

# Caracterização da Impedância de Acesso à Rede de Energia Elétrica Residencial para Uso em Sistemas *Power Line Communications*

Luís Guilherme da S. Costa, Antonio Angelo M. Picorone, Antônio Carlos M. de Queiroz, Vinícius Lagrota R. da Costa, Moisés V. Ribeiro.

**Resumo**— Este trabalho tem como objetivo discutir a caracterização da impedância de acesso residencial em redes de energia elétrica no Brasil para subsidiar o desenvolvimento adequados à realidade Brasileira do sistema *Power Line Communication* - (PLC). É descrita de forma breve uma campanha de medição realizada para medir a impedância de acesso considerando a faixa de frequências entre 2 e 500 MHz. Em seguida, são apresentadas as análises estatísticas que levam em conta o comportamento típico das redes de energia elétrica nos lares brasileiros, considerando três faixas de frequências importantes para aplicações do sistema PLC em banda larga. Finalmente, mostra-se que os resultados obtidos proporcionam informações muito importante para projetar circuitos casadores de impedância que são úteis para melhorar o desempenho dos sistemas PLC em banda larga.

**Palavras-Chave**— PLC, casamento de impedância, acoplador PLC, rede de energia elétrica.

**Abstract**— This work aims to discuss the characterization of access impedance in Brazilian indoor electric power grids for designing *Power Line Communication* (PLC) system suitable for the Brazilian characteristics. With this regards, we briefly describe a measurement campaign that was carried out to measure access impedance considering the frequency band between 2 to 500 MHz. In the following, we present statistical analyses that address the behavior of such parameter of typical electric power grids in Brazilian homes considering three important frequency bands for broadband PLC system applications. Finally, we show that the attained results provide very important information to design matching circuits that are useful to improve the performance of broadband PLC systems.

**Keywords**— PLC, impedance matching, PLC coupling, electricity power network.

## I. INTRODUÇÃO

Recentemente, a tecnologia *Power Line Communications* (PLC) tem sido usada para atender diferentes demandas de comunicação de dados. Devido a sua área de abrangência, capilaridade, o uso de sistemas PLC oferece uma infraestrutura de telecomunicações bastante interessante para atender diversas demandas de comunicação de dados das cidades inteligentes. Como exemplo de algumas dessas demandas, pode-se citar as de banda larga para acesso à internet de alta velocidade e aplicativos de multimídia. Para banda estreita, alguns exemplos

Luís G. S. Costa, Moisés V. Ribeiro e Vinícius L. R. Costa, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora-MG, Brasil, E-mails: (luis.guilherme, mribeiro, vinicius.lagrota)@engenharia.ufjf.br. Antonio A. M. Picorone, Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora e CEMIG, Juiz de Fora-MG, Brasil, E-mail: picorone@pucminas.cesjf.br. Antônio C. M. Queiroz, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, E-mail: acmq@coe.ufrj.br.

são os destinados às aplicações de automação residencial, comercial e industrial. Além disso, o uso de sistemas PLC é bastante interessante e tem sido muito considerado para dar suporte às redes elétricas inteligentes - (REI) (*Smart Grids*). No entanto, a rede de energia elétrica - (REE) é extremamente hostil para a comunicação de dados. Os sinais em alta frequência ao se propagarem na REE sofrem atenuações e distorções devido a dinâmica das cargas conectadas à esse barramento, principalmente, devido à comutação (liga/desliga) de equipamentos alimentados pela REE. Essa dinâmica de alterações na REE faz com que sua resposta em frequência se apresente como seletiva no tempo e na frequência [1]. Para que seja possível utilizar a REE como meio de comunicação PLC é extremamente aconselhável que tanto no sentido transceptor PLC/REE quanto no sentido contrário haja a menor perda de transferência de sinal possível, o que melhora a capacidade de comunicação de dados do sistema PLC. O teorema da máxima transferência de potência diz que para transferir a quantidade máxima de energia de uma fonte para uma carga, a impedância da carga deve corresponder ao conjugado da impedância da fonte, nesse caso diz-se que a carga e fonte estão casadas. Caso não haja o casamento entre fonte e carga, pode-se esperar uma redução no desempenho do sistema PLC como redução da distância limite entre transceptores, baixa confiabilidade na comunicação PLC e redução da taxa de transmissão de dados [2].

Com intuito de se obter melhores resultados no uso de sistemas PLC, deve-se perseguir em seu projeto o casamento de impedância entre o transceptor PLC e o ponto de acesso à REE. Para que isso ocorra é fundamental que se conheça as características de impedância do ponto de acesso à REE para que sistemas de casamento de impedância sejam projetados.

