_{rb} = 1$
Permeabilidade Relativa	$\mu_{rc} = 1$	Permeabilidade Relativa	$\mu_{rb} = 1$
<b>Isolação Interna</b>		<b>Isolação Externa</b>	
Resistividade	$\rho_{int} = 1 \times 10^{14} \Omega.m$	Resistividade	$\rho_{ext} = 1 \times 10^{14} \Omega.m$
Permissividade Relativa	$\epsilon_{rint} = 1$	Permissividade Relativa	$\epsilon_{rext} = 1$
Permeabilidade Relativa	$\mu_{rint} = 1$	Permeabilidade Relativa	$\mu_{rext} = 1$

## C.1.2 MALHA

A construção da malha é um passo importante na rotina de simulação, pois garante a acurácia dos resultados. A escolha do tipo de malha varia de acordo com as particularidades da geometria e do estudo a ser realizado.

Neste caso, tanto para o cálculo de capacitância quanto impedância é necessário que a malha contemple toda a dimensão do cabo. Os dados referentes a configuração Extra Fine são ilustrados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Características da malha.**

<b>CONFIGURAÇÃO EXTRA FINE</b>	
TAMANHO MÁXIMO	0,00177 m
TAMANHO MÍNIMO	$6,64 \times 10^{-6}$ m
TOTAL DE ELEMENTOS DE DOMÍNIO	6558

## C.2 CABO EM TUBULAÇÃO

Três diferentes configurações foram estudadas neste trabalho no Capítulo 4, objetivando o cálculo de parâmetros internos unitários e análise do efeito da proximidade da blindagem com a armadura.

### C.2.1 CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA E DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

Os dados da geometria para as três configurações estão descritos na Tabela 6 e foram baseados no modelo apresentado por YIN [26].

**Tabela 6 - Dados da geometria da tubulação. [26]**

Raio do Enchimento	$r_e = 109.5mm$
Raio da Armadura	$r_a = 115.9mm$
Raio da Capa Externa	$r_{ce} = 120mm$

Os dados dos materiais estão descritos nas Tabelas 4, referente aos cabos monopolares, e 7, referente ao enchimento e tubulação.

**Tabela 7 - Propriedades eletromagnéticas dos materiais. [26] e [9]**

<b>Enchimento</b>		<b>Armadura</b>	
Resistividade	$\rho_e = 1 \times 10^{14} \Omega. m$	Resistividade	$\rho_a = 25.59 \times 10^{-8} \Omega. m$

Permissividade Relativa	$\varepsilon_{r_e} = 2.25$	Permissividade Relativa	$\varepsilon_{r_a} = 1$
Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_e} = 1$	Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_a} = 500$
<b>Capa Externa</b>			
Resistividade	$\rho_{ce} = 1 \times 10^{14} \Omega.m$		
Permissividade Relativa	$\varepsilon_{r_{ce}} = 1$		
Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_{ce}} = 1$		

## C.2.2 MALHA

A malha gerada tanto para o cálculo de capacitância quanto para o cálculo da matriz  $Z_p$ , possui dimensão igual ao raio mais externo do cabo. Os dados de malha referentes a cada configuração são ilustrados nas Tabelas 8-10.

**Tabela 8 - Características da malha para Configuração 1 do Cabo em Tubulação.**

<b>CONFIGURAÇÃO 1 - EXTRA FINE</b>	
TAMANHO MÁXIMO	0,0048 m
TAMANHO MÍNIMO	$1,8 \times 10^{-5}$ m
TOTAL DE ELEMENTOS DE DOMÍNIO	10626

**Tabela 9 - Características da malha para Configuração 2 do Cabo em Tubulação.**

<b>CONFIGURAÇÃO 2 - EXTRA FINE</b>	
TAMANHO MÁXIMO	0,0048 m
TAMANHO MÍNIMO	$1,8 \times 10^{-5}$ m
TOTAL DE ELEMENTOS DE DOMÍNIO	9764

**Tabela 10 - Características da malha para Configuração 2 do Cabo em Tubulação.**

<b>CONFIGURAÇÃO 3 - EXTRA FINE</b>	
TAMANHO MÁXIMO	0,0048 m
TAMANHO MÍNIMO	$1,8 \times 10^{-5}$ m
TOTAL DE ELEMENTOS DE DOMÍNIO	9934

## C.3 CABO MULTIFILAMENTAR

No Capítulo 5 foram abordadas três diferentes configurações de cabos multifilamentados e avaliada a influência da camada semicondutora nos cálculos de impedância e capacitância. Além disso, buscou-se um cabo equivalente composto de um condutor sólido redondo que fosse capaz de representar o cabo filamental.

