

Influência dos Parâmetros dos Condutores na Impedância Própria das Fases dos Sistemas Elétricos

Felipe Hernández García*

Mario Orlando Oliveira**

Departamento de Engenharia Elétrica – DELET
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Porto Alegre – RS, Brasil

fhdez@ece.ufrgs.br; moliveira@ece.ufrgs.br

Renato Gonçalves Ferraz

Arturo Suman Bretas

Departamento de Engenharia Elétrica – DELET
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Porto Alegre – RS, Brasil

rferraz@ece.ufrgs.br; abretas@ece.ufrgs.br

Abstract— Este artigo apresenta uma análise numérica relacionada com a influência dos parâmetros dos condutores na impedância própria das fases de um sistema elétrico de distribuição. Os condutores analisados foram selecionados a partir de famílias de cabos comerciais avaliando-se sua resistência elétrica e o raio médio geométrico. Ambos os parâmetros foram relacionados através de equações apresentadas neste trabalho. Estas equações permitiram o traçado de curvas relacionando a impedância própria das fases das diferentes famílias com a resistência dos cabos, para diferentes tipos de neutros. O trabalho mostra que a impedância própria das fases não depende apenas dos seus condutores senão da combinação de condutores fase-neutro. Deste modo, para um mesmo cabo de fases resultam diferentes impedâncias quando combinado com diferentes neutros. Da mesma forma, uma mesma impedância de fase pode ser obtida com diferentes combinações de cabos.

Palavras chave-- Sistema de distribuição de energia elétrica, matriz de impedância, impedância própria de fase.

I. INTRODUÇÃO

Nos estudos dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é importante conhecer corretamente os modelos matemáticos das linhas elétricas dado que são imprescindíveis na configuração e operação dos SEP. Além disso, dada sua extensão, é na linha onde ocorre proporcionalmente a maioria das faltas, as quais ocasionam diversos distúrbios nos SEP.

Os condutores das linhas elétricas têm quatro parâmetros característicos que estão distribuídos ao longo de todo o comprimento: dois longitudinais (resistência e indutância) e dois transversais (capacitância e condutância). A utilização destes parâmetros na modelagem matemática da linha depende do comprimento desta. Em linhas curtas, como pode ser o caso de sistemas de distribuição, cada condutor pode ser modelado adequadamente por uma única impedância série, que representa de forma concentrada os parâmetros que estão fisicamente distribuídos ao longo de todo o condutor [1].

A impedância série está conformada por duas componentes, uma resistiva (real) e outra reativa (imaginária). A primeira está relacionada com a resistência e a segunda com a indutância, que por sua vez depende das características construtivas e dos campos magnéticos originados pela corrente no condutor e pelas correntes nos condutores vizinhos. Ambas as componentes têm uma forte dependência

da frequência elétrica, fato estudado por vários pesquisadores na procura de modelos para uma melhor representação dos fenômenos transitórios que ocorrem na linha ou do desempenho de linhas que operam com frequência variável [2], [3]. A frequência elétrica provoca o efeito pelicular, que afeta os parâmetros do condutor, mas este efeito depende também da proximidade de outros condutores [4]. Nessas condições a resistência elétrica não é calculada de forma simples como no caso da corrente contínua, sendo geralmente adotada de manuais e livros de engenharia ou de catálogos de fabricantes [5].

A maioria dos SEP conta com algum tipo de aterramento, como medida de proteção e também porque a terra é utilizada como referência de grandezas elétricas. Também podem contar com um condutor de neutro, para unir os centros de geradores, transformadores e cargas conectados em estrela. Em algumas circunstâncias, como no caso de faltas envolvendo a terra ou devido ao desequilíbrio, parte da corrente circula pelo neutro e através do solo, influenciando nas impedâncias da linha [6]. Todos estes, entre outros fatores, são considerados por vários autores na definição de modelos matemáticos para o cálculo das impedâncias.

