

Metodologia para o Cálculo de Parâmetros de Cabos Submarinos de Potência aplicando Análise por Elementos Finitos

André M. Alzamora*. José Carlos L. V. Silva**.
Marco Túlio A. Êvo***. Hélder de Paula****.

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia (e-mail: andre.alzamora@outlook.com)

**Petrobrás S.A. (e-mail: jcarlos_lvs@petrobras.com.br)

***Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del Rei (e-mail: mtevo@ufsj.edu.br)

****Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia (e-mail: drhelderdepaula@gmail.com)

Abstract: The expansion of offshore wind farms, the need for oil production in increasingly deeper waters and the demand for larger power transmission systems have required new levels of technology and performance of submarine power cables. The long length of these cables makes such applications more susceptible to a series of undesirable electromagnetic phenomena, including transient ones, requiring studies to be carried out for the design and commissioning of the system, as well as to assess and mitigate the consequences of such phenomena. For this type of evaluation, computer simulations are indispensable and, in the aforementioned case, they demand specific models, suitable for high frequency studies. In the case of insulated cables, the elaboration of their modeling requires, as input data, the matrices of resistances and inductances at various frequencies, from Hz to MHz. In this way, the Finite Element Method (FEM) is a powerful tool for obtaining such parameters. In this context, this paper presents a methodology composed of advanced techniques for the calculation of submarine power cables parameters through the FEM. Three different models of submarine application cables are employed in various case studies. The objective is to discuss the best way to model certain constructive characteristics of cables in the FEM, as well the impact of these characteristics on parameter values and in the associated joule losses.

Resumo: A expansão dos parques eólicos *offshore*, a necessidade por produção de petróleo em águas cada vez mais profundas e a demanda por sistemas de transmissão de energia de maior porte exigiram que os cabos submarinos de potência atingissem novos níveis de tecnologia e desempenho. O grande comprimento destes cabos torna tais aplicações mais suscetíveis a uma série de fenômenos eletromagnéticos indesejáveis, incluindo transitórios, exigindo que estudos sejam realizados para o projeto e comissionamento do sistema, bem como para avaliar e mitigar as consequências de tais fenômenos. Para esse tipo de avaliação, simulações computacionais são indispensáveis e, no caso supracitado, elas demandam modelos específicos, apropriados para estudos em alta frequência. No caso de cabos isolados, a elaboração de sua modelagem requer, como dados de entrada, as matrizes de resistências e indutâncias em várias frequências, de Hz até MHz. Dessa forma, o Método de Elementos Finitos (FEM) é uma ferramenta indispensável para a obtenção de tais parâmetros. Neste contexto, o presente artigo apresenta uma metodologia composta por técnicas avançadas para o cálculo de parâmetros de cabos submarinos de potência através do FEM, contemplando, em estudo de casos, três diferentes modelos de cabos de aplicação submarina. O objetivo é discutir a melhor forma de se modelar no FEM determinadas características construtivas dos cabos, bem como o impacto dessas características nos valores dos parâmetros e nas perdas joulícas associadas.

Keywords: cable parameters; finite element method; submarine cables; proximity effect; skin effect; modeling;

Palavras-chaves: cabos submarinos; efeito pelicular; efeito proximidade; método de elementos finitos; modelagem; parâmetros de cabos.

1. INTRODUÇÃO

Os cabos submarinos são divididos em dois tipos de aplicações principais: telecomunicações e transmissão de energia. O primeiro sempre foi objeto de enorme atenção da comunidade científica e industrial desde a instalação do primeiro cabo telegráfico submarino em 1850 e, mais recentemente, com o desenvolvimento da fibra óptica. Já o segundo tem

experimentado um maior desenvolvimento em pesquisas e desenvolvimento tecnológico apenas nas décadas mais recentes (Worzyk, 2009). Cabos submarinos de potência são empregados na exploração e produção de petróleo em águas profundas (Rodrigues et al., 2005), parques eólicos *offshore* (Bresesti et al., 2007), fornecimento e conexão de sistemas de energia entre ilhas e continentes (Doyen et al., 1989; Colla et al., 2013; Benato et al., 2016), sistema de transmissão de

energia submarino em alta tensão utilizando corrente contínua (Hauge et al., 1988; Colla e Zaccone, 2018), dentre outras aplicações.

Dependendo de sua aplicação e do sistema como um todo, os valores a serem investidos nos cabos podem representar uma das maiores parcelas dos custos relativos ao orçamento do projeto, motivando a realização de pesquisas e estudos para a obtenção da melhor opção para o cabo submarino (Green et al. 2007; Renaudin et al., 2019).

Uma das características comuns a todas as aplicações citadas é a necessidade de cabos submarinos bastante extensos (da ordem de dezenas e até centenas de quilômetros). A presença de cabos longos pode gerar, ou intensificar, as consequências de uma série de fenômenos eletromagnéticos de natureza transitória, exigindo estudos e simulações por parte dos projetistas e operadores dos sistemas para poderem entender, prever e mitigar tais eventos. Em sistemas de transmissão submarina em corrente alternada, por exemplo, sobretensões transitórias podem ser causadas a cada processo de chaveamento, como durante energizações ou eliminação de curtos-circuitos (Ohno, 2012; Colla e Zaccone, 2018), podendo estar associadas a mecanismos de ressonância em componentes harmônicas de baixa ordem (Colla et al., 2007). Em sistemas que envolvem a presença de acionamento de motores através de inversores a longas distâncias, tal como ocorre na extração de petróleo no fundo do mar através de bombas submersas, sobretensões transitórias são causadas pela propagação e reflexão dos pulsos de tensão PWM (Metwally e Gastli, 2006). Diferentemente das aplicações industriais comuns, onde os cabos não são tão extensos, no caso do acionamento de bombas submersas, as sobretensões podem ser amplificadas devido a processos de ressonância (Liang et al., 2015), aumentando ainda mais a preocupação com o projeto e comissionamento do sistema.

