



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

Avaliação do impacto de cabos de conexão no desempenho de filtros harmônicos passivos

**GIORDANNI DA SILVA TRONCHA (1); IVAN NUNES SANTOS (1); CELSO ROSA DE AZEVEDO JUNIOR (1);
HÉLDER DE PAULA (1); MARCO LEANDRO BONELLI (2); EVANDRO MARCOS VACILOTO (2);
UFU (1); GE Grid Solutions(2);**

RESUMO

Percebe-se, na atualidade, um grande aumento de cargas de natureza não linear em todo o sistema elétrico, seja em baixa, média ou alta tensão. Somado a isto, verifica-se um expressivo crescimento no número de plantas de geração de energia conectadas ao SIN (Sistema Interligado Nacional) via conversores eletrônicos de potência, provenientes, principalmente, da crescente inserção de parques eólicos, fazendas solares e geração distribuída fotovoltaica no sistema elétrico brasileiro. Neste cenário, torna-se imperativa a aplicação de medidas mitigatórias, haja vista que, conforme já constatado pelo ONS, muitos barramentos do sistema elétrico brasileiro encontram-se com medições dos níveis de distorções harmônicas próximas (ou acima) dos limites estabelecidos pelas normas nacionais.

Como se sabe, a principal forma de mitigação das distorções harmônicas presentes num sistema elétrico ainda é, na atualidade, a instalação de filtros harmônicos passivos sintonizados em uma frequência. Tal escolha ocorre devido à simplicidade da solução, à sua robustez, e, principalmente, por conta de seu baixo custo quando comparada a outras tecnologias. Todavia, muito embora o fato de que a conexão destes filtros ocorra, via de regra, por meio de ligação direta no barramento de média ou baixa tensão, tem-se notado que, em algumas situações, mostra-se necessária a inserção de cabos entre o barramento e o arranjo de filtragem para a efetivação das mesmas, o qual, por vezes, pode apresentar extensões consideráveis.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o impacto do cabo de conexão no desempenho de filtros passivos. Para tanto, foram realizados ensaios em campo, utilizando-se seis vias de cabos isolados (cabos blindados de 240,00 mm² / 1kV) de aproximadamente 130 metros cada uma, dispostas em diferentes configurações geométricas. Em cada um dos arranjos analisados, a impedância do cabo foi medida em diferentes frequências (60, 120, 180, 300, 420, 660, 780, 900 e 1020 Hz), de forma a caracterizar a resistência e a indutância inseridas em série com a do filtro e a sua influência na dissintonia do filtro e fator de qualidade, dentre outros aspectos. Além disso, esse informe técnico apresenta uma revisão dos aspectos teóricos sobre a formulação da matriz de impedância de um cabo isolado, incluindo os efeitos pelicular e proximidade, explanando também a influência do acoplamento magnético mútuo entre cabos de um mesmo arranjo na estimativa da impedância harmônica dos condutores, além do seu impacto no desempenho dos filtros passivos. Dessa forma, por meio desta proposta, pretende-se acrescer à literatura já existente certas peculiaridades que afetam o dimensionamento prático de filtros harmônicos passivos, seja em baixa, média ou alta tensão. Vale ressaltar que problemas de dimensionamento desses equipamentos são vivenciados diariamente por profissionais do meio, tais como queimas imprevistas e desempenho aquém do esperado.

PALAVRAS-CHAVE

Filtros harmônicos, cabos de conexão, fontes renováveis, compatibilidade eletromagnética, dessintonia de filtros.

1.0 - INTRODUÇÃO

Conforme será apresentado na sequência deste informe técnico, a impedância série de um cabo é composta de várias parcelas. Dentre elas, pode-se destacar aquela relativa ao efeito da terra na circulação das correntes no circuito, e é justamente na modelagem do mesmo que as diversas formulações analíticas encontradas na literatura

divergem entre si (1,2,3,4,5), sendo as demais parcelas comuns a todas elas, obtidas de formulações tradicionais. Métodos baseados em elementos finitos, também com o objetivo de determinar a impedância do cabo em diferentes frequências e igualmente contemplando o efeito do solo não ideal, foram aplicados com sucesso na realização de tal tarefa, mas envolvem um procedimento complexo, tal como dissertado em (6).

