

GIUSEPPE RENATO DI MARZO

APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA ANÁLISE
DE TENSÕES INDUZIDAS EM CABOS UMBILICAIS

São Paulo
2010

GIUSEPPE RENATO DI MARZO

APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA ANÁLISE
DE TENSÕES INDUZIDAS EM CABOS UMBILICAIS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador: Dr. Maurício Caldora
Costa

São Paulo
2010

GIUSEPPE RENATO DI MARZO

APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NA ANÁLISE
DE TENSÕES INDUZIDAS EM CABOS UMBILICAIS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador: Dr. Maurício Caldora
Costa

São Paulo
2010

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 18 de outubro de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Marzo, Giuseppe Renato di

**Aplicação do método dos elementos finitos na análise de tensões induzidas em cabos umbilicais / G.R. di Marzo. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010.
106p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Eletromagnetismo 2. Cabos umbilicais I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão pelo que sei, pelo que sou e por todo o amor, apoio e confiança incondicionais.

A Renata, pelo amor e parceria a todo o momento.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Maurício Caldora Costa, pelo profundo acompanhamento, ensino, orientação e constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Ao amigo e eterno mestre Mário Leite Pereira Filho pelos ensinamentos e conselhos que possibilitaram a elaboração deste trabalho.

Ao Renato Martins e sua equipe da ABB por me auxiliar na busca por materiais e contato com as fábricas de cabos na Noruega.

Aos meus amigos e colegas de trabalho que me apoiaram e sempre me incentivaram a continuar me esforçando e a todos que colaboraram direta ou indiretamente na consecução deste trabalho.

“Um grande projeto, não necessariamente precisa de uma grande equipe, mas necessariamente ele precisa de um grande público; só assim ele realmente será grande.”

Carla Amaral Vidotti

RESUMO

O presente trabalho visa à aplicação de metodologias de análise de tensões induzidas em cabos de sinal de cabos umbilicais a partir da utilização do “Método dos Elementos Finitos”. A aplicação consiste na avaliação de tensões induzidas nos condutores de sinal, a partir do acoplamento mútuo de fluxo magnético originado das correntes dos circuitos de potência do cabo umbilical. Para tanto, são aplicadas técnicas de fatiamento e transposição para a geometria do cabo concomitantemente às técnicas de acoplamento com circuito elétrico. São apresentados modelos de condutores elétricos com ênfase no detalhamento geométrico, simplificações consideradas, adoção de parâmetros de suporte e condições de contorno. A avaliação das tensões induzidas nos condutores de sinal é realizada tanto para simulações bidimensionais, pelos métodos de fatiamento e transposição, como para simulações tridimensionais.

Palavras-chave: Cabos umbilicais. Método dos Elementos Finitos. Método de Fatiamento. Método de Transposição. Tensão induzida.

ABSTRACT

The aim of this work is apply the methodologies of induced voltage in signal cables inside umbilical cables through application of Finite Elements Method. The application is made by the evaluation of the induced voltage on signal cables through the coupling of magnetic fields generated by the power cables. Therefore slice and transposition techniques are applied to the cable geometry with electrical circuit coupling techniques. One presents electrical conductor modeling focused on geometric detailing and simplifications, support parameters and boundary conditions. The evaluation of induced voltages on signal cables is made through the application of bidimensional method, using slices and transposition techniques and also tridimensional simulations.

Key-words: Umbilical cables. Finite Element Method. Slices methodology. Transposition methodology. Induced voltage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparação da discretização da geometria pelo Método das Diferenças Finitas (a) e Método dos Elementos Finitos (b) , (HUEBNER, 1976)	23
Figura 2 – Modelo de cabo umbilical com estrutura complexa	24
Figura 3 – Relação dimensional entre operários e um cabo umbilical (ABB, 2009)	26
Figura 4 – Ilustração de plataforma <i>offshore</i> (NSW, 2010)	29
Figura 5 – Ilustração de diversos tipos de cabos umbilicais para aplicações submarinas (PRYSMIAN CABLES AND SYSTEMS, 2009)	31
Figura 6 – Condutores utilizados para a fabricação dos cabos umbilicais (Worzyk 2009, p. 11)	32
Figura 7 – Movimento de rotação dos condutores ao redor do eixo de referência local	33
Figura 8 – Representação de um trecho de condutores de potência em modelo tridimensional	33
Figura 9 – Movimentos de rotação local e global dos condutores de um cabo umbilical	34
Figura 10 – Filamento de lâmpada incandescente com uma propagação helicoidal em relação aos eixos local e global (UDESC, 2004), ou propagação dupla helicoidal	34
Figura 11 – Propagação helicoidal dos cabos de potência e de sinal (BREMNES, 2005)	35
Figura 12 – Conductor e distâncias ao ponto de interesse para aplicação da Lei de Biot-Savart (GOOD, 1998)	37
Figura 13 – Exemplo de acoplamento magnético entre duas bobinas, representando a indutância mútua	40
Figura 14 – Modelo de cabo umbilical completo	42
Figura 15 – Ilustração da geometria do cabo umbilical simplificado para simulações magnéticas	43
Figura 16 – Ilustrações de condutor maciço e condutor multifilar	44

Figura 17 – Área equivalente da armadura	45
Figura 18 - Modelo de cabo umbilical com apenas dois condutores	46
Figura 19 – Circuito elétrico utilizado para o acoplamento ao modelo de elementos finitos para o cabo com apenas dois condutores e uma armadura externa	47
Figura 20 – Curvas de magnetização para diferentes ligas de ferro (UNESP, 2009)	49
Figura 21 – Curva de Rayleigh para baixos valores de campo magnético, dependência de B(H) (CEDRAT, 2009)	50
Figura 22 – Linhas equipotenciais de potencial magnético na condição de campo tangencial	51
Figura 23 – Ilustração da região infinita aplicada ao cabo umbilical.	53
Figura 24 – Condição de contorno por potencial imposto (em vermelho) e discretização da geometria	54
Figura 25 – Detalhe da discretização para regiões bidimensionais	56
Figura 26 – Detalhe da discretização para regiões filiformes	56
Figura 27 – Representação do MMC para os movimentos de rotação local e global dos componentes do cabo umbilical	58
Figura 28 – Face bidimensional do cabo umbilical e sua malha de elementos finitos	59
Figura 29 – Modelo tridimensional do cabo umbilical	60
Figura 30 – Malha de elementos finitos para simulação tridimensional	61
Figura 31 – Discretização das geometrias bidimensional e tridimensional	62
Figura 32 – Representação do modelo tridimensional utilizando armadura e isolante malhados, condutores de potência e sinal não malhados e a relação de comprimento entre armadura e condutores de potência.	63
Figura 33 – Circuito elétrico acoplado aos condutores da geometria tridimensional	64
Figura 34 – Distribuição equipotencial de indução magnética na armadura do trecho de cabo umbilical, utilizando condutores não malhados	65
Figura 35 – Distribuição equipotencial de indução magnética no material isolante do cabo umbilical para a simulação tridimensional	66

Figura 36 - Distribuição uniforme de campo magnético na armadura utilizando condutores de potência com 3 MMC e armadura com 2 MMC de comprimento e utilizando periodicidade	67
Figura 37 - Distribuição de campo magnético não uniforme na armadura para condutores de potência e armadura com mesmo comprimento igual a 2 MMC, utilizando periodicidade	67
Figura 38 – Metodologia simplificada de análise da tensão induzida nos condutores de sinal	70
Figura 39 – Acoplamento mútuo entre os condutores de potência e de sinal	71
Figura 40 – Incidência de campo magnético em uma espira retangular	72
Figura 41 – Fatiamento do cabo umbilical	74
Figura 42 – Circuito equivalente total de um condutor de sinal com cargas conectadas às extremidades	75
Figura 43 – Circuito equivalente para cada uma das fatias do condutor de sinal com cargas conectadas às extremidades	75
Figura 44 – Exemplo da soma quadrática para a variação espacial dos condutores	76
Figura 45 – Circuito elétrico associado aos elementos do cabo umbilical para o método do fatiamento direto	77
Figura 46 – Circuito elétrico associado aos elementos do cabo umbilical para o método do fatiamento direto	79
Figura 47 – Representação do método de transposição	81
Figura 48 – Representação do método da transposição para condutores de potência	81
Figura 49 – Fração do MMC de comprimento do cabo umbilical	85
Figura 50 – Sentidos de rotação dos condutores a) giro positivo e b) giro negativo.	87

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1** – Relação entre o número de fatias transversais do cabo e a tensão induzida, para o método do fatiamento, sentido de giro unidirecional e 750mm de cabo umbilical 91
- Gráfico 2** – Relação entre o número de fatias transversais do cabo umbilical e a tensão induzida, para o método do fatiamento, sentido oposto de giro dos condutores e 750mm de cabo umbilical 93
- Gráfico 3** – Relação entre a quantidade de amostras e a tensão induzida para o método de transposição para o sentido unidirecional de giro dos condutores para 750mm de cabo umbilical 95
- Gráfico 4** – Relação entre a quantidade de amostras e a tensão induzida para o método da transposição em sentido oposto de giro dos condutores para 750mm de cabo umbilical 96
- Gráfico 5** - Relação entre a tensão induzida e a quantidade de amostras para os métodos de fatiamento e transposição, para sentido unidirecional de giro dos condutores 97
- Gráfico 6** - Relação entre a tensão induzida e a quantidade de amostras para os métodos de fatiamento e transposição, para sentidos opostos de giro dos condutores 97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ângulo e profundidade das fatias para o cabo de 750mm.....	90
Tabela 2 – Tensão induzida x número de fatias, sentido unidirecional	91
Tabela 3 – Relação da tensão induzida pelo número de fatias, sentido oposto de giro	92
Tabela 4 - Ângulo para parametrização das simulações para o cabo de 750mm	94
Tabela 5 –Tensão induzida x número de fatias, sentido oposto	94
Tabela 6 – Tensão induzida x número de fatias, sentido oposto.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEF 2D	Método dos Elementos Finitos Bidimensional
MEF 3D	Método dos Elementos Finitos Tridimensional
XLPE	<i>Cross-Linked Polyethylene</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
IEC	<i>International Electrical Committee</i>
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
IPU	<i>Integrated Production Umbilical</i>
HVAC	<i>High Voltage Alternating Current</i>
Offshore	Estação Marítima
Jicable	Fórum Internacional para Pesquisa, Desenvolvimento Industrial, Instalação, Operação e Diagnósticos Relacionados a Cabos de Potência Isolados e seus Acessórios, desde baixa tensão até extra alta tensão, cabos especiais e cabos utilizando novas tecnologias.
f.e.m.	Força eletromotriz, ou tensão induzida
API	<i>American Petroleum Institute</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ	Somatória
\vec{B}	Vetor indução magnética, em Tesla
\vec{H}	Vetor campo magnético em A/m
μ	Permeabilidade magnética do meio
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$
μ_r	Permeabilidade magnética do material em relação a μ_0
π	Constante "PI", adimensional, equivalente a 3,1415926
Ω	"Omega", símbolo de resistência elétrica
ρ	"Rho", símbolo para resistividade elétrica
Δ	"Delta", representa um intervalo de variação
f	Frequência do circuito, dada em ciclos por segundo ou Hertz (Hz)
\vec{A}	Vetor potencial magnético
\emptyset	fluxo magnético
t	tempo, em segundos
L	Indutância própria, em weber/ampère ou Henry
θ	ângulo entre a indução magnética B e o vetor normal ao plano de uma espira
H_c	Campo coercitivo
B_r	Remanência ou indução magnética remanente
\vec{D}	Vetor correntes de deslocamento
\vec{J}	Vetor densidade de corrente elétrica
$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	Correntes de deslocamento provocadas pelo campo elétrico variável no tempo.
R	Distância entre o condutor com corrente elétrica e o ponto de interesse
I	Corrente elétrica no condutor
$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	Variação da indução magnética no tempo
$\frac{\partial \Phi}{\partial t}$	Variação do fluxo magnético no tempo
s	Distância entre os centros das blindagens

r_b	Raio médio entre os centros das blindagens
A_{eq}	Área equivalente
N	Número de condutores que compõem a armadura
r	Raio de cada um dos condutores da armadura
RBLIND	Raio da armadura metálica.
EBLIND	Espessura da armadura metálica externa.
RHOG	Distância dos condutores ao centro geométrico.
RG	Raio do condutor Gerador.
$V_{\text{fatiamento}}$	Valor resultante da tensão induzida no condutor de sinal para o método de fatiamento.
V_{real}	Valor da parte real da tensão medida no resistor de carga
V_{imag}	Valor da parte imaginária da tensão medida no resistor de carga
$V_{\text{transposição}}$	Valor resultante da tensão induzida no condutor de sinal para o método da transposição
S_{real}	Área do condutor para cálculo do efeito pelicular
S_{aparente}	Área do condutor considerando o efeito pelicular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
3	O CABO UMBILICAL E O SEU MODELO EM ELEMENTOS FINITOS	30
3.2.1	A indutância mútua.....	39
3.3.1	Modelagem da armadura	44
3.3.2	Acoplamento com circuito elétrico.....	46
3.3.3	A permeabilidade magnética.....	48
3.3.4	Definição das condições de contorno.....	50
4	METODOLOGIA	57
4.1	Limitações do modelo no mef 3D	57
4.2	Técnicas bidimensionais de simulação.....	69
5	RESULTADOS.....	84
5.1.2	Condições de contorno	87
5.1.3	Alívio da discretização pelo uso de região filiforme.....	89
5.1.4	Análise de sensibilidade proporcional à amostragem	90
5.1.4.1	Método do fatiamento direto.....	90
5.1.4.2	Método da transposição.....	93
5.1.4.3	Comparação dos resultados	96
5.1.5	Efeito do trançamento dos condutores na atenuação da tensão induzida nos condutores de sinal	98
6	CONCLUSÕES	100

1 INTRODUÇÃO

O petróleo, do latim *petroleum*, "óleo da pedra", no sentido de óleo bruto, consiste em uma substância oleosa e inflamável, de coloração geralmente negra e menos densa que a água. Dentre as diversas teorias a respeito de seu surgimento, a mais aceita confere suas origens aos restos orgânicos de animais e vegetais, os quais, depositados no fundo de lagos e mares ao longo de milhares de anos, sofreram transformações químicas, devido a elevadas taxas de pressão e temperatura.

Registros históricos apontam como marco inicial de sua utilização a exploração de afloramentos no Oriente Médio (por volta de 1.000 a.C.) e, posteriormente, as perfurações feitas com hastes de bambu na China. Ao longo de muitos anos, as principais utilidades do petróleo consistiram na iluminação e no aquecimento de água (JOHNSON, 1938).

A moderna indústria petrolífera, por sua vez, desenvolveu-se a partir de meados do século XIX, quando poços de pequena profundidade começaram a ser perfurados ao redor do mundo. O primeiro poço comercial com elevada produção foi perfurado nos Estados Unidos, no estado da Pensilvânia, por Edwin Laurentine Drake, também conhecido por Coronel Drake, por meio de uma técnica elaborada para a exploração das minas de sal, em 1859.

A descoberta de suas vantagens e a crescente necessidade de aumento da produção e transporte desse precioso material contribuiu para a elaboração e aprimoramento de técnicas de soldagem, de laminação de tubos e de metalurgia, as quais possibilitaram a construção de longas redes de tubulação. A partir de então, a humanidade pôde observar um desenvolvimento industrial sem precedentes (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2009).

Diante da escassez de jazidas tradicionais, foi necessário buscar o petróleo em bacias sedimentares de difícil acesso, tais como as localizadas em zonas árticas e marítimas. Atualmente a indústria do petróleo atua nas mais diversas regiões do

planeta, principalmente em plataformas oceânicas. Para tanto, investimentos expressivos são feitos com intuito de aprimorar as técnicas de extração, transporte e refino do petróleo, bem como minimizar as perdas durante o processo.

As plataformas oceânicas de extração de petróleo (*Offshore*) constituem estruturas, fixas ou móveis, pavimentadas em concreto, flutuantes com ancoragem ou braços tensores, podendo, ainda, se tratar de plataformas distribuidoras. Todas, entretanto, possuem em comum o fato de utilizarem cabos umbilicais, também conhecidos por IPU (*Integrated Production Umbilical*).

No caso das plataformas de petróleo, os cabos umbilicais prestam-se à conexão da plataforma às bombas submersas de extração de petróleo, com comprimento na ordem de quilômetros em águas profundas, sob constante pressão e esforços mecânicos intensos.

Um exemplo típico de cabo umbilical é o cabo com condutores de potência e de sinal ou controle e as tubulações. Os condutores de potência são normalmente utilizados para o acionamento das bombas de extração de petróleo e pelos condutores de sinal trafegam dados referentes à pressão, vazão, temperatura, dentre outros, enquanto as tubulações transportam fluidos em alta pressão.

Os condutores de potência e de sinal que formam um cabo umbilical encontram-se próximos e estão sujeitos a um tipo de acoplamento eletromagnético conhecido como *crosstalk* (TOSIN, 2005). O *crosstalk* é o acoplamento eletromagnético indesejado entre condutores, podendo causar tensões induzidas e interferências entre circuitos, como, por exemplo, entre condutores de potência e de sinal.

Assim, é possível que em um cabo de controle, no qual são monitorados os sinais de pressão de uma bomba submersa, apareçam tensões induzidas, em virtude do seu acoplamento com o circuito de potência. Essa situação pode, inclusive, acarretar erros de leituras dos sinais de interesse, acionamentos indevidos de alarmes de falhas ou até mesmo a interrupção do processo por erro de interpretação dos sinais medidos.

Desta forma, a avaliação eletromagnética tem sido cada vez mais importante na fase de projeto de um cabo umbilical, sendo realizada para atender a requisitos de desempenho funcional de transmissão de energia e também de envio e recebimento de sinais de controle. Em outras palavras, o ideal é encontrar apenas sinais de potência nos condutores de potência e, nos condutores de controle, apenas os seus respectivos sinais.

O objetivo deste trabalho é avaliar as tensões induzidas entre os elementos que constituem um cabo umbilical, através da aplicação de técnicas numéricas de simulação de campos eletromagnéticos, em particular o Método dos Elementos Finitos Bidimensional (MEF 2D).

Devido a aspectos relacionados à sustentação mecânica do cabo umbilical, uma das técnicas comumente aplicadas em seu projeto é o trançamento dos seus condutores de potência (PETTERSSON, 1997). Quando é realizado este tipo de alteração na geometria, ou seja, o condutor deixa de ser um condutor retilíneo e passa a ser um condutor que se propaga helicoidalmente no sentido de seu comprimento, o MEF 2D não pode ser aplicado diretamente na resolução do problema, sendo necessária a utilização do Método dos Elementos Finitos Tridimensional (MEF 3D). No entanto, a utilização do MEF 3D implica em um aumento significativo na quantidade de elementos para a discretização do domínio de estudo, necessitando de um elevado processamento computacional e, conseqüentemente, tornando o processo muito mais lento, muitas vezes impossibilitando a obtenção dos resultados procurados.

Visando à modelagem em elementos finitos de cabos umbilicais contendo condutores helicoidais, porém evitando as dificuldades encontradas nas simulações em 3D, são apresentadas neste trabalho duas metodologias de análise bidimensional que contemplam a topologia helicoidal dos condutores: o método de fatiamento e o método de transposição.

Além da apresentação conceitual dessas duas metodologias de análise bidimensional, é feito um estudo aprofundado de avaliação da sensibilidade dos resultados obtidos a partir dessas metodologias em relação à variação de alguns parâmetros utilizados na caracterização do modelo em elementos finitos, tais como

as condições de contorno e a geometria das blindagens dos condutores. Também é feita uma avaliação da qualidade dos resultados em relação ao número de subdivisões (“fatias” ou “transposições”) do domínio de estudo utilizado em cada uma dessas metodologias.

Inicialmente, será apresentada a revisão bibliográfica referente ao estado da arte no projeto e na análise de cabos umbilicais. Em seguida, será feita a descrição das principais características físicas e geométricas de um cabo umbilical, com as respectivas modelagens em elementos finitos.

Visando justificar a escolha de técnicas alternativas de análise de umbilicais baseadas no domínio 2D, no item 4 são apresentadas as principais dificuldades encontradas na elaboração de um modelo de análise tridimensional para esta aplicação. Neste mesmo item, será feita uma descrição detalhada das metodologias de análise baseadas no método do fatiamento e no método de transposição, ambas com aplicação do MEF 2D.

Finalmente, os resultados obtidos a partir das técnicas bidimensionais de modelagem aplicadas a um cabo umbilical serão discutidos, com ênfase na aplicação em regime permanente senoidal para a frequência de 60Hz.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A técnica mais conhecida de análise eletromagnética se dá através das consagradas equações de Maxwell (BASTOS, 2005), as quais descrevem o comportamento do campo elétrico e magnético com o estabelecimento de relações entre cargas e correntes elétricas, campos eletromagnéticos com permeabilidade e permissividade do meio.

Apesar das equações de Maxwell descreverem por completo o fenômeno físico observado, a aplicação direta das equações em geometrias complexas é difícil, sendo muitas vezes necessário recorrer a técnicas de cálculo numérico para se obter a distribuição dos campos resultantes.

Uma metodologia inicialmente utilizada para estruturas menos elaboradas é o Método das Diferenças Finitas (MDF) (TANNEHILL, 1984), por meio do qual se resolvem equações diferenciais de uma determinada matriz, representada por uma malha.

O MDF pode ser utilizado para a solução de grande parte dos problemas com geometrias simplificadas. Entretanto, quando é necessário estudar o domínio para uma geometria mais complexa, este método não é o mais adequado pelo fato de que a geometria complexa não é discretizada da melhor maneira possível, conforme demonstrado no exemplo da **Figura 1**.

Outro método de cálculo numérico importante é o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF foi inicialmente divulgado por volta dos anos 1960 (HUEBNER, 1976), já então tendo sido utilizado na área aeroespacial (CLOUGH, 1960). Estudos a respeito da discretização de funções contínuas, por sua vez, iniciaram-se apenas em 1943, pelo matemático Courant, seguindo a ideia de utilização de elementos triangulares e o princípio da minimização de energia potencial em estudos de torção em peças mecânicas.

O MEF é um método matemático para a solução de equações diferenciais parciais, tais como as equações de Poisson e Laplace (BASTOS, 2005). O conceito mais fundamental do MEF é o de que toda “função contínua, seja ela de temperatura, pressão ou deslocamento, pode ser aproximada por um modelo composto de um conjunto de funções contínuas (dentro de um intervalo) definidas sobre um número finito de subdomínios”, denominados por elementos finitos (SEGERLIND, 1976).

O maior problema do MEF é a dificuldade de geração de malha. Por esse motivo, sua utilização tornou-se mais popular apenas na década de 80, a partir do avanço tecnológico dos computadores e dos vários métodos de geração automática de malhas.

Até então, a utilização do método era restrita ao mundo acadêmico, passando a ser utilizado posteriormente pelas empresas, com o objetivo principal de aumentar a precisão de projetos e minimizar os custos com modelos reais e com perdas na produção.

Na **Figura 1** apresentam-se as malhas oriundas da discretização do domínio em estudo, nas quais é possível perceber a diferença construtiva e a distribuição dos nós, tanto para o Método das Diferenças Finitas, quanto para o Método dos Elementos Finitos.

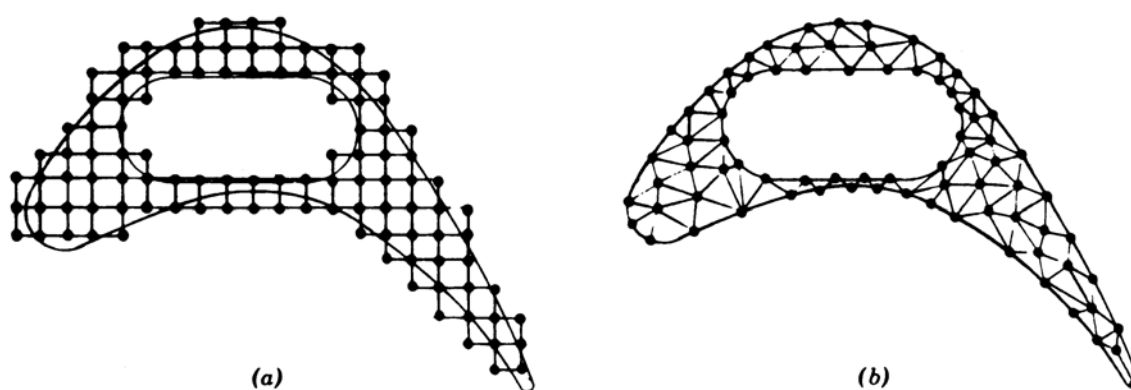


Figura 1 – Comparação da discretização da geometria pelo Método das Diferenças Finitas **(a)** e Método dos Elementos Finitos **(b)**, (HUEBNER, 1976)

Conforme se observa, o MEF apresenta maior precisão na resolução de problemas com geometrias complexas, pois se compatibiliza melhor ao contorno da geometria sob análise.

A **Figura 2** apresenta uma geometria muito complexa de cabo umbilical, somente passível de análise graças ao advento de ferramentas de alta velocidade e eficiência com métodos numéricos como, por exemplo, o Método dos Elementos Finitos.



Figura 2 – Modelo de cabo umbilical com estrutura complexa

O Método dos Elementos Finitos (MEF) foi escolhido para a realização deste trabalho por ser uma ferramenta já utilizada pelo autor, sendo este um método sem grandes limitações ou dificuldades de aplicação em geometrias bidimensionais, além do seu ótimo desempenho no que se refere à precisão dos resultados.

No que se refere aos cabos umbilicais, a maioria das publicações relacionadas a este assunto se refere à estrutura mecânica e análises térmicas. Contudo, o material

referente às análises de tensões induzidas nos condutores e estruturas no interior dos cabos umbilicais é escasso.

Atualmente, diversas pesquisas têm sido realizadas acerca da estrutura mecânica dos cabos para aperfeiçoamento de tubulações em seu interior e de condutores de potência e sinal, bem como formas de fixação, fabricação e espécies de materiais a serem utilizados na isolação (CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 2004; OLIVIER, 2007; CORDOVÉS, 2008).

Há diversas patentes relacionadas a cabos umbilicais e cabos subaquáticos. As primeiras evidências de patentes relacionadas aos cabos umbilicais remetem-se a 1938, referentes a técnicas e equipamentos para proporcionar o agrupamento de vários condutores elétricos em um mesmo cabo e a sua propagação ao longo do comprimento (JOHNSON, 1938).

Os cabos eram denominados em 1970 de cabos multicondutores subaquáticos (MORGAN, 1970), sendo patenteados em 1980 como cabos umbilicais de utilização marinha (MOORE, 1980) e, desde então, conhecidos por cabos umbilicais.