Fenômenos como estes supracitados, bem como outros de natureza transitória eletromagnética (Greenwood, 1991; Silva e Bak, 2013; Ametani et al., 2015), podem ser reproduzidos em ambientes computacionais através de simuladores. Para isso, é imprescindível que cada componente do sistema seja representando através de modelos específicos, elaborados de acordo com a natureza do evento e do tipo de estudo em foco. No caso dos cabos elétricos, sua modelagem deve considerar a dependência dos valores de seus parâmetros com a frequência, bem como a sua natureza distribuída (de Paula, 2008a e 2008b). Modelos que assumem parâmetros constantes (por exemplo, em 60 Hz) não podem simular adequadamente a resposta do sistema sob condições transitórias, uma vez que eles estão sujeitos a sinais compostos por uma ampla faixa de frequências (Martí, 1982).

Nesse sentido, o desenvolvimento da modelagem de linhas ou cabos requer, como dados de entrada, os valores dos parâmetros série (matrizes das resistências e indutâncias) em uma ampla faixa de frequências (Chaves et al., 1997; Moreira et al., 2002; de Paula, 2008b). No caso de linhas áreas, tais parâmetros podem ser obtidos através de expressões analíticas clássicas (Carson, 1926). Por outro lado, os cabos isolados normalmente se caracterizam por construções mais elaboradas, sendo constituídos por isolações, blindagens e

armaduras metálicas. Tais características elevam sobremaneira a complexidade da determinação de suas matrizes de impedância, pois, dentre outras dificuldades, pode-se citar a presença do efeito proximidade, o que exige métodos numéricos para a sua representação. Nesse sentido, o Método dos Elementos Finitos (FEM) se tornou a principal ferramenta para a obtenção de parâmetros de cabos, tal como feito em Yin e Dommel (1989), Cristina e Felizani (1989), Cirino et al. (2009) e de Souza et al. (2018).

No caso específico de cabos submarinos de potência, algumas técnicas ainda mais avançadas de construção podem ser empregadas. Dentre elas, pode-se citar a elaboração da armadura do cabo através do entrelaçamento de fios individuais em formato helicoidal e a concepção do condutor principal através de segmentos isolados. Tais aspectos construtivos têm efeito direto nos valores de resistências e indutâncias do cabo, bem como nas perdas jôulicas associadas.

Nesse contexto, o objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia composta por técnicas avançadas para aprimorar o cálculo de parâmetros de cabos submarinos de potência em uma ampla faixa de frequências através do FEM, incluindo métodos para a simplificação das geometrias e a utilização de condições de fronteira específicas para aperfeiçoar a simulação, diminuindo o custo computacional e aumentando a exatidão dos resultados. Nos estudos de casos apresentado, três tipos de cabos submarinos são empregados, a fim de contemplar diferentes aspectos construtivos e avaliar seus impactos nos resultados pretendidos. O software empregado é o Comsol Multiphysics, bastante difundido nos meios acadêmicos e profissionais (Comsol, 2017). Contudo, as técnicas são explicitadas de maneira que estudantes, engenheiros ou profissionais da área consigam reproduzi-las em outros *softwares* similares.

2. CABOS SUBMARINOS DE POTÊNCIA

Existem diversos tipos de cabos submarinos de potência, cada um podendo apresentar características específicas de construção e material para os condutores principais, blindagens, armaduras e isolantes. Nesse cenário, o presente artigo aborda três modelos diferentes de cabos dotados de determinadas características, a fim de que sejam utilizados como exemplos para o emprego de técnicas de modelagem associadas ao FEM, aqui apresentadas.

O primeiro modelo trata-se de um cabo trifásico submarino de 500 mm²/220 kV, desenvolvido e fabricado pela ABB e apresentado na Fig. 1 (ABB, 2010). A escolha por esse tipo de cabo se deu por algumas características específicas que somente são encontradas em cabos de maiores níveis de tensão e seção transversal, dentre as quais pode-se citar:

- O condutor principal (ou de fase) é fabricado através de segmentos isolados, reduzindo consideravelmente os efeitos pelicular e proximidade. Esse tipo de construção, conhecido como Milliken, é empregado apenas em cabos de seções transversais maiores, aumentando consideravelmente a área efetiva de circulação das correntes pelo condutor (Worzyk, 2009).

- A armadura é composta por fios entrelaçados em formato helicoidal e separados através de um material isolante que preenche toda a seção transversal da região da armadura. Esse tipo de formato da armadura impede a circulação de correntes parasitas entre os fios.

O segundo modelo avaliado é um cabo de 240 mm²/20 kV da MFX. Seus condutores possuem a construção padrão, formada por fios compactos circulares e entrelaçados. Nesse caso, os efeitos proximidade e pelicular possuem forte influência na distribuição dos campos eletromagnéticos e, consequentemente, no cômputo dos parâmetros série.

O terceiro modelo de cabo, fabricado pela MFX e mostrado na Fig. 2, também é de 240 mm²/20 kV. Contudo, por ser aplicado especificamente em acionamento de bombas submersas para a extração de petróleo, ele possui além dos condutores de fase para a transmissão de potência elétrica, diversos outros elementos para transmitir, a partir de plataformas, sinais elétricos e ópticos aos equipamentos localizados no fundo do mar e no poço, realizar controles hidráulicos de válvulas, injetar aditivos químicos e efetivar diversas outras intervenções.