Sendo assim, este trabalho terá como objetivo avaliar o impacto dos parâmetros do cabo de conexão de filtros no desempenho dos mesmos. Para tanto, um método experimental foi empregado, dispensando o uso dos complexos métodos analíticos e numéricos relacionados nas referências bibliográficas anteriormente citadas. Além disso, a aplicação da técnica proposta mostra-se como uma alternativa satisfatória quando comparada ao uso de pontes RLC de elevado desempenho, que, a despeito de sua praticidade e ótima exatidão (7), apresentam custo muito elevados, estando, portanto, na maioria das vezes indisponíveis em laboratórios de pesquisa ou para avaliações em campo. Contudo, para a compreensão do método empregado neste artigo, tendo em vista a caracterização da impedância do cabo em foco nas frequências de interesse, é necessário, primeiramente, o entendimento da composição da matriz de impedância de um cabo isolado, o que é mostrado na próxima seção.

2.0 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é mostrado o desenvolvimento matemático para a determinação da impedância de cabos elétricos constituídos pelo condutor propriamente dito compreendendo a isolação, blindagem e capa externa, o que representa, portanto, um típico cabo isolado.

2.1 Composição da matriz impedância de um cabo isolado

Os desenvolvimentos são iniciados a partir das equações diferenciais matriciais representativas do cabo isolado:

$$(1) \quad \frac{d[V]}{dx} = -[Z] \cdot [I]$$

$$(2) \quad \frac{d[I]}{dx} = -[Y] \cdot [V]$$

Onde V e I são vetores de dimensão n , representando, respectivamente, a tensão e corrente à distância x ao longo do sistema de cabos contendo n condutores metálicos. Z e Y são matrizes quadradas de dimensão $n \times n$. As equações 1 e 2 constituem o modelo matemático de um sistema de transmissão e podem ser baseadas nas seguintes condições:

- (i) O sistema de cabos consiste de n condutores metálicos cujos eixos são mutuamente paralelos entre si e também à superfície da terra;
- (ii) O sistema é longitudinalmente homogêneo.
- (iii) A atenuação da tensão e corrente nos condutores é desprezível em um comprimento de cabo comparável às suas dimensões laterais.

O sistema em questão consiste de n cabos que apresentam uma seção transversal denotado na Figura 1. Cada cabo tem dois elementos metálicos: um é o condutor propriamente dito, enquanto o outro é a sua blindagem ou armação metálica. Na figura 1 em questão, tem-se: r_1 - raio do condutor central (condutor propriamente dito); r_2 - raio interno da isolação; r_3 - raio externo da isolação; r_4 - raio externo da cobertura ou capa externa, sendo que todos esses valores são tomados em relação ao centro do condutor.

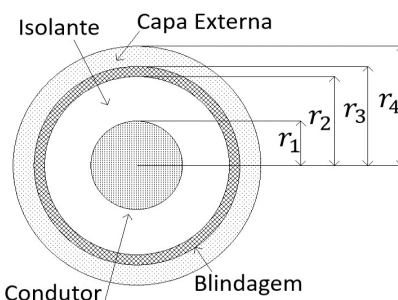


FIGURA 1 – Representação da seção transversal do tipo de cabo em estudo.

A matriz de impedâncias série do cabo é dada pela equação 3:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \dots & Z_{2n} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & \dots & Z_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{i1} & Z_{i2} & Z_{i3} & \dots & Z_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Reportando-se à expressão (3), tem-se que os elementos da diagonal principal Z_{ii} associam-se com a impedância em série da malha formada pelo condutor correspondente e a terra. Já os elementos fora da diagonal principal Z_{ij} representam a parcela da impedância série associada ao acoplamento mútuo entre condutores, e determinam a tensão introduzida longitudinalmente num condutor “i” quando uma corrente elétrica circula no condutor “j”, ou vice-versa. Os termos resistivos que aparecem em tais elementos, os quais serão determinados posteriormente, são introduzidos pela presença da terra, que representa um caminho potencial de retorno de corrente.

2.2 Determinação dos elementos da matriz de impedância

A determinação de cada elemento da diagonal principal da matriz de impedância série mostrada na equação 3 envolve a soma de diversas parcelas, as quais são indicadas na equação 4 a seguir:

$$Z_{ii} = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7 \quad (4)$$

Em que.:

- Z_1 : impedância interna do condutor central;
- Z_2 : impedância devido à variação do campo magnético na isolamento;
- Z_3 , Z_4 e Z_5 : impedância interna, mútua e externa da blindagem, respectivamente;
- Z_6 : impedância devido à variação do campo magnético na cobertura;
- Z_7 : impedância própria do caminho de retorno pela terra.