O âmbito de estudos relacionados ao desenvolvimento de cabos umbilicais encontra-se restrito aos seus grandes fabricantes, devido ao fato de se tratar de uma área dependente de pesados investimentos financeiros e equipamentos especiais para implementação de um sistema que possibilite a produção em série.

Ao longo dos anos, o desenvolvimento de cabos tem se ampliado de sorte a viabilizar a realização de projetos considerados impossíveis há cerca de vinte anos atrás.

Por mais de um século realizaram-se diversas pesquisas com o intuito de aprimorar os parâmetros (capacitância, isolação, disposição dos condutores) e técnicas de fabricação, adotados atualmente pelas empresas.

Recordes de instalação em longas distâncias, altas profundidades e potências transmitidas têm sido superados em intervalos cada vez menores.

O Grupo ABB atingiu vários recordes de fabricação, instalação e comissionamento de cabos para elevadas tensões, tais como a instalação do primeiro cabo submarino HVAC utilizando o material XLPE em meados de 1960.

A maioria dos cabos de energia com distâncias muito longas são produzidos pela ABB, a exemplo do cabo de energia interligando por 580 km de distância a Holanda à Noruega (ABB HIGH VOLTAGE CABLE UNIT IN SWEDEN, 2008).

A técnica empregada pela ABB para a confecção dos cabos de alta tensão é a extrusão vertical, como referência a instalação de cabos de potência em cobre e cabos de fibra óptica interligando a plataforma oceânica Gjõa da empresa Statoil ao continente da Noruega pela distância de 98 km, além de fazendas eólicas (*Wind farms*) offshore.

A **Figura 3** apresenta uma foto de um cabo umbilical sendo enrolado no carretel. A partir desta figura é possível comparar o enorme tamanho do carretel do cabo umbilical com o tamanho de trabalhadores enrolando o cabo.



Figura 3 – Relação dimensional entre operários e um cabo umbilical (ABB, 2009)

Segundo a associação OnePetro (2009), em 1998 iniciaram-se as criações de ferramentas de desenvolvimento de cabos umbilicais e, desde então, inúmeras aplicações têm sido realizadas.

Atualmente o Brasil é o pioneiro na exploração de petróleo em águas profundas. Isto se deve às características diferenciadas dos poços de petróleo brasileiros, as quais notadamente pressupõem maior esforço e desenvolvimento tecnológico.

A Petrobrás, empresa brasileira fundada em 1953 (FOLHA ONLINE, 2003) e pioneira na exploração e extração de petróleo, ao longo dos anos passou a investir em pesquisa e desenvolvimento e firmou parcerias com diversas universidades, podendo, desta maneira, explorar águas cada vez mais profundas e tornando-se reconhecida internacionalmente como líder em tecnologia *offshore*.

Este fato contradiz o “relatório Link”, emitido por Walter Link, geólogo norte-americano que esteve à frente do departamento de exploração de poços de petróleo da estatal, entre 1954 e 1960 (REVISTA O SETOR ELÉTRICO, 2010).

Segundo Link era vital a exploração de petróleo no mar, porém não havia recursos tecnológicos suficientes na época, chegando-se a cogitar que seria mais interessante para o Brasil importar o petróleo a investir em tecnologias de exploração *offshore*.

A Petrobrás efetuou expressivos investimentos em pesquisas, havendo, inclusive, firmado parcerias com vistas a alcançar o recorde mundial de exploração em águas profundas, contrariando o relatório de Link.

O recorde foi conferido à instalação de cabos umbilicais de potência e sinal em altas profundidades no campo de Roncador, por intermédio de uma parceria entre as empresas Prysmian e Petrobrás. Entre junho e setembro de 2000 foi instalado um cabo umbilical de controle a 1.853m, para controle do poço R0-08, e um cabo umbilical eletro-óptico de 1.360m de profundidade, interligando as plataformas P36 e P47 (WORZYK, 2009).

Referente à utilização do Método dos Elementos Finitos na análise de umbilicais, em 2007, ocasião na qual se realizou o congresso Jicable 07, Shackelton (2007) publicou um relevante artigo acerca da utilização do Método dos Elementos Finitos

como forma de análise de interferências eletromagnéticas e térmicas nos cabos umbilicais, visando minimizar as perdas na produção e nos testes, considerando as limitações térmicas e magnéticas dos componentes.

Com relação a estudos de análises mecânicas, a empresa *Kvaerner OilField Products* apresenta um artigo (AKER KVAERNER, 2005) a respeito do programa de análise e desenvolvimento de cabos umbilicais. Neste artigo, noticiam-se os resultados das análises de esforços mecânicos, térmicas e eletromagnéticas durante as fases de instalação e operação. Apesar do foco deste artigo ser a parte mecânica, discorre-se também sobre a análise térmica realizada devido à circulação de corrente elétrica, com base no MEF 2D.

Embora o trabalho tenha utilizado o MEF 2D para a análise térmica devido à passagem de corrente elétrica, a análise em MEF 2D foi bastante simplificada, considerando um cabo umbilical específico, cujos elementos internos não apresentam uma propagação helicoidal ao longo de seu comprimento.

Análises de stress e esforços mecânicos são realizadas por um programa desenvolvido pela empresa *Kvaerner Oilfield Products, Inc.* (AKER KVAERNER, 2005), denominado por USAP, para a análise de esforços mecânicos que ocorrem durante a operação de um cabo umbilical, além das análises térmica e eletromagnética, por meio do programa de Elementos Finitos MSC.Patran 2001, aplicado segundo a magnetodinâmica (BASTOS, 2005).

Estudos com relação à análise eletromagnética de cabos umbilicais são, por exemplo, realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e pela Universidade de São Paulo (USP), através de pesquisas, simulações e medições de parâmetros de tais cabos, bem como do desenvolvimento das técnicas de simulação por fatiamento e transposição, utilizando o MEF2D aplicado a cabos umbilicais (COSTA, 2007).

A empresa *Marine Production Systems* do Brasil atualmente realiza a análise dos modelos de cabo umbilical utilizando o MEF2D adotando uma técnica de fatiamento (SHACKLETON, 2007) a qual será apresentada neste trabalho.

A **Figura 4** apresenta um exemplo de instalação do cabo umbilical em uma plataforma *offshore* de extração de petróleo.

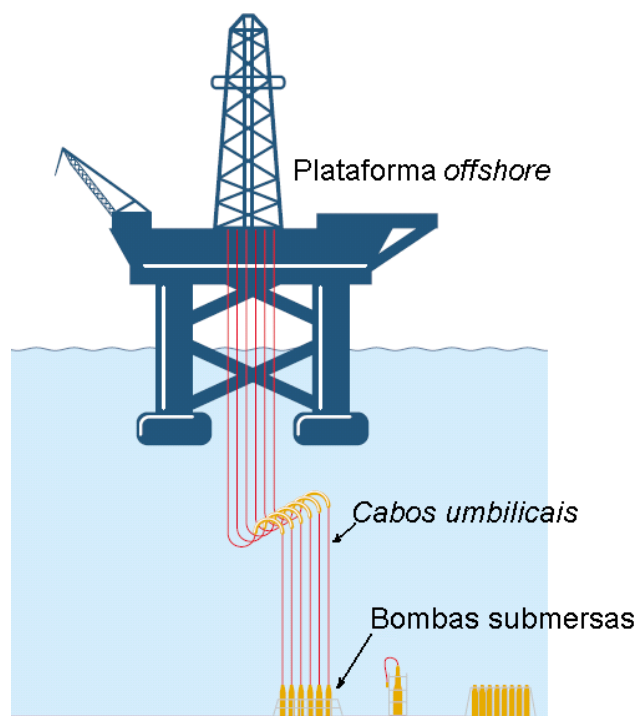


Figura 4 – Ilustração de plataforma *offshore* (NSW, 2010)

Com relação aos condutores, para fins comerciais, são produzidos apenas em cobre ou alumínio. Estudos estão em andamento em busca de condutores com maior condutividade, elaborados em nano tubos de carbono, com base na descoberta da supercondutividade em altas temperaturas em 1986 (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2009).

As técnicas de fabricação e detalhes construtivos de cabos umbilicais podem ser encontradas no trabalho de Worzyk (2009, p. 51).

3 O CABO UMBILICAL E O SEU MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

Nesta seção apresentam-se as características geométricas de um cabo umbilical e o seu respectivo modelo em elementos finitos, desenvolvido com o intuito de representar da melhor forma possível o comportamento físico observado durante sua operação.

Algumas premissas foram adotadas neste trabalho a fim de evitar as diversas possibilidades de avaliação dos casos estudados.

O princípio básico a ser considerado neste trabalho é o acoplamento apenas de campo magnético, não sendo abordados os efeitos do campo elétrico nas simulações e também não sendo consideradas as características dielétricas dos materiais.

É considerado também que as tensões e correntes estudadas estão em baixa frequência (particularmente 60 Hz) e em regime permanente senoidal, não sendo apresentados resultados a respeito de efeitos transitórios e/ou harmônicas nos sinais de tensão e corrente.

As impedâncias de geradores, sensores, motores e demais cargas conectadas aos terminais dos condutores, tanto de sinal quanto potência são representadas por cargas puramente resistivas, sendo considerados os valores de 40Ω para as cargas conectadas às extremidades dos condutores de potência e 250Ω para as cargas conectadas às extremidades dos condutores de sinal.

Esses valores de resistência foram adotados seguindo o padrão utilizado em outros trabalhos como, por exemplo, o de Shackleton (2007), além de serem amplamente utilizados em casos reais envolvendo umbilicais.

3.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CABO UMBILICAL

Os cabos umbilicais podem ser compostos apenas por condutores de potência, bem como de controle, de potência e controle, controle e tubulações, ou mesmo pelo conjunto de todas as configurações anteriores, dependendo do tipo de aplicação.

A **Figura 5** apresenta alguns tipos de cabos fabricados pela empresa Prysmian.



Figura 5 – Ilustração de diversos tipos de cabos umbilicais para aplicações submarinas (PRYSMIAN CABLES AND SYSTEMS, 2009)

Os condutores de um cabo umbilical são geralmente constituídos por alumínio ou cobre. A forma e a quantidade de veias, assim como do arranjo de montagem, dependem do tipo de aplicação à qual o cabo será submetido.

Um cabo pode ser constituído por um condutor maciço, um cabo flexível ou ainda um cabo flexível segmentado, conforme apresentado na **Figura 6** e explicado por Worzyk (2009, p. 11).

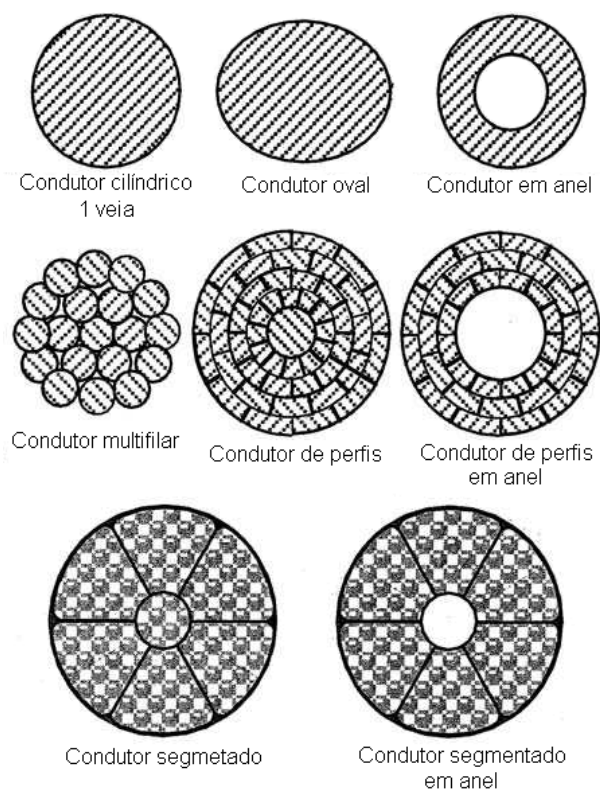


Figura 6 – Condutores utilizados para a fabricação dos cabos umbilicais (Worzyk, 2009, p. 11)

Além da composição de cada condutor em cabos umbilicais, a sua disposição é feita de modo a garantir flexibilidade, controle de tensões induzidas e resistência mecânica, devendo estar em conformidade com as normas de fabricação e aplicação de cabos umbilicais, tanto pela norma IEC (2006) como também pela API (2008).

Os condutores e estruturas podem ser distribuídos paralelamente, helicoidalmente, com distintos passos e sentido de giro. Normalmente são aplicados aos condutores dois movimentos, rotação local e rotação global.

A rotação local trata-se do giro do condutor ou do conjunto de condutores ao redor do eixo de referência local, podendo ser tanto no sentido horário quanto no sentido anti-horário, conforme apresentado na **Figura 7**.

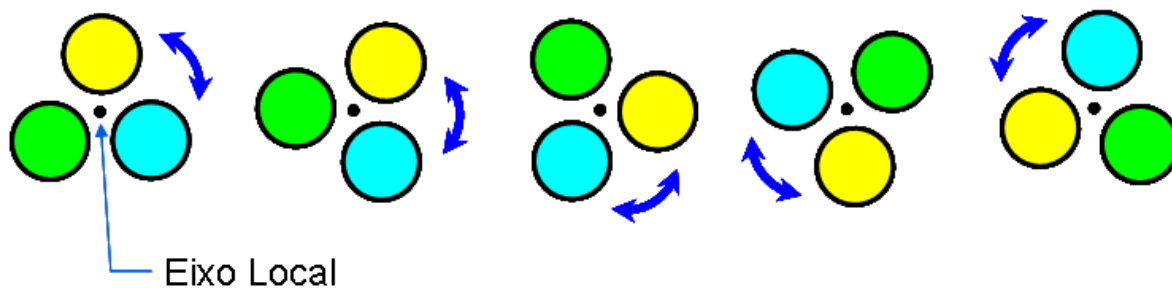


Figura 7 – Movimento de rotação dos condutores ao redor do eixo de referência local

Na **Figura 8** é apresentado um trecho dos condutores de potência em geometria tridimensional.

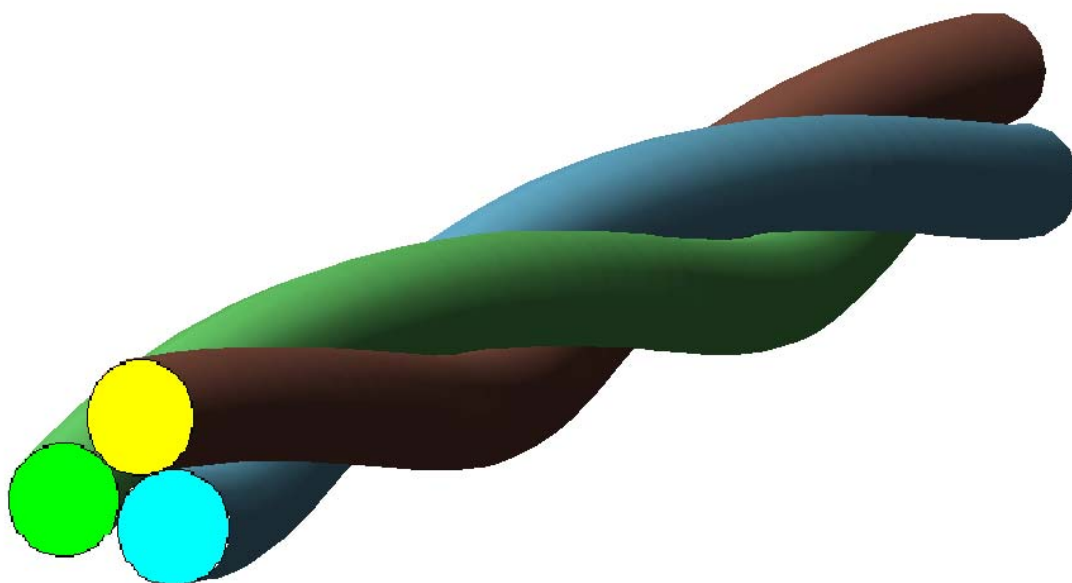


Figura 8 – Representação de um trecho de condutores de potência em modelo tridimensional

A rotação global, por sua vez, é o giro do condutor ou do conjunto de condutores ao redor do eixo de referência global, podendo ser tanto no sentido horário quanto no sentido anti-horário, conforme apresentado na **Figura 9**.

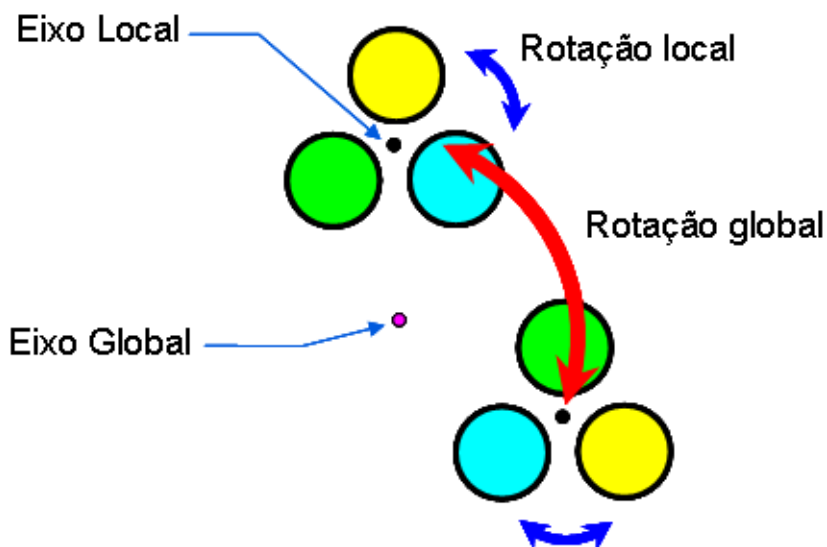


Figura 9 – Movimentos de rotação local e global dos condutores de um cabo umbilical

Nos cabos umbilicais, os dois movimentos eventualmente ocorrem simultaneamente e o sentido de rotação pode ser contínuo ou alternado periodicamente.

A esses dois movimentos é aplicada uma propagação no sentido do comprimento do cabo. Desse modo, é obtida a propagação dupla helicoidal da mesma maneira que aplicado a filamentos de lâmpadas incandescentes, conforme mostra a **Figura 10**.

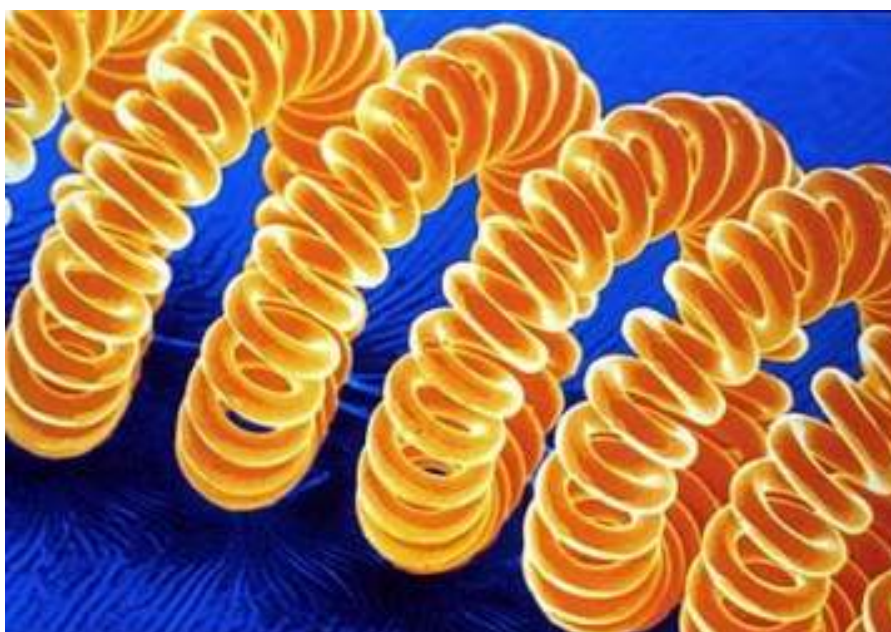


Figura 10 – Filamento de lâmpada incandescente com uma propagação helicoidal em relação aos eixos local e global (UDESC, 2004), ou propagação dupla helicoidal

A **Figura 11** apresenta um trifólio de potência, propagado helicoidalmente e envolto por cabos de sinal, também utilizando a técnica da propagação helicoidal.

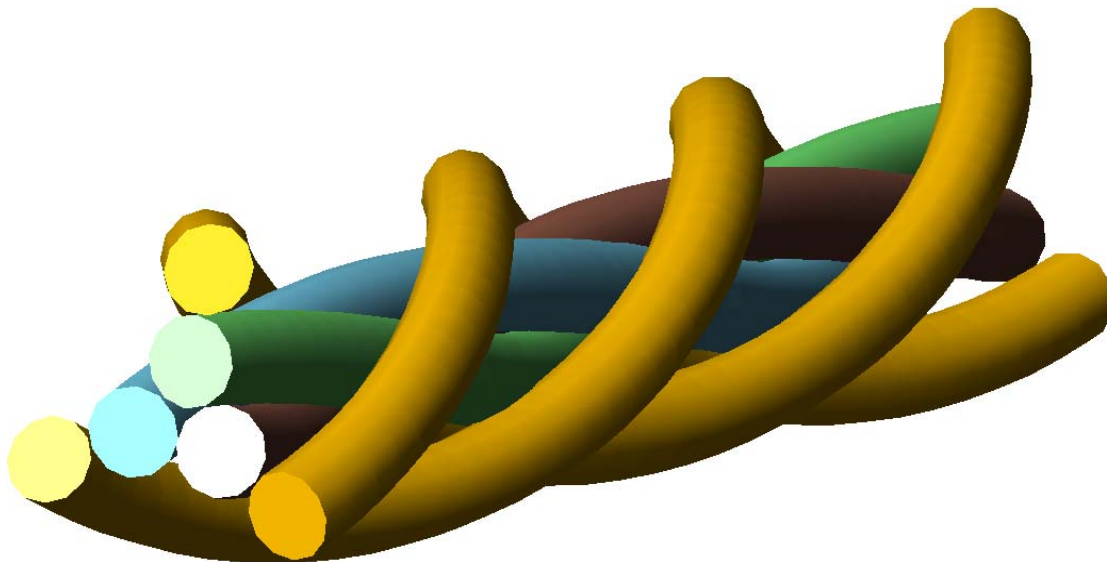


Figura 11 – Propagação helicoidal dos cabos de potência e de sinal (BREMNES, 2005)

Para a simulação dos cabos umbilicais, primeiramente é necessário definir o modelo em elementos finitos e a distribuição dos condutores e das estruturas no cabo.

Essa distribuição é realizada em atenção a características mecânicas, visando a facilitar a fabricação e mantendo a flexibilidade, além de propiciar a adequada resistência mecânica, respeitando também as características elétricas, tais como resistência, isolamento, capacitância, reatância e blindagens.

A geometria do cabo umbilical é bastante complexa e repleta de detalhes fundamentais para o comportamento adequado do cabo ao longo de seu período útil de aplicação.

3.2 O ACOPLAMENTO MAGNÉTICO ENTRE OS CONDUTORES DO CABO UMBILICAL

O estudo de parâmetros e características de condutores elétricos carregados sempre foi encarado como desafio pela comunidade científica. Continuamente são realizadas pesquisas a fim de aprimorar a estimativa do comportamento em termos eletromagnéticos e térmico dos condutores elétricos.

As características eletromagnéticas dos cabos umbilicais devem ser muito bem estudadas, devido à sua utilização em áreas remotas e de difícil acesso para a manutenção, as quais exigem maior precaução quanto às margens de segurança.

Demonstram as equações elementares do eletromagnetismo (BASTOS, 2005) que a corrente elétrica, ao circular por condutores elétricos, provoca o surgimento de campos magnéticos ao seu redor, conforme apresentado pela equação de Maxwell (1):

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

Ou seja, onde há corrente elétrica, há campo magnético.

Importa ressaltar ser tal equação absolutamente válida para todo o tipo de condutor elétrico, seja para um cabo singelo, ou mesmo para uma linha de transmissão formada por inúmeros condutores.

O cálculo do campo magnético em determinado ponto de interesse, próximo ao condutor eletricamente carregado, pode ser realizado através da equação de Biot-Savart, apresentada na sua forma elementar para um condutor retilíneo de comprimento infinito conforme a equação (2).

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi r} \quad (2)$$

Para melhor entendimento, a **Figura 12** ilustra a utilização da Lei de Biot-Savart.

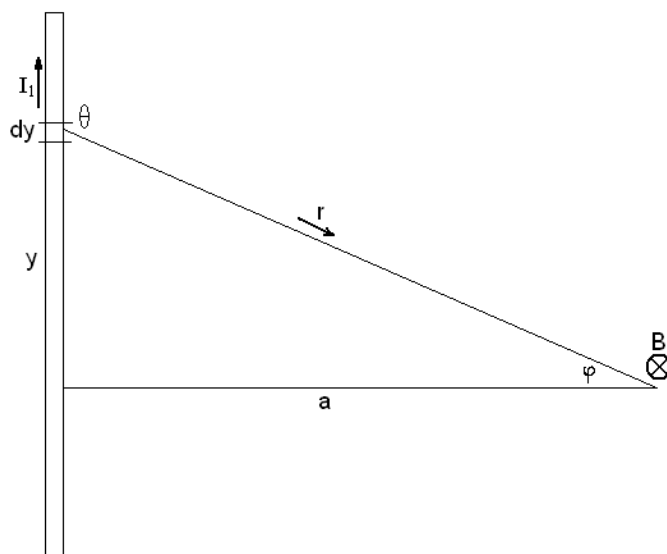


Figura 12 – Condutor e distâncias ao ponto de interesse para aplicação da Lei de Biot-Savart (GOOD, 1998)

A **Figura 12** representa um condutor de comprimento “y” e um ponto de interesse de determinação do campo magnético a uma determinada distância “a”.

Utilizando-se a Lei de Biot-Savart, é possível determinar o campo magnético em um determinado ponto a partir de trechos do condutor elétrico, bastando apenas conhecer o valor da corrente elétrica (I_1) e as coordenadas do ponto de interesse e do condutor no espaço.

Em cálculos realizados para linhas de transmissão, nas quais o comprimento dos condutores se apresenta consideravelmente maior do que seu diâmetro, o cálculo de campo magnético em um ponto de interesse pode ser obtido através da Lei de Biot-Savart. Porém, para o cálculo do campo magnético para linhas de transmissão mais complexas, há modelos específicos de cálculo analítico, considerando a forma dos condutores, conforme Nogueira (2007), os métodos de posicionamento dos condutores em um cabo formado por multicondutores, conforme estudos de Petterson (1997), e a disposição dos condutores em uma linha de transmissão (KAUNE, 1992).