Tanto o segundo modelo de cabo apresentado no artigo (empregado exclusivamente para a transmissão de potência e sinais elétricos) como o terceiro modelo (conhecido também como cabo umbilical) podem ser aplicados para o acionamento de bombas submersas. Apesar de apresentarem condutores de fase praticamente iguais, a presença de outros elementos metálicos e as maiores dimensões do cabo umbilical podem ou não gerar impacto nos valores de resistências e indutâncias. O intuito neste artigo é determinar o quanto, em valores percentuais, os parâmetros série desses cabos se divergem entre si considerando uma ampla faixa de frequências.

A estrutura dos condutores de fase é praticamente a mesma para os três cabos, diferenciando-se apenas no fato de que o primeiro modelo possui a construção do tipo Milliken, enquanto os demais possuem a construção padrão. Essa estrutura é mostrada na Fig. 3 e os diâmetros das principais camadas do condutor e do cabo são mostrados na Tabela 1. D_{con} , D_{iso} , D_{bli} e D_{rev} se referem aos diâmetros externos do condutor, isolante, blindagem e revestimento, respectivamente, que compõem cada um dos três condutores de fase do cabo. $D_{arm,i}$ e $D_{arm,e}$ se referem aos diâmetros interno e externo da região que compõe a armadura do cabo. As camadas semicondutoras pouco influenciam no cômputo dos parâmetros série e foram consideradas como isolantes.

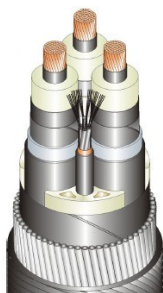


Fig. 1 – Cabo submarino de potência de 500 mm²/220 kV da ABB (ABB, 2010).

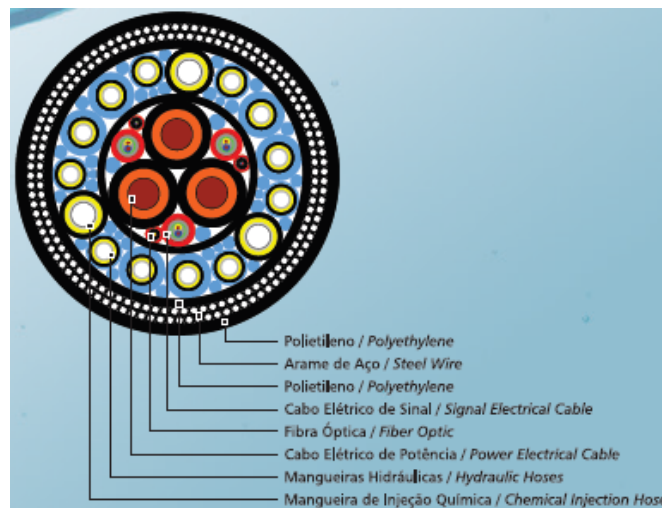


Fig. 2. Cabo submarino umbilical de 240 mm²/20 kV da MFX (MFX, 2022).

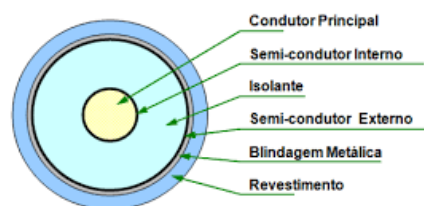


Fig. 3. Visão da seção transversal do condutor de fase.

Tabela 1. Valores dos diâmetros das principais camadas dos cabos.

Modelo	Diâmetro das camadas do condutor (mm)					
	D_{con}	D_{iso}	D_{bli}	D_{rev}	$D_{arm,i}$	$D_{arm,e}$
1	26,2	77,6	83,4	89,2	199,1	212,1
2	18,6	34,08	35,3	38,4	94,6	108,8
3	18,6	34,08	35,3	38,4	149,5	163,5

A condutividade (σ) e a permeabilidade magnética (μ) dos materiais empregados nos cabos são exibidos na Tabela 2. Os condutores de todos os modelos são de cobre. O cabo da ABB emprega chumbo na blindagem e um material não ferromagnético na armadura, já os cabos da MFX empregam uma blindagem de cobre e uma armadura de aço galvanizado. Os valores de condutividade e permeabilidade empregados nas armaduras dos cabos são pressupostos com base no material empregado, uma vez que os catálogos não os quantificam.

Tabela 2. Condutividade e permeabilidade dos materiais empregados nos cabos.

Modelo	Condutor		Blindagem		Armadura	
	σ (S/m)	μ	σ (S/m)	μ	σ (S/m)	μ
1	59,6 M	1	4,55 M	1	4,03 M	1
2 e 3	59,6 M	1	59,6 M	1	35 M	300

3. METODOLOGIA

O primeiro emprego do FEM envolvendo o cálculo de parâmetros de cabos ocorreu há 33 anos, em um trabalho desenvolvido por Yin e Dommel (1989). Desde então, diversos

autores publicaram estudos tendo em vista diferentes casos e abordagens, gerando contribuições expressivas nesse tema.

De maneira simplificada, a utilização do FEM para o cálculo de parâmetros de cabos exige a definição de algumas questões, dentre as quais pode-se citar:

- 1) Determinação do tipo de problema a ser solucionado, isto é, das equações matemáticas que regem as leis físicas associadas aos fenômenos em foco, a depender do parâmetro a ser calculado e do método utilizado para esse fim.
- 2) Definição da dimensão do modelo.
- 3) Descrição dos domínios do problema.
- 4) Escolha das condições de fronteira.
- 5) Refinamento da malha de elementos finitos nas regiões em que ocorrem maiores variações das grandezas físicas intrínsecas ao problema.