As parcelas Z_1 a Z_6 são obtidas de formulações tradicionais, enquanto Z_7 é objeto de estudo de vários trabalhos encontrados na literatura, cujo foco concentra-se na correta modelagem da terra como um caminho potencial de circulação de correntes. A maneira de se calcular Z_7 depende da forma de instalação do cabo, isto é, se o mesmo se encontra enterrado, tocando o solo, disposto em bandejas ou eletrodutos aterrados ou ainda instalado a uma certa altura em relação ao solo. Fórmulas para o cálculo de Z_7 , assim como das parcelas de impedância relacionadas com os acoplamentos mútuos Z_{ij} , também relacionados com a impedância do plano de terra, foram desenvolvidas por (4). Outras abordagens encontradas na literatura para o cálculo das impedâncias de retorno pela terra foram desenvolvidas por (2) e (4). Entretanto, como no presente informe a impedância do cabo foi medida, tais formulações para o cálculo analítico da matriz de impedância do cabo não serão mostradas, podendo ser encontradas em (8). Evidentemente, nos resultados obtidos dos ensaios para a caracterização da impedância do cabo, já estão naturalmente embutidos todos os efeitos associados às parcelas $Z_{ii} = z_1 + z_7$ e também à Z_{ij} ; tal compreensão ficará facilitada com os conceitos apresentados no próximo subitem.

2.3 Cálculo dos parâmetros modais do cabo a partir da matriz de impedância

Uma vez apresentada a estrutura da matriz de impedância série de um cabo isolado e esclarecida a composição de cada um dos seus elementos, neste item descreve-se como os parâmetros de sequência positiva, negativa e zero do cabo são calculados a partir da matriz apresentada na equação 3. Extraíndo as partes real e imaginária de cada um de seus elementos e dividindo-se a segunda pela frequência angular na qual os mesmos foram calculados, obtém-se, respectivamente, as matrizes de resistência e indutância do cabo, mostradas na sequência.

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & R_{12} & R_{12} \\ R_{21} & R_2 & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_2 & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Os parâmetros de sequência positiva, negativa e zero do cabo, ou, em outras palavras, os parâmetros do modo diferencial (sequência positiva e negativa) ou do modo comum (sequência zero), são calculados diagonalizando-se as matrizes 5 e 6 ou então a matriz 3 de onde foram derivadas as anteriores, o que pode ser feito por meio do cálculo de seus autovalores e auto vetores. Como resultado, considerando a matriz obtida nessa operação, tem-se que os elementos da diagonal principal representam exatamente os seus parâmetros de sequência ou modais, tal como apresentado na matriz 7:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{pos} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{i} & \dot{i} \\ 0 & \dot{i} & Z_{zero} \dot{i} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Em que: Z_{pos} , Z_{-i} e Z_{zero} são as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero do cabo.

Contudo, como tal processo de diagonalização não é trivial, uma vez que os parâmetros da matriz de impedância são complexos e dependentes da frequência, uma forma de simplificar sobremaneira o cálculo dos parâmetros modais é admitir que o cabo em análise é continuamente transposto, ou que o desequilíbrio entre os parâmetros das suas fases é suficientemente pequeno. Caso tais hipóteses possam ser assumidas, as matrizes de resistência e indutância apresentam-se da forma mostrada na equação 8.

$$R = \begin{bmatrix} R_S & R_M & R_M \\ R_M & R_S & R_M \\ R_M & R_M & R_S \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_S & L_M & L_M \\ L_M & L_S & L_M \\ L_M & L_M & L_S \end{bmatrix} \quad (9)$$

Observa-se que, nesse caso, todos os parâmetros da diagonal principal são iguais entre si, ocorrendo o mesmo com os elementos fora da mesma, recebendo, na notação adotada em 8 e 9, os índices s e m , respectivamente. Assim sendo, a diagonalização da matriz de impedância do cabo pode ser feita de forma muito mais simples, através do uso de uma matriz fixa, como a transformada de Clarke, por exemplo. Nesse caso, a matriz apresentada em 7 assumirá forma apresentada em 10.