Neste artigo é apresentada uma análise numérica para avaliar a influência dos parâmetros dos condutores - resistência elétrica e o Raio Médio Geométrico (RMG) - sobre a impedância própria das fases de uma linha de distribuição. Para esta análise, são considerados vários condutores, empregados indistintamente como condutores de fases e/ou neutro em uma linha trifásica. A partir dos resultados obtidos é possível verificar que uma mesma impedância pode ser obtida considerando-se diferentes combinações de condutores fase-neutro.

II. MODELO MATEMÁTICO DA LINHA ELÉTRICA

Em SEP equilibrados que atendem cargas balanceadas, as correntes na linha circulam apenas pelas fases, entre as quais se manifestam acoplamentos mútuos. Em SEP desequilibrados de 4 condutores uma parte da corrente circula através do neutro e do próprio solo, de modo que o acoplamento mútuo manifesta-se também entre as fases e o neutro e entre todos estes condutores e o solo. Isto está esquematizado na Fig.1, que representa um trecho de linha de distribuição trifásica com neutro e sem carga, com cada condutor representado por sua impedância própria ou série, z'_{ii} . Também estão representados

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro.

*Atualmente professor da FURG.

**Atualmente professor da UNaM/Argentina.

os acoplamentos mútuos em forma de impedâncias mútuas z'_{ij} (por reciprocidade, $z'_{ij} = z'_{ji}$). As fases estão aterradas no terminal remoto e o neutro em ambos os terminais.

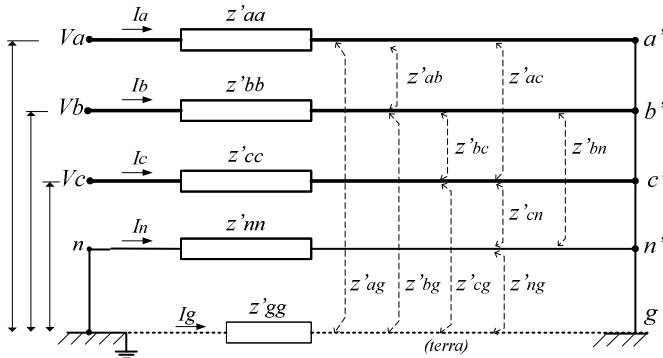


Figura 1. Representação da linha elétrica.

O modelo matemático da linha elétrica pode ser obtido através das relações tensão-corrente nos diferentes elementos. Para a fase a , por exemplo, a diferença de potencial $V_{aa'}$ entre seus terminais é calculada como:

$$V_{aa'} = z'_{aa} I_a + z'_{ab} I_b + z'_{ac} I_c + z'_{an} I_n + z'_{ag} I_g \quad (1)$$

Considerando as demais fases, o neutro e o solo, obtêm-se um sistema de equações lineares, representado matricialmente como:

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \\ V_{nn'} \\ V_{gg'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z'_{aa} & z'_{ab} & z'_{ac} & z'_{an} & z'_{ag} \\ z'_{ba} & z'_{bb} & z'_{bc} & z'_{bn} & z'_{bg} \\ z'_{ca} & z'_{cb} & z'_{cc} & z'_{cn} & z'_{cg} \\ z'_{na} & z'_{nb} & z'_{nc} & z'_{nn} & z'_{ng} \\ z'_{ga} & z'_{gb} & z'_{gc} & z'_{gn} & z'_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \\ I_g \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$[V] = [z'] [I] \quad (2b)$$

onde V e I representam as matrizes coluna das diferenças de potencial entre os terminais dos condutores, e do solo, e das correntes através destes, respectivamente.

A matriz z' é a matriz de impedância da linha representada na Fig.1 e constitui seu modelo matemático. A ordem desta matriz é 5x5, entretanto, outros elementos dos SEP têm modelos matemáticos representados por matrizes de menor ordem, como a 3x3 dos elementos trifásicos.