Para o estudo das tensões induzidas entre condutores de um cabo umbilical, além de saber calcular o valor do campo magnético em um determinado ponto, é fundamental saber qual o efeito produzido pelo acoplamento entre o campo magnético gerado por um condutor carregado em outro condutor sob análise.

O acoplamento ocorre quando um condutor é submetido a um campo magnético variável ou quando este se movimenta através de um campo magnético estático. Quando submetido a uma dessas duas situações ocorre o surgimento de tensões induzidas e conseqüentemente correntes induzidas ao longo deste condutor.

Este fenômeno pode ser explicado pela equação de Maxwell (3), oriunda da lei da indução de Faraday:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

Antes de serem apresentadas as metodologias de análise de cabos umbilicais serão abordados modelos mais simples e detalhes a serem observados a respeito de cada modelo antes das simulações.

Utilizando estes condutores simplificados como modelo, podem ser adotadas metodologias para a aplicação em condutores mais elaborados.

Tratando-se de um modelo computacional, há a vantagem quanto à possibilidade de se realizar a parametrização da geometria, uma vez que para o estudo de um cabo podem ser modificadas as espessuras, raios e distâncias entre os condutores, permitindo a obtenção de resultados sem que haja a necessidade da criação de um protótipo real.

As tensões induzidas nos condutores de sinal são oriundas do acoplamento entre o campo magnético gerado pela passagem de corrente nos condutores de potência, sendo que este acoplamento é dependente da chamada indutância mútua.

3.2.1 A indutância mútua

A variação da corrente elétrica em um condutor provoca a variação do fluxo magnético ao seu redor e induz uma força eletromotriz (f.e.m.) nos condutores acoplados ao fluxo magnético gerado. Considerando-se a permeabilidade do meio constante, a f.e.m. induzida é proporcional à taxa de variação da corrente elétrica, conforme apresentado pela equação (4):

$$V = L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (4)$$

Em uma bobina de N espiras, a f.e.m. induzida é dada pela equação (5).

$$V = N \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (5)$$

Sendo $N \frac{\partial \Phi}{\partial t}$ o fluxo concatenado do circuito, combinando (4) e (5) obtemos:

$$L \frac{\partial i}{\partial t} = N \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (6)$$

Assim, a indutância própria da bobina é definida por:

$$L = N \frac{\partial \Phi}{\partial i} \quad (7)$$

A indutância mútua consiste no acoplamento pelo fluxo magnético gerado por uma bobina em relação a uma outra bobina próxima, conforme apresentado na **Figura 13**.

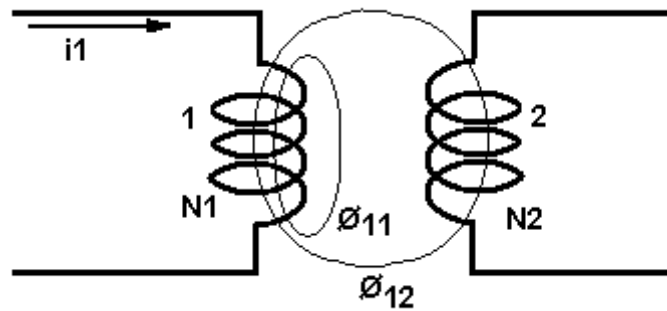


Figura 13 – Exemplo de acoplamento magnético entre duas bobinas, representando a indutância mútua

A corrente variável i_1 estabelece um fluxo Φ_1 . Este fluxo é dividido em duas partes, uma referente apenas à bobina N_1 , sendo o fluxo disperso Φ_{11} e o segundo fluxo que abrange ambas as bobinas, Φ_{12} .

A tensão induzida na bobina 2 é apresentada pela equação (8), de acordo com a lei de Faraday.

$$V_2 = N_2 \frac{\partial \Phi_{12}}{\partial t} \quad (8)$$

Como Φ_{12} é originado pela corrente i_1 , V_2 é proporcional à variação da corrente i_1 , conforme apresentado na equação (9).

$$V_2 = M \frac{\partial i_1}{\partial t} \quad (9)$$

em que M é a indutância mútua entre as bobinas 1 e 2.

Igualando as equações (8) e (9), temos:

$$V_2 = N_2 \frac{\partial \Phi_{12}}{\partial t} = M \frac{\partial i_1}{\partial t} \quad (10)$$

e

$$M = N_2 \frac{\partial \Phi_{12}}{\partial i_1} \quad (11)$$

Esse é o cálculo elementar para o acoplamento entre duas bobinas, porém, no caso dos cabos umbilicais, constituídos de vários condutores de circuitos diferentes, além do aterramento das blindagens, o cálculo é bem mais complexo.

Neste caso a indutância mútua ocorre entre cada um dos condutores e suas respectivas blindagens e o campo equivalente à circulação de corrente pelas blindagens provoca o acoplamento magnético entre blindagens e aos condutores. Resumindo, há indutância mútua condutor a condutor.

A indutância mútua depende da forma de disposição, raios de condutores e suas blindagens, forma de propagação dos condutores ao longo do cabo e configuração dos aterramentos das blindagens.

Segundo Weedy (1980), para o arranjo dos condutores de potência em trifólio, caso as blindagens sejam aterradas nas duas extremidades, o fluxo concatenado pelas blindagens produz a circulação de corrente nas mesmas, resultando no aumento da resistência série e redução da indutância série equivalente dos condutores de potência.

Para este caso específico de disposição em trifólio dos condutores de potência, a indutância mútua é dada pela equação (12), (WEEDY, 1980).

$$M = \mu_0 i_n \frac{S}{r_b} \quad (12)$$

3.3 O MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

A **Figura 14** apresenta a ilustração da representação geométrica de uma seção transversal do cabo umbilical completo, com estruturas metálicas, condutores elétricos, proteções mecânicas, apoios, isolamentos, separações, blindagens e a armadura metálica.

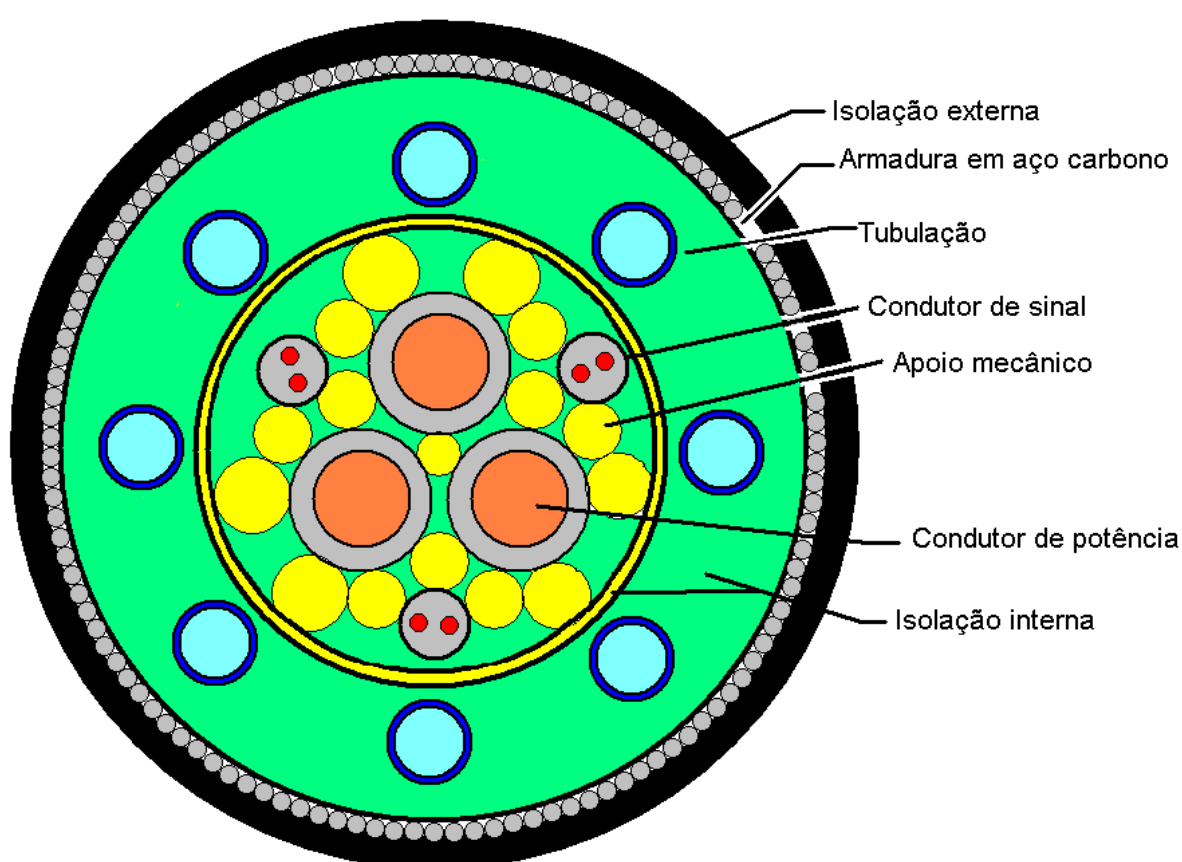


Figura 14 – Modelo de cabo umbilical completo

Apesar de a estrutura ser composta por isolamentos, apoios, borrachas, fibras e polímeros para a distribuição e separação dos componentes no interior do cabo, do ponto de vista magnético, todas essas estruturas são interpretadas como ar, uma vez que elas não influenciam na distribuição de linhas de campo magnético.

Desta maneira, para a análise magnética do cabo umbilical, serão consideradas apenas as estruturas metálicas e condutores elétricos presentes no cabo umbilical.

Este procedimento não poderia ser adotado para uma análise mecânica e/ou térmica, uma vez que estas estruturas não metálicas influenciam no resultado final de tal análise.

A **Figura 15** apresenta a ilustração da geometria do cabo umbilical, discriminando a disposição dos condutores de potência e de sinal, bem como a das blindagens e armadura externa, considerando apenas elementos relevantes às análises magnéticas.

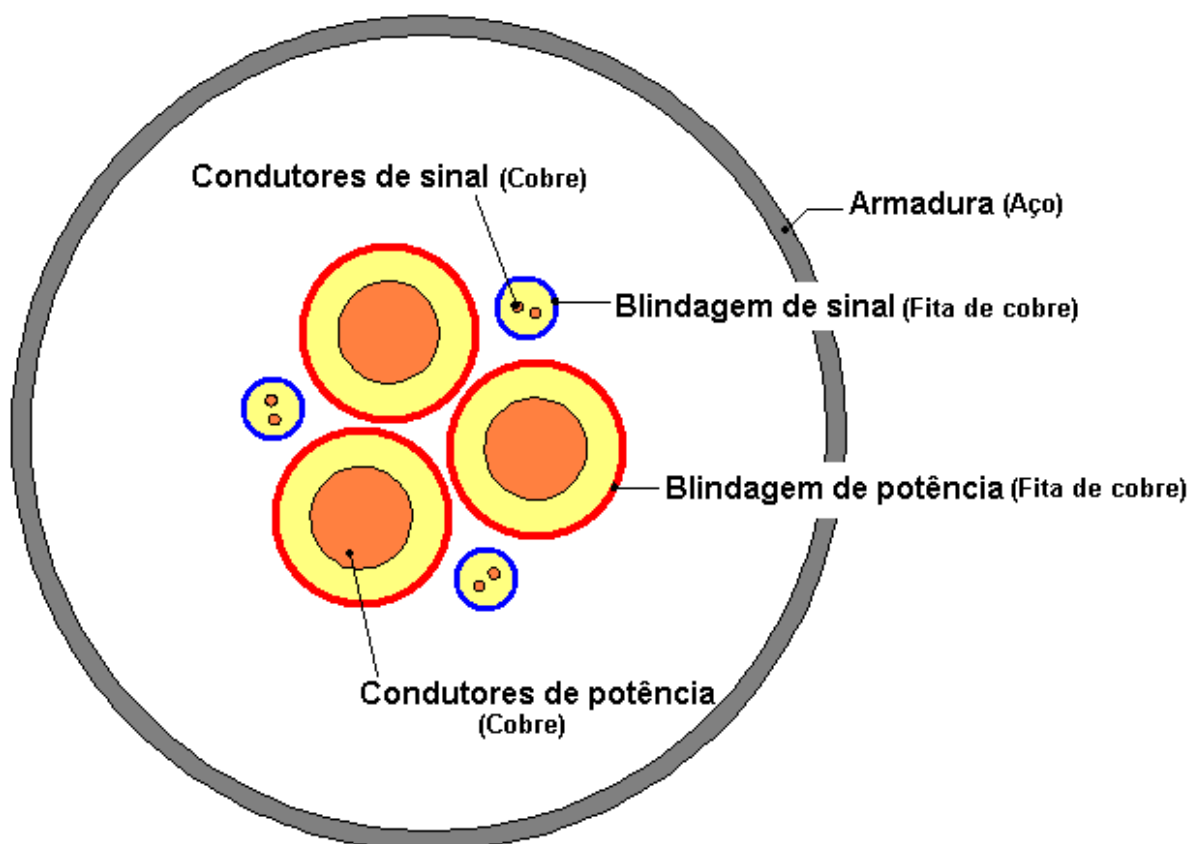


Figura 15 – Ilustração da geometria do cabo umbilical simplificado para simulações magnéticas

O modelo de cabo umbilical adotado é constituído por condutores de potência e condutores de sinal, esses condutores, por sua vez, possuem blindagens individuais e todos esses elementos dispostos no interior do cabo umbilical estão envoltos por uma armadura de aço.

3.3.1 Modelagem da armadura

A armadura é uma estrutura metálica, localizada na parte mais externa do cabo umbilical para garantir a integridade mecânica dos componentes internos do cabo umbilical.

Essa armadura é frequentemente constituída por arames de aço entrelaçados ao longo do cabo. A realização das simulações torna-se muito complexa quando são adotadas blindagens como as da armadura que são compostas por vários arames e, visando a simplificação da geometria ao realizar-se as análises com o MEF, essa geometria multifilar pode ser simplificada por uma área equivalente, desde que não ocorra influência do efeito pelicular nos condutores da armadura.

Para o acoplamento com o circuito elétrico podem ser utilizados dois tipos de componentes, o condutor maciço ou cabo multifilar, conforme apresentado na **Figura 16**.

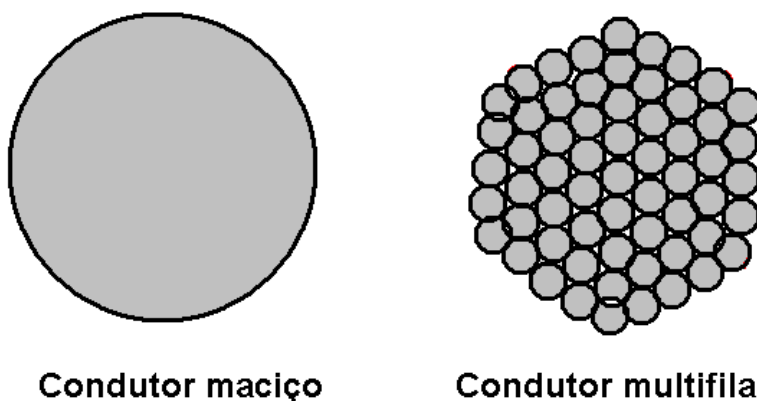


Figura 16 – Ilustrações de condutor maciço e condutor multifilar

A escolha entre esses tipos de cabo difere na realização das simulações, uma vez que o condutor maciço considera o efeito pelicular nos cálculos.

A resistência elétrica dos condutores não varia apenas com a temperatura, mas também com a variação da frequência, (CENTRAL STATION ENGINEERS OF THE WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, 1964).

Com o aumento da frequência, a corrente elétrica tende a circular na região periférica dos condutores. A esse efeito denominamos por efeito pelicular, (BASTOS, 2005).

A discretização da geometria da armadura, considerando os arames, exige mais capacidade computacional e conseqüentemente maior tempo para a resolução das simulações. Além disso, por ser uma geometria muito complexa, poderá acarretar em elementos mal formados, comprometendo a confiabilidade do resultado final das simulações.

Visando evitar esses problemas foi utilizada uma área equivalente para a armadura, conforme apresentado na **Figura 17**, utilizando-se condutor maciço no modelo, de modo a levar em consideração o efeito pelicular observado nos arames de aço que compõem a região da armadura.

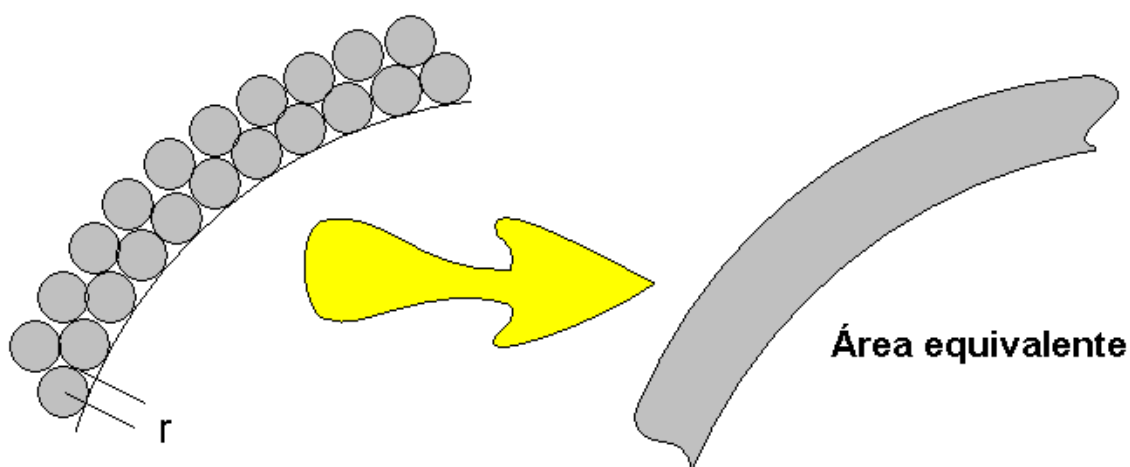


Figura 17 – Área equivalente da armadura

A utilização da área maciça equivalente evita que a discretização seja realizada para cada um dos condutores, diminuindo o número de elementos e evitando a criação de elementos com má formação.

A área equivalente pode ser calculada conforme a equação (13).

$$A_{eq} = N\pi r^2 \quad (13)$$

3.3.2 Acoplamento com circuito elétrico

O acoplamento do MEF com circuito elétrico permite que a alimentação dos condutores modelados em elementos finitos seja feita por fontes de tensão, além de possibilitar a obtenção direta da tensão induzida nos demais condutores do domínio de estudo, (COSTA, 2007).

A **Figura 18** apresenta a representação geométrica utilizada para exemplificar o acoplamento entre o MEF e as equações de circuito elétrico, onde se tem um cabo constituído por dois condutores envoltos por uma blindagem metálica externa, representado pelo corte transversal. Um dos condutores será denominado condutor gerador e o outro, condutor receptor. Ao condutor gerador é injetada uma corrente elétrica e no condutor receptor é medida a tensão induzida em seus terminais em relação à carcaça metálica.

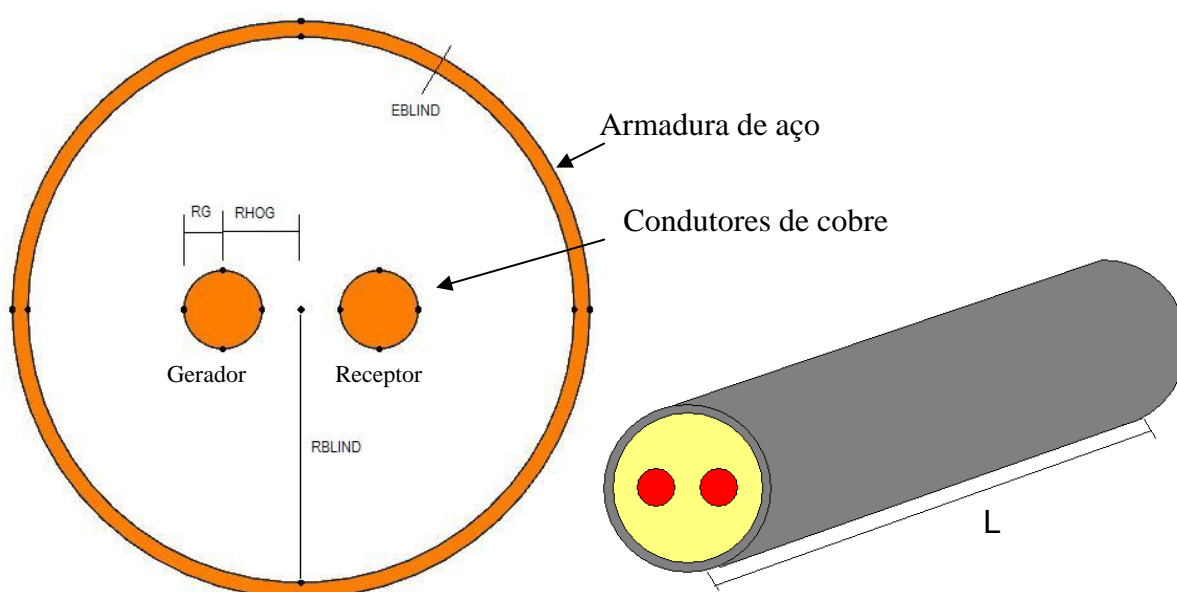


Figura 18 - Modelo de cabo umbilical com apenas dois condutores

A **Figura 19** apresenta o circuito elétrico utilizado para o acoplamento com o modelo de elementos finitos para o cabo com dois condutores, ele apresenta uma fonte de corrente conectada ao cabo gerador (M1) e o cabo receptor (M2) e a armadura externa do cabo (M3).

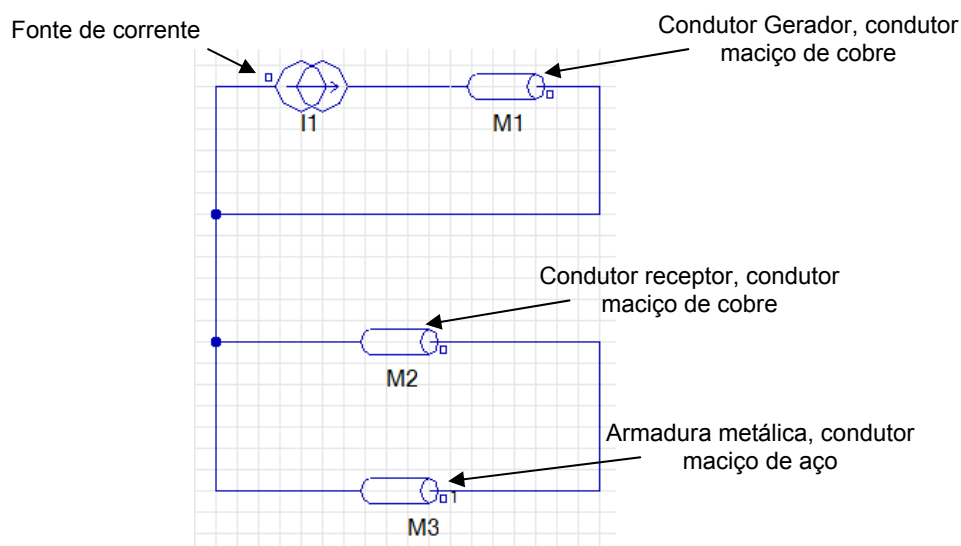


Figura 19 – Circuito elétrico utilizado para o acoplamento ao modelo de elementos finitos para o cabo com apenas dois condutores e uma armadura externa

Ao utilizar o elemento de circuito do tipo condutor maciço, o efeito pelicular é considerado nas simulações. É através destes condutores do circuito elétrico apresentado na **Figura 19** que se dá o acoplamento com o modelo de elementos finitos.

No circuito da **Figura 19** a corrente circula no condutor gerador devido à presença da fonte de corrente e o acoplamento é feito entre os condutores adjacentes, representados no circuito elétrico por M2 (condutor receptor) e M3 (blindagem externa), devido ao acoplamento mútuo pelo campo magnético.

3.3.3 A permeabilidade magnética

Para a realização das simulações, é importante definir uma permeabilidade magnética coerente para os materiais ferromagnéticos, uma vez que tal dado influencia diretamente na distribuição das linhas de campo magnético e conseqüentemente no acoplamento entre os circuitos.

A permeabilidade magnética dos materiais empregados nas armaduras dos cabos umbilicais pode apresentar diferentes valores, de acordo com as especificações necessárias para cada projeto.

A permeabilidade é definida pela equação (14).

$$\mu_r = \frac{\vec{B}}{(\mu_0 \vec{H})} \quad (14)$$

A **Figura 20** apresenta quatro curvas de magnetização para os seguintes materiais: Ferro Armco, ferro fundido, chapa de aço silício e aço fundido, sendo representados no eixo vertical os valores de indução magnética (\vec{B} em μT) e no eixo horizontal os valores de campo magnético (\vec{H} em A/m).

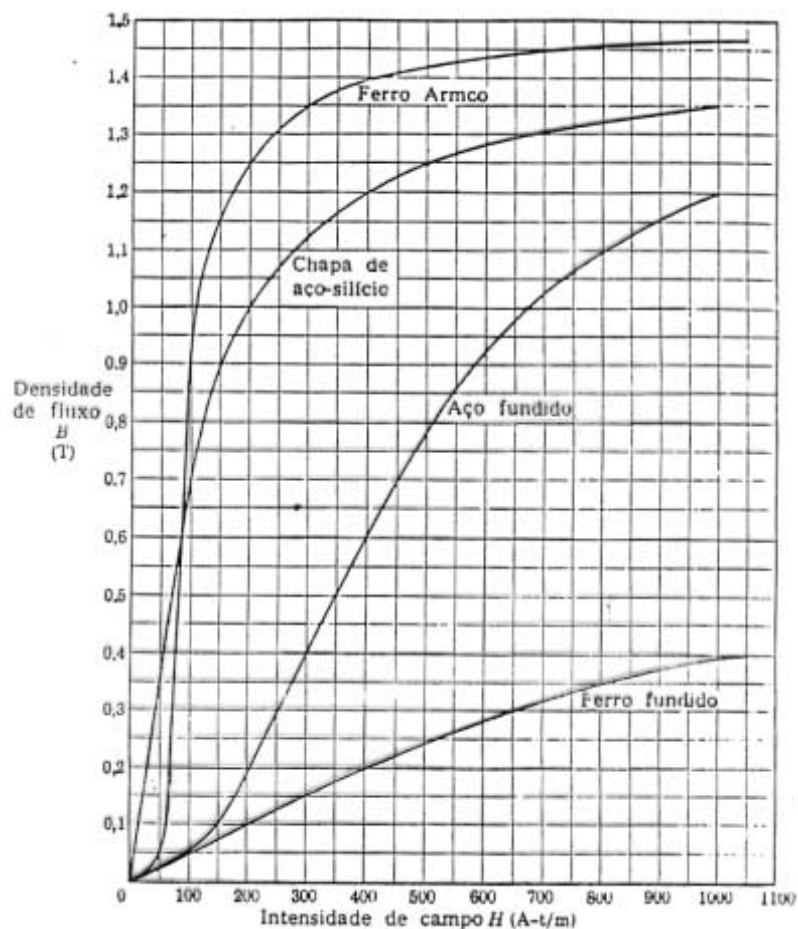


Figura 20 – Curvas de magnetização para diferentes ligas de ferro (UNESP, 2009)

Estudos demonstram que os valores de campo magnético no interior dos cabos umbilicais são consideravelmente baixos. Pode-se observar na **Figura 20** que valores de campo magnético baixos estão no início das curvas de magnetização. Essa é uma região de difícil modelagem, sendo adotados valores lineares para os materiais nesta faixa de campo magnético, como apresentado na **Figura 21**, (CEDRAT, 2009).