$$Z = \begin{bmatrix} Z_S - Z_M & 0 & 0 \\ 0 & Z_S - Z_M & 0 \\ 0 & 0 & Z_S + 2Z_M \end{bmatrix} \quad (10)$$

Posto isto, os valores das resistências e indutâncias de sequência positiva, negativa e zero do cabo são dados por:

$$R_{pos} = R_{-i} = R_S - R_M \quad (11)$$

$$R_{zero} = R_S + 2 \cdot R_M \quad (12)$$

$$L_{pos} = L_{-i} = L_S - L_M i \quad (13)$$

(14)

$$L_{zero} = L_S + 2 \cdot L_M$$

Reportando novamente aos conceitos introduzidos anteriormente, mas agora expandindo sua explanação por meio de uma abordagem mais didática e ilustrativa, faz-se uso das Figura 2, elaboradas com o propósito de facilitar o entendimento do significado da resistência e indutância mútuas do cabo, do ponto de vista físico.

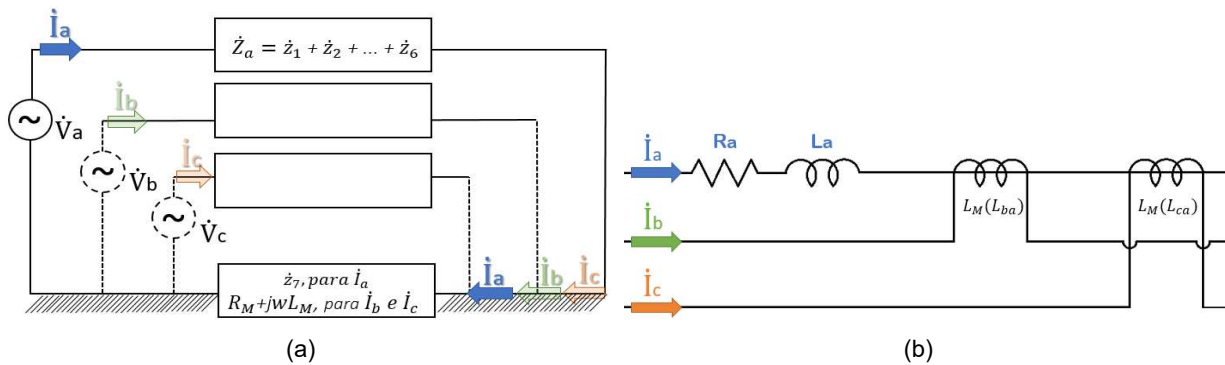


FIGURA 2 – (a) Representação das malhas para a determinação das impedâncias próprias do cabo, evidenciando que a impedância da terra é comum aos três circuitos – Fase A. (b) Tensão introduzida longitudinalmente na Fase A devido ao campo magnético produzido pelas correntes das Fases B e C.

A Figura 2(a) mostra que a obtenção dos parâmetros da diagonal principal da matriz de impedância é feita tal como se fosse conectada uma fonte de tensão entre cada fase do cabo e a terra, sendo o condutor da referida fase ligado em série à terra. Isso, inclusive, está implícito na expressão (4), que mostra que uma das parcelas das impedâncias Z_i refere-se justamente à impedância da terra, que é parte integrante de tal malha. Estendendo-se isso para as três fases do cabo, ou seja, utilizando-se as malhas compostas pelas fases do cabo e a terra para a determinação dos parâmetros da diagonal principal, observa-se que as correntes das três fases, nesse processo, circulam pela terra. Em outras palavras, a impedância da terra, que é um componente comum às três malhas, ao ser atravessada pelas correntes das fases, apresenta uma queda de tensão que é comum aos três circuitos. Dessa forma, a corrente da fase A, por exemplo, retornando pela terra, introduz uma queda de tensão nas malhas das fases B e C, o que é contabilizado pelas resistências e indutâncias mútuas entre tais fases, na matriz de impedância. Isto ratifica o que havia sido comentado no subitem 2.1, em que se afirmou que os parâmetros fora da diagonal principal da matriz de impedância relacionam-se com a impedância da terra.