### C.3.1 CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA E DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

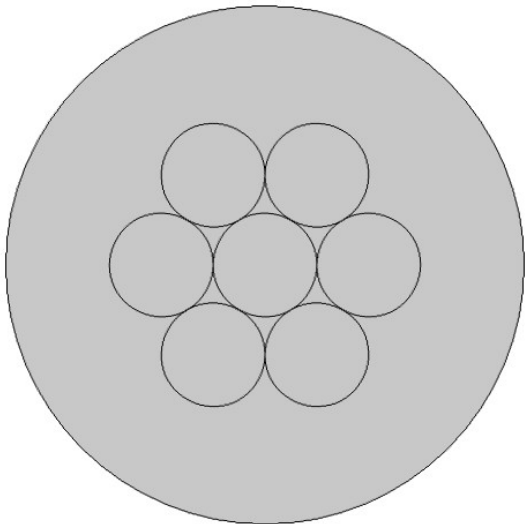
A geometria foi construída baseando-se nos dados presentes em SILVA [23] e são ilustrados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Dados da geometria do Cabo Flor. [23]**

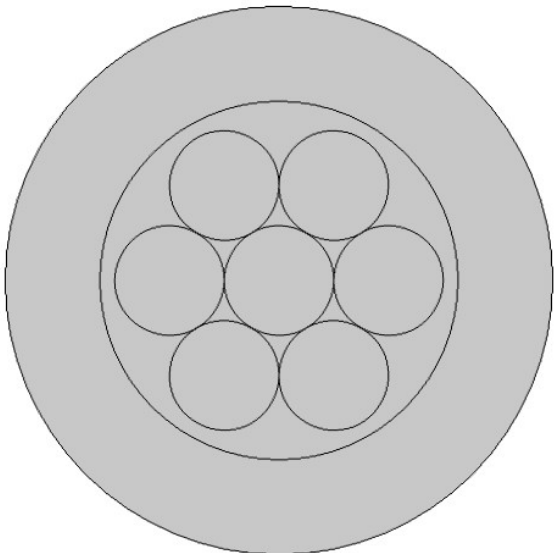
Raio de cada Filamento que compõe o condutor (7 por condutor)	$r_{fil} = 1\text{ mm}$
Raio da Camada Semicondutora na Configuração 2	$r_{sc} = 3.27\text{ mm}$
Espessura da Camada Semicondutora na Configuração 3	$e_{sc} = 0.27\text{ mm}$
Raio da Isolação Interna	$r_i = 5\text{ mm}$
Raio do Enchimento	$r_e = 11.42\text{ mm}$
Raio da Armadura	$r_a = 12.42\text{ mm}$
Raio da Capa Externa	$r_{ce} = 14.42\text{ mm}$

Profundidade do Cabo	$h = 1m$
----------------------	----------

As veias de potência de cada configuração são representadas nas Figuras 145-147. Como pode ser observado nas Figuras 146 e 147, foi inserida uma camada semicondutora variando-se apenas a sua geometria.