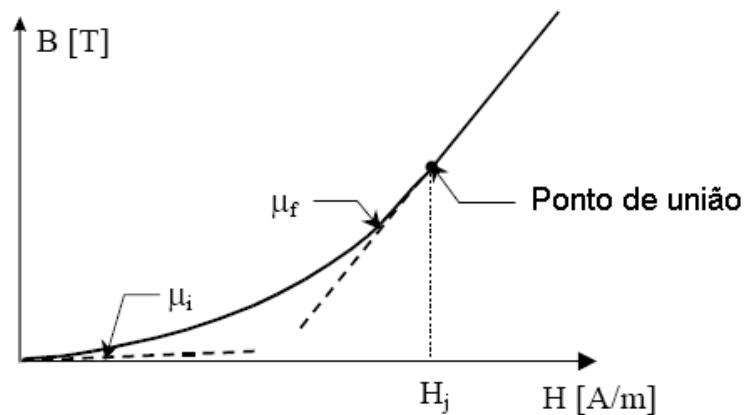


Figura 21 – Curva de Rayleigh para baixos valores de campo magnético, dependência de $B(H)$ (CEDRAT, 2009)

Trabalhos relacionados ao estudo eletromagnético e térmico de cabos umbilicais adotam entre 500 a $1000\mu_0$, como nos estudos de Cardoso (1995), assim como em Bremnes (2005), que por sua vez, adota o valor de $1000\mu_0$ para o material da armadura. Costa e Shackleton (2007) adotam o valor de $200\mu_0$, sendo este o valor adotado para a realização das simulações deste trabalho.

3.3.4 Definição das condições de contorno

A análise do MEF Bidimensional aplicado à magnetodinâmica (estudo de campos magnéticos em regime permanente senoidal) requer uma atenção maior no que se refere às condições de contorno, uma vez que as linhas de campo magnético se estendem ao infinito, sendo necessário o truncamento do domínio.

Para este modelo em estudo, foram analisadas três condições de contorno: campo tangencial, potencial imposto e região infinita.

3.3.4.1 Campo tangencial

A condição de contorno por campo tangencial delimita a região de estudo pela imposição de campo magnético tangencial nos limites da fronteira do domínio. Devido à presença da blindagem de aço considerada com permeabilidade magnética muito superior à do ar ($200\mu_0$), tem-se como consequência o confinamento das linhas de campo magnético no interior do umbilical, com ínfima dispersão de campo além da armadura do umbilical. Neste caso, é possível impor a condição de campo tangencial na camada mais externa da armadura, obtendo-se linhas de campo magnético tangenciando a fronteira do domínio.

A **Figura 22** apresenta as linhas de potencial magnético tangenciando a fronteira com condição de contorno de campo tangencial, não sendo observadas linhas de campo magnético na região externa ao cabo.

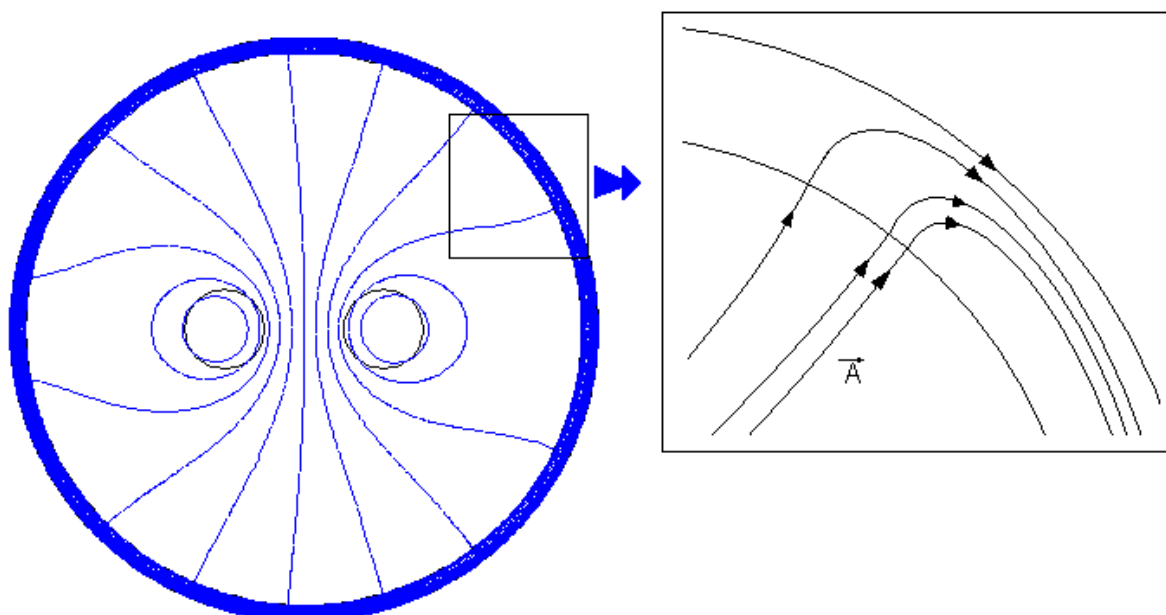


Figura 22 – Linhas equipotenciais de potencial magnético na condição de campo tangencial

3.3.4.2 Região infinita

A “região infinita” é um artifício matemático que permite modelar a região além dos limites da fronteira geométrica do umbilical, considerando linhas de campo dispersas do sistema sob análise (CEDRAT, 2009). Utilizando esta técnica, é definida a região de contorno, considerando que o potencial magnético é nulo no infinito.

A região infinita é definida por dois parâmetros, a região interna e a externa. Na região externa é definido o potencial magnético como sendo nulo.

A técnica de região infinita é interessante de ser utilizada quando a análise é realizada inclusive para as regiões fora do objeto sob a análise, ou seja, quando há o interesse em avaliar o campo disperso.

Esta técnica permite estabelecer um limite na análise das linhas de campo magnético, assim como nas outras técnicas, apesar de que devido à presença da armadura em material ferromagnético não ocorrer a dispersão do campo magnético.

A **Figura 23** apresenta um exemplo de região infinita, podendo ser observadas duas circunferências que determinam a região infinita, a de raio interno e externo.

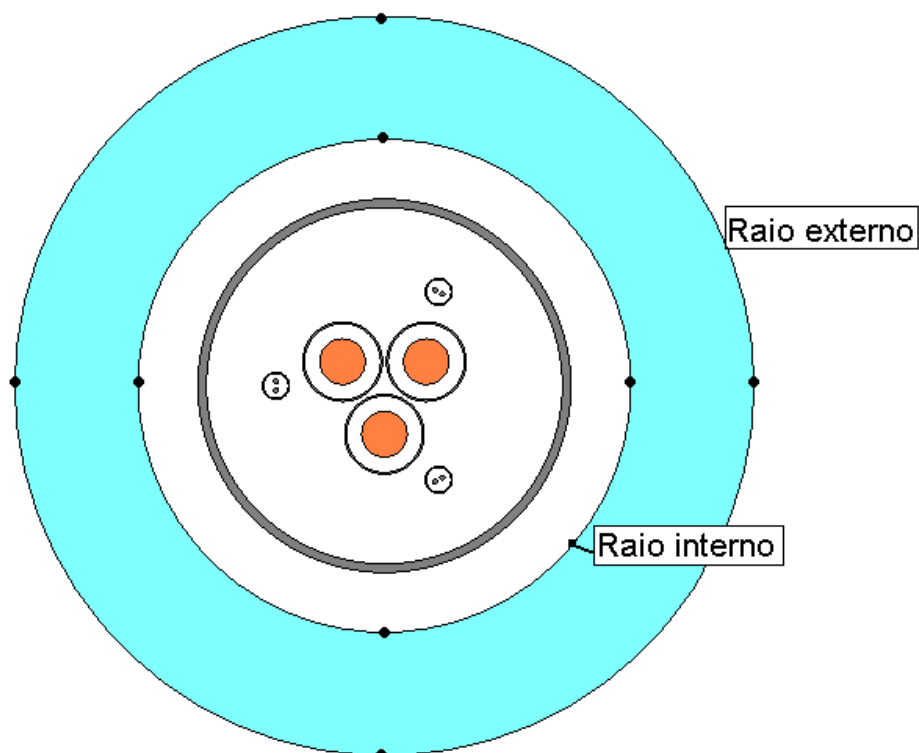


Figura 23 – Ilustração da região infinita aplicada ao cabo umbilical.

Recomenda-se manter o distanciamento de pelo menos 50% a mais que o tamanho da geometria sob análise para evitar erros (CEDRAT, 2009).

No **item 5.1.2** são apresentados os resultados das simulações realizadas para verificação da viabilidade de utilização da região infinita para os diversos espaçamentos entre nós da malha.

3.3.4.3 Potencial imposto

A condição de contorno por potencial imposto, assim como se dá no caso da condição de campo tangencial, é aplicada ao limite da fronteira do domínio em estudo, conhecida por condição de Dirichlet (WORZYK, 2009). Na fronteira é imposto aos nós da circunferência externa da armadura um potencial magnético conhecido, ou seja, considera-se que as linhas de fluxo magnético ficam confinadas nos limites da fronteira, jamais a atravessando.

A **Figura 24** apresenta a discretização por meio da condição de contorno por potencial imposto. É possível observar que para a mesma geometria, a quantidade de elementos é menor para a condição de contorno por potencial imposto, uma vez que não há a discretização de uma área externa ao cabo umbilical, não sendo considerado o campo além da região externa ao cabo.

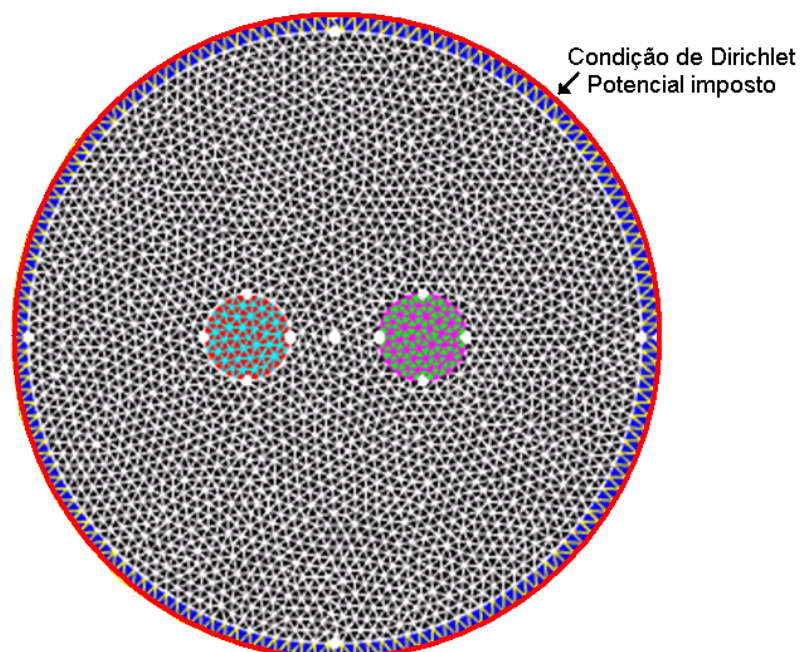


Figura 24 – Condição de contorno por potencial imposto (em vermelho) e discretização da geometria

Utilizando esta técnica de condição de contorno de Dirichlet, o vetor potencial magnético é considerado zero na fronteira do domínio. Desta maneira, os cálculos são simplificados, uma vez que os cálculos dos potenciais são realizados apenas nos nós internos da malha.

3.3.5 Uso da região filiforme para alívio da discretização

Alguns tipos de geometria podem provocar grandes problemas de discretização e falhas ou atrasos na resolução das simulações.

Uma técnica que não impacta no resultado da tensão induzida nos cabos de sinal, mas que alivia muito a discretização, é a utilização de uma região filiforme (ou região 1D) ao invés de uma região bidimensional representando as blindagens.

As blindagens possuem uma espessura que pode ser representada em elementos finitos por uma região filiforme que geometricamente é uma região 1D, porém a espessura está implícita na formulação.

Desta maneira, a discretização pode ser feita com uma menor quantidade de elementos, alterando muito pouco o resultado final de tensão induzida nos condutores de sinal, conforme apresentado no **item 5.1.3**.

A **Figura 25** apresenta a geometria do cabo de potência e a blindagem representada como uma região bidimensional, podendo-se notar o adensamento de elementos na região da blindagem. Lembrando que quanto maior o número de elementos, maior será o tempo de processamento e resolução dos sistemas.

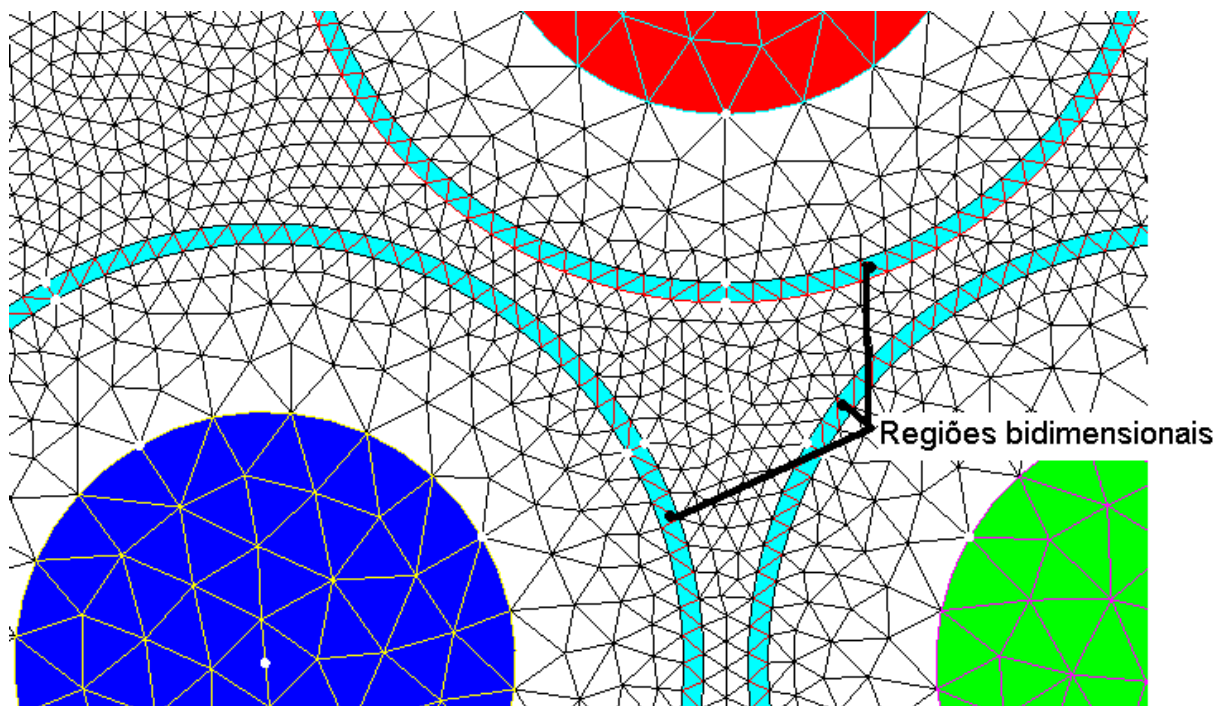


Figura 25 – Detalhe da discretização para regiões bidimensionais

A **Figura 26** apresenta a mesma geometria do cabo de potência, porém, ao invés da utilização da região 2D para a determinação da blindagem, é utilizada uma região filiforme, podendo-se notar que a quantidade de elementos finitos é menor.

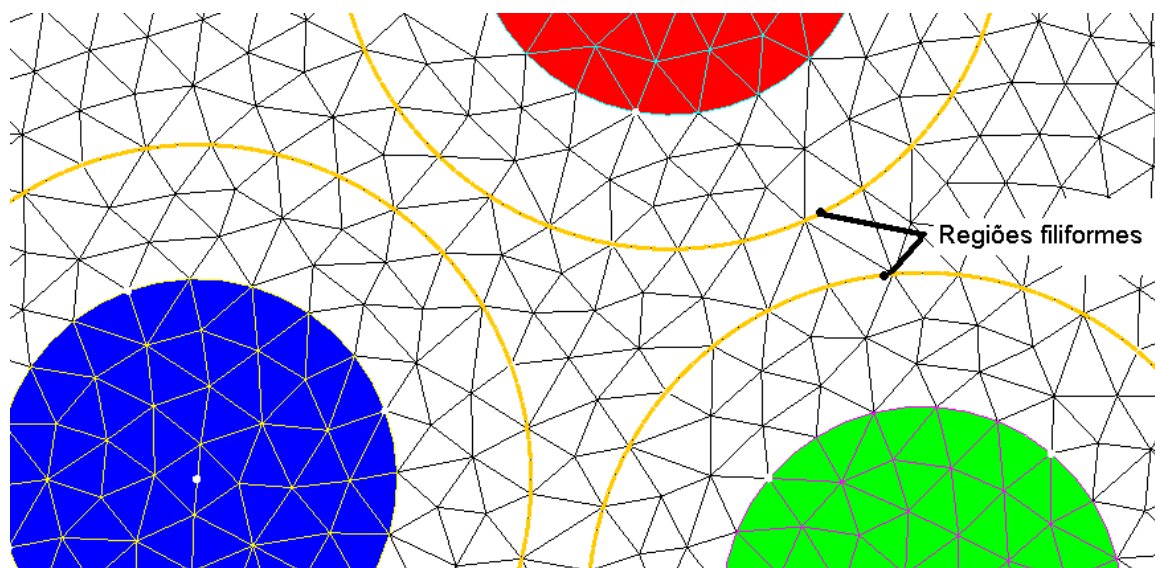


Figura 26 – Detalhe da discretização para regiões filiformes

Esta técnica pode ser empregada no caso de não convergência da discretização das faces da geometria devido à insuficiência de memória computacional para o processamento.

4 METODOLOGIA

4.1 LIMITAÇÕES DO MODELO NO MEF 3D

As estruturas que formam o cabo umbilical distribuem-se ao longo do comprimento de maneira não retilínea, geralmente por uma propagação helicoidal, impossibilitando a simulação em 2D.

O modelo recomendado para a realização das simulações para um cabo umbilical seria o modelo tridimensional (3D), representando o comprimento total do cabo. Porém, a quantidade de memória necessária para a realização das simulações de um modelo tridimensional de um cabo umbilical com quilômetros de comprimento é completamente inviável, uma vez que a quantidade de memória necessária para o processamento computacional seria elevadíssima.

Por este motivo, optou-se pela realização de análises preliminares de trechos curtos do cabo umbilical de apenas alguns centímetros de comprimento, as quais foram submetidas a diferentes análises e modelagem para definição do método final de avaliação, utilizando-se o ambiente tridimensional do programa Flux.

Uma possibilidade é realizar as simulações para uma parcela de cabo que possa representar o comprimento total do cabo umbilical de interesse. Esse comprimento é determinado pelo Mínimo Múltiplo Comum (MMC) entre os passos de giro das estruturas.

O MMC representa um trecho do cabo umbilical que se repetirá ao longo de seu comprimento. Assim, as simulações podem ser realizadas para um trecho e propagadas para o comprimento total do cabo umbilical.

A **Figura 27** apresenta um exemplo de representação do MMC para o cabo umbilical, sendo os movimentos de rotação local e global representados por ciclos senoidais.

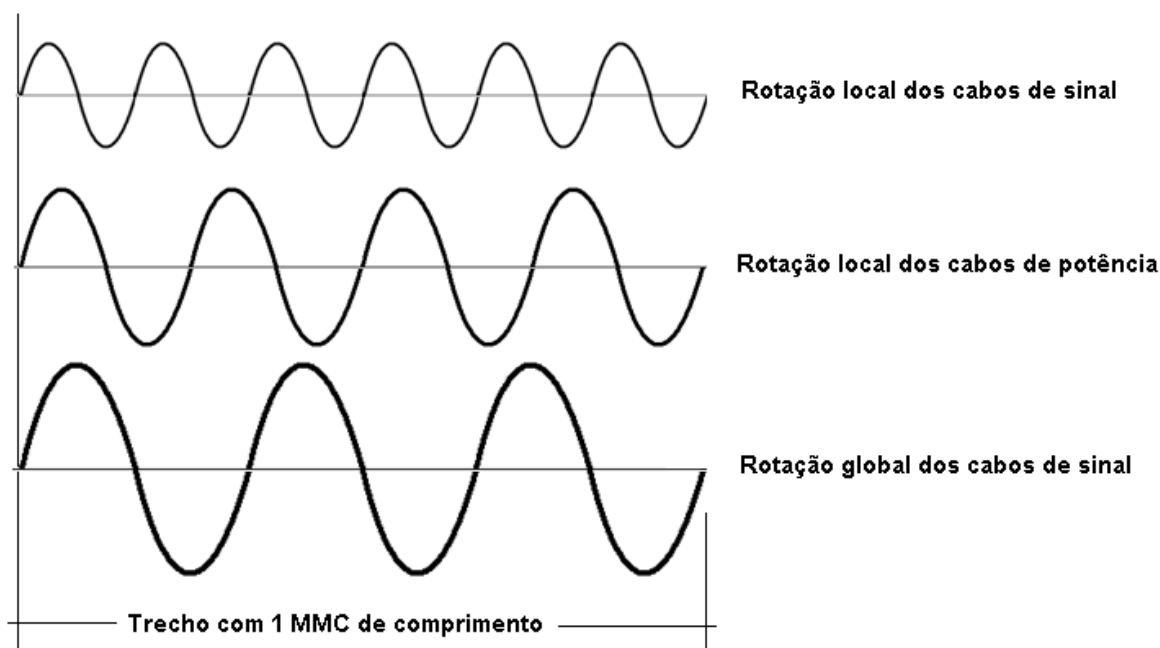


Figura 27 – Representação do MMC para os movimentos de rotação local e global dos componentes do cabo umbilical

O MMC entre estes três movimentos ocorre quando todos os ciclos completos coincidirem, assim todas as possibilidades de acoplamentos são satisfeitas.

O resultado final é a somatória das tensões induzidas para cada fatia correspondente a um MMC de comprimento até completar o comprimento total do cabo umbilical.

Inicialmente foi adotada a propagação helicoidal dos condutores de potência e de sinal, a partir da face bidimensional, conforme apresentado na **Figura 28**, obtendo-se um trecho tridimensional, conforme apresentado na **Figura 29**. A propagação da face para originar o modelo tridimensional é denominada extrusão.

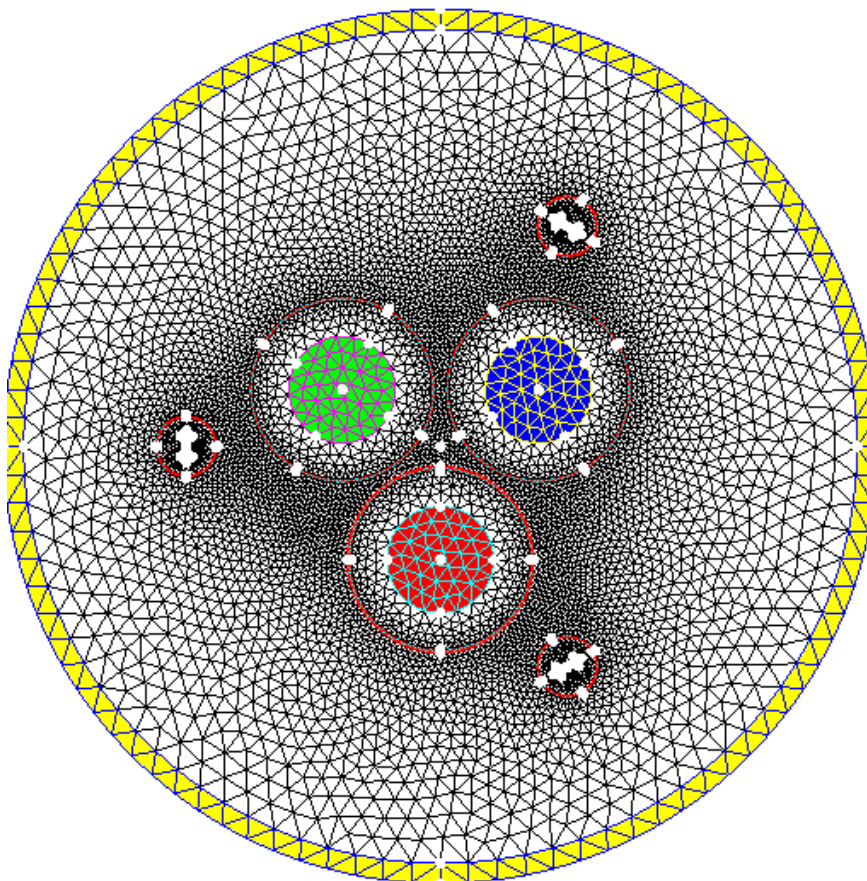


Figura 28 – Face bidimensional do cabo umbilical e sua malha de elementos finitos

As condições de contorno adotadas foram o potencial imposto, para a superfície externa da blindagem e a periodicidade para o comprimento.

A periodicidade é utilizada para deixar implícito que nos cortes transversais da geometria ocorre uma repetição periódica com a profundidade de domínio definida, desta maneira sendo realizado o truncamento da condição de contorno.

A **Figura 29** apresenta alguns pontos de vista utilizando uma fatia transversal do cabo umbilical para a modelagem tridimensional.