No que se refere à indutância mútua entre as fases, ilustrada na Figura 2(b), observa-se que o campo magnético produzido pela corrente de uma certa fase, ao concatenar os condutores das fases vizinhas, induz, pela Lei de Faraday, uma tensão longitudinal nos mesmos, a qual é contabilizada por meio dos elementos fora da diagonal da matriz de indutâncias. Perante o que foi discutido, tem-se, então, que L_M relaciona-se tanto a este efeito como àquele citado no parágrafo anterior, relacionado à circulação das correntes das três fases na reatância da terra, a qual faz parte das malhas das três fases. Já R_M diz respeito somente à introdução de tensão numa certa fase devido à queda de tensão na resistência da terra provocada pela circulação das correntes das demais fases.

3.0 - ESTUDOS DE CASOS

Frente às limitações dos métodos analíticos e à complexidade dos métodos numéricos destinados à determinação dos parâmetros de cabos isolados, optou-se, neste artigo técnico, por obtê-los através de medições. Contudo, como não se dispunha de um equipamento específico para esta finalidade, foi necessária a concepção de uma metodologia para este propósito, a qual será detalhada no subitem que se segue.

Os casos aqui avaliados têm como fundamento a metodologia abordada na seção 2.0. Para tanto, as ferramentas utilizadas foram: fonte controlada California Instruments CSW5550, osciloscópio digital TEKTRONIX TPS 2024, seis (06) vias de cabos de cobre flex FCU 240 mm², 1 kV, com comprimento de 130 metros cada via. O procedimento para a execução das medições foi baseado na aplicação de uma tensão de 2 volts de magnitude no cabo por meio da fonte programável, na frequência correspondente àquela em que se deseja medir os seus parâmetros, quais sejam: fundamental, 2^a, 3^a, 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a e 19^a ordens, além da medição da corrente correspondente.

Com as formas de onda de ambas as grandezas visualizadas simultaneamente em um osciloscópio, o módulo da impedância do cabo nas frequências desejadas foi obtido pela relação entre as amplitudes das formas de onda da tensão e da corrente, ao passo que o ângulo da impedância foi determinado pelo defasamento angular observado entre ambas.

Para a avaliação da influência do acoplamento eletromagnético dos cabos, os mesmos foram, neste momento, arranjados em dois trifólios (Figura 3) dispostos sobre o solo, sendo que terminais do tipo argola compatíveis com a seção transversal de 240 mm² foram instalados nas extremidades de cada cabo e um barramento de cobre de 50 centímetros de elevada condutibilidade elétrica e térmica foi utilizado para curto-circuitar as extremidades finais de cada trifólio. Vale ressaltar que as seis vias permaneceram curto circuitadas em sua extremidade final durante todos os ensaios enquanto configurados na forma de trifólio. Sendo assim, finalmente realizou-se o ensaio, executado em três momentos distintos, conforme descrito na sequência por meio dos Casos 1, 2 e 3.

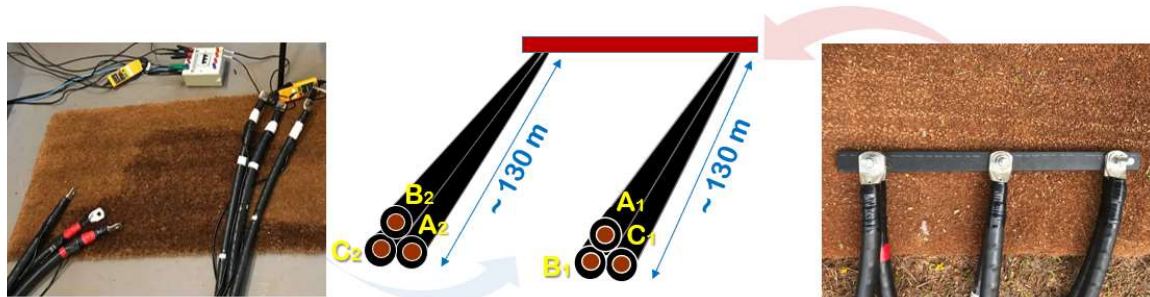


FIGURA 3 – Extremidade inicial de conexão à fonte (a esquerda) e final curto circuitada entre as seis vias com auxílio do barramento de cobre (a direita).