3.1 Determinação do Tipo de Problema e Método de Cálculo

Os parâmetros série, resistências e indutâncias, são obtidos no FEM através de um problema magnético harmônico no tempo cuja solução consiste na determinação do potencial vetor magnético nos domínios do modelo, em função da frequência do sinal de excitação. No Comsol, esse tipo de problema é resolvido por meio de uma interface física chamada de “*Magnetic Field (mf)*” através de um estudo no domínio da frequência (“*Frequency Domain Model*”).

A excitação do sistema, seja ela por tensão ou corrente, é realizada no Comsol através de um nó chamado de “*Coil*”, sendo adicionado sob a interface “*Magnetic Field (mf)*”. A resistência e a indutância de sequência positiva foram obtidas diretamente através da imposição de correntes senoidais defasadas entre si de 120° nos três condutores de fase e cuja frequência é aquela em que se deseja obter os parâmetros série.

3.2 Definição da Dimensão do Modelo

Simulações em domínios bidimensionais podem ser realizadas sem perda na precisão dos resultados caso o sistema tenha as seguintes características: (i) as geometrias presentes são longitudinalmente homogêneas e (ii) as grandezas físicas intrínsecas ao problema magnético harmônico no tempo variam, predominantemente, apenas nos dois eixos coplanares às seções transversais dos cabos. Em relação à primeira condição, ela está atrelada à consideração de que todos os elementos presentes no sistema estão paralelos entre si e os materiais empregados neles são isotrópicos. Apesar da armadura conter fios entrelaçados em formato helicoidal, a ideia é considerá-los paralelos entre si e aplicar condições específicas, como mostrado na seção 4.3(C), uma vez que as correntes parasitas são consideradas praticamente nulas. Já em relação à segunda, a própria natureza espacial dos campos gerados pelas correntes elétricas nos cabos, associada à lei de Biot-Savart, permite afirmar que eles, para o caso de cabos submarinos, variam muito pouco no terceiro eixo ortogonal. Nos casos em que tais condições não são satisfeitas, é necessário que um modelo em três dimensões seja considerado, aumentando consideravelmente o esforço

computacional e a complexidade do problema (Alzamora e de Paula, 2021).

3.3 Descrição dos Domínios do Problema e Escolha das Condições de Fronteira

Todos os problemas a serem resolvidos pelo FEM devem possuir domínios e limites bem definidos. Os domínios estão associados às diversas regiões com propriedades específicas que influenciam na solução do problema; a união dos diversos domínios origina o modelo completo. Os limites estão relacionados à necessidade do problema em apresentar uma região de solução fechada para a qual as grandezas físicas devem ser determinadas.

No caso dos cabos submarinos de potência, apesar da armadura confinar grande parte dos campos eletromagnéticos em seu interior, há a necessidade de se considerar o meio externo ao cabo, principalmente para frequências iguais ou mais próximas da fundamental, onde o efeito de blindagem eletromagnética das estruturas metálicas do cabo é menos pronunciado e a penetração dos campos eletromagnéticos no leito marinho é maior. A Fig. 4. mostra que existem linhas de campo magnético externas ao cabo para a frequência fundamental.

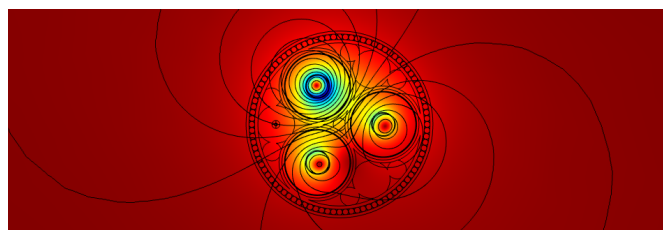


Fig. 4. Linhas de campo magnético externas ao cabo para a frequência fundamental.

Normalmente, os cabos são dispostos diretamente no fundo do mar ou enterrados sob pequenas profundidades. O guia da ABB para cabos XLPE (ABB, 2010) estabelece para suas especificações a condição de que o cabo esteja a um metro de profundidade no solo marinho.

O solo marinho em torno do cabo é concebido através de um círculo cujo raio é definido através de sucessivas simulações até que os valores de resistência e indutância do cabo se estabilizem para aumentos contínuos do raio do círculo. Um raio para o solo marinho de cerca de cinco vezes o raio do cabo foi o suficiente para representar todas as correntes induzidas nesse meio para a frequência fundamental de 60 Hz.

Em relação às condições de fronteiras, um contorno do tipo Dirichlet, com potencial vetor magnético nulo, foi imposto nas linhas que delimitam o círculo que representa o solo marinho, de forma a confinar todo o fluxo magnético no interior da região de solução. No Comsol, o contorno de Dirichlet é imposto através de uma condição de fronteira chamada de “*Magnetic Insulation*”.

3.4 Refinamento da Malha

A exatidão da solução obtida através de simulações baseadas no FEM está diretamente relacionada à quantidade e qualidade

dos elementos finitos que discretizam as diferentes regiões que compõem os domínios do problema, ou seja, há uma relação direta entre o refinamento da malha e a precisão dos resultados. Por outro lado, quanto mais refinada for determinada malha, maior será o tempo e custo de memória computacional necessários para a obtenção da resposta. Sendo assim, o refinamento da malha deve ser realizado de maneira otimizada e se concentrar nas regiões em que as variações das grandezas físicas do problema são maiores. Nesse contexto, na sequência são discutidas as estratégias adotadas na geração da malha de elementos finitos para o modelo:

A. Condutores Tradicionais

Os condutores de fase dos cabos submarinos são constituídos normalmente de fios de cobre circulares compactos e entrançados, principalmente para seções transversais de até 1000 mm² (ABB, 2010). Devido à baixa resistência de contato elétrico entre os fios que compõem o cabo, esse tipo de construção tem praticamente o mesmo comportamento elétrico no que tange os efeitos proximidade e pelicular em relação ao condutor sólido composto de um único fio massivo (Nexans, 2004).