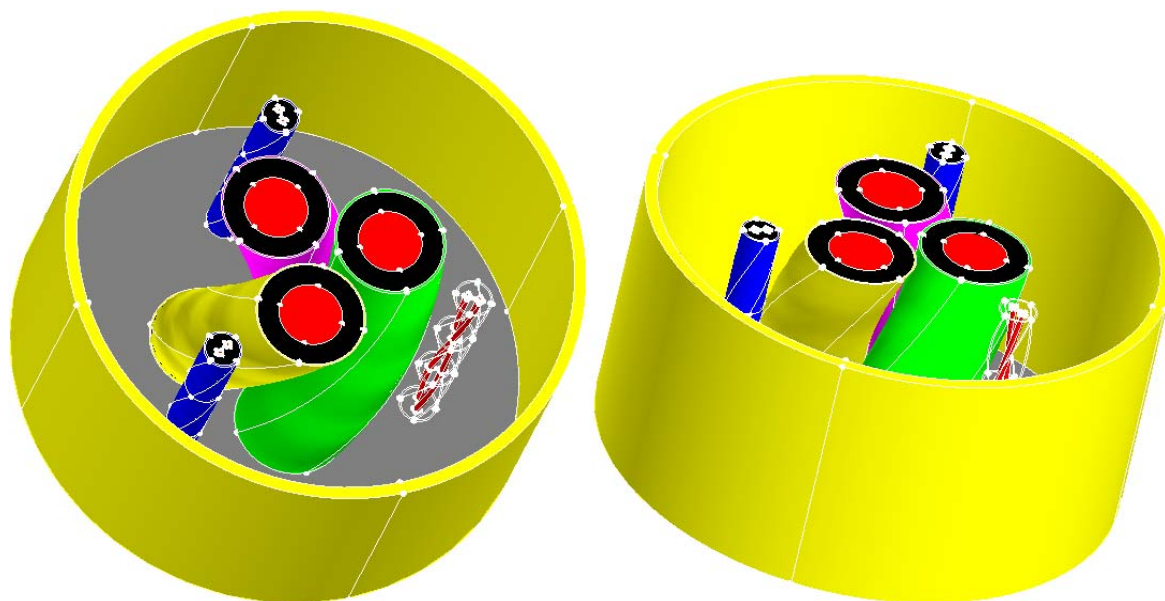


Figura 29 – Modelo tridimensional do cabo umbilical

O objetivo inicial deste trabalho seria representar o cabo umbilical da maneira como ele é projetado, porém o programa Flux3D apresenta uma limitação quanto à extrusão de geometrias, não sendo possível realizar a extrusão dupla-helicoidal, conforme apresentado no **item 3**. Por este motivo tanto as simulações bidimensionais quanto tridimensionais foram realizadas aplicando-se extrusões helicoidais simples, apenas rotação dos condutores ao redor de seu eixo local.

A segunda etapa realizada foi a discretização dos volumes do modelo tridimensional criado, conforme apresentado na **Figura 30**.

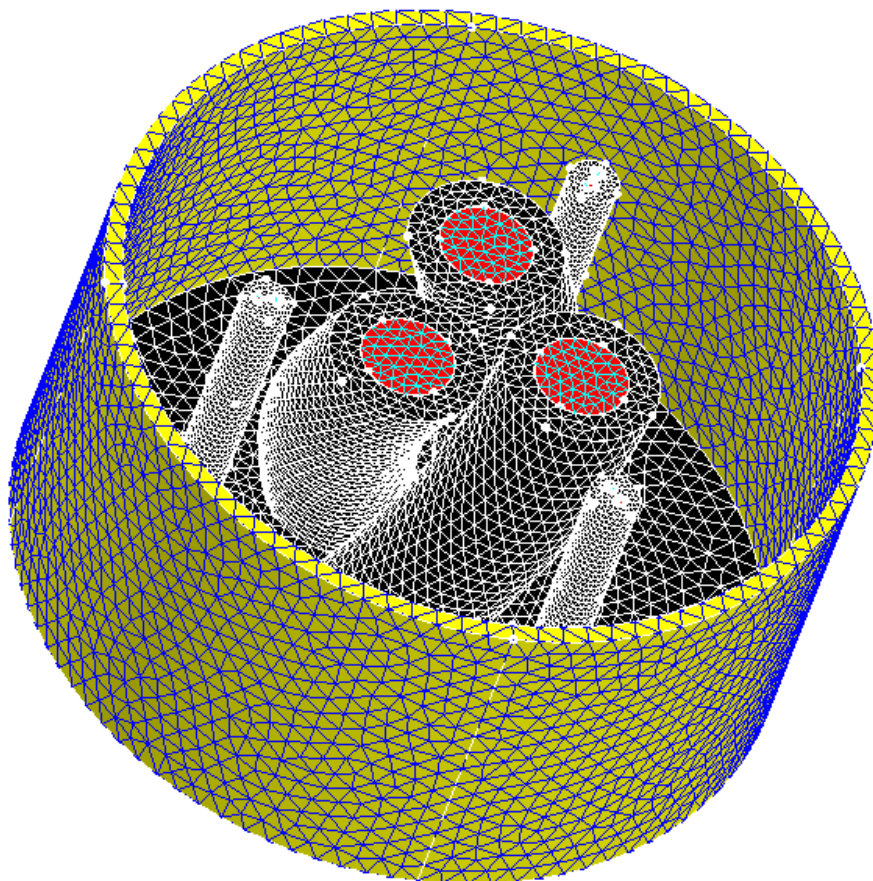


Figura 30 – Malha de elementos finitos para simulação tridimensional

Mesmo utilizando-se malha de primeira ordem ocorreram problemas de insuficiência de memória de processamento durante as simulações. As tentativas de resolução utilizando este modelo exigiram elevada memória computacional resultando na não convergência do processo iterativo.

A **Figura 31** apresenta a comparação da discretização da geometria bidimensional e tridimensional.

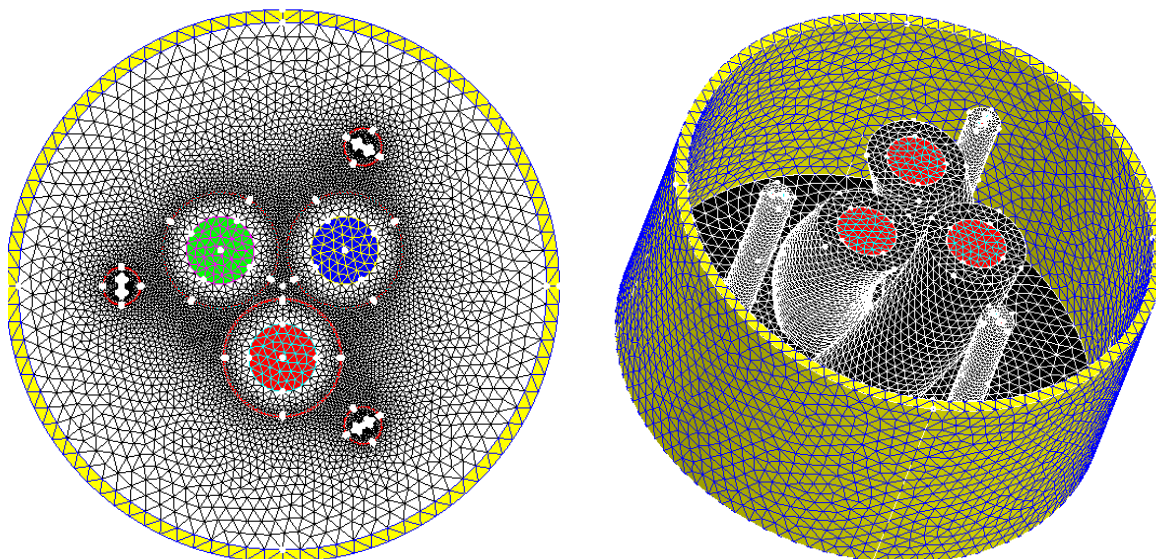


Figura 31 – Discretização das geometrias bidimensional e tridimensional

Para a simulação bidimensional, foram utilizados apenas 12.480 elementos de face, enquanto que para a simulação tridimensional foram utilizados 2.321.880 elementos de volume, ou seja, uma diferença de 186 vezes. Esta diferença impacta diretamente no tempo de simulação, sendo muito maior para a simulação tridimensional.

As tentativas de resolução utilizando-se a discretização do modelo tridimensional exigiram memória computacional superiores a 10GB de RAM para algumas configurações, pois a malha é muito densa, necessitando de um elevado tempo de processamento e resultando na não convergência dos resultados.

Uma terceira tentativa de avaliar a viabilidade de utilização da modelagem tridimensional é a utilização de condutores não malhados (CEDRAT, 2009), tanto para os condutores de potência quanto para os condutores de sinal.

Um condutor não malhado é um volume que é superimposto à geometria malhada, porém, não apresentando dependência direta com a mesma. O cálculo do campo magnético gerado pelas correntes que circulam nos condutores é realizado pela Lei de Biot-Savart.

Lembrando que a equação (2) apresentada é válida para um condutor retilíneo de comprimento infinito, para condutores com volumes definidos, como no caso dos

não malhados, o cálculo é realizado para a densidade de corrente que circula no volume ($\vec{J}_v dV$), devendo ser utilizada a Lei de Biot-Savart (15) (CEDRAT, 2009).

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int \vec{J}_v dV \wedge \frac{\vec{r}}{r^3} \quad (15)$$

Utilizando-se condutores não malhados na geometria tridimensional a malha de elementos finitos torna-se menos densa, diminuindo-se a exigência por memória de processamento computacional e o tempo para a realização das simulações.

A **Figura 32** apresenta a utilização de condutores de potência e sinal não malhados na realização de simulações tridimensionais.

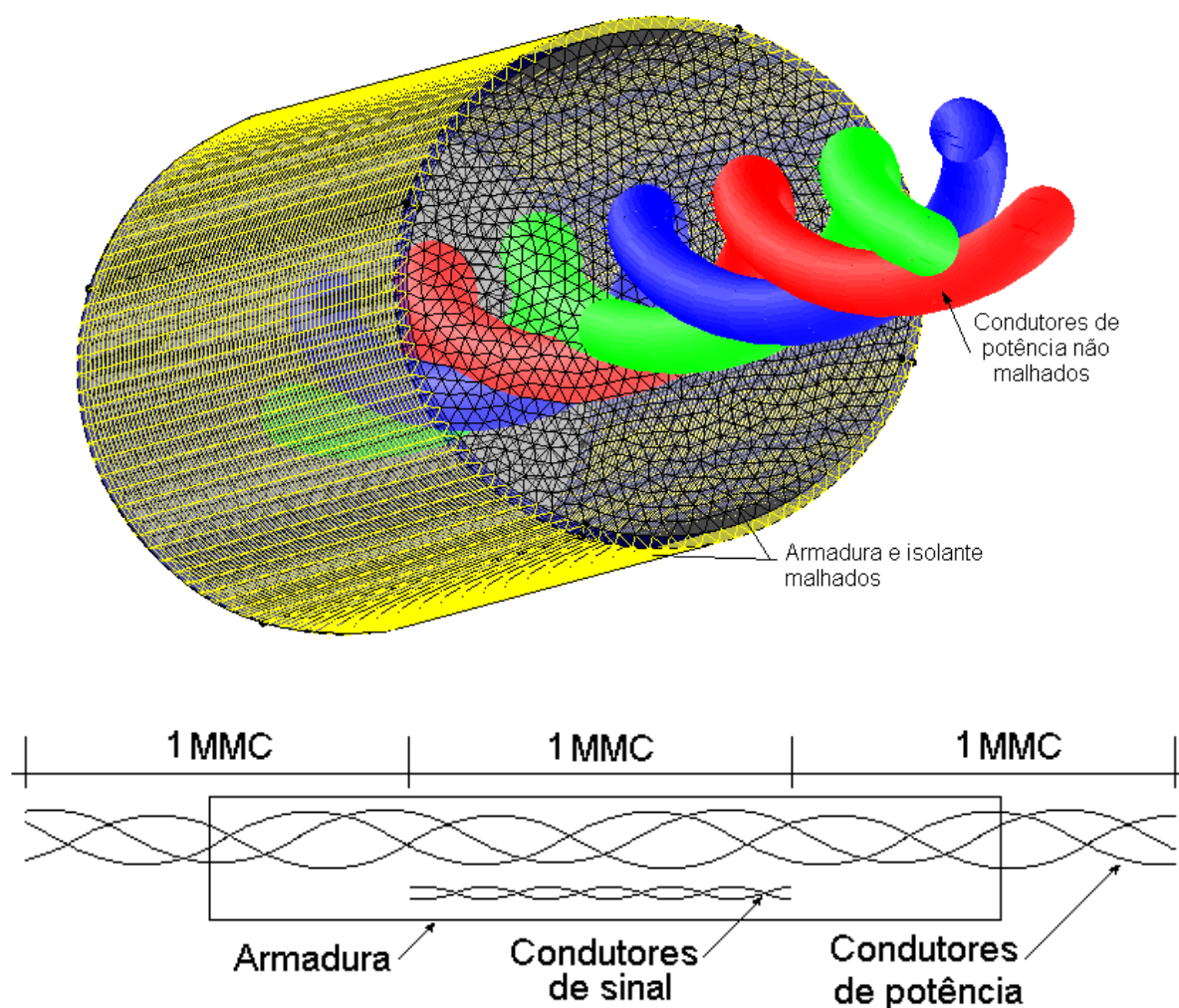


Figura 32 – Representação do modelo tridimensional utilizando armadura e isolante malhados, condutores de potência e sinal não malhados e a relação de comprimento entre armadura e condutores de potência.

A armadura e os condutores de sinal não malhados da geometria tridimensional apresentada na **Figura 32** foram acoplados ao circuito elétrico disposto na **Figura 33**.

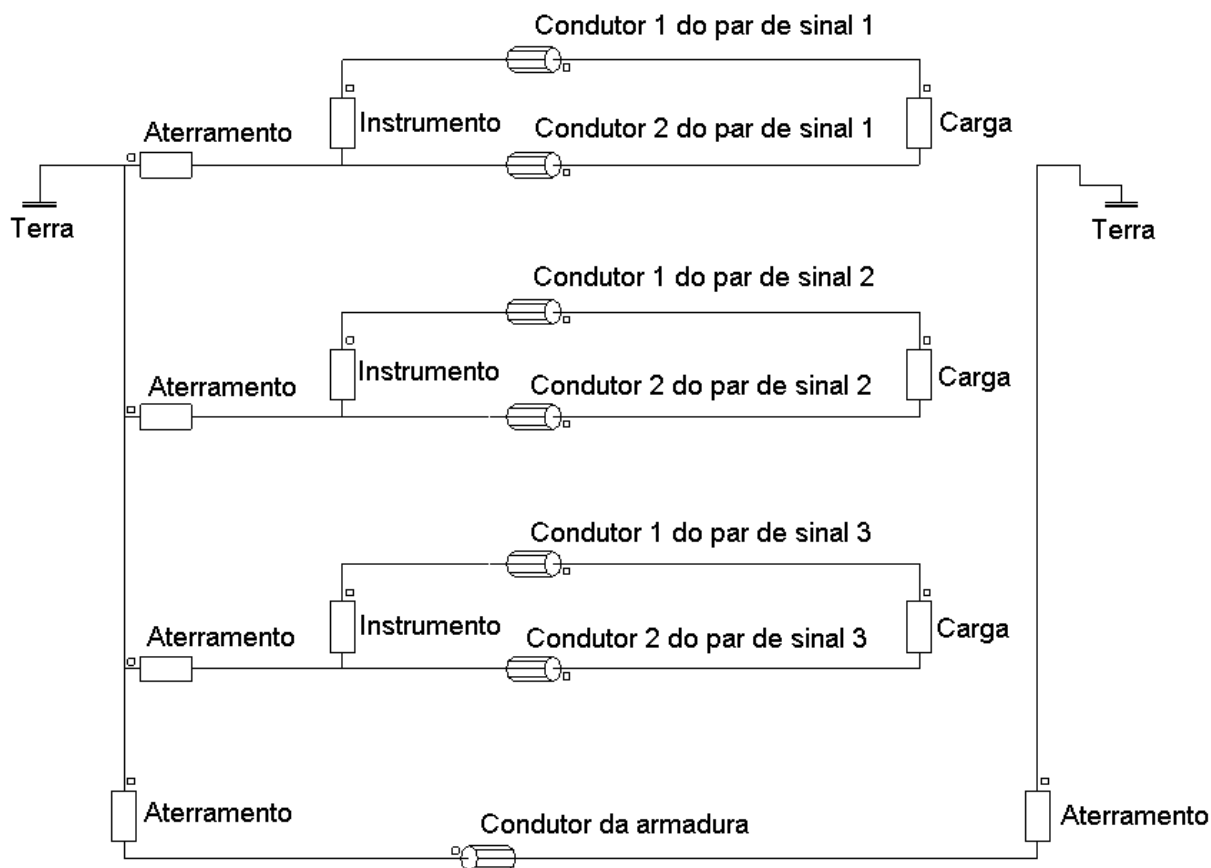


Figura 33 – Circuito elétrico acoplado aos condutores da geometria tridimensional

No circuito elétrico apresentado na **Figura 33** estão dispostos os três pares de condutores de sinal e a armadura, utilizando-se condutores multifilares, bem como as resistências de carga e instrumentação e de aterramento.

As resistências de aterramento são utilizadas apenas durante o processo de simulação para auxiliar a parametrização do circuito, ou seja, são atribuídos valores muito baixos de resistência para representar a conexão à terra dos elementos do circuito ou valores muito elevados para representar a desconexão à terra dos elementos do circuito.

Os condutores de potência são caracterizados por corrente imposta, ou seja, não são utilizadas fontes de corrente no circuito, mas sim um valor conhecido de corrente elétrica, não havendo a necessidade de representação no circuito elétrico.

Com esta técnica a corrente é imposta nos condutores de potência, ocorrendo o acoplamento de campo magnético com os elementos do cabo e consequentemente podendo-se obter o valor de tensão induzida nos condutores de sinal.

A distribuição equipotencial de indução magnética na armadura é apresentada na **Figura 34** e na **Figura 35** para o material isolante em simulação tridimensional utilizando condutores não malhados.

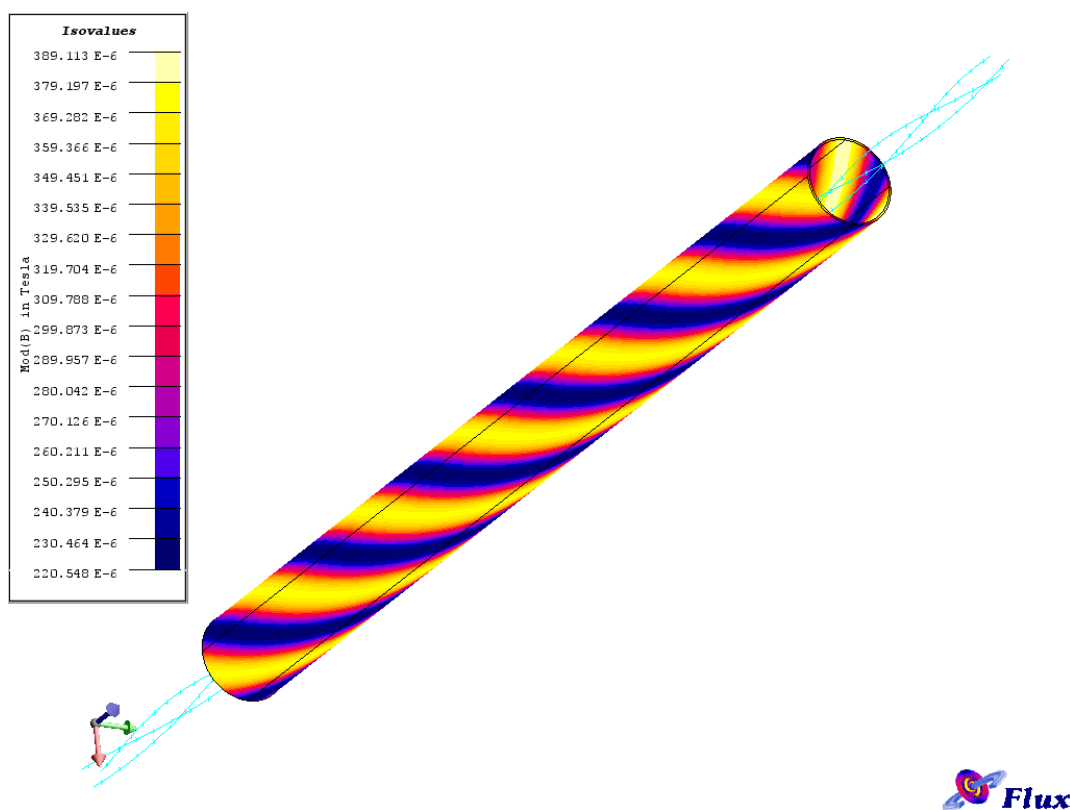


Figura 34 – Distribuição equipotencial de indução magnética na armadura do trecho de cabo umbilical, utilizando condutores não malhados

A **Figura 35** apresenta a distribuição equipotencial de indução magnética no material isolante do cabo umbilical para a simulação tridimensional.

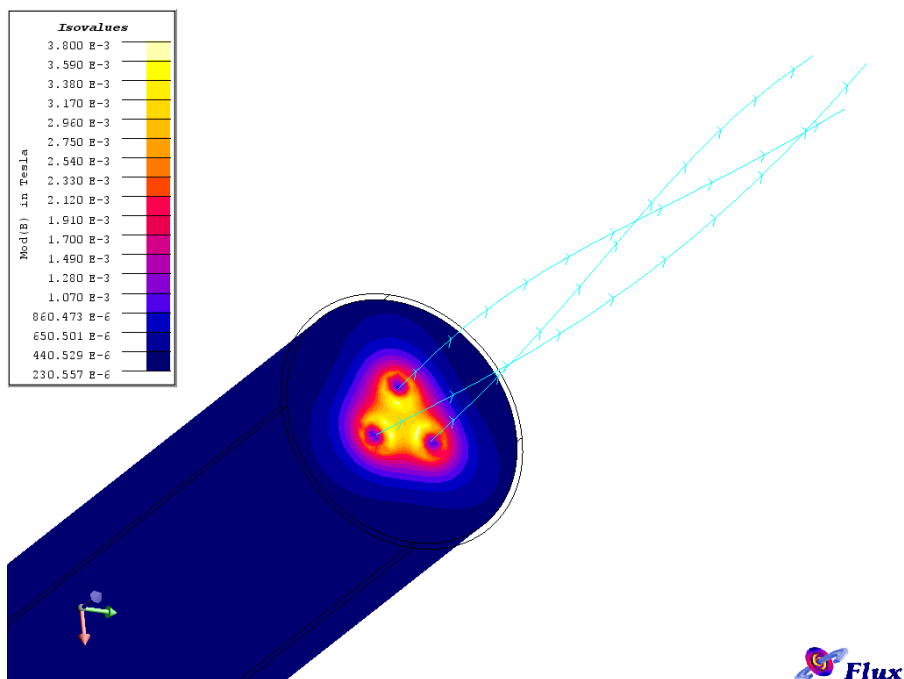


Figura 35 – Distribuição equipotencial de indução magnética no material isolante do cabo umbilical para a simulação tridimensional

Para as simulações utilizando condutores não malhados recomenda-se que o comprimento da armadura e dos condutores de potência sejam maiores que o comprimento dos condutores de sinal, pois ocorre a não uniformidade do campo magnético nas extremidades da armadura e conseqüentemente um acoplamento inadequado entre os circuitos de potência e de sinal. Além do comprimento dos condutores é necessário adotar a periodicidade como condição de contorno.

A relação de comprimento adotada neste trabalho é a de 3 MMC para condutores de potência, 2 MMC para a armadura e 1MMC para os condutores de sinal.

A **Figura 36** apresenta a distribuição de campo magnético na armadura do cabo umbilical considerando periodicidade como condição de contorno e condutores de potência com comprimento maior que a armadura. É possível observar que a distribuição de campo magnético é uniforme ao longo do comprimento da armadura.

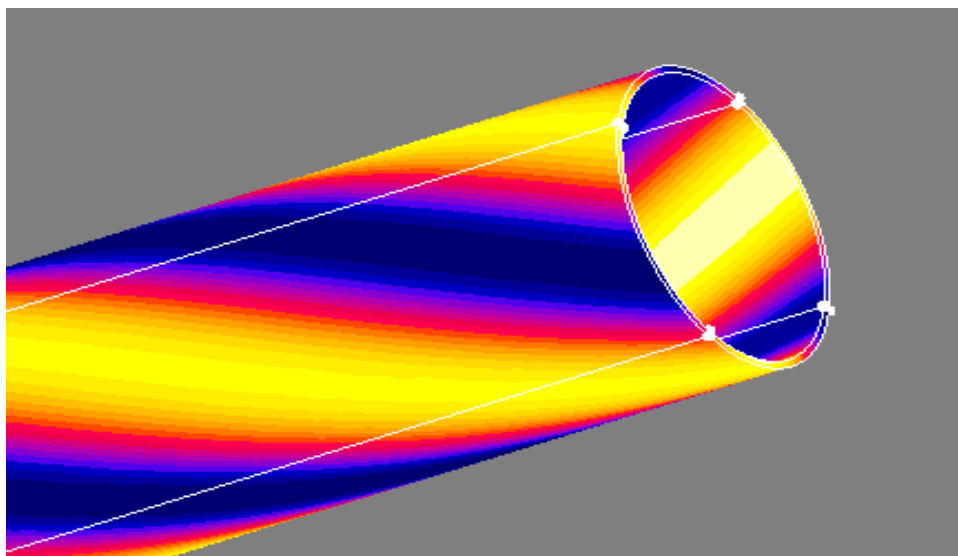


Figura 36 - Distribuição uniforme de campo magnético na armadura utilizando condutores de potência com 3 MMC e armadura com 2 MMC de comprimento e utilizando periodicidade

Em contrapartida, na **Figura 37** é apresentada a distribuição de campo magnético considerando a periodicidade como condição de contorno, porém, para condutores de potência com o mesmo comprimento da armadura. Observa-se nas extremidades da armadura uma distribuição irregular de campo magnético e um menor valor de tensão induzida nos condutores de sinal, portanto, não sendo representado adequadamente o acoplamento de campo magnético entre os condutores.