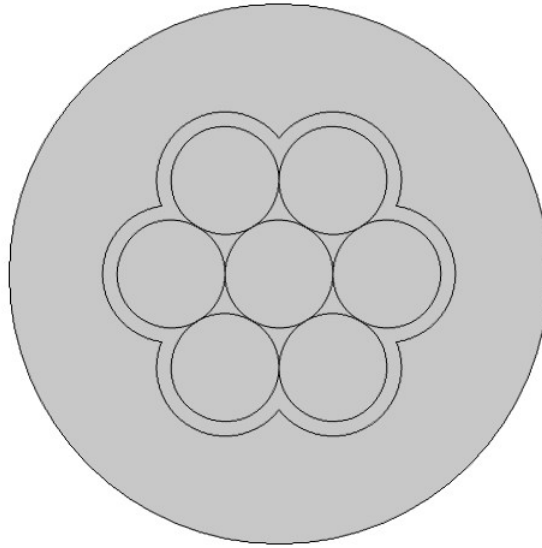


**Figura 142 - Cabo Coaxial com condutor filamentado utilizado na Configuração 1 de Cabo Multifilamentar.**



**Figura 143 - Cabo Coaxial com condutor filamentado utilizado na Configuração 2 de Cabo Multifilamentar.**





**Figura 144 – Cabo Coaxial com condutor filamentado utilizado na Configuração 3 de Cabo Multifilamentar.**

Os dados dos materiais utilizados no COMSOL para as três configurações foram baseados em YIN [26] e SILVA [23] e são ilustrados na Tabela 12.

**Tabela 12 - Dados dos materiais. [23] e [26]**

<b>Fio de Condutor</b>		<b>Isolação Interna</b>	
Resistividade	$\rho_c = 14.34 \times 10^{-9} \Omega.m$	Resistividade	$\rho_{int} = 1 \times 10^{18} \Omega.m$
Permissividade Relativa	$\epsilon_{r_c} = 1$	Permissividade Relativa	$\epsilon_{rint} = 2.3$
Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_c} = 1$	Permeabilidade Relativa	$\mu_{rint} = 1$
<b>Camada Semicondutora</b>		<b>Enchimento</b>	
Resistividade	$\rho_{sc} = 0.5 \Omega.m$	Resistividade	$\rho_e = 1 \times 10^{18} \Omega.m$
Permissividade Relativa	$\epsilon_{r_{sc}} = 2.25$	Permissividade Relativa	$\epsilon_{r_e} = 2.25$

Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_{sc}} = 1$	Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_e} = 1$
<b>Armadura</b>		<b>Capa Externa</b>	
Resistividade	$\rho_a = 25.59 \times 10^{-8} \Omega.m$	Resistividade	$\rho_{ce} = 1 \times 10^{18} S/m$
Permissividade Relativa	$\epsilon_{r_a} = 1$	Permissividade Relativa	$\epsilon_{r_{ce}} = 2.25$
Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_a} = 500$	Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_{ce}} = 1$

### C.3.2 MALHA

A malha gerada tanto para o cálculo de capacitância quanto para o cálculo da matriz  $Z_p$ , possui dimensão igual ao raio mais externo do cabo. Os dados de malha referentes a cada configuração são ilustrados nas Tabelas 13-15.

**Tabela 13 - Características da malha para Configuração 1 do Cabo Multifilamentar.**

<b>CONFIGURAÇÃO 1 - EXTRA FINE</b>	
TAMANHO MÁXIMO	$5,77 \times 10^{-4} \text{ m}$
TAMANHO MÍNIMO	$2,16 \times 10^{-6} \text{ m}$
TOTAL DE ELEMENTOS DE DOMÍNIO	18094

**Tabela 14 - Características da malha para Configuração 2 do Cabo Multifilamentar.**

<b>CONFIGURAÇÃO 2 - EXTRA FINE</b>	
TAMANHO MÁXIMO	$5,77 \times 10^{-4} \text{ m}$
TAMANHO MÍNIMO	$2,16 \times 10^{-6} \text{ m}$
TOTAL DE ELEMENTOS DE DOMÍNIO	17718

**Tabela 15 - Características da malha para Configuração 3 do Cabo Multifilamentar.**

<b>CONFIGURAÇÃO 3 - EXTRA FINE</b>	
------------------------------------	--

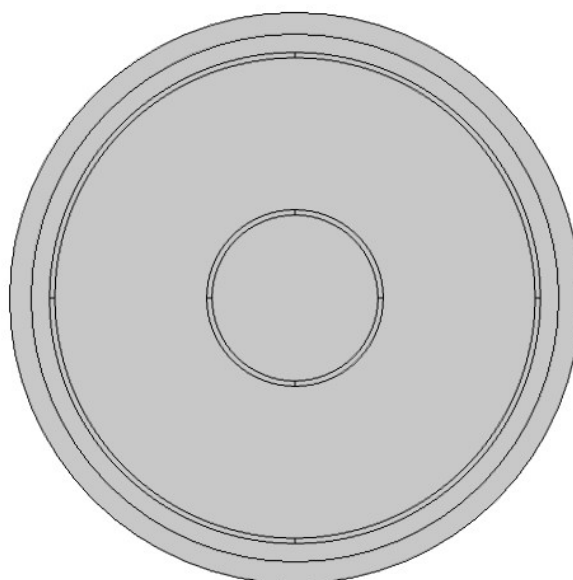
TAMANHO MÁXIMO	$5,77 \times 10^{-4} \text{ m}$
TAMANHO MÍNIMO	$2,16 \times 10^{-6} \text{ m}$
TOTAL DE ELEMENTOS DE DOMÍNIO	17932