- CASO 1: ENSAIO COM OS DOIS TRIFÓLIOS JUSTAPOSTOS

Nesta situação, tendo sido os dois trifólios esticados ao solo e justapostos, conforme ilustrado na Figura 5(a), duas variações de arranjo foram analisadas. Na primeira, conectou-se à fase A da fonte controlada de tensão as extremidades dos cabos B2 e A1 (B2||A1) e, na fase b, as extremidades de B1, C1, A2 e C2 (A2||C2||B1||C1). Já no segundo arranjo, os cabos C2 e B1 (C2||B1) foram conectados na fase A, enquanto os cabos A1, C1, A2 e B2 (A1||C1||A2||B2) foram conectados na fase B da fonte. Dessa forma, contemplando essas duas configurações, consegue-se, no ensaio, verificar o nível de desbalanceamento do arranjo, que se manifestará na forma de variações entre as impedâncias de sequência positiva e negativa do cabo.

- CASO 2: ENSAIO COM OS TRIFÓLIOS ESPAÇADOS EM 20 CENTÍMETROS

Neste caso, tendo sido os dois trifólios esticados ao solo e separados entre si por uma distância de 20 centímetros em toda a sua extensão, conforme mostrado na Figura 5(b), repetiu-se as configurações de conexão dos cabos junto à fonte de tensão descritas no Caso 1.



FIGURA 5 – (a) Arranjos na forma de trifólios justapostos esticados sobre o solo. (b) Arranjos na forma de trifólios separados entre si por uma distância de 20 centímetros, esticados sobre o solo.

- CASO 3: ENSAIO COM UM CABO SINGELO

Por fim, realizou-se o ensaio com um único cabo esticado ao solo, com sua extremidade inicial conectada na fase A e a extremidade final conectada na fase B da fonte controlada de tensão. De forma a se minimizar o acoplamento entre os trechos de ida e de volta do cabo à fonte, foi mantida uma distância de 1 metro entre os lados do “U” formado pelo cabo, procedendo-se então com o ensaio.

4.0 - RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos nos ensaios dos cabos são apresentados na Tabela 1. Vale ressaltar que, no tocante ao teste com um único cabo (cabo singelo), os resultados referentes à 13^o, 17^o e 19^o harmônicas foram eliminados, devido a erros ocorridos na medição e que foram identificados somente posteriormente. Vale ressaltar que na Tabela 1, o arranjo 1 corresponde à conexão do cabo à fonte feita com (B2||A1 e A2||C2||B1||C1), ao passo que o arranjo 2 se refere à conexão (C2||B1 e A1||C1||A2||B2).

Tabela 1 – Resultados dos estudos de casos de 1 a 3

Ordem h	ESTUDOS DE CASOS - CABOS ISOLADOS														
	CASO 1						CASO 2						CASO 3		
	Arranjo 1			Arranjo 2			Arranjo 1			Arranjo 2					
	Z (Ω)	R (Ω)	L (μH)	Z (Ω)	R (Ω)	L (μH)	Z (Ω)	R (Ω)	L (μH)	Z (Ω)	R (Ω)	L (μH)	Z (Ω)	R (Ω)	L (μH)
1	0,01328	0,00781	28,4956	0,01251	0,00787	25,805	0,01256	0,00777	26,1853	0,01297	0,00807	26,933	0,04936	0,01189	127,067
2	0,02244	0,00849	27,5472	0,01975	0,0088	23,4498	0,02079	0,00815	25,3673	0,02139	0,00863	25,9606	0,09308	0,01207	122,412
3	0,03222	0,01015	27,0352	0,02767	0,00933	23,031	0,02966	0,00965	24,8035	0,03045	0,00925	25,6502	0,13866	0,01283	122,073
5	0,05145	0,0121	26,5307	0,04402	0,01128	22,5712	0,04754	0,01086	24,5543	0,04872	0,01035	25,2574	0,22927	0,01448	121,392
7	0,06991	0,01282	26,0439	0,0594	0,01217	22,031	0,0645	0,01276	23,9571	0,06589	0,01331	24,454	0,32014	0,01943	121,092
11	0,10472	0,01728	24,9053	0,0891	0,01463	21,1943	0,09712	0,01452	23,1555	0,09935	0,01469	23,6957	0,49727	0,02212	119,795
13	0,12393	0,02333	24,8353	0,10528	0,01884	21,1357	0,11464	0,01985	23,0392	0,11651	0,034952	23,4466	x	x	x
17	0,15969	0,02751	24,5453	0,13666	0,02267	21,0279	0,14773	0,02431	22,364	0,15203	0,02543	23,3878	x	x	x
19	0,17607	0,02909	24,2431	0,15251	0,02612	20,978	0,16348	0,03287	22,3577	0,16903	0,03162	23,1824	x	x	x