Durante os estudos dos SEP é realizada uma simplificação do modelo matemático da linha elétrica, consistente em reduzir a ordem da sua matriz de impedância para poder "acoplá-la" com os restantes elementos dos SEP.

A simplificação parte de considerar o solo como um condutor ideal, que não oferecerá, portanto, resistência ao passo da corrente elétrica. Como será mostrada a seguir, esta simplificação é possível porque as impedâncias relacionadas com o solo (z'_{gg} , z'_{ig} e z'_{gi}) são agregadas às impedâncias das fases.

As equações de Carson, por exemplo, permitem determinar as impedâncias próprias e mútuas dos condutores em uma linha elétrica com retorno através do solo fazendo uso daquela consideração [7]. No entanto, as equações de Carson

precisam de alguns parâmetros que são desconhecidos, sendo aplicadas na prática através de duas equações modificadas (para cálculo das impedâncias próprias e mútuas) [8]:

$$z_{ii} = r_i + 0,09530 + j0,12134 \ln \left(\frac{1}{\text{RMG}_i} + 7,93402 \right) \quad (3)$$

$$z_{ij} = 0,09530 + j0,12134 \ln \left(\frac{1}{D_{ij}} + 7,93402 \right) \quad (4)$$

onde z_{ii} representa a impedância própria do condutor da fase i , r_i (Ω/mi) e RMG_i (ft) a resistência e o Raio Médio Geométrico do mesmo, respectivamente. z_{ij} representa a impedância mútua entre os condutores i e j , e D_{ij} (ft) a distância entre eles.

Cabe salientar que em (3) e (4) além das impedâncias z'_{gg} e z'_{ig} estão considerados parâmetros dos quais dependem as impedâncias próprias e mútuas das fases, como a frequência da rede (60 Hz nestes casos) e a indutância dos condutores. Com estas simplificações resulta um novo sistema de equações para a linha elétrica, representado por (5), no qual não está presente a equação correspondente ao solo.

$$z = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{an} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bn} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cn} \\ z_{na} & z_{nb} & z_{nc} & z_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde z representa uma matriz equivalente de impedâncias da linha, com $z_{ij} = z_{ji}$ e a , b e c representando às fases e n ao neutro.

Desta forma, o trecho de linha da Fig.1 pode ser esquematizado por três fases e um neutro aterrado em ambos terminais. Entretanto agora com impedâncias "zeradas" no solo o neutro terá uma diferença de potencial de 0 V entre seus terminais ($V_{nn'} = 0$). Isto significa que em (5) a quarta equação é igual a zero, pelo que pode ser eliminada do sistema de equações, resultando a matriz de impedâncias da linha (de ordem 3x3):

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{sa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{sb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{sc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde Z_{ii} (ou Z_{si}) representa a impedância própria equivalente do condutor da fase i e Z_{ij} a impedância mútua equivalente entre os condutores das fases i e j . Novamente $Z_{ij} = Z_{ji}$.

Neste caso, os elementos de (6) são obtidos aplicando a técnica de redução de Kron [9] em (5), a qual estabelece que:

$$Z_{pq} = z_{pq} - \frac{z_{pn} z_{nq}}{z_{nn}} = z_{pq} - y_{nn} z_{pn} z_{nq} \quad (7)$$

onde p e q representam às fases a , b e c (inclusive $p = q$) e y_{nn} representa a admitância própria do neutro, que está sendo reduzido.

Neste trabalho é utilizado o termo *impedância própria* dos condutores da linha quando se faz referência aos elementos da

diagonal principal de (6). No entanto, é importante salientar que estes valores correspondem a impedâncias equivalentes.

III. ESTUDO DE CASO

Os efeitos produzidos pelos parâmetros dos condutores sobre os valores das impedâncias próprias de uma linha são estudados utilizando a estrutura mostrada na Fig.2. O estudo será realizado sobre a fase *a* quando empregados diferentes condutores, na fase e no neutro. De acordo com (3) a impedância própria de um condutor depende da sua resistência elétrica, *r*, e de seu raio médio geométrico, RMG, sendo estes os parâmetros que serão analisados.