Nesse caso, a concepção da malha de elementos finitos nos condutores deve levar em conta, principalmente, a presença do efeito pelicular, uma consequência direta da circulação de correntes alternadas. À medida que a frequência da corrente elétrica que circula pelo condutor aumenta, mais fina é a camada da seção transversal do cabo pela qual ela se estabelece. A densidade de corrente J pode ser definida em função da profundidade r medida a partir da superfície do condutor, conforme (1):

$$J(r) = J_s \cdot e^{-r/\delta} \quad (1)$$

onde r é o raio medido a partir da superfície do condutor, $J(r)$ é a densidade de corrente a uma profundidade r , J_s é a densidade de corrente na superfície do condutor e δ é a profundidade de penetração pelicular. A profundidade de penetração δ é, por sua vez, definida por (2):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2)$$

onde ω é a frequência angular, μ é a permeabilidade magnética do meio e σ é a condutividade do meio.

Através de (1), verifica-se que a densidade de corrente diminui exponencialmente a partir da borda do condutor. Para $r = \delta$, por exemplo, tem-se um valor de densidade de corrente equivalente a 37% da densidade que circula na superfície do condutor e, para $r = 5\delta$, esse valor é de 0,67%. Portanto, a malha de elementos finitos gerada no condutor deve ser mais refinada no círculo que compreende sua superfície até uma espessura de 5δ , pois é nessa região em que ocorre uma maior variação da densidade de corrente e, conseqüentemente, da densidade de fluxo magnético produzido por ela.

Uma vez estabelecido o local de refinamento, deve-se determinar o tipo e o tamanho dos elementos geométricos a serem empregados nessa região. Existe uma convicção sobre a utilização da profundidade de penetração pelicular δ como

referência para definir tanto a região de refinamento como também o tamanho dos elementos finitos na malha dos condutores. Em relação ao tipo do elemento, as principais referências empregam triângulos.

Nas pesquisas conduzidas em Cirino et al. (2009), as arestas dos triângulos são definidas com comprimento máximo igual a $0,5\delta$ e empregados na região compreendida entre a borda do condutor até uma espessura de 5δ ; já em de Souza et al. (2018), onde os triângulos também tem arestas cujos tamanhos são dependentes de δ , um estudo mais minucioso é realizado, chegando à conclusão que para frequências bastante altas, onde a profundidade de penetração é muito pequena, estabelecer a região de refinamento até 5δ pode tornar o esforço computacional excessivamente alto, dado o aumento da densidade da malha de elementos finitos a ser concebido na região de refinamento, visto o tamanho da aresta estar relacionado ao pequeno valor de δ . Com isso, o autor realizou adaptações no método, reduzindo a região de refino e aumentando a relação de tamanho do triângulo à medida que a frequência dos campos ia se tornando mais alta. A tarefa de encontrar um equilíbrio entre custo computacional, tamanho dos triângulos, dimensão da região de refinamento e precisão nos resultados, é bastante laboriosa e pode variar caso a caso, por depender da frequência de cálculo e das geometrias envolvidas. Tal referência elaborou um algoritmo extremamente complexo através de testes exaustivos a fim de contemplar qualquer configuração genérica dentro dos casos estudados, mas, mesmo assim, algumas combinações de frequências e geometrias podem tornar a simulação proibitiva e o programa simplesmente não ser capaz de finalizar a aplicação.

Visando elaborar uma malha refinada para os condutores sem as restrições apresentadas nos métodos empregados pelas referências citadas no último parágrafo, estudaram-se algumas opções de elementos geométricos a serem utilizados na região de refinamento. Sendo assim, propõe-se a aplicação de uma nova abordagem, relacionada à utilização de camadas paralelas espaçadas entre si de δ na região compreendida entre a superfície do condutor até uma espessura de 5δ , tal estratégia é conhecida mais comumente como “*boundary layer mesh*” e é bastante empregada em problemas de viscosidade. Programas mais robustos, como o Comsol, já possuem essa opção de malha pré-definida. A ideia desse tipo de malha está relacionada ao comportamento físico da densidade de corrente, que é de variar fortemente na direção normal à fronteira do condutor e muito pouco ao longo de linhas circulares concêntricas a ele. A Fig. 5 exhibe o refinamento aplicado à seção transversal de um condutor utilizando elementos triangulares e camadas paralelas para efeito de comparação.

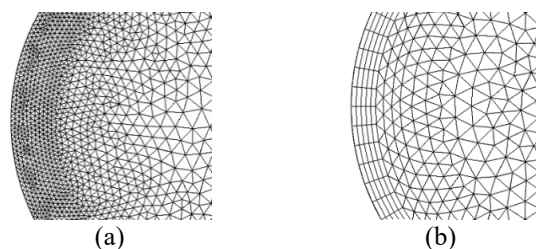


Fig. 5 - Formas de refinamento da malha: (a) elementos triangulares (b) camadas paralelas.

Em termos dos valores obtidos para as resistências e indutâncias, ambos os métodos apresentaram excelentes precisões, mas é possível perceber na Fig. 5 que o emprego de elementos triangulares gera muito mais elementos e, portanto, mais equações a serem resolvidas pelo FEM, resultando em um maior esforço para o computador. Além disso, o método das camadas paralelas para definir o refinamento da malha se mostrou muito mais interessante, pois, mesmo em altas frequências, a simulação não se torna excessivamente onerosa e pode-se manter a estratégia de refino (malha com subdivisões paralelas espaçadas entre si de δ) independentemente de qualquer característica do sistema, inclusive, de frequência. Ou seja, o usuário não precisa ficar realizando testes para encontrar um equilíbrio entre o refinamento da malha e a precisão nos resultados. Portanto, o emprego de camadas paralelas é incluso na metodologia proposta.