Levando-se em conta os resultados apresentados para as configurações ensaiadas, cabem os seguintes comentários:

- Como pode ser observado na Tabela 1, os efeitos pelicular e proximidade foram expressivos, visto que a elevação da resistência com o aumento da frequência, assim como a redução da indutância, foi bastante evidente.
- É evidente a diminuição dos valores das indutâncias de sequência positiva e negativa quando da formação dos dois trifólios, devido à influência do acoplamento entre ambos. Houve uma redução média de aproximadamente 61μH do sistema sem acoplamento (caso 3) para um valor médio aproximado de 18μH (primeiras ordens harmônicas) do sistema acoplado justaposto (caso 1) e para 16,5μH para o sistema acoplado com afastamento de 20 cm (caso 2).
- Nos testes para a verificação do efeito da sequência de fases da tensão aplicada ao cabo, verificou-se que a maior diferença entre as reatâncias de sequência positiva e negativa foi observada no caso dos trifólios justapostos, com uma variação de 10% na frequência fundamental e de 22% para a décima nona harmônica. No caso dos trifólios afastados de 20 cm, essas mesmas diferenças foram reduzidas para, respectivamente, 2,9 % e 3,7 %.
- Ainda com relação aos mesmos ensaios do comentário anterior, observou-se que a diferença entre os valores das resistências de sequência positiva e negativa foi inferior àquela apresentada pelas reatâncias.
- Sendo assim, com base nas constatações feitas em c) e d), é aceitável admitir que o arranjo de cabos é balanceado e que, portanto, apresenta impedância de sequência positiva igual à negativa, com valor calculado pela média dos respectivos valores. A aproximação supracitada elimina a preocupação de ter que se selecionar uma fase específica do arranjo paralelo de cabos para ser conectada numa determinada fase do filtro, tornando a instalação do cabo muito mais simples.
- Recomenda-se o uso do arranjo triangular no cabo de conexão do filtro, com o devido cuidado em sua montagem/instalação para garantir que os cabos permaneçam o mais próximo possível entre si ao longo de todo o trajeto, para maximizar o acoplamento entre as fases e assegurar que o valor da reatância de sequência positiva do arranjo seja a menor possível, impactando, ao mínimo, o valor da indutância que se deseja obter no filtro.

Por fim, observa-se que os resultados obtidos foram coerentes, com baixo desvio padrão em todas as medições realizadas, mostrando que o procedimento de medição proposto provou-se apropriado para o propósito desejado.