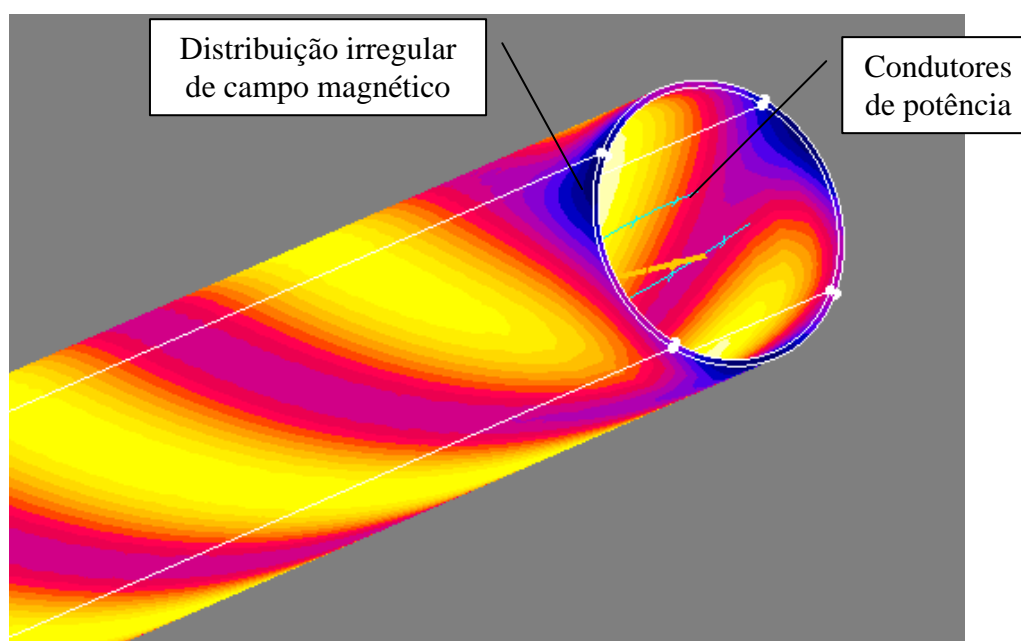


Figura 37 - Distribuição de campo magnético não uniforme na armadura para condutores de potência e armadura com mesmo comprimento igual a 2 MMC, utilizando periodicidade

Como há uma limitação do programa de elementos finitos para a representação geométrica do cabo umbilical em relação à extrusão e a impossibilidade de utilização de blindagem nos condutores, optou-se por realizar a comparação dos valores de tensão induzida para um MMC completo de comprimento e para a fração de 3/4 de comprimento de MMC, visando verificar se o trançamento dos condutores atenua os valores de tensão induzida, mostrando desta maneira que a simulação tridimensional representa bem o esperado (PETTERSSON, 1997).

Foram considerados os seguintes parâmetros para esta simulação:

- Condutores de potência = 3.000mm de comprimento por 9,25mm de diâmetro
- Condutores de sinal = 1.000mm (1 MMC completo) ou 750mm (3/4 MMC) de comprimento
- Armadura = 2.000mm de comprimento

Os valores obtidos de tensão induzida, utilizando condutores não malhados foram de 0,14 μ V para o comprimento de 1 MMC e 23 μ V para o comprimento de 3/4 de MMC.

Desta maneira, os resultados obtidos para as simulações tridimensionais utilizando condutores não malhados demonstraram que ocorre o aumento da tensão induzida da ordem de 164 vezes quando é utilizada uma fração do MMC em relação a um MMC completo.

Um problema encontrado na utilização de condutores não malhados é a impossibilidade de se modelar as blindagens nos condutores. Desta maneira, somente é possível apresentar os resultados das simulações tridimensionais para a comparação dos valores de tensão induzida para um ciclo completo de MMC e frações de MMC de comprimento do cabo.

Com o intuito de contornar os diversos problemas encontrados nas simulações com o MEF 3D, tais como tempo de processamento, elevada necessidade de memória, dificuldade de geração da malha de elementos finitos, etc., foram utilizadas duas técnicas de modelagem por simulações bidimensionais que visam aproximar o

resultado do cabo sob análise por geometrias que requerem menor quantidade de elementos e processamento computacional reduzido.

4.2 TÉCNICAS BIDIMENSIONAIS DE SIMULAÇÃO

A necessidade de utilização de uma metodologia bidimensional originou-se a partir das dificuldades enfrentadas na resolução das simulações tridimensionais.

O objetivo maior na utilização de simulações bidimensionais é a constante busca pela otimização entre o máximo detalhamento possível da geometria sob análise com a menor quantidade de memória exigida de processamento computacional. Desta maneira as simulações podem ser realizadas por seções do cabo umbilical, não havendo a necessidade da reprodução de todo o trecho a ser analisado, uma vez que ocorre a periodicidade ao longo do comprimento do cabo umbilical.

Utilizar diretamente o modelo bidimensional para as simulações de uma estrutura complexa como a de um cabo umbilical também não é possível devido à não periodicidade de sua geometria ao longo do comprimento do cabo umbilical.

Devido a estes inconvenientes, fez-se necessário a utilização de duas técnicas de suporte à simulação bidimensional para contornar o problema de grandes quantidades de elementos. Essas duas técnicas são o fatiamento e a transposição, (COSTA, 2007).

Para a realização das simulações bidimensionais, continua-se a utilizar uma face de referência para as propagações helicoidais dos condutores.

A fim de manter o mesmo padrão foi utilizada como base a face de cabo conforme apresentado na **Figura 15**, sendo aplicadas as propagações helicoidais (rotação em relação ao eixo local) tanto aos condutores de potência quanto aos condutores de sinal. A rotação em torno do eixo global não foi aplicada aos condutores de sinal,

assim, a posição dos eixos locais dos cabos de sinal não varia ao longo do comprimento.

O princípio físico de utilização destas metodologias de suporte às simulações bidimensionais surgiu a partir da análise do acoplamento em uma geometria simplificada, conforme apresentado na **Figura 38**.

Este exemplo é realizado com condutores retilíneos tanto para os condutores de potência quanto de sinal.

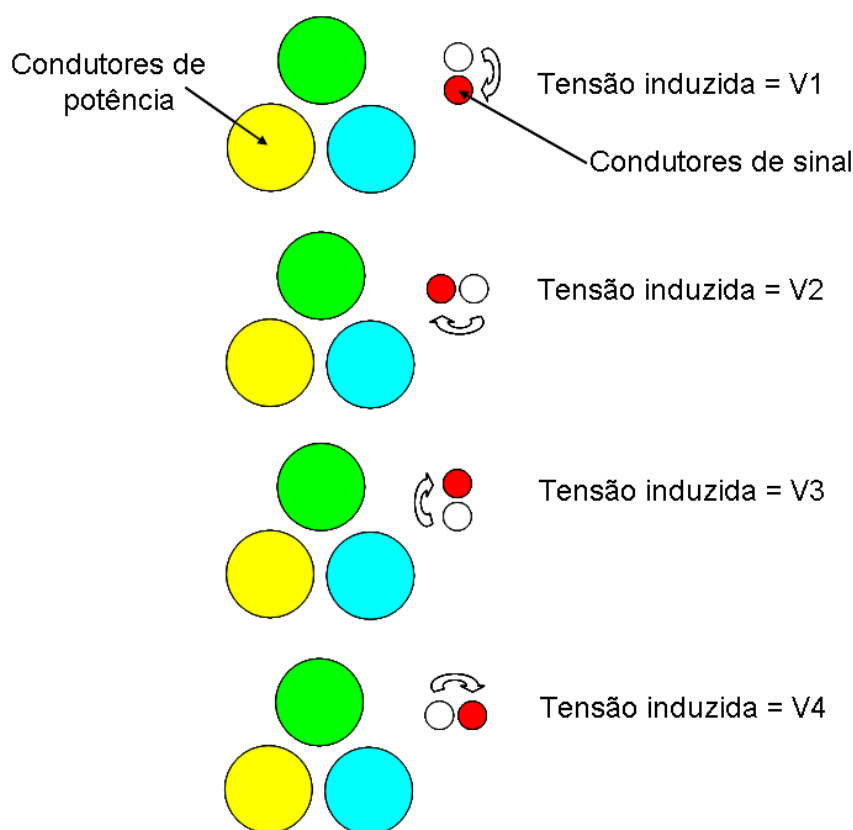


Figura 38 – Metodologia simplificada de análise da tensão induzida nos condutores de sinal

Considerando os condutores de potência sem movimentos e apenas o giro do condutor de sinal em torno do seu eixo de referência local, é possível obter as tensões induzidas V_1 , V_2 , V_3 e V_4 para as quatro condições apresentadas na **Figura 38**.

Supondo que o campo magnético resultante das correntes dos condutores de potência seja igual para as quatro condições, é possível perceber que, em cada uma

das quatro condições, as linhas de indução magnética B atravessam de forma distinta os condutores de sinal, conforme apresentado na **Figura 39**, considerando que as linhas de indução magnética provenientes dos condutores de sinal não afetem as linhas de indução magnética dos condutores de potência.

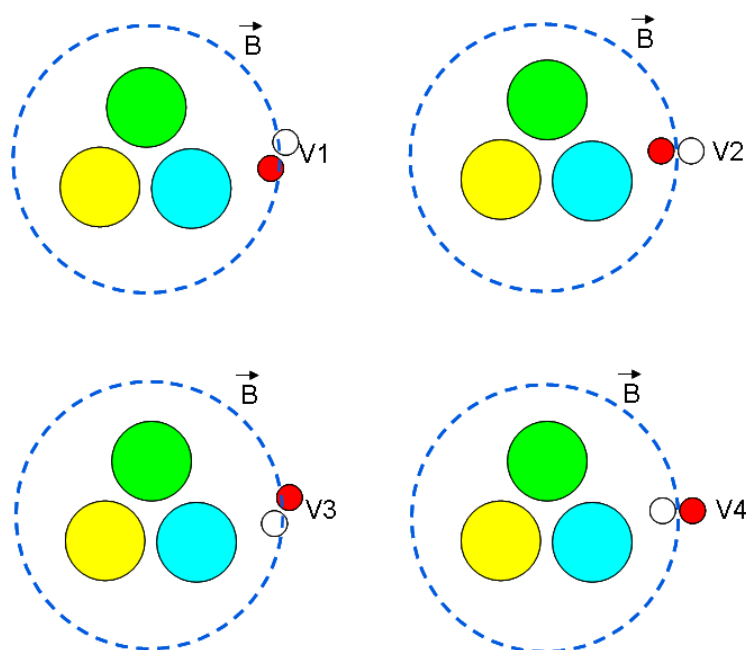


Figura 39 – Acoplamento mútuo entre os condutores de potência e de sinal

As tensões induzidas nos condutores de sinal, devido ao acoplamento mútuo de fluxo magnético proveniente das correntes, de acordo com a equação (5), são proporcionais à variação do fluxo magnético no tempo, da área de incidência da indução magnética e do ângulo entre a incidência do campo e o vetor normal ao plano geométrico da espira, conforme apresentado na **Figura 40**.

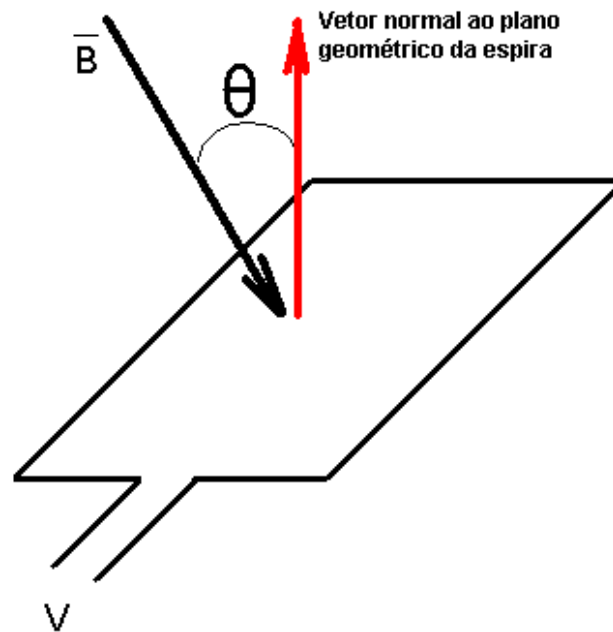


Figura 40 – Incidência de campo magnético em uma espira retangular

Para as quatro posições, os ângulos θ serão iguais a α , β , $\alpha+180^\circ$ e $\beta+180^\circ$.

A partir destas considerações é possível verificar que as tensões induzidas serão equivalentes a:

$$V_1 = ve^{(j\omega t + \alpha)}$$

$$V_2 = ve^{(j\omega t + \beta)}$$

$$V_3 = ve^{(j\omega t + \alpha + 180)}$$

$$V_4 = ve^{(j\omega t + \beta + 180)}$$

Se somarmos as tensões induzidas, é possível observar que o resultado é zero volt, ou seja, V_1 anula V_3 , assim como V_2 anula V_4 .

Sendo:

$$V_1 + V_3 = ve^{(j\omega t + \alpha)} + ve^{(j\omega t + \alpha + 180)} = ve^{(j\omega t + \alpha)} + ve^{(j\omega t - \alpha)} = 0 \text{ volt}$$

$$V_2 + V_4 = ve^{(j\omega t + \beta)} + ve^{(j\omega t + \beta + 180)} = ve^{(j\omega t + \beta)} + ve^{(j\omega t - \beta)} = 0 \text{ volt}$$

Esse princípio de acoplamento entre trechos do cabo e a resultante das tensões confirma a base das metodologias de suporte das simulações bidimensionais apresentadas neste trabalho.

4.2.1 O método do fatiamento

O método do fatiamento pode ser realizado de duas maneiras, o fatiamento direto e o fatiamento indireto, conforme apresentado a seguir:

4.2.1.1 O fatiamento direto

O método do fatiamento direto consiste na realização de simulações bidimensionais em fatias do cabo umbilical, com uma determinada profundidade de domínio, sendo aplicados os movimentos de rotação local e global para cada uma das fatias, até completar um ciclo, equivalente ao MMC do comprimento do cabo umbilical.

Inicialmente são atribuídas as condições de contorno e em seguida, é atribuída a profundidade à face do corte transversal do cabo umbilical. São definidas as regiões dos condutores, blindagens e isolantes.

A **Figura 41** apresenta um trecho de cabo umbilical analisado pelo método do fatiamento, sendo possível observar os movimentos de rotação local e global aplicados aos elementos do cabo.

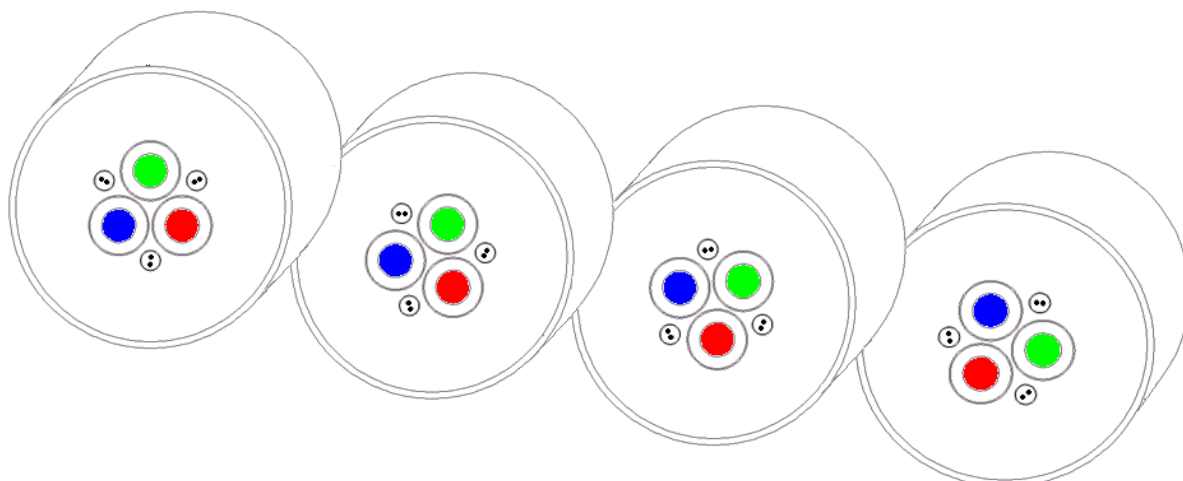


Figura 41 – Fatiamento do cabo umbilical

Esta metodologia foi utilizada em relevante estudo de autoria de Costa (2007), para a simulação de verificação do acoplamento de campo magnético entre circuitos de potência operando em frequências diferentes para um cabo umbilical constituído por circuitos de potência e tubulações de aço para transporte de fluídos.

Conforme apresentado na **Figura 41**, a cada fatia são impostos movimentos de rotação local e global dos condutores. Assim, quanto maior a quantidade de fatias, menor será o ângulo de rotação entre o condutor de uma fatia e da fatia seguinte.

Deste modo o cabo é subdividido em fatias (m) e, para cada fatia, é realizada uma simulação. Os resultados das tensões induzidas são obtidos pela raiz quadrada da soma dos componentes real e imaginário das tensões medidas nos resistores de carga dos condutores de sinal, conforme apresentado na equação (16).

$$V_{\text{fatiamento}} = \sqrt{\left[\left(\sum_{n=1}^m V_{\text{real}} \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^m V_{\text{imag}} \right)^2 \right]} \quad (16)$$

Os resistores de carga são utilizados no circuito de potência e no circuito de sinal, representando as cargas conectadas aos cabos de potência as impedâncias da fonte de corrente e a resistência dos motores das bombas submersas.

As impedâncias dos instrumentos de medição ligados tanto no lado submarino quanto no lado emerso são representados pelos resistores de carga conectados aos condutores de sinal.

A partir da aplicação deste método, objetiva-se demonstrar que sobre cada uma das fatias do cabo de sinal há o acoplamento mútuo entre o cabo de sinal e o fluxo magnético produzido pelas correntes que circulam nos cabos de potência, sendo cada uma das fatias acopladas a um condutor do circuito elétrico (circuito de acoplamento).

Na **Figura 42** é apresentada uma ilustração do comprimento total do cabo de sinal e o circuito equivalente, da mesma maneira que em uma linha de transmissão curta (STEVENSON, 1986).

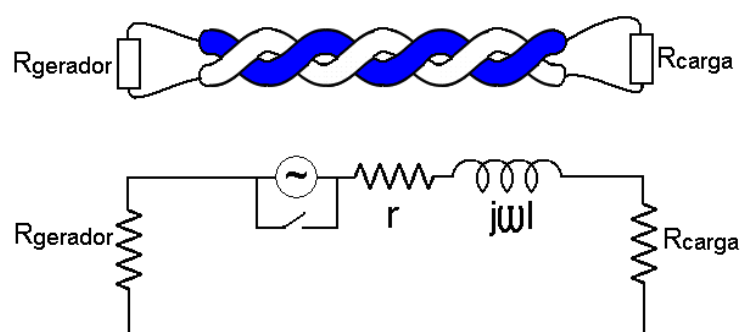


Figura 42 – Circuito equivalente total de um condutor de sinal com cargas conectadas às extremidades

A **Figura 43** apresenta a ilustração do condutor de sinal e o circuito equivalente para cada uma das fatias.

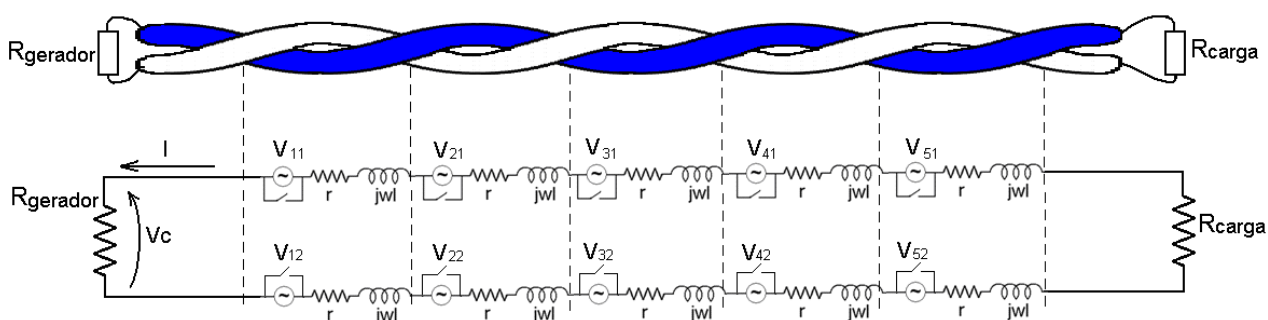


Figura 43 – Circuito equivalente para cada uma das fatias do condutor de sinal com cargas conectadas às extremidades

O circuito equivalente é representado pela impedância $(r+j\omega l)$ e por fontes de tensão equivalentes a cada fatia do cabo. Assim, para a simulação, é mantida aberta a chave da fatia em análise e fechadas as demais chaves, eliminando as fontes referentes às demais fatias.

Esse procedimento é repetido para todas as fatias dentro do domínio de interesse. O resultado final é obtido pela soma das tensões induzidas em cada uma das fatias do condutor de sinal.

Conforme apresentado na **Figura 43**, a interpretação adequada seria que, para um fluxo magnético incidente no condutor de sinal, em cada uma das fatias surgirá uma tensão induzida que, devido ao fato de estarem em série, são somadas para a obtenção do resultado final da tensão induzida total no condutor.

A resultante é obtida pela raiz quadrada dessa soma, pois há a variação espacial dos condutores de uma fatia para as demais, conforme apresentado na **Figura 44**.

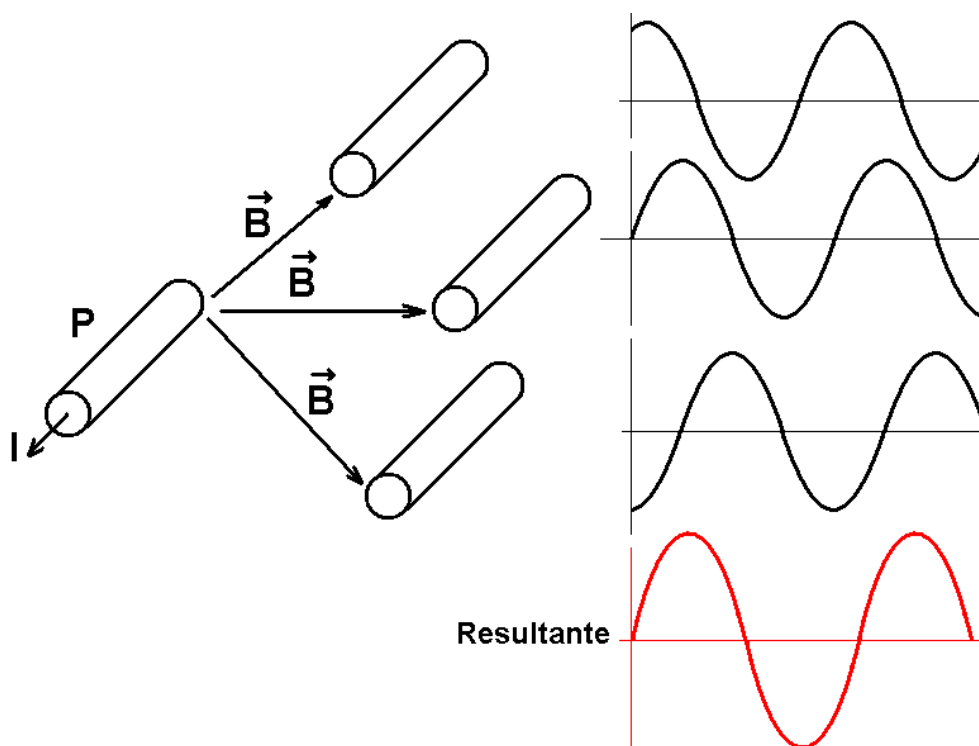


Figura 44 – Exemplo da soma quadrática para a variação espacial dos condutores

É possível observar na **Figura 44** que para cada posição do condutor de sinal, há um campo magnético diferente, tanto pelo posicionamento quanto pela fase do campo gerado pelo condutor de potência.

No **item 3.3.2**, foi visto que cada elemento do cabo umbilical é associado a um componente do circuito elétrico, o mesmo princípio é adotado para esta metodologia, porém o circuito é mais complexo, conforme apresentado na **Figura 45**.

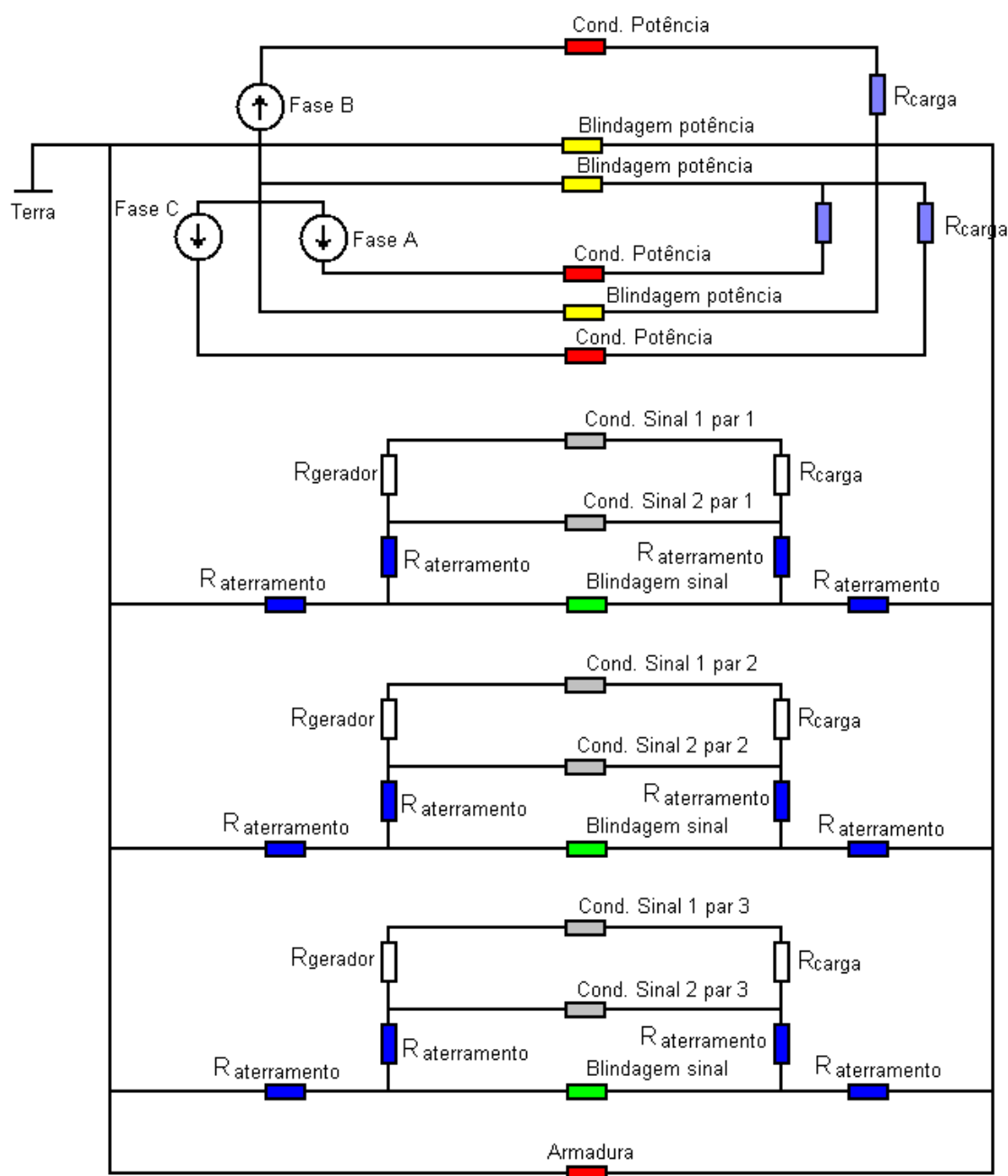


Figura 45 – Circuito elétrico associado aos elementos do cabo umbilical para o método do fatiamento direto

Para a realização da simulação, é necessário que circule uma corrente elétrica através dos condutores de potência, para esta finalidade são utilizadas as fontes de corrente.