A Fig. 6 apresenta a seção transversal de um condutor exibindo a distribuição da densidade de corrente sob uma frequência de 10 kHz e a malha de elementos finitos elaborada. Essa malha é formada por camadas paralelas na região de refinamento e elementos triangulares na área mais interna do condutor. Vale ressaltar que mesmo os condutores não excitados pela corrente senoidal utilizaram essa mesma concepção de malha devido ao fato de estarem sujeitos à penetração de campos eletromagnéticos.

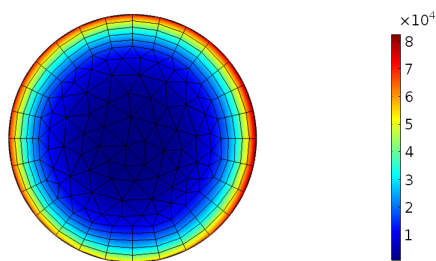


Fig. 6 - Visão da seção transversal de um condutor exibindo a densidade de corrente a 10 kHz e a malha de elementos finitos formada por camadas paralelas na região de refinamento e elementos triangulares no centro do condutor.

Conforme pode ser verificado pela Fig. 6, as camadas paralelas se localizam justamente na região onde a densidade de corrente se concentra, consequência do efeito pelicular, e elementos triangulares estão alocados na região de menor variação dessa densidade.

B. Condutores Milliken

Condutores Milliken, também conhecidos como segmentados, são constituídos de vários segmentos ou setores, cada um composto por fios circulares e enrolados em formato triangular. Estes segmentos são colocados justapostos entre si e montados em formato espiral, sendo separados por uma fita isolante ou semicondutora. Esse tipo de condutor é empregado para condutores com seções transversais maiores, normalmente acima de 1000 mm². A fig. 7 exhibe esse condutor.

O efeito proximidade é praticamente eliminado, uma vez que o formato espiral dos segmentos alterna a distância entre os fios que compõem dado segmento e os condutores dos outros

circuitos. Além disso, devido à isolamento entre os setores, o efeito pelicular também é bastante reduzido e restrito à cada segmento.

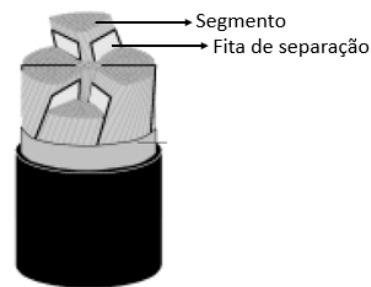


Fig. 7. Estrutura de um condutor segmentado ou Milliken (Nexans, 2004 (modificado)).

Para modelar o comportamento deste tipo de condutor no Comsol, propõe-se empregar uma opção chamada de “*Homogenized multi-turn*” no nó “*Coil*”. Essa opção consegue de forma otimizada reduzir os efeitos pelicular e proximidade e uniformizar a circulação de correntes pela seção transversal do condutor.

C. Armadura entrelaçada

O elemento construtivo de maior robustez dos cabos submarinos é a armadura, fornecendo as eles uma importante proteção mecânica. Geralmente, a armadura é composta por fios entrelaçados em formato helicoidal e separados através de um material isolante que preenche toda a seção transversal que compõe a sua região. Esse tipo de formato da armadura tem uma forte influência nas propriedades mecânicas do cabo (Worzyk, 2009). Contudo, ele também influencia em suas características elétricas: pode-se considerar que a corrente total induzida na armadura é zero (Arentsen et al., 2017; Bremnes et al., 2010). Isso se dá por dois motivos: a tensão induzida total é zero em um fio da armadura sobre um comprimento helicoidal completo e como os fios estão separados por um material isolante, não há um caminho para a circulação de correntes parasitas entre eles.

Devido aos aspectos mencionados no parágrafo anterior, é imprescindível que o modelo implementado no FEM mantenha as características elétricas apresentadas pelos fios que compõe a armadura, isto é, tensão total induzida nula. Para isso, propõe-se que a região que compreende a armadura seja definida como um domínio do tipo “*Coil*” cuja tensão de excitação (“*excitation voltage*”) é igual a 0 V. Esse tipo de estrutura consegue modelar de maneira otimizada a estrutura helicoidal da armadura, sem que seja necessário o emprego de modelos mais robustos e pesados computacionalmente, tal como a elaboração de modelos em três dimensões.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção visa discutir como as diferentes particularidades construtivas dos cabos submarinos podem impactar nos valores das suas resistências e indutâncias, bem como as perdas júllicas associadas. Para isso, para cada tipo de característica considerada, a técnica de simulação associada a ela foi empregada, conforme discutido na seção anterior.

4.1 Armadura Entrelaçada/Paralela

O primeiro estudo de caso mostra o quanto a estrutura da armadura influencia nos valores dos parâmetros e nas perdas associadas: na primeira simulação a armadura é composta por fios entrelaçados e separados por um isolante (para isso, é aplicada a técnica de modelagem exibida na seção 3.4(C)) e, na segunda simulação, o mesmo cabo é considerado, porém agora sua armadura é composta por condutores paralelos (modelada simplesmente como um material condutor que permite a circulação de correntes parasitas). O cabo utilizado como referência foi o da ABB, mostrado na Fig. 1.

A tabela 3 exibe os resultados obtidos no Comsol para as perdas júllicas nos condutores da fase, na blindagem e na armadura, considerando os dois tipos de armadura para o mesmo cabo. A tabela 4, por sua vez, apresenta as diferenças percentuais entre os valores dos parâmetros série para o mesmo caso. Nas tabelas, R_+ e L_+ são a resistência e indutância de sequência positiva, tais valores são idênticos para os três condutores.