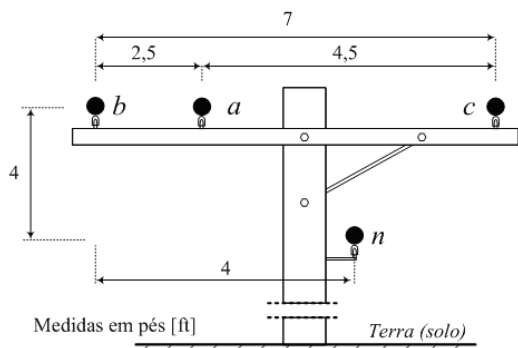


Figura 2. Estrutura aérea da linha elétrica.

Como é sabido, a resistência elétrica de um condutor depende inversamente do seu raio. Entretanto, nos SEP são usualmente empregados cabos, que estão constituídos por um conjunto encordoado de condutores, às vezes de diferentes características. Deste modo, não existe uma equação “padrão” relacionando a resistência dos cabos com seu RMG. No entanto, os cabos são fabricados de forma padronizada, empregando condutores que, por exemplo, obedecem à série AWG, na qual os diâmetros das seções nominais estão em progressão geométrica. Isto sugeriu a possibilidade de achar uma relação entre o RMG e a resistência elétrica dos cabos, para facilitar o estudo neste trabalho.

Existem diferentes tipos de condutores, mas todos eles podem ser agrupados em famílias, segundo a tecnologia de construção, o tipo de material ou outros aspectos. A Fig.3 relaciona o RMG e a capacidade de corrente (*C_c*) de condutores comerciais com a resistência elétrica dos mesmos [10], [8]. São identificadas as quatro famílias de condutores seguintes:

- Cabos de alumínio reforçado com aço, com 26 condutores de alumínio e 7 de aço (ACSR 26/7),
- Cabos de alheação de alumínio (AA),
- Cabos de cobre com 19 condutores (Cobre 19),
- Cabos de alumínio reforçado com aço, com 6 condutores de alumínio e 1 de aço (ACSR 6/1).

Devido à dispersão dos pontos, adotar uma única relação entre o RMG e a resistência não se mostra adequado. Entretanto, quando os condutores são agrupados por tecnologias, ou famílias, encontram-se relações mais precisas. Neste sentido, relações foram determinadas ajustando os dados das famílias citadas a curvas do tipo:

$$RMG = k r^{-\alpha} \quad (8)$$

onde *k* e α são os parâmetros das curvas ajustadas, que adotam valores diferentes segundo as famílias. Confia-se na representatividade das equações pelo coeficiente de regressão dos ajustes, o qual resultou ser superior a 99% para o caso das famílias ACSR 26/7, AA e Copper 19. Para a família ACSR 6/1 foi superior a 94%.

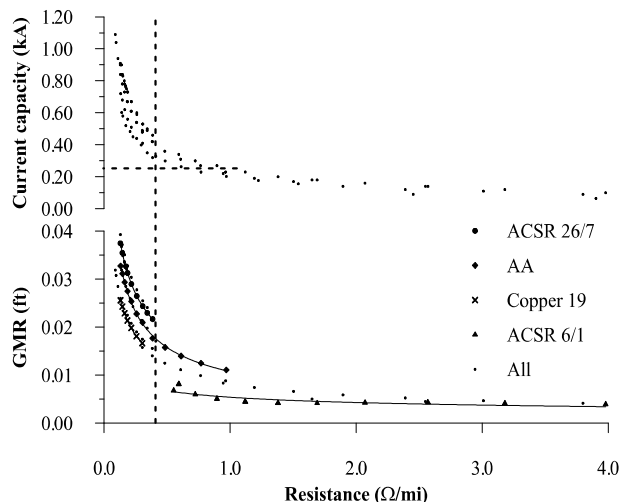


Figura 3. Raio médio geométrico e capacidade de corrente vs resistência de famílias de cabos elétricos.