É possível utilizar também fontes de tensão e resistências calculadas para a imposição dos valores desejados de corrente elétrica, pois os cálculos e acoplamentos serão realizados da mesma maneira pelo programa.

As fontes de corrente são conectadas em estrela, defasadas de 120° entre si, sendo atribuído um valor de corrente a ser injetado nos condutores de potência. Na outra extremidade do condutor de potência foram conectadas as cargas resistivas e em ambas as extremidades dos condutores de sinal são conectadas cargas resistivas.

A escolha do número de fatias para a realização das simulações afeta o resultado final da tensão induzida nos cabos de sinal. Desta maneira é necessário avaliar a sensibilidade do valor da tensão induzida em relação à quantidade de fatias para o trecho de simulação.

Neste trabalho foram levantadas curvas da relação entre o número de fatias e o valor da tensão induzida nos condutores de sinal para determinar a quantidade necessária de fatias para o estudo de um determinado comprimento de cabo umbilical. Os resultados serão apresentados no **item 5**.

4.2.1.2 O método de fatiamento indireto

O fatiamento indireto foi uma técnica empregada por Shackleton (2007) para a avaliação das limitações térmicas e magnéticas de estruturas e componentes dos cabos umbilicais.

Da mesma maneira que o fatiamento direto, esta metodologia consiste em atribuir um fatiamento ao cabo umbilical, mas a resolução das simulações não é realizada para cada uma das fatias individualmente.

Neste tipo de metodologia é realizado o acoplamento dos elementos do cabo umbilical com os componentes de circuito elétrico, considerando-se a variação espacial para cada uma das fatias em apenas uma simulação.

A **Figura 46** apresenta o circuito elétrico equivalente para o método de fatiamento indireto.

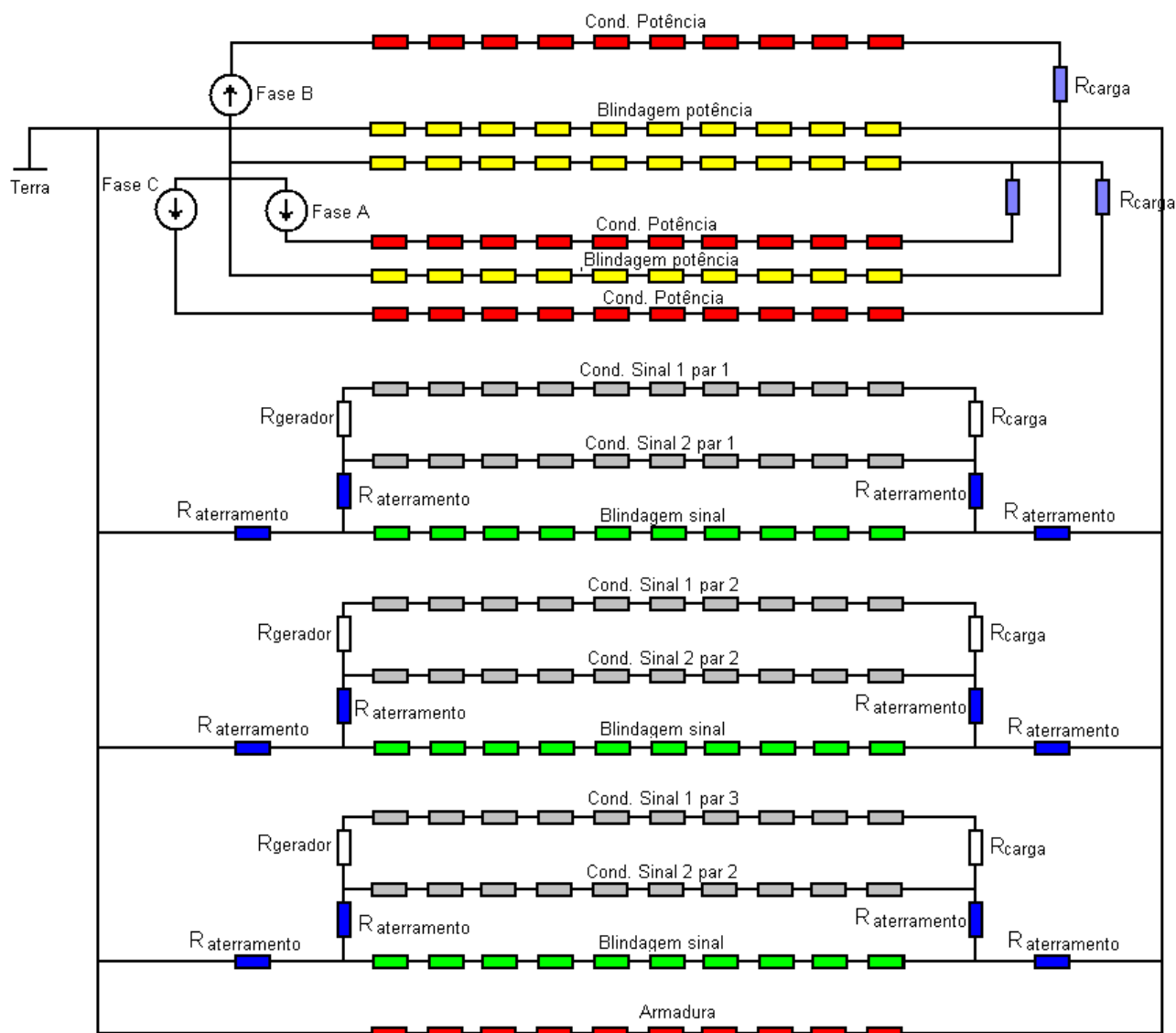


Figura 46 – Circuito elétrico associado aos elementos do cabo umbilical para o método do fatiamento indireto

Neste método, a quantidade de fatias refletirá diretamente nos ângulos relativo entre fatias e na quantidade de componentes no circuito elétrico.

A desvantagem desta metodologia está na falta de flexibilidade de simulação, pois, para cada alteração na quantidade de fatias, há a necessidade da variação da quantidade de componentes de circuito, além da sua dificuldade de implementação.

É possível perceber a complexidade do circuito equivalente do método de fatiamento indireto representado pela **Figura 46**, sobretudo quando comparado ao circuito equivalente apresentado na **Figura 45**, utilizado tanto para o fatiamento direto quanto para o método da transposição, o qual será explicado a seguir.

4.2.2 O método da transposição

O método de análise por transposição é uma técnica empregada na análise de linhas de transmissão, conforme apresentado por Stevenson (1986, p. 78).

A análise por transposição consiste na verificação do acoplamento mútuo entre o condutor de sinal e o fluxo magnético proveniente da corrente elétrica dos condutores de potência.

Na simulação por transposição são realizadas simulações para o MMC do comprimento do cabo umbilical. Cada simulação é realizada para um ângulo diferente, até completar o giro completo do MMC do comprimento ou para uma fração de MMC.

A tensão induzida total é resultante da raiz quadrada da soma quadrática da média dos componentes real e imaginária das tensões medidas nos resistores de carga dos condutores de sinal para cada ângulo (m) simulado conforme apresentado na equação (17).

$$V_{\text{transposição}} = \sqrt{\left[\left(\frac{\sum_{n=1}^m V_{\text{real}}}{m} \right)^2 + \left(\frac{\sum_{n=1}^m V_{\text{imag}}}{m} \right)^2 \right]} \quad (17)$$

Nesta técnica a tensão resultante é equivalente à soma vetorial das tensões obtidas em condutores em momentos diferentes de posição relativa. A **Figura 47** representa a forma de interpretação da análise por transposição, sendo A, B e C os condutores de potência, com comprimentos equivalentes a um MMC de comprimento cada.

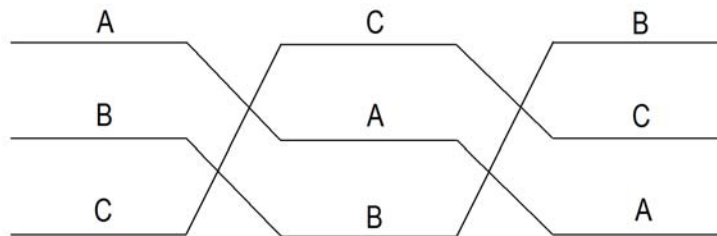


Figura 47 – Representação do método de transposição

Faz-se necessário ressaltar que na **Figura 47** os condutores alternam-se de posição ao longo do comprimento de 1 MMC do cabo umbilical, conforme apresentado na figura abaixo.

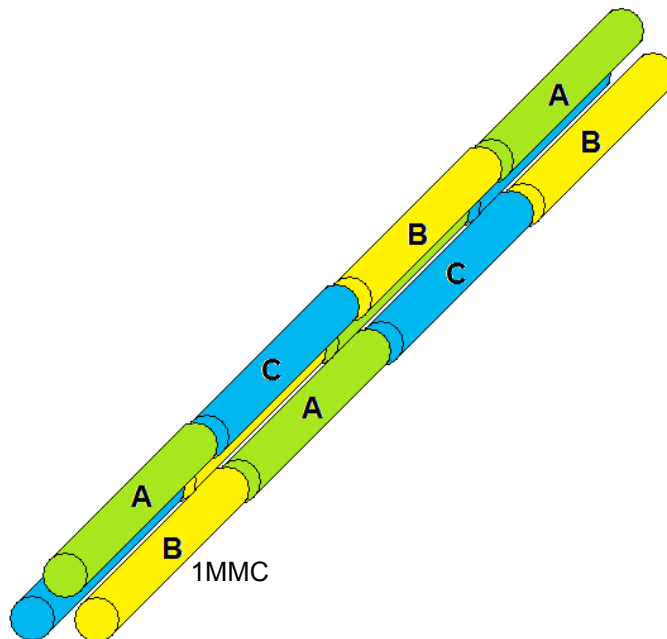


Figura 48 – Representação do método da transposição para condutores de potência

Este método, além de considerar a transposição em si, pela média entre os valores obtidos para cada simulação, considera também a variação espacial dos condutores, pela soma quadrática desta média.

Neste trabalho foram levantadas curvas da relação entre a quantidade de passos e o valor da tensão induzida nos condutores de sinal para determinar a quantidade necessária de passos para o estudo de um determinado comprimento de cabo umbilical.

Para a realização da análise de sensibilidade, serão estabelecidos passos entre os posicionamentos dos condutores, onde a cada passo é acrescido um ângulo ao passo anterior, de acordo com a teoria de amostragem de Nyquist abordado por Steven (1999, p. 40).

4.2.3 A teoria da amostragem

Os métodos de fatiamento e transposição, conforme apresentados, podem ser aplicados utilizando-se uma determinada quantidade de fatias, um ângulo específico entre amostras, respectivamente para os métodos de fatiamento e transposição. Essas quantidades de fatias e determinação do ângulo entre cada uma das simulações devem ser definidas no modelo bidimensional do umbilical.

Visando verificar se a tensão induzida nos condutores de sinal é afetada por essa escolha do número de fatias/ângulos, neste trabalho é apresentada esta análise de sensibilidade.

Essa análise de sensibilidade pode ser determinada pela amostragem do sinal de interesse, podendo-se determinar, a partir de quantas amostras do sinal, os valores passam a ser válidos.

Segundo a teoria da amostragem, o número de amostras deve ser superior ao dobro da frequência do sinal amostrado, essa teoria é conhecida como o teorema de amostragem de Nyquist (STEVEN, 1999, p. 40).

No **item 5.1.4**, são apresentados os resultados obtidos de tensão induzida nos condutores de sinal para diferentes amostragens, podendo ser observado o efeito da taxa de amostragem nos resultados obtidos de tensão induzida nos condutores de sinal.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos das simulações bidimensionais utilizando as metodologias de simulação por fatiamento e transposição aplicados ao cabo umbilical, ambos para a condição de avaliação em regime permanente senoidal, em 60 Hz.

5.1 SIMULAÇÕES BIDIMENSIONAIS

As simulações bidimensionais foram realizadas em etapas, visando verificar tipos de condutores, resposta em frequência e amostragem dos métodos, conforme apresentado a seguir:

- Análise dos resultados obtidos de tensão induzida nos condutores de sinal para as três condições de contorno possíveis de serem utilizadas, **item 5.1.2**.
- Comparação entre a utilização da região filiforme versus discretização das regiões das blindagens, **item 5.1.3**.
- Sensibilidade dos valores obtidos de tensão induzida nos condutores de sinal em relação à quantidade de amostras, realizando-se as simulações para diferentes amostragens, **item 5.1.4**.
- Efeito do trançamento dos condutores na atenuação da tensão induzida nos condutores de sinal. Foram realizadas as simulações para um condutor com e sem trançamento tanto dos cabos de potência quanto dos condutores de sinal, **item 5.1.5**.

5.1.1 Parâmetros adotados

O cabo utilizado como exemplo deste trabalho foi escolhido com os seguintes parâmetros geométricos:

Comprimento total = 10m

Passo dos condutores de sinal = 10 voltas por metro

Passo dos condutores de potência = 1 volta por metro

MMC de comprimento = 1m

A geometria do cabo umbilical segue um padrão periódico, ou seja, a cada comprimento de 1 MMC o perfil se repete. A propagação helicoidal é utilizada pelos fabricantes de cabos para minimizar o efeito de acoplamento de campo magnético e aumentar a imunidade dos cabos quanto a acoplamento de campos de outros circuitos (PETTERSSON, 1997), além de lhe conferir uma melhor sustentação mecânica. Desta maneira, ao utilizar-se um comprimento de MMC os valores de tensão induzida nos condutores de sinal tenderiam a ser nulos. Por este motivo, para a realização das simulações, foi adotado um comprimento de $3/4$ MMC, o que representa uma das piores condições de tensão induzida para a configuração de umbilical adotada.

A **Figura 49** apresenta a configuração de $3/4$ do MMC de comprimento do cabo umbilical para a realização das simulações.

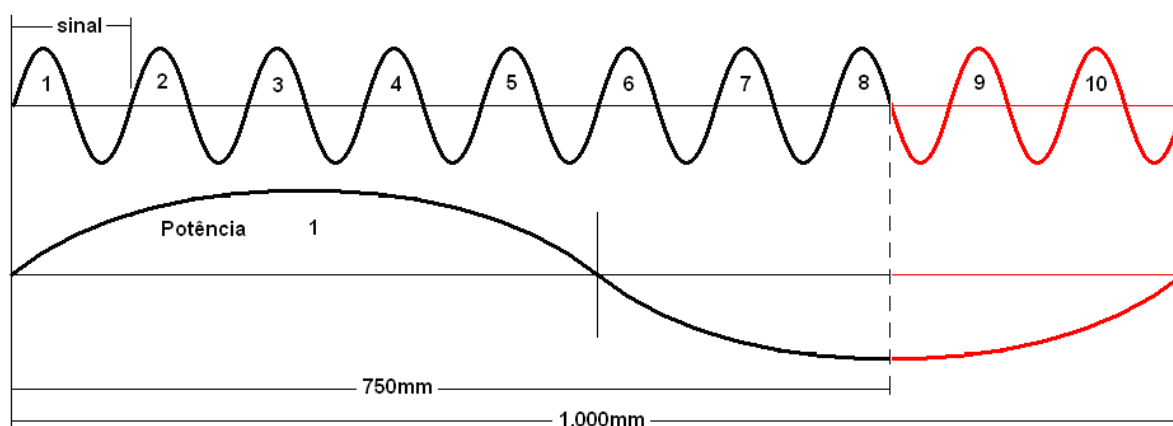


Figura 49 – Fração do MMC de comprimento do cabo umbilical

O comprimento utilizado para a realização da primeira simulação é de 750mm (3/4 do MMC de 1.000mm).

Os valores adotados para as correntes elétricas das fontes dos circuitos elétricos são de 200A, sendo três fontes interligadas em estrela e com defasagem angular entre as correntes de 120° .

As resistências de carga conectadas aos condutores de potência possuem valores de 40Ω e as cargas resistivas conectadas aos condutores de sinal possuem o valor de 250Ω .

Conforme apresentado no **item 3.3.3**, a permeabilidade relativa adotada para a blindagem é de 200μ .

Os parâmetros geométricos para a realização das simulações são os seguintes:

- Distância entre os condutores de sinal = 1,77mm;
- Espessura da armadura = 3,5mm;
- Espessura da blindagem dos cabos de potência = 0,75mm;
- Espessura da blindagem dos condutores de sinal = 0,5mm;
- Raio interno da armadura = 72,2mm;
- Espessura do cabo de potência = 18,5mm;
- Distância dos centros dos cabos de potência ao centro do cabo umbilical = 19,62mm;
- Distância do centro dos condutores de sinal ao centro do cabo umbilical = 44mm;
- Raio interno da blindagem dos cabos de potência = 15,42mm;
- Raio interno da blindagem dos condutores de sinal = 5,04mm;
- Diâmetro dos condutores de sinal = 2,04mm.

Os condutores considerados são maciços e os materiais são lineares e isotrópicos para a análise eletromagnética.

Os movimentos de rotação local e global foram atribuídos para duas simulações, a primeira para o giro em um sentido apenas (giro positivo) e a segunda para giros opostos entre condutores de sinal e de potência (giro negativo), conforme apresentado na **Figura 50**.

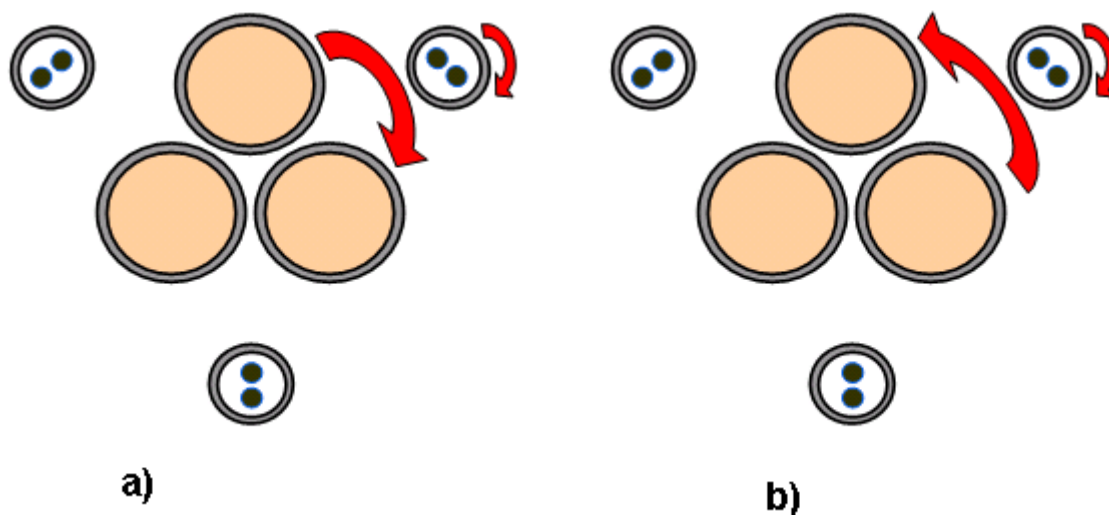


Figura 50 – Sentidos de rotação dos condutores a) giro positivo e b) giro negativo.

Há diversas configurações possíveis de aterramento e conexão das cargas aos condutores e blindagens, porém para este trabalho as simulações foram realizadas considerando as blindagens dos condutores de sinal e potência e aterradas apenas no lado do gerador e a armadura em ambas as extremidades.

5.1.2 Condições de contorno

Há três condições de contorno que podem ser utilizadas para a realização das simulações: a região infinita, o potencial imposto e o campo tangencial.

Visando realizar as simulações com os mesmos parâmetros para as três condições de contorno, para o método do fatiamento foram utilizadas 100 fatias e para o método da transposição, 36° entre rotações. Desta maneira, as simulações foram realizadas para 10 amostras por período.

5.1.2.1 Região Infinita

Foram realizadas simulações para diferentes distâncias de espaçamento entre os nós da malha da parametrização da região infinita visando verificar a sensibilidade do resultado de tensão induzida no condutor receptor. Além da variação do espaçamento dos nós da malha também foram alteradas as distâncias dos raios das regiões interna e externa.

Considerou-se a geometria apresentada na **Figura 15** para os condutores de potência, percorridos por correntes de 200A, defasadas de 120° entre si.

O valor obtido de tensão induzida para a condição de contorno de região infinita foi de $6,19\mu\text{V}$, tanto para a metodologia de fatiamento quanto transposição, para o sentido positivo de giro dos condutores.

Ao se variar o espaçamento entre nós da malha e em relação ao distanciamento das regiões internas, e interna em relação à armadura do cabo, não ocorreu a alteração no valor de tensão induzida, desta maneira a utilização de região infinita como condição de contorno pode ser considerada estável.

5.1.2.2 Potencial Imposto

O resultado obtido utilizando-se a condição de contorno de potencial imposto foi de $6,24\mu\text{V}$, para o fatiamento, e de $6,22\mu\text{V}$ para a transposição.

5.1.2.3 Campo Tangencial

O resultado obtido utilizando-se a condição de contorno de campo tangencial foi de $6,22\mu\text{V}$ para o fatiamento e $6,23\mu\text{V}$ para a transposição.

Observa-se que os valores obtidos nas três condições de contorno são similares.

5.1.3 Alívio da discretização pelo uso de região filiforme

Visando comparar o efeito da utilização da região filiforme ao invés da discretização das áreas das blindagens, foram realizadas simulações, obtendo-se os seguintes resultados:

5.1.3.1 Região filiforme

As simulações são realizadas com a aplicação da região filiforme para os métodos do fatiamento e transposição, conforme se apresenta:

- Método do fatiamento: para 50 fatias, as simulações foram realizadas para cada fatia utilizando profundidade de 15mm e resistência de $105\mu\Omega$ e passo de 54° , resultando na tensão induzida de $6,96\mu\text{V}$.

- Método da transposição: foi realizada a simulação para 60° entre passos, para a profundidade de 750mm e resistência de $5,25\text{m}\Omega$, resultando em $6,93\mu\text{V}$.

Desta maneira, os resultados obtidos para as simulações utilizando a técnica de discretização das áreas das blindagens foram equivalentes aos resultados obtidos com a utilização das regiões filiformes.

Portanto, é possível diminuir a quantidade de nós utilizando a região filiforme para alívio da discretização, sem alteração significativa dos resultados obtidos de tensão induzida nos condutores de sinal.

5.1.4 Análise de sensibilidade proporcional à amostragem

5.1.4.1 Método do fatiamento direto

A análise de sensibilidade foi realizada para os fatiamentos em 10, 20, 50, 100 e 200 fatias, correspondendo às amostragens de sinal de 1, 2, 3, 5, 10 e 20 amostras. As simulações foram realizadas para 750mm de comprimento do cabo umbilical.

Considerando-se que o condutor de sinal completa sete voltas e meia, o ângulo total de rotação será de $7,5 \times 360^\circ$, equivalente a 2.700° . Para a parametrização do giro dos condutores, foram considerados os seguintes ângulos e profundidades das fatias de acordo com a **Tabela 1**.

Tabela 1 - Ângulo e profundidade das fatias para o cabo de 750mm

Amostras	Fatias	Ângulo entre fatias (graus)	Profundidade do domínio (mm)
1	10	$2.700/10 = 270$	$750/10 = 75$
2	20	$2.700/20 = 135$	$750/20 = 37,5$
3	30	$2.700/30 = 90$	$750/30 = 25$
5	50	$2.700/50 = 54$	$750/50 = 15$
10	100	$2.700/100 = 27$	$750/100 = 7,5$
20	200	$2.700/200 = 13,5$	$750/200 = 3,75$

5.1.4.1.1 Sentido de giro unidirecional

Os condutores de potência e de sinal giram no sentido horário.

Os valores obtidos de tensão induzida nos condutores de sinal, para o sentido unidirecional de giro dos condutores de potência em relação ao número de amostras, são apresentados na **Tabela 2**.

Número amostras	Tensão induzida (μV)
1	71,3
2	13,6
3	8,98
5	6,66
10	6,24
20	6,44

O **Gráfico 1** apresenta a variação dos valores de tensão induzida em relação à quantidade de amostras para o sentido unidirecional de giro dos condutores de potência.

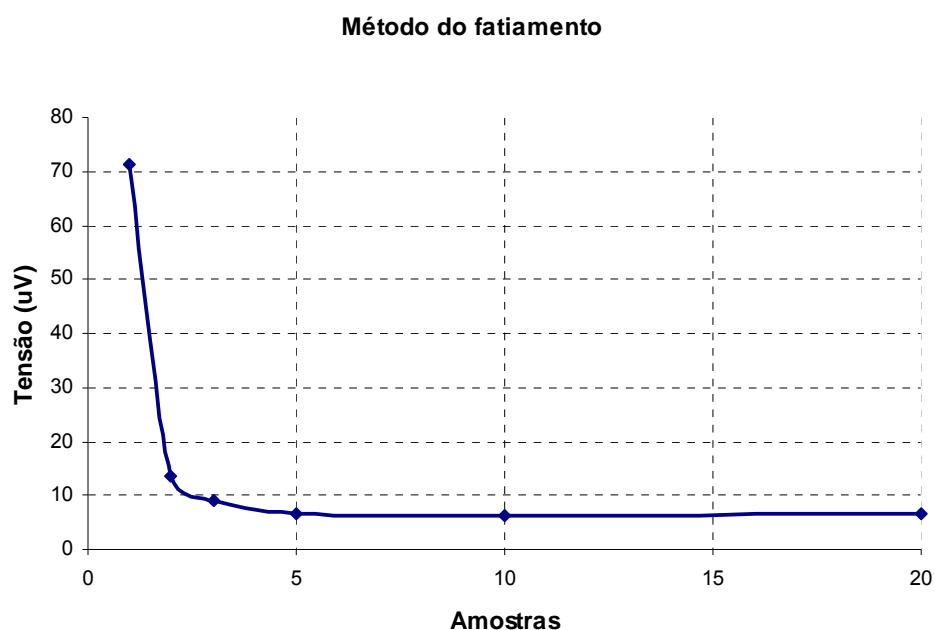


Gráfico 1 – Relação entre o número de fatias transversais do cabo e a tensão induzida, para o método do fatiamento, sentido de giro unidirecional e 750mm de cabo umbilical

5.1.4.1.2 Sentido oposto de giro

Foi mantido o giro do condutor de sinal no sentido horário e o condutor de potência passou a girar no sentido anti-horário.