## C.4 CABO SUBMARINO

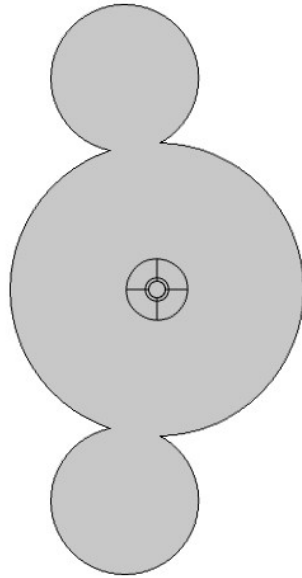
No capítulo 6 foi abordada uma aplicação de cabos umbilicais comumente utilizados em cabos submarinos. Durante o período de pesquisa, mais especificamente para o seminário de mestrado, este tipo de cabo foi estudado abordando-se diversos cálculos e estudos de características eletromagnéticas.

O desenvolvimento de sua geometria no COMSOL foi realizado baseando-se no documento [9] disponível no site do COMSOL e na biblioteca do próprio *software*.

A Figura 145 ilustra a configuração do cabo coaxial utilizado para cada veia de potência. Este cabo é composto de condutor central, camada semicondutora, isolamento, camada semicondutora, blindagem e isolamento. A Figura 146 ilustra a fibra óptica, composta por Silica Gel, Blindagem e Isolamento.