5.0 - CONCLUSÃO

O presente informe técnico é fruto de um projeto de pesquisa e desenvolvimento e a motivação para a sua realização foram os obstáculos encontrados no que tange à sintonia fiel de filtros passivos harmônicos por meio de cabos isolados de grande comprimento (superior a 100 metros) e ligados em paralelo (para suportarem a corrente necessária sem se utilizar seção transversal muito elevada). Ficou evidente, a partir da análise dos resultados, que os projetistas destes equipamentos devem levar em consideração não só a impedância fornecida pelos fabricantes de condutores, como também a disposição dos mesmos. Neste contexto, pode ser citada como contribuição inédita deste documento a completa caracterização do cabo de interligação para filtros harmônicos passivos em função da frequência, do arranjo geométrico e das conexões feitas, possibilitando avaliar o impacto de sua adição no circuito no desempenho deste equipamento (possível dessintonia e alteração do fator de qualidade). As medições realizadas contemplaram, além da excitação do cabo em diferentes frequências, diferentes disposições geométricas, arranjos para a medição de sua impedância de fase ou de sua impedância de sequência positiva/negativa, testes para a verificação do seu grau de desequilíbrio, através da excitação de suas impedâncias de sequência positiva e negativa, dentre outros casos. Além disso, foi apresentada uma fundamentação teórica sobre a composição da matriz de impedância de um cabo através de uma abordagem bastante didática e ilustrativa, diferentemente daquilo que normalmente é encontrado na literatura, facilitando a compreensão do leitor.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao suporte financeiro concedido pelo grupo Neoenergia, por meio do P&D n° PD-7284-0001/2016. Este trabalho também foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) WEDEPOHL, L.M., WILCOX, D.J., "Transient Analysis of Underground Power Transmission Systems". IEE Procedures, vol. 120, n.2, p. 253-260, February 1973.
- (2) DERI, A., TEVAN, G., "A Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, p. 3686-3693, vol. 100, August 1981.
- (3) AMETANI, A., "A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, p. 902-910, vol. 99, n. 3, May/June 1980.
- (4) INDULKAR, C. S., KUMAR, P., KOTHARI, D. P., "Sensitivity Analysis of Modal Quantities for Underground Cables. IEE Procedures, p. 229-234, vol. 128, n. 4, July 1981.
- (5) ATP Theory Book, Electromagnetic Transients Program (EMTP).
- (6) DE SOUZA, WARLEY; DE PAULA, HÉLDER; DE CONTI, ALBERTO; MESQUITA, RENATO. "Cable Parameter Calculation for Typical Industrial Installation Methods and High-Frequency Studies". IEEE Transactions on Industry Applications, v. 54, p. 3919-3927, 2018.
- (7) <https://www.keysight.com/en/pd-715495-pn-E4980A/precision-lcr-meter-20-hz-to-2-mhz?cc=BR&lc=por> (Acessado em 04/10/2018).
- (8) DE PAULA, HÉLDER, "Uma Nova Metodologia para a Determinação dos Fenômenos de Alta Frequência em Sistemas de Acionamento de Motores de Indução através de Inversores PWM". Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Junho de 2005.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Giordanni da Silva Troncha é natural de Araguari-MG, possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia – UFU (2016) e mestrado pela mesma instituição (2018). Possui experiência na área de engenharia elétrica com ênfase em sistemas de potência, com especialidade em tópicos como: qualidade da energia, eletrônica de potência e fontes renováveis de energia elétrica. Atualmente é doutorando pela UFU, bolsista CAPES e atua como pesquisador em dois projetos de pesquisa e desenvolvimento junto ao núcleo de qualidade da energia.



Ivan Nunes Santos é natural de Prata-MG, engenheiro eletricitista (2005), mestre (2007) e doutor (2011) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Realizou o pós-doutorado na Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands (2013-2014). Atualmente é professor e pesquisador da Faculdade Engenharia Elétrica da UFU. Suas áreas de interesse são: geração eólica e fotovoltaica, sistemas elétricos de potência e qualidade da energia elétrica.



Celso Rosa de Azevedo Júnior é natural de Tupaciguara-MG, possui graduação em licenciatura em física (2010) e engenharia elétrica (2016) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluno de mestrado em Engenharia Elétrica da UFU, atuando também como Pesquisador em Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento junto ao núcleo de qualidade da energia. Suas principais áreas de interesse são em sistemas elétricos de potência e qualidade da energia elétrica.



Hélder de Paula obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia, em 2001 e 2005, respectivamente. De agosto de 2006 a outubro de 2017, fez parte do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. De novembro de 2017 até o presente momento, é docente da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Suas principais áreas de interesse são: Compatibilidade e Interferência Eletromagnética Conduzida, Transitórios Eletromagnéticos, Transmissão de Energia (incluindo (i) Transmissão em Corrente Contínua e em (ii) Linhas Subterrâneas), Máquinas Elétricas e Acionamentos.



Evandro Marcos Vaciloto Filho é natural de Mococa-SP, engenheiro eletricitista (2014) e mestrando pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Possui experiência na área de engenharia elétrica com ênfase em sistemas de potência, com especialidade em tópicos como: qualidade da energia, eletrônica de potência e fontes renováveis de energia elétrica. Atualmente trabalha no desenvolvimento de soluções de qualidade de energia e compensação reativa.



Marco Leandro Bonelli é natural de Ribeirão Preto-SP, possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Estadual Paulista – UNESP (2011) onde cursou parte da graduação na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Portugal. Atualmente é Lead Sales & Proposal Manager na GE Grid Solutions, atuando com soluções de equipamentos para a melhoria da qualidade da energia elétrica, entre eles filtros de harmônicos, bancos de capacitores e reatores shunt. Possui experiência em correção de fator de potência, mitigação de harmônicos, estudos e medições de qualidade de energia elétrica, vendas técnicas e manutenção industrial.