Os valores obtidos de tensão induzida nos condutores de sinal para sentidos opostos de giro dos condutores de potência em relação ao número de amostras são apresentados na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Relação da tensão induzida pelo número de fatias, sentido oposto de giro

Número de amostras	Tensão induzida (μV)
1	32,0
2	15,1
3	11,6
5	9,86
10	9,39
20	9,45

O **Gráfico 2** apresenta a variação dos valores de tensão induzida em relação à quantidade de fatias para sentidos opostos de giro dos condutores de potência.

Método do fatiamento

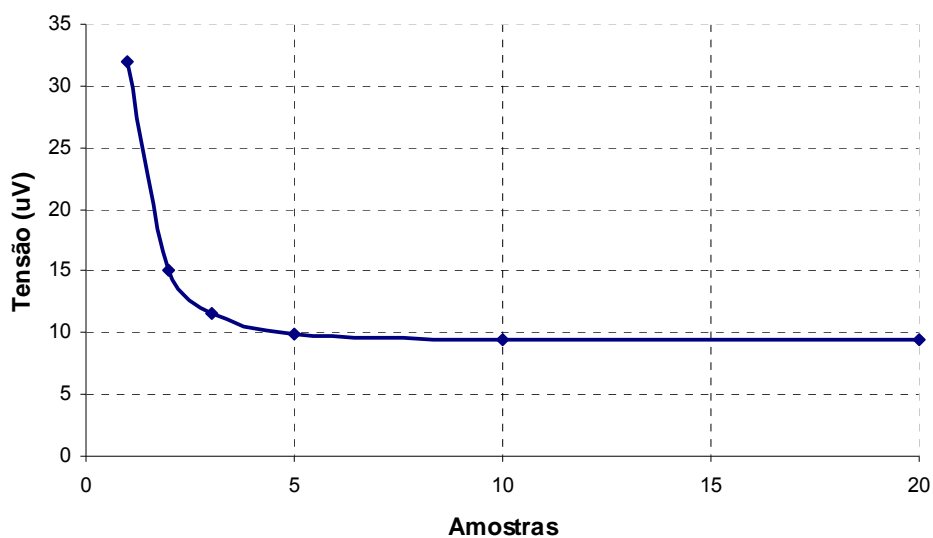


Gráfico 2 – Relação entre o número de fatias transversais do cabo umbilical e a tensão induzida, para o método do fatiamento, sentido oposto de giro dos condutores e 750mm de cabo umbilical

É possível observar que tanto no giro unidirecional quanto em sentidos opostos, com o aumento do número de amostras, o valor tende à estabilização.

A sensibilidade da análise pode ser verificada no **Gráfico 1** e **Gráfico 2**, podendo ser observado que a partir de um determinado ponto, o aumento do número de amostras não resulta em grandes variações nos valores de tensão induzida nos condutores de sinal.

Assim, pode-se considerar um valor aceitável de tensão induzida, a partir de 5 amostras.

5.1.4.2 Método da transposição

A análise de sensibilidade foi realizada para os ângulos de 360°, 180°, 120°, 72°, 36° e 18°, correspondendo às amostragens de sinal de 1, 2, 3, 5, 10 e 20 amostras.

Considerando-se que o condutor de sinal completa sete voltas e meia, o equivalente a 2.700° , para a parametrização do giro dos condutores, foram considerados os seguintes ângulos e profundidades das fatias de acordo com a **Tabela 4**.

Tabela 4 - Ângulo para parametrização das simulações para o cabo de 750mm

Amostras	Passos	Ângulo entre passos (graus)	Profundidade do domínio (mm)
1	10	360	750
2	20	180	750
3	30	120	750
5	50	72	750
10	100	36	750
20	200	18	750

5.1.4.2.1 Sentido de giro unidirecional

Os valores obtidos de tensão induzida nos condutores de sinal, para o sentido unidirecional de giro dos condutores de potência e sinal, em relação ao número de amostras, são apresentados na **Tabela 5**.

Tabela 5 – Tensão induzida x número de fatias, sentido oposto	
Número de amostras	Tensão induzida (μV)
1	69,3
2	19,6
3	14,5
5	10,8
10	6,20
20	6,29

O **Gráfico 3** apresenta a variação dos valores de tensão induzida em relação à quantidade de amostras para o sentido unidirecional de giro dos condutores de potência e sinal.

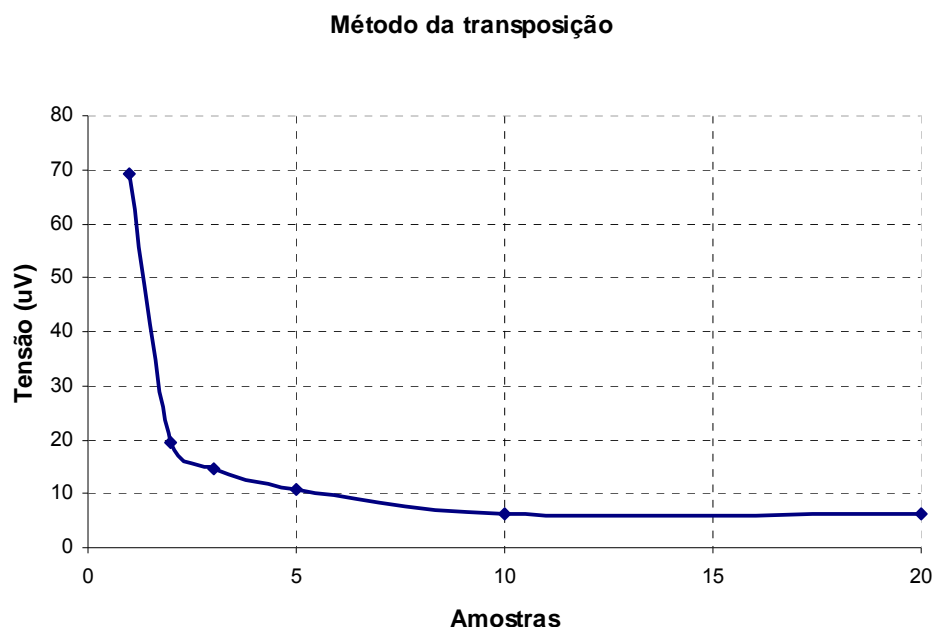


Gráfico 3 – Relação entre a quantidade de amostras e a tensão induzida para o método de transposição para o sentido unidirecional de giro dos condutores para 750mm de cabo umbilical

5.1.4.2.2 Sentido oposto de giro

Os valores obtidos de tensão induzida nos condutores de sinal, para o sentido oposto de giro entre os condutores de potência e sinal, em relação ao número de amostras são apresentados na **Tabela 6**.

Tabela 6 – Tensão induzida x número de fatias, sentido oposto

Número de amostras	Tensão induzida (µV)
1	77,1
2	20,2
3	15,1
5	11,6
10	10,7
20	9,40

O **Gráfico 4** apresenta a variação dos valores de tensão induzida em relação número de amostras, para o sentido oposto de giro entre os condutores de potência e sinal.

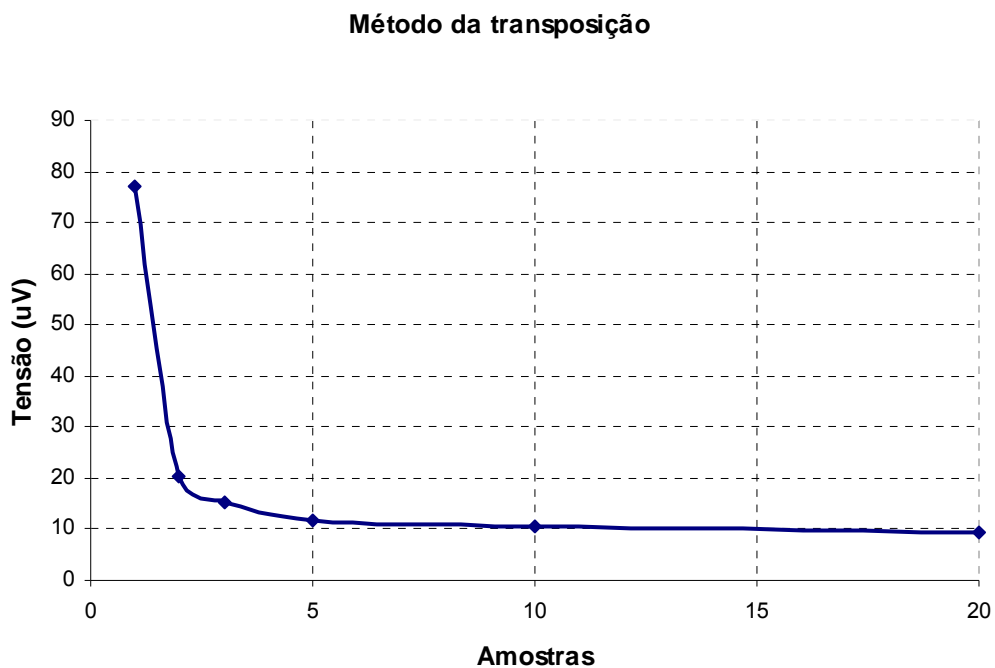


Gráfico 4 – Relação entre a quantidade de amostras e a tensão induzida para o método da transposição em sentido oposto de giro dos condutores para 750mm de cabo umbilical

5.1.4.3 Comparação dos resultados

Os resultados obtidos das tensões induzidas nos condutores de sinal, tanto para o método do fatiamento quanto para o método da transposição, para o sentido unidirecional de giro dos condutores são apresentados no **Gráfico 5** e o **Gráfico 6**, sendo os resultados referentes ao sentido unidirecional e oposto de giro dos condutores.

Método do fatiamento/transposição

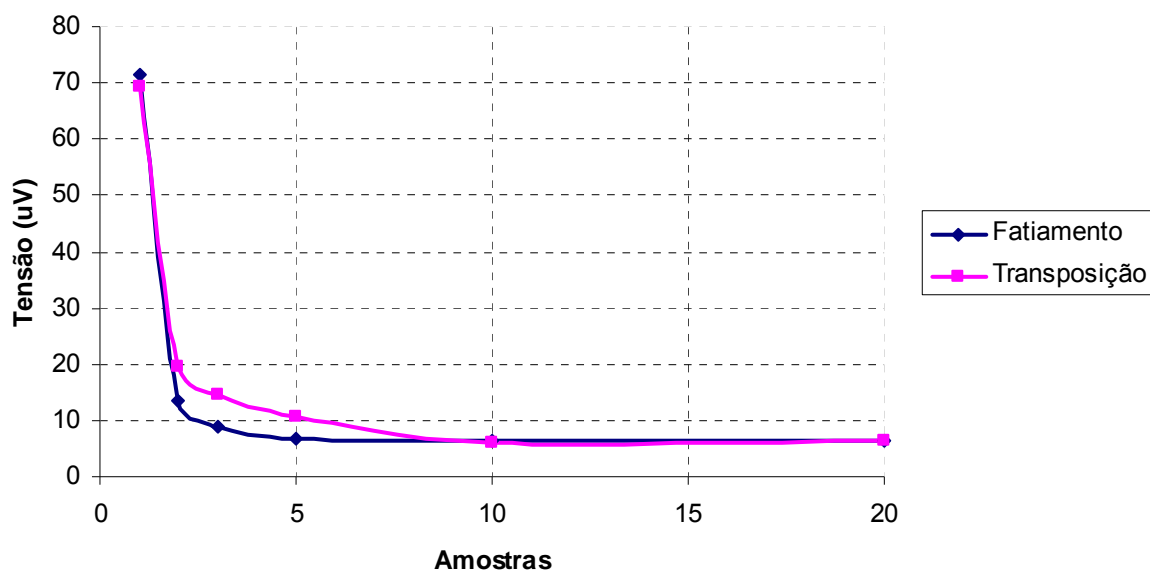


Gráfico 5 - Relação entre a tensão induzida e a quantidade de amostras para os métodos de fatiamento e transposição, para sentido unidirecional de giro dos condutores

Método do fatiamento/transposição

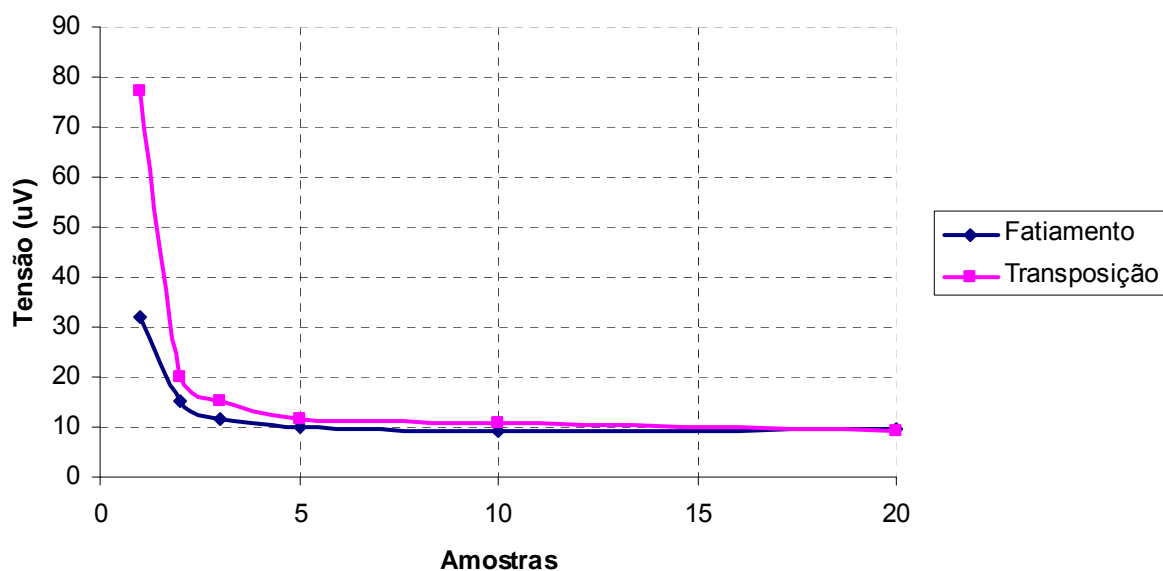


Gráfico 6 - Relação entre a tensão induzida e a quantidade de amostras para os métodos de fatiamento e transposição, para sentidos opostos de giro dos condutores

Conforme apresentado no **Gráfico 5** e **Gráfico 6**, é interessante observar que quanto menor o número de amostras, os resultados para a tensão induzida são mais elevados, porém, aumentando-se o número de amostras os valores de tensão induzida tendem a estabilizar-se.

É possível observar o mesmo comportamento para as duas metodologias tanto para giro unidirecional quanto para o giro em sentidos opostos dos condutores, de acordo com a teoria de amostragem de Nyquist, conforme apresentado por Steven (1999, p. 40).

Além da comprovação da teoria de Nyquist, que define o número mínimo de amostras devem ser utilizadas, é possível observar que não há a necessidade de utilizar um elevado número de amostras pois os valores apresentam-se praticamente estáveis a partir de 10 amostras.

Desta maneira recomenda-se utilizar entre 5 a 10 amostras para a realização das simulações, garantindo assim uma confiança nos resultados sem perder muito tempo com um número elevado de simulações.

5.1.5 Efeito do trançamento dos condutores na atenuação da tensão induzida nos condutores de sinal

Primeiramente foi realizada uma simulação para um condutor utilizando-se uma extrusão simples, ou seja, considera-se os condutores distribuídos paralelamente ao longo do comprimento. A profundidade do domínio utilizada foi de 1.000mm e 50 fatias para o método do fatiamento e 72° para o método da transposição.

O valor obtido de tensão induzida nos condutores de sinal foi de 0,80mV para ambos os métodos.

Para a simulação utilizando a propagação helicoidal para 1 MMC completo, o resultado obtido de tensão induzida nos condutores de sinal para o método do fatiamento foi de 0,296pV e 1,75pV para o método da transposição, ou seja, praticamente zero, comprovando desta maneira que o trançamento dos condutores atenua a tensão induzida nos condutores de sinal.

Quando realizadas as simulações para a extrusão helicoidal e 750mm de MMC, foi obtido o valor de 6,66 μ V, idêntico ao valor obtido na **Tabela 2**.

Estas simulações demonstram que a extrusão helicoidal dos condutores de sinal diminui o valor da tensão induzida nos mesmos, conforme esperado.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo demonstrar a utilização de metodologias de simulação de tensões induzidas em cabos umbilicais através da aplicação do Método dos Elementos Finitos.

Foi possível verificar que devido à armadura ser de material ferromagnético, a dispersão do campo para o exterior é desprezível e as linhas de campo magnético formam um circuito fechado na armadura, assim, os resultados da tensão induzida nos condutores de sinal para as três condições de contorno são similares.

Na aplicação do MEF 3D, foi encontrada maior dificuldade com relação à elaboração da geometria, em virtude das limitações do programa de elementos finitos utilizado e também dos requisitos de hardware necessários. Além disso, deparou-se com problemas de não convergência dos resultados, devido à densidade elevada da malha de elementos finitos exigida para as simulações tridimensionais com condutores com volume malhado.

A solução encontrada para a execução da simulação tridimensional foi a utilização de condutores de potência e de sinal não malhados. Com esta técnica, a memória computacional exigida para a realização das simulações foi muito menor, uma vez que o volume dos condutores não é malhado e os cálculos de campo magnético foram realizados a partir da formulação de Biot-Savart.

Utilizando-se a técnica de condutores não malhados, foram obtidos resultados satisfatórios para uma configuração simples de cabo umbilical, pois foi possível verificar a atenuação da tensão induzida quando realizado o trançamento dos condutores, conforme demonstra a teoria. Estes resultados serviram de subsídio para o desenvolvimento das metodologias de fatiamento e transposição baseadas MEF 2D.

Não foi possível estabelecer uma comparação direta entre os resultados da metodologia tridimensional e os resultados das metodologias bidimensionais, sobretudo em razão das limitações do modelo 3D, como a utilização de apenas malhas de primeira ordem no modelo. No entanto, foi possível comprovar que nas simulações em 2D também ocorre a atenuação das tensões ao longo de um período completo do MMC dos condutores do umbilical, demonstrando que as metodologias desenvolvidas, reproduzem o fenômeno físico observado em domínio 3D, porém exigindo menor esforço computacional.

Finalmente, foi realizada uma análise sobre a quantidade de amostras para os métodos de fatiamento e transposição, na qual se verificou a importância da teoria de amostragem de Nyquist, segundo a qual a quantidade de amostras para a realização das simulações deve ser maior do que o dobro da frequência do menor período de comprimento, geralmente os condutores de sinal.

Para trabalhos futuros, seria interessante estabelecer a comparação dos resultados obtidos com outras metodologias de análise (cálculos analíticos, por exemplo) e, possivelmente, com medidas experimentais em cabos umbilicais reais. Tais comparações seriam importantes para uma validação experimental das metodologias desenvolvidas neste trabalho, viabilizando a aplicação das mesmas em novos projetos de cabos umbilicais utilizados na área de exploração de óleo e gás.

REFERÊNCIAS

ABB HIGH VOLTAGE CABLE UNIT IN SWEDEN. **Cables for offshore windfarms and platforms**. Sweden, 2008. (ABB HVC 2GM5010-gb pdf).

ABB. **Submarine Power Cables. State-of-the-art production facility, more than 100 years of experience and reference installations around the world**. ABB's high voltage cable unit in Sweden. Disponível em: <www.abb.com/cables> Acesso em: 03 nov. 2009.

AKER KVAERNER, Inc. Solutions. Noruega 2005. Disponível em: <www.akerkvaerner.com>. Acesso em: 25 jan. 2010.

API RP IIS6 – **Recommended practice for testing of electric submersible cable system**, 1995, revisão de 2008.

BASTOS J. P. A., IDA NATHAN. **Electromagnetics and calculations of fields**. Second edition, Springer-Verlag New York. EUA: 1997.

BASTOS. J.P. A. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**. Florianópolis: Marcel Dekker, Inc. 2005.

BREMNES, J. **Multi-conductor power umbilicals for subsea located motors**. Energy Division Nexans Norway AS. European Flux users club 2005. Kortrijk: 13 out. 2005.

CARDOSO, J. R.; **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**, 1ª edição, publicação independente, 1995.

CEDRAT. FLUX, USER'S GUIDE. Vol 2 **Physical description circuit coupling kinematic coupling**. Julho 2009. França.

CEDRAT. FLUX, USER'S GUIDE. Vol 3 **Physical Applications**. 29 jun. 2009. França.

CENTRAL STATION ENGINEERS OF THE WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. **Electrical Transmission and Distribution Reference Book Westinghouse**. Pittsburgh, Pensilvânia: 1964.

CHIPMAN, R. A. **Teoria e Problemas de Linhas de Transmissão**. São Paulo: McGraw-Hill, 1976.

CLAYTON, R. P., **Analysis of Multiconductor Transmission Lines**. Wiley-Interscience. Nova Iorque, 1994.

CLOUGH, R. W. **The Finite Element Method in Plane Stress Analysis Proceedings**. ASCE CONFERENCE ON ELECTRONIC COMPUTATION. Pittsburgh, PA, 8–9 set. 1960.

CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS. **Análise estrutural axissimétrica de cabos umbilicais e linhas flexíveis**. [S.l.: s.n.] Jefferson Lacerda, M. A. Vaz. Salvador. 2004

CORDOVÉS, D. C. S. **Análise de confiabilidade estrutural de cabos umbilicais**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo: 2008. 149 p.

COSTA, M.C. et al. **A New Methodology for Power System Quality Analysis of Umbilical Cables Using 2D-Finite Element Method**. In. COMPUMAG 2007. 2007 Alemanha. São Paulo: USP, 2007.

COURANT R. **Variational Methods for the Solutions of Problems of Equilibrium and Vibrations**. BULL. AM. MATH. SOC., Vol. 49, 1943.

EDMINISTER J.A. Circuitos elétricos, coleção Schaum, Joseph A. Edminister. McGraw-Hill do Brasil Ltda. EUA: 1975.

FOLHA ONLINE, 03 de outubro de 2003, Relatório Link. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/especial/2003/petrobras50anos/fj0310200309.shtml>>

Acesso em: 15 fev. 2010.

FERREIRA, J. L. Propostas para redução e atenuação de ruídos originados em transformadores e subestações elétricas de alta potência. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PROMEC - UFRGS), Brasil.

GOOD, ROBERT H., Classical Electromagnetism, Saunders College Publishing. California State University, Hayward. 1998

HAVARD D. *Oleo & gas production handbook, An introduction to oil and gas production*. 1 ed. Oslo: ABB. 7 ago. 2008.

HEGGDAL, O. *The integrated production umbilical (IPU) and design tools for deep water*. OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. EUA 2-5 maio 2005.

HO C. W.; A. E. Ruehli; P. A. Brennan; *The Modified Nodal Approach to Network Analysis*, IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. CAS-22, 1975.

HUEBNER, K. H. *The Finite Element Method for Engineers*. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1976.

IEC 60287-1-1 International Standard. *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – Edição 2*. 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics**. Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf>. Acesso em: 30 set. 2009.

JOHNSON, Fred V. Nydegger, Roland R. **Apparatus for handling strands**. United States Patent 2106803, 01 fev. 1938.

KAUNE, W.T. IEEE Transactions on power delivery. **Analysis of magnetic field produced far from electric power lines**, 1992.

LANDGRAF, F. J. G. **Materiais magnéticos para a indústria automobilística**. ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO: São Paulo. Julho: 2008

MOORE, Boyd B., Kendall Jr., Clarence E. **Marine umbilical cable**. United States Patent 4196307, 01 abr. 1980.

MORGAN, George W. **Multiconductor underwater line**. United States Patent 3526086, 01 set. 1970.

NATIONAL COUNCIL OF EXAMINERS FOR ENGINEERING AND SURVEYING **Fundamentals of engineering supplied-reference handbook**. 5 ed. 2001.

NOGUEIRA, A. F. L. **Análise de cabos coaxiais cilíndricos usando a técnica dos elementos finitos**. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, Brasil. 26 set. 2007.

NSW a General cable company. Submarine Power Cables. Norddeutsche Seekabelwerke GmbH. Alemanha. Disponível em: <www.nsw.com>, acesso em: 08 jan. 2010.

OLIVIER, N.C. **Análise de falha da camada polimérica externa de cabos umbilicais**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. 190 p.

ONE PETRO. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/about.htm>>. Acesso em: 06 ago. 2009.

ORSINI, L. Q. **Curso de Circuitos Elétricos**. vol. 1, Ed. Edgard Blucher Ltda., 1991.

PETTERSSON; SCHONBORG, N. **Reduction of power system magnetic Field by configuration twist**. IEEE Transactions on power delivery. Vol 12 Suécia:Out. 1997.

PRIBERAM Disponível em:
<<http://prieram.sapo.pt/dlpo/default.aspx?pal=remanência>> . Acesso em: 09 nov. 2009.

PRYSMIAN CABLES AND SYSTEMS. **Umbilicals Thermoplastic and Steel Tube**. Disponível em: <www.prysmian.com>. Acesso em: 12 jun. 2009.

REVISTA O SETOR ELÉTRICO, **Instalações offshore: pioneirismo brasileiro**. ano 5, edição 50, março de 2010, ISSN 1983-0912., p.74.

ROBERT, R. **Efeito Pelicular**, **Revista Brasileira de Ensino de Física**. vol. 22, no. 2. Departamento de Eletricidade, Universidade Federal do Paraná. Junho, 2000.

SANTOS, C.H. **Método de equações integrais de fronteira aplicado à eletrostática**. Reunião Anual da SBPC. Florianópolis. 2006

SEGERLIND, L. J. **Applied Finite Element Analysis**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1976.

SHACKLETON, D. et al. **Electrical and thermal design of umbilical cable**. Jicable 07. Versailles, 2007.

STEVEN W. SMITH. **The scientist and engineer's guide to Digital Signal Processing**. California Technical Publishing, San Diego, Califórnia second edition 1999.

STEVENSON, W. D. Jr. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

TANNEHILL, et al. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**. 2 ed. Washington DC: Hemisphere Publishing Corporation. 1984.

TOSIN, André; Dietz, W. G., Sartori, C., Cardoso, J. R. **Application of Spice simulator in the evaluation of crosstalk computational models**. Universidade de São Paulo. Brazil. COMPEL 25,3. 2005

UDESC. **Mundo Físico**. Centro de Ciências Tecnológicas. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville Brasil. 2004. Disponível em: <http://www.mundofisico.joinville.udesc.br/index.php?idSecao=120&idSubSecao=30&idTexto=135> . Acesso em: 02 fev. 2010.

UNESP. **Eletrotécnica Geral. VII Circuitos magnéticos**. DLSR/JCFC - UNESP/FEG/DEE. www.dee.feg.unesp.br:8080/Disciplinas/SEL4001/Capitulo_7.pdf acesso em: 22 set. 2009.

WEEDY, B.M., **Underground Transmission of Electric Power**. John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1980.

WORZYK, T. **Submarine Power cables**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Suécia: 2009.