Dentre as famílias citadas, para este estudo foram selecionados os 10 cabos mostrados na Tabela I os quais são utilizados indistintamente como condutores de fases e/ou condutores de neutro.

TABELA I. DADOS DOS CONDUTORES ESTUDADOS.

#	Núm.	Tramado	Tecnología	RMG (ft)	<i>r</i> (Ω/mi)*	C _c (A)
1	1/0	6/1	ACSR	0,00446	1,1200	230
2	2/0	class A	AA	0,01250	0,7690	230
4	400.0	19	Cooper	0,02290	0,1619	730
5	556.5	26/7	ACSR	0,03130	0,1859	730
6	795.0	26/7	ACSR	0,03750	0,1288	900
7	336.4	26/7	ACSR	0,02440	0,3060	530
8	4/0	19	Cooper	0,01668	0,3030	480
9	300.0	19	Cooper	0,01987	0,2150	610
10	397.5	26/7	ACSR	0,02650	0,2590	590
11	266.8	26/7	ACSR	0,02170	0,3850	460

*a 50°C e 60 Hz

IV. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A matriz apresentada em (6) representa o modelo matemático da linha elétrica empregado neste estudo. Conforme (7) quaisquer das impedâncias de (6) não apenas depende do condutor das fases, mas também do condutor do neutro. Dessa forma, os resultados aqui mostrados consideram ambos os condutores sendo identificada a função de cada um através dos símbolos Ph, para as fases, e Ne, para o neutro. Os cabos em particular são referenciados pelo número correspondente a sua fileira na Tabela I, por exemplo, Ph5 identifica o cabo 556.5 da família ACSR 26/7 na condição de

condutor de fases, e Ne1 identifica o cabo 1/0 ACSR 6/1 operando como neutro.

Os resultados são mostrados para valores de resistência dos condutores das fases entre 0,1 e 2 Ω/mi , que segundo a Fig.3, corresponde ao intervalo no qual está contido a resistência da maior parte dos condutores elétricos considerados.

A. Influência dos parâmetros dos condutores sobre a impedância própria da fase

Para esta análise são consideradas combinações entre condutores “teóricos” obtidos de (8), para cada uma das famílias estudadas, que atuariam como condutores de fase e cabos tomados da Tabela I, que atuariam como neutros. Para isto, começando com 0,1 Ω em (8) incrementa-se gradativamente o valor de r , através de um subprograma desenvolvido no MatLab®, obtendo-se um RMG para cada valor de r . Dos condutores assim formados (r , RMG) é determinada sua impedância própria conforme (6). A impedância própria do condutor do neutro, tomado da Tabela I, é determinada através de (3).

A primeira análise a ser realizada é para comprovar o efeito do neutro na impedância própria dos condutores das fases. Como esperado, o efeito é o aumento da impedância, o qual é mostrado na Fig.4 para as famílias Cobre 19 e ACSR 26/7 em função da resistência elétrica das mesmas.

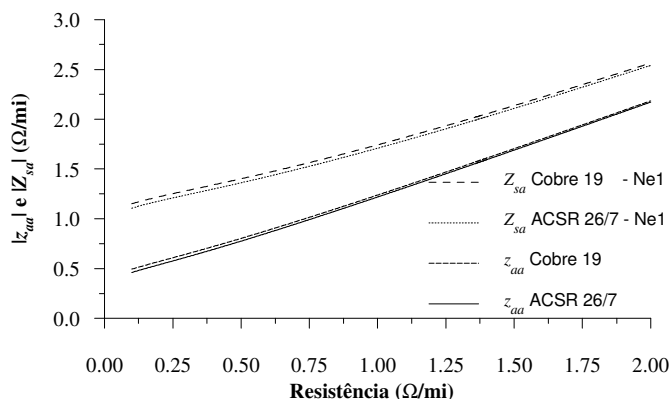


Figura 4. Impedância própria de condutores, z_{ii} , e impedância própria da fase a , Z_{sa} .