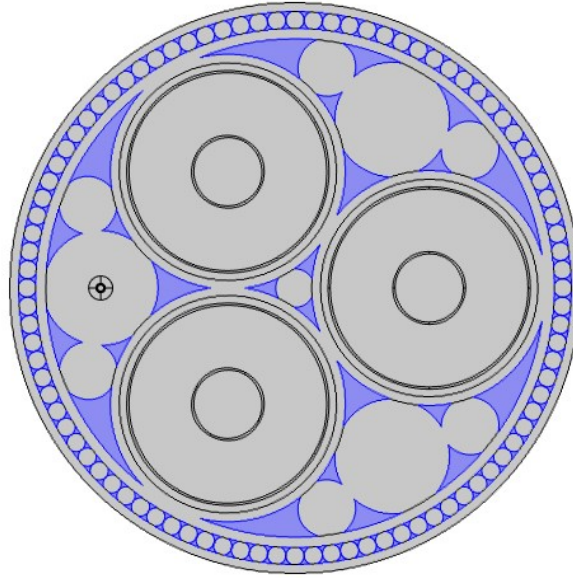


**Figura 145 - Cabo Coaxial relativo a cada veia de potência.**

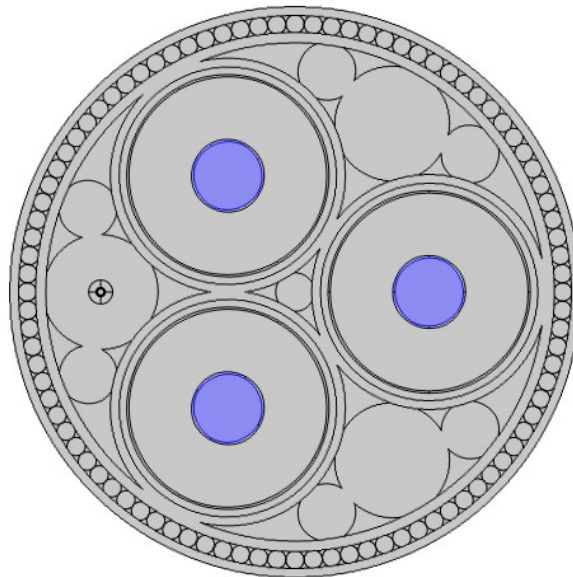


**Figura 146 – Fibra Óptica.**

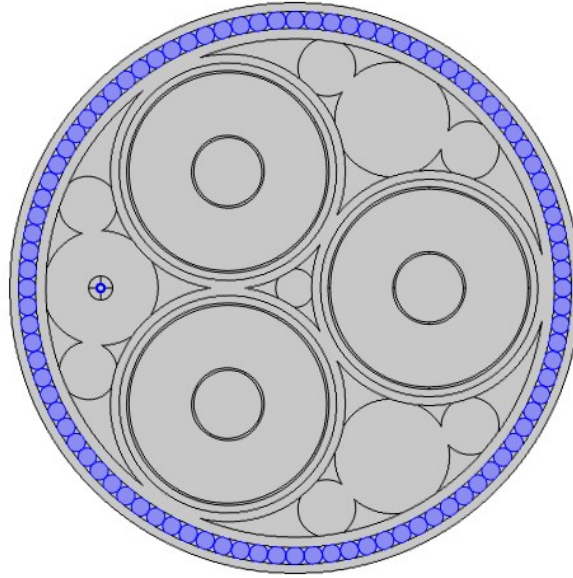
Os dados dos materiais também podem ser encontrados em [9] e nas Figuras 147-156 são ilustrados os materiais utilizados e definidos para cada componente do cabo submarino. A Tabela 16 ilustra as características de cada um desses materiais.



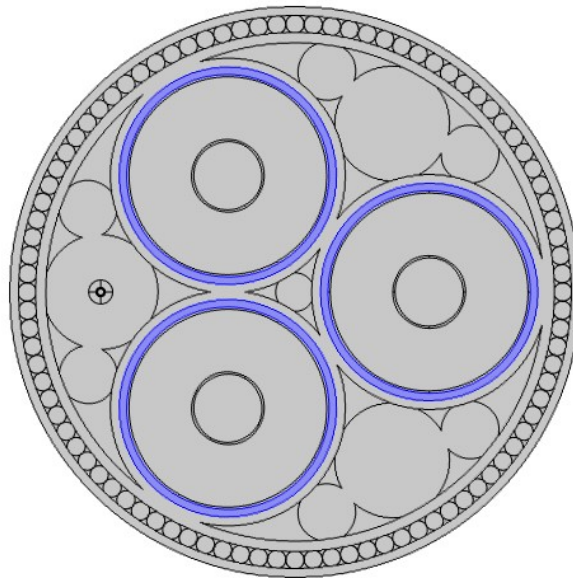
**Figura 147 – Para as áreas destacadas em azul foi definido AR, cujas características já estão definidas na biblioteca do COMSOL.**



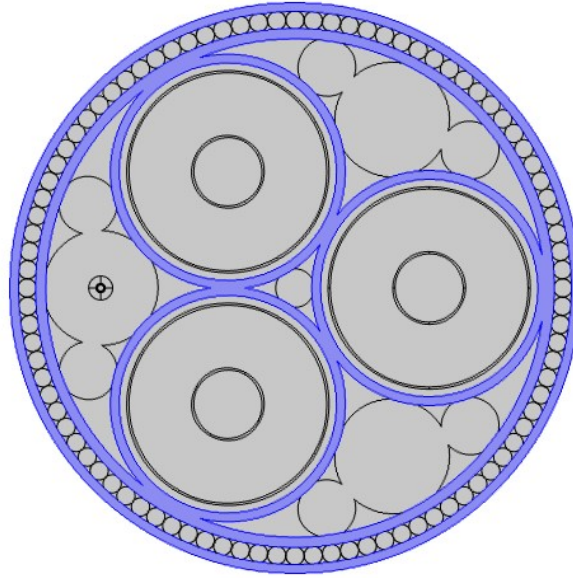
**Figura 148 – Para as áreas destacadas em azul foi definido COBRE, cujas características já estão definidas na biblioteca do COMSOL.**