Tabela 3. Perdas nas estruturas metálicas para os dois tipos de armadura.

Tipo	Perdas (W/km)			
	Condutor	Blindagem	Armadura	Total
Armadura simples	43190,4	10346,5	10012,5	63,5 k
Armadura entrelaçada	43190,4	12490,6	9,1	55,7 k

Tabela 4. Diferenças percentuais entre os parâmetros série para os dois tipos de armadura.

Frequência (kHz)	Diferença Percentual (%)	
	R_+	L_+
0,060	15,0	-5,9
1	-16,4	1,6
10	1,3	0,0
100	0,0	0,0
1000	0,0	0,0

O resultado exibido na Tabela 3 é bastante interessante, mostrando que as perdas totais no cabo diminuíram cerca de 12% ao considerá-lo com a armadura entrelaçada. Tal efeito é devido, principalmente, à redução drástica de perdas nos próprios fios da armadura que impossibilitam a circulação livre de correntes parasitas, responsáveis pelas perdas júllicas, quando estes estão entrelaçados e isolados.

Além disso, a Tabela 4 mostra a importância de se considerar corretamente a estrutura da armadura no cômputo dos parâmetros série do cabo. Grandes diferenças percentuais são encontradas, sobretudo para os valores de resistência em frequências mais próximas da fundamental.

4.2 Condutores Milliken/Tradicional

O objetivo do presente estudo de caso é quantificar em termos de diferenças percentuais o quanto os valores de resistência e indutância se modificam a depender da forma de construção do condutor principal. Para isso, empregou-se o cabo

submarino da ABB como referência e uma modelagem empregou os recursos mostrados na seção 3.4(A) para considerar o condutor do tipo tradicional e o outro modelo utilizou as técnicas apresentadas na seção 3.4(B) para considerá-lo segmentado. A tabela 5 exibe tais diferenças considerando diversos valores de frequência, de 60 Hz até 1 MHz (valor positivo indica um maior valor de parâmetro para o condutor tradicional).

Tabela 5. Diferenças percentuais entre os parâmetros série para os dois tipos de condutores.

Frequência (kHz)	Diferença Percentual (%)	
	R_+	L_+
0,060	7,6	-1,1
1	28,9	-11,7
10	74,2	-16,5
100	70,4	-18,0
1000	111,3	-18,5

Conforme mostra a Tabela 5, os valores dos parâmetros do cabo são fortemente afetados pelo tipo de condutor empregado, principalmente em frequências maiores (acima de 1 kHz), onde os efeitos peculiar e proximidade tem forte influência. Isso ocorre porque o condutor segmentado, conforme mencionado, atua no sentido de minimizar tais fenômenos. Tais resultados justificam a exigência de se considerar corretamente o tipo de condutor (tradicional ou segmentado) durante a modelagem do FEM, com efeito direto na exatidão dos resultados obtidos na simulação.

4.3 Cabos Umbilicais/Elétricos

Nesse último caso, são comparados os valores de parâmetros série dos dois cabos de 240 mm² da MFX, sendo que um deles, conforme discutido na seção 2, chamado de umbilical, tem uma construção típica para permitir também controles hidráulicos. Os dois cabos possuem a mesma estrutura de material e dimensões geométricas para o condutor principal, mas o umbilical apresenta diâmetros maiores para o cabo e para a armadura. Tal estudo visa responder à pergunta do quanto parâmetros elétricos são influenciados por tal configuração. A tabela 6 exibe tais diferenças considerando diversos valores de frequência (valor positivo indica um maior valor de parâmetro para o cabo exclusivamente elétrico).

Tabela 6. Diferenças percentuais entre os dois cabos de 240 mm²

Frequência (kHz)	Diferença Percentual (%)	
	R_+	L_+
0,060	6,7	-1,2
1	4,5	-1,0
10	3,2	-0,9
100	1,1	-0,8
1000	0,6	-0,6

Conforme pode ser constatado pela tabela 6, o valor de resistência do cabo é menor para o cabo umbilical. Simulações também mostraram uma redução de cerca de 12% nas perdas na frequência fundamental para esse tipo de cabo. Esses

resultados foram obtidos considerando os valores de condutividade e permeabilidade mostrados na Tabela 2, podendo ser maior ou menor se outro tipo de material for empregado na armadura. Portanto, pode-se concluir que o emprego do cabo umbilical pode influenciar nos parâmetros elétricos do sistema, sendo mais um fator importante durante o projeto de dado sistema.

6. CONCLUSÕES

O Método de Elementos Finitos representa uma opção concreta para a obtenção de parâmetros de cabos em condições que os métodos analíticos não são capazes de os fornecerem. No caso de cabos submarinos de potência, algumas características construtivas específicas devem ser cuidadosamente consideradas durante a modelagem do cabo, como a presença de armaduras entrelaçadas e condutores de fase segmentados (Milliken).

Nesse sentido, o presente artigo exibiu diversas técnicas para a modelagem de cabos submarinos, no intuito de possibilitar que outros usuários consigam reproduzi-las em seus próprios ambientes computacionais.

Diversos resultados foram exibidos no tocante ao impacto que as mencionadas características construtivas, bem como o emprego de cabos umbilicais, possuem tanto na variação dos valores dos parâmetros série em uma ampla faixa de frequências, bem como nas perdas joulícas associadas à frequência fundamental. Justificando a necessidade de empregar corretamente as técnicas de modelagem.