Neste caso, as famílias são combinadas com o neutro Ne1, obtendo-se um aumento na impedância que não é constante em toda a faixa de resistências, variando entre 130% e 20%.

Por outra parte, neutros diferentes modificarão de diferente forma a impedância própria das fases (conforme sugere o segundo termo de (7)). Isto é verificado na Fig.5 a qual mostra o absoluto da impedância própria da fase a para condutores das quatro famílias quando empregados dois neutros de diferentes impedâncias, no caso, Ne1 e Ne6, correspondendo as maiores impedâncias às combinações com o Ne1 ao qual pertence o menor RMG e ao mesmo tempo a maior resistência.

Observa-se também na Fig.5 que o efeito de utilizar diferentes condutores de neutro é deslocar as curvas das famílias (para cima ou para abaixo) mantendo o posicionamento relativo entre elas. Observa-se que este

posicionamento é o inverso ao mostrado pelas curvas dos RMG na Fig.3, significando que para um mesmo neutro, cabos de fases de igual resistência terão menor impedância quanto maior for seu RMG. Esta é uma observação importante e poderia ser suficiente na escolha dos cabos de uma linha elétrica, no entanto, os cabos são fabricados de forma padronizada, para valores “discretos” de resistências e RMG o que dificultaria a comparação entre combinações de cabos diferentes.

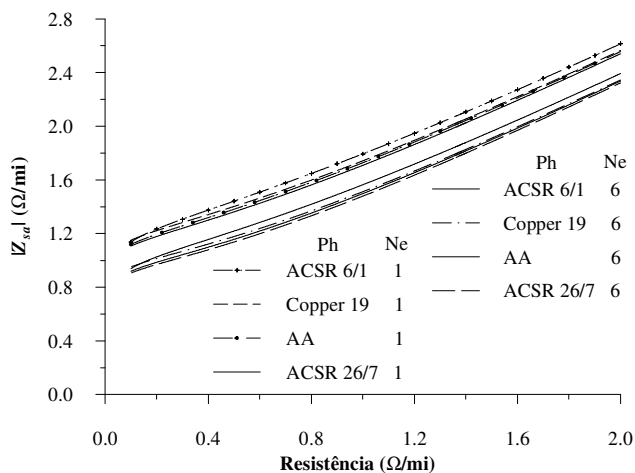


Figura 5. Impedância própria da fase a , para diferentes famílias e neutros.

Na Fig.6 são mostradas as combinações das famílias Cobre 19 e ACSR 26/7 com vários neutros. Para facilitar a visualização é considerado o intervalo de 0,1 a 0,6 Ω/mi , ao qual pertencem as resistências da maior parte dos cabos de força considerados neste estudo. A Fig.6 permite verificar as observações realizadas previamente, considerando combinações reais entre alguns dos cabos da Tabela I.

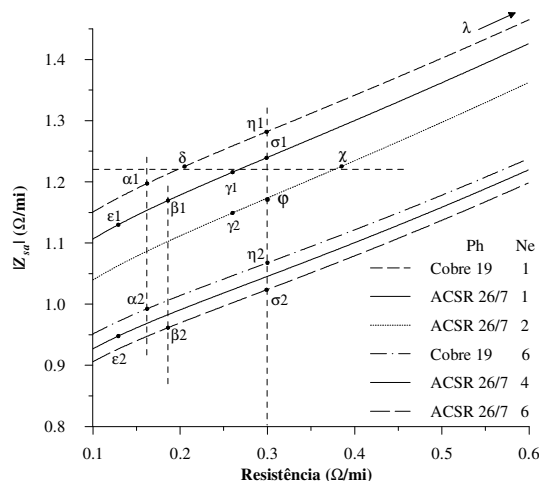


Figura 6. Impedâncias próprias para várias combinações de cabos de fase e neutro.