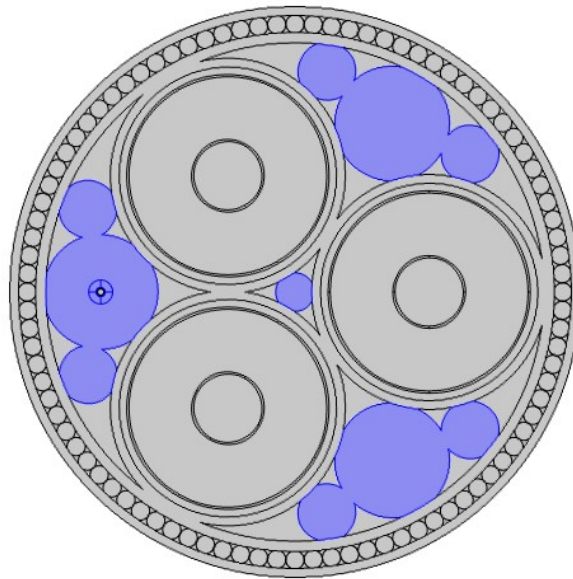
**Figura 149 – Para as áreas destacadas em azul foi definido LIGA DE AÇO REFORÇADA.**



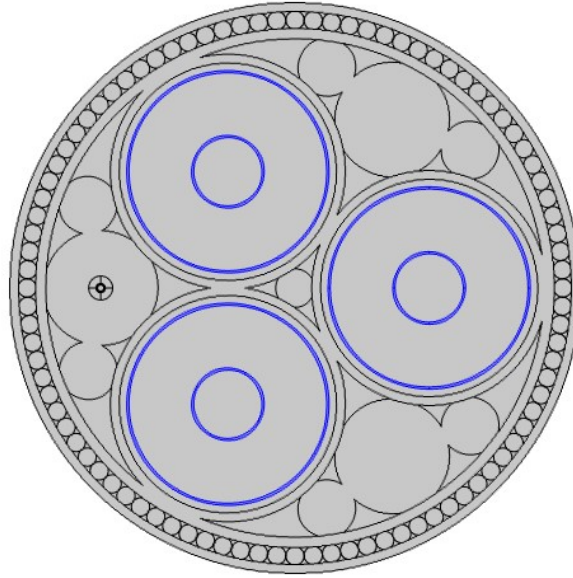
**Figura 150 – Para as áreas destacadas em azul foi definido CHUMBO.**



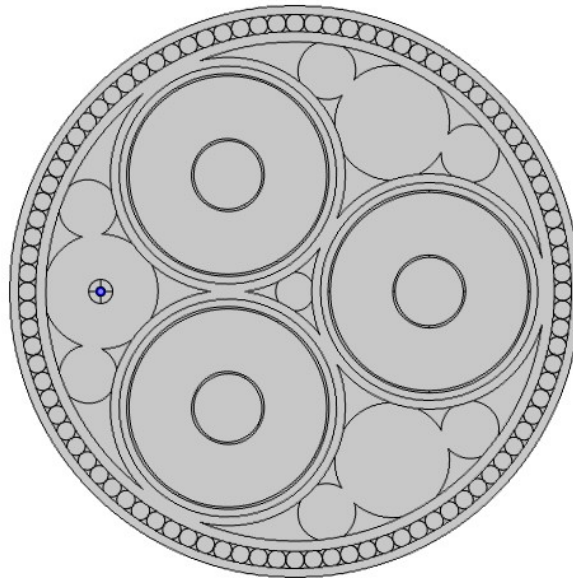
**Figura 151 – Para as áreas destacadas em azul foi definido POLIETILENO.**