REFERÊNCIAS

- ABB (2010). XLPE Submarine Cable Systems Attachment to XLPE Land Cable Systems - User's Guide. Disponível em: <<https://new.abb.com/docs/default-source/ewea-doc/xlpe-submarine-cable-systems-2gm5007.pdf>>. [Consultado em: 24/04/2022].
- Alzamora, A. M. e de Paula, H. (2021). A New Industrial Cable System Parameter Calculation Methodology Based on 3-D Finite Element Analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57 (no. 3), pp. 3038-3048.
- Ametani, A. et al. (2015). *Cable System Transients: Theory, Modeling and Simulation*. Wiley-IEEE Press.
- Arentsen, M. T. et al. (2017). MVAC submarine cable, magnetic fields measurements and analysis. *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1-6.
- Benato, R. et al. (2016). 43 km double-circuit AC 380 kV submarine-land cables in Italy between Sicily and Calabria. *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, pp. 1-5.
- Bremnes, J. J. et al. (2010). Power loss and inductance of steel armoured multi-core cables: comparison of IEC values with “2,5D” FEA results and measurements. *CIGRE*.
- Bresesti, P. et al. (2007). HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22 (no. 1), pp. 37-43.
- Carson, J. R. (1926). Wave propagation in overhead wires with ground return. *The Bell System Technical Journal*, vol. 5 (no. 4), pp. 539-554.
- Chaves, M. L. R. et al. (1997). Time Domain Cable Modeling with Frequency Dependent Parameters. *International Conference on Power System Transients*, pp. 275-279.
- Colla, L. et al. (2007) et al. Temporary Overvoltages due to Harmonic Resonance in Long EHV Cables. *International Conference on Power Systems Transients*.
- Colla, L. et al. (2013). Mediterranean high voltage submarine cable links technology and system challenges. *AEIT Annual Conference 2013*, pp. 1-5.
- Colla, L. e Zaccone, E. (2018). HVDC Land and Submarine Cables in the Mediterranean Area. *2018 AEIT International Annual Conference*, pp. 1-6.
- Comsol Multiphysics, versão 5.3a (2017). AC/DC Module - User's Guide. Stockholm, Sweden.
- Cristina, S. e Feliziani, M. (1989). A Finite Element Technique for Multiconductor Cable Parameters Calculation. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25 (no. 4), pp. 2986-2988.
- Cirino, A. W. et al. (2009). Cable parameter variation due to skin and proximity effects: determination by means of finite element analysis. *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pp. 4073-4079.
- de Paula, H. et al. (2008a). Novas Contribuições ao Estudo das Sobreensões Transitórias e Correntes de Modo Comum em Sistemas de Acionamento de Motores por Inversores. *VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais*.
- de Paula, H. et al. (2008b). Methodology for Cable Modeling and Simulation for High-Frequency Phenomena Studies in PWM Motor Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23 (no. 2), pp. 744-752.
- de Souza, W. L. et al. (2018). Cable Parameter Calculation for Typical Industrial Installation Methods and High-Frequency Studies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 4, pp. 3919-3927.
- Doyen, H. et al. (1989). Experiences with different cable designs and laying methods in conjunction with the power supply of the islands in the North- and Baltic-Sea. *10th International Conference on Electricity Distribution*, vol.3, pp. 279-283.
- Ganguli, S. K. e Kohli, V. (2016). *Power Cable Technolog*. CRC Press, Boca Raton.
- Green, J. et al. (2007). Electrical Collection and Transmission Systems for Offshore Wind Power. *Offshore Technology Conference*.
- Greenwood, A. (1991). *Electrical transients in power systems*, 2ª ed. John Wiley & Sons.
- Hauge, O. et al. (1988). Performance of the +or-250 kV HVDC Skagerrak submarine cables. Further development of the HVDC paper-insulated, mass-impregnated (solid type) submarine cable. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3 (no. 1), pp. 1-15.
- Liang, X. et al. (2015). Load Filter Design Method for Medium-Voltage Drive Applications in Electrical Submersible Pump Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51 (no. 3), pp. 2017-2029.
- Ohno, T. (2012). Dynamic Study on the 400 kV 60 km Kyndbyværket – Asnæsværket Line. Ph.D. thesis, Department of Energy Technology, Aalborg University.
- Marti, J. R. (1982). Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101 (no. 1), pp. 147-157.
- MFx (2022). UEH INTEGRADO – Especificações Técnicas. Disponível em: <https://www.mfx.com.br/arquivos/umbilicais/umbilical_151.pdf>. [Consultado em: 24/04/2022].
- Metwally, I. A. e Gastli, A. (2006). Factors affecting transient overvoltages of electric submersible pumps. *IEEE Potentials*, vol. 25 (no. 5), pp. 13-17.
- Moreira, A. F. et al. (2002). High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38 (no. 5), pp. 1297-1306.
- Nexans (2004). 60-500 kV High Voltage Underground Power Cables. Disponível em: <<http://elektrable.pl/wp-content/uploads/2017/09/high-voltage.pdf>>. [Consultado em: 24/04/2022].
- Renaudin, F. et al. (2019). Electrification of Offshore Oil & Gas Fields Using Offshore Power Distribution Hub: A Study of Submarine HVAC Power Cables Systems Solutions. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*.
- Rodrigues, R. et al. (2005). A New Approach for Subsea Boosting - Pumping Module on The Seabed. *Offshore Technology Conference*.
- Silva, F. F. e Bak, C. L. (2013). *Electromagnetic Transients in Power Cables*. Springer, London.
- Worzyk, T. (2009). *Submarine Power Cables*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Yin, Y. e Dommel, H. W. (1989). Calculation of Frequency Dependent Impedances of Underground Power Cables with Finite Element Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25 (no. 4), pp. 3025-3027.