Em primeiro lugar, observa-se que para uma mesma família (curva), uma maior resistência elétrica do cabo implica uma maior impedância própria de fase (independentemente do RMG). Exemplos disto são a combinação Ph11-Ne2 (ponto χ) a qual possui maior impedância própria que Ph10-Ne2 (ponto γ_2), e a combinação Ph8-Ne1 (ponto η_1) de maior impedância própria que Ph9-Ne1 (ponto δ). Também pode ser comprovada a influência do RMG perante uma mesma

resistência elétrica. Como exemplos estão as combinações formadas com os cabos #8 e #7 os que possuem uma resistência elétrica semelhante, no entanto seus RMG são diferentes. Desse modo, quando combinados com um mesmo neutro a impedância própria da combinação com o cabo Ph8 (por exemplo, pontos η_1 e η_2) sempre resultará maior àquela que emprega o cabo Ph7 (pontos σ_1 e σ_2), pois $RMG\#8 < RMG\#7$. Outra comprovação está relacionada com a influência de neutros diferentes na impedância própria das fases. Exemplos disto são as combinações Ph4-Ne1 e Ph4-Ne6 (pontos α_1 e α_2) e Ph5-Ne1 e Ph5-Ne6 (pontos β_1 e β_2).

A estimativa com respeito à impedância própria se dificulta quando são comparadas combinações de cabos de diferentes resistências e RMG. A resistência do cabo #4, por exemplo, é menor que a resistência do cabo #5, o que poderia ser motivo para sua seleção para uma linha, já que ambos possuem a mesma capacidade de corrente. No entanto, comprova-se que a impedância própria da combinação Ph4-Ne1 é maior do que a impedância própria da combinação Ph5-Ne1 (pontos α_1 e β_1), motivado pelo menor RMG do cabo #4, de maior peso neste caso. A estimativa se dificulta ainda mais quando são empregadas combinações de cabos diferentes tanto nas fases quanto nos neutros. O cabo #5, por exemplo, tem maior RMG que o #10, por tanto, considerando a influência desta grandeza pareceria que a impedância própria da combinação Ph5-Ne1 (ponto β_1) seria menor do que aquela da combinação Ph10-Ne2 (ponto γ_2), já que os cabos #1 e #2 têm igual capacidade de corrente. No entanto, a Fig.6 revela que acontece o contrário, motivado pelo maior peso da resistência, que é menor no cabo #10.

Deste modo, curvas como as apresentadas neste trabalho podem ser úteis durante o processo de projeto de uma linha elétrica, dado que podem ser utilizadas para estimar preliminarmente qual a combinação apropriada dos cabos disponíveis em estoque para uma determinada aplicação. Por exemplo, diante de um estoque de condutores com resistência em torno de $0,3 \Omega/\text{mi}$, as curvas das famílias Copper 19 e ACSR 26/7 mostram que as impedâncias próprias para as combinações Ph8-Ne1 e Ph7-Ne1 (pontos η_1 e σ_1) serão $1,28$ e $1,23 \Omega/\text{mi}$, respectivamente. Verifica-se também que a combinação Ph7-Ne2 (ponto ϕ), apresenta uma impedância própria menor ($1,17 \Omega/\text{mi}$), embora os neutros Ne2 e Ne1 tenham a mesma capacidade de corrente.

Outra aplicação pode precisar de uma linha cujas impedâncias próprias não ultrapassem certo limite. Por exemplo, alguns equipamentos, como os inversores dos sistemas fotovoltaicos, só se conectam à rede se a impedância da linha for menor a certo valor [11]. Para impedâncias em torno de $1,22 \Omega/\text{mi}$, por exemplo, poderão ser utilizadas as combinações Ph9-Ne1 (ponto δ) ou Ph10-Ne1 (ponto γ_1). Ainda, a condição será satisfeita com a combinação Ph11-Ne2 (ponto χ). Obviamente a seleção dos tipos de cabos e a sua função pode depender de outros fatores, como o preço. O cabo das fases, por exemplo, tem um comprimento três vezes maior que o comprimento do neutro, o que pode representar um preço maior para o primeiro. No entanto, a redução de custos não deve estar associada à inversão da função dos cabos na linha, pois a impedância pode não ser a mesma em ambos os casos. Por exemplo, como mostra a Fig.6, a impedância própria da combinação Ph4-Ne6 (ponto α_2) é diferente da