**Figura 152 – Para as áreas destacadas em azul foi definido POLIPROPILENO.**

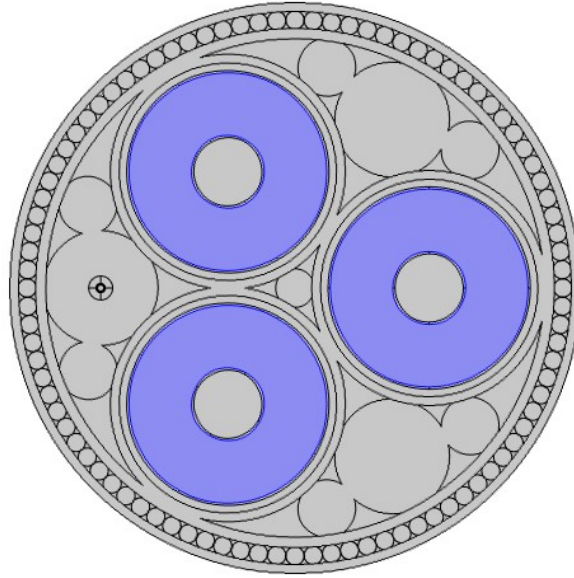


**Figura 153 – Para as áreas destacadas em azul foi definido uma camada semicondutora.**

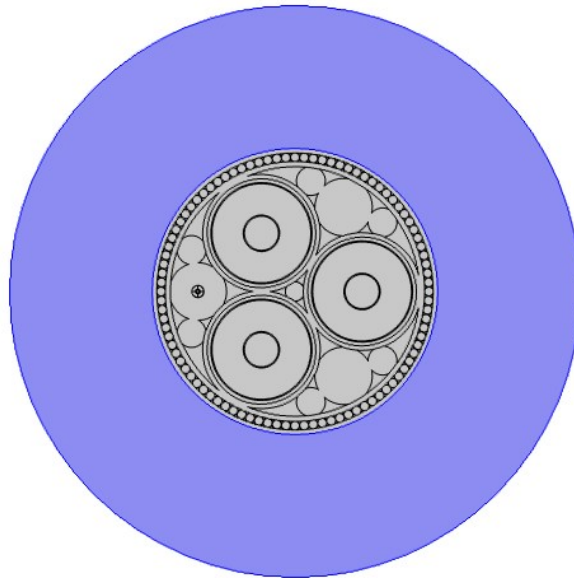


**Figura 154 – Para as áreas destacadas em azul foi definido SILICA GLASS.**





**Figura 155 – Para as áreas destacadas em azul foi definido XLPE.**



**Figura 156 – Para as áreas destacadas em azul foi definido SOLO MARINHO SATURADO.**

**Tabela 16 - Características dos materiais utilizados nas simulações referentes ao cabo submarino [9].**

<b>AR</b>		<b>COBRE</b>	
Condutividade	$\sigma_{ar} = 0 \text{ S/m}$	Resistividade	$\sigma_c = 5,998 \times 10^7 \text{ S/m}$
Permissividade Relativa	$\epsilon_{rar} = 1$	Permissividade Relativa	$\epsilon_{rc} = 1$
Permeabilidade Relativa	$\mu_{rar} = 1$	Permeabilidade Relativa	$\mu_{rc} = 1$
<b>LIGA DE AÇO REFORÇADA</b>		<b>CHUMBO</b>	
Condutividade	$\sigma_{liga} = 4,032 \times 10^6 \text{ S/m}$	Condutividade	$\sigma_{ch} = 4,84 \times 10^6 \text{ S/m}$
Permissividade Relativa	$\epsilon_{rliga} = 1$	Permissividade Relativa	$\epsilon_{rch} = 1$
Permeabilidade Relativa	$\mu_{rliga} = 1$	Permeabilidade Relativa	$\mu_{rch} = 1$
<b>POLIETILENO</b>		<b>POLIPROPILENO</b>	
Condutividade	$\sigma_p = 1 \times 10^{-18} \text{ S/m}$	Condutividade	$\sigma_{pp} = 1 \times 10^{-18} \text{ S/m}$
Permissividade Relativa	$\epsilon_{rp} = 2.25$	Permissividade Relativa	$\epsilon_{rpp} = 2.36$
Permeabilidade Relativa	$\mu_{rp} = 1$	Permeabilidade Relativa	$\mu_{rpp} = 1$
<b>CAMADA SEMICONDUTORA</b>		<b>SILICA GLASS</b>	
Condutividade	$\sigma_{sc} = 2 \text{ S/m}$	Condutividade	$\sigma_{sg} = 1 \times 10^{-14} \text{ S/m}$
Permissividade Relativa	$\epsilon_{rsc} = 2.25$	Permissividade Relativa	$\epsilon_{rsg} = 2.09$

Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_{sc}} = 1$	Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_{sg}} = 1$
<b>XLPE</b>		<b>SOLO MARINHO SATURADO</b>	
Condutividade	$\sigma_x = 1 \times 10^{-18} S/m$	Condutividade	$\sigma_{ss} = 1 S/m$
Permissividade Relativa	$\varepsilon_{r_x} = 2.5$	Permissividade Relativa	$\varepsilon_{r_{ss}} = 28$
Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_x} = 1$	Permeabilidade Relativa	$\mu_{r_{ss}} = 1$