combinação Ph6-Ne4 (ponto ϵ_2). Nesse exemplo a diferença não é muito elevada, como sim acontece entre as combinações Ph6-Ne1 (ponto ϵ_1) e Ph1-Ne6 (ponto λ , fora da figura).

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise das impedâncias próprias dos condutores de uma linha elétrica de distribuição aérea, em função de parâmetros dos mesmos.

Considerou-se uma linha trifásica, com neutro e retorno por terra, modelada através da sua matriz de impedância. A matriz de impedância original foi reduzida a uma matriz equivalente com auxílio da técnica de redução de Kron. Dado que o neutro forma parte do caminho percorrido pela corrente elétrica, a sua impedância influencia no valor das componentes da matriz de impedância equivalente.

Foram obtidas curvas que relacionam as impedâncias de famílias de condutores com a sua resistência elétrica. Para cada família podem ser obtidas diferentes curvas, segundo o condutor empregado como neutro. Estas curvas podem ser uma ferramenta útil na etapa de projeto de uma linha elétrica, ao oferecer uma informação visual que permite uma rápida estimativa inicial das impedâncias de combinações fase-neutro de condutores. As curvas contribuíram para comprovar que uma mesma impedância pode ser obtida por várias combinações de condutores fase-neutro e que, o fato de que dois condutores tenham igual resistência ou capacidade de corrente não significa que quando combinados com um terceiro resultarão em combinações com impedâncias iguais.

Este trabalho contribuiu para uma melhor compreensão da influência dos parâmetros dos condutores sobre as impedâncias próprias correspondentes, o que se revela de grande importância para estudos e projetos de linhas elétricas. As observações realizadas servirão de suporte para trabalhos futuros relacionados à modelagem e análises de faltas em redes de distribuição, nas quais a matriz de impedância da linha tem um papel fundamental.

REFERÊNCIAS

- [1] Grainger, J. J.; Stevenson, W. D. (1994). Power System Analysis. McGraw-Hill, New York .
- [2] Oliveira, J. C.; Paulsen, R. J.; Amaral, M. A.; Andrade, D. A. e Araújo, S. C. N. (1996). Electrical Transmission System with Variable Frequency Through Long Length Cable. In: Offshore Technology Conference, Houston.
- [3] Akke, M. e Biro T. (2005). Measurements of the frequency-dependent impedance of a thin wire with ground return. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, No 2, pp. 1748-1752.
- [4] Berleze, S. L. M.; Robert R. (2003). Skin and Proximity Effects in Nonmagnetic Conductors. IEEE Transaction on Education, Vol. 46, No. 3, pp. 368-372.
- [5] General Cable Corporation (2011). <http://www.generalcable.com>.
- [6] Kurokawa, S.; Filho, J. P.; Tavares, M. C.; Portela, C. M.; Prado, A. J. (2005). Behavior of Overhead Transmission Line Parameters on the Presence of Ground Wires. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1669-1676.
- [7] Carson, J. R. (1926). Wave propagation in overhead wires with ground return. Bell System Technical Journal, Vol. 4, No. 5, pp 539-554.
- [8] Kersting, W. H. (2002). Distribution system modeling and analysis. Boca Ratón: CRC Press.
- [9] Kron, G. (1939). Tensor analysis of networks. New York: J. Wiley & Sons, New York.
- [10] Anderson, P. M. (1973). Analysis of Faulted Power Systems. The Iowa State University Press, 1973.
- [11] SMA Solar Technology AG (2012). <http://www.sma.de>.