Em [3] são apresentados resultados de medições de impedância de acesso à REE em diferentes ambientes, porém, considerando apenas sistemas banda estreita. A caracterização da impedância de acesso às REE para sistemas PLC banda larga com frequências de até 100 MHz foi reportada em [4]. Nesse trabalho foi reportado que o valor da componente resistiva da impedância de acesso à REE diminui, enquanto a componente reativa aumenta com o aumento da frequência. Em [4], também foi reportado que tanto os valores das componentes resistivas quanto os valores das componentes reativas sofrem uma menor variação a partir de 45 MHz.

No presente trabalho, a caracterização da impedância em banda larga é examinada. Nesse contexto, são apresentados

e analisados os resultados obtidos em uma campanha de medição da impedância de acesso à REE em três cidades de Minas Gerais. Este trabalho difere dos citados por caracterizar a impedância de acesso à REE na banda de frequência compreendida entre 2 MHz e 500 MHz, banda larga. Além disso, apresenta os primeiros resultados de uma campanha de medição da impedância de acesso às REE dentro de residências Brasileiras.

Dessa forma, o presente trabalho está assim organizado: a Seção II discute a medição da impedância de acesso à REE utilizado. Além disso, apresenta-se o circuito projetado para acoplar o instrumento de medição à REE e a formulação básica para extrair a impedância de acesso à REE. Na Seção III é apresentada a campanha de medição realizada e seus resultados são analisados. Finalmente, os resultados e o direcionamento futuro são apresentados na Seção IV.

## II. SISTEMA DE MEDIÇÃO

Com o objetivo de selecionar a banda de frequência desejada para estimar a impedância de acesso à REE, prover proteção elétrica adequada para o instrumento de testes e para o técnico operador, se faz necessário o uso de um dispositivo de acoplamento entre a REE e o instrumento de medição. Além das funções citadas, o acoplador é responsável por fornecer isolamento galvânica entre a REE e o instrumento de medição, evitando o contato do instrumento de medição diretamente com a REE. A Figura 1 mostra o circuito acoplador proposto para a medição da impedância de acesso à REE utilizado neste trabalho e a Figura 2 mostra o acoplador desenvolvido. O circuito proposto permite a medição da impedância de acesso à rede de energia  $Z_R(\omega) = R_R(\omega) + jX_R(\omega) \mid \omega_l \leq \omega \leq \omega_h$ , em que  $\omega_l$  é definida pelo capacitor  $C_1$  e  $\omega_h$  dada pela frequência de corte do transformador de rádio frequência (RF)  $T_1$ . Note que,  $R_R$  e  $X_R$  são a resistência e a reatância no ponto de acesso à rede de energia elétrica, respectivamente.

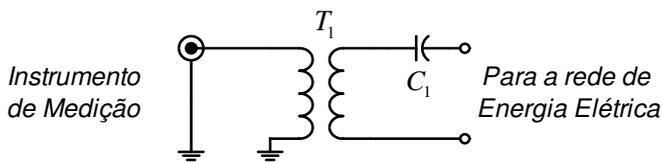


Fig. 1. Circuito proposto para medição da impedância de acesso à REE.



Fig. 2. Acoplador desenvolvido para medição da impedância de acesso à REE.

O capacitor  $C_1$  é escolhido para bloquear a tensão da REE de 127 V<sub>rms</sub> em 60 Hz, além de trabalhar como filtro passa-alta com resposta em frequência plana a partir de 2 MHz. O transformador  $T_1$  é escolhido para cobrir uma banda larga de frequências, proporcionar o isolamento galvânico entre

o instrumento de medição e a REE, atuar como conversor de linha balanceada/desbalanceada (BALUN), casamento de impedância e compatibilização dos níveis de tensão e corrente quando necessários. Além disso, ele também é usado para proporcionar segurança ao operador do instrumento, evitando choques acidentais.

O circuito equivalente da configuração utilizada para medição da impedância de acesso à REE, considerando a impedância do acoplador e a impedância de acesso à REE, está representado na Figura 3. Nessa figura,  $Z_c$  é a impedância referente a  $C_1$ , dada por

$$Z_c(\omega) \approx -\frac{1}{\omega C_1} j, \quad (1)$$

em que  $j = \sqrt{-1}$  e  $\omega = 2\pi f$ , sendo  $f$  a frequência em Hertz avaliada.  $R_m$  é a impedância representada pela transresistência do transformador  $T_1$  para alta frequência [5]. A partir da Figura 3, pode-se equacionar a impedância medida pelo instrumento de medição como

$$Z_M = \frac{R_m(Z_C + Z_R)}{R_m + Z_C + Z_R}. \quad (2)$$

Observe que o instrumento de medição mede a impedância de acesso à REE de forma indireta, pois  $Z_R$  é interferida pela impedância inserida pelo circuito de acoplamento. Uma forma conveniente de se obter a impedância  $Z_M$  é utilizar um instrumento de medição que avalia o parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  [6] [7] e assim, estimar a impedância medida por

$$Z_M = Z_s \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}, \quad (3)$$

em que  $Z_s$  é a impedância interna do instrumento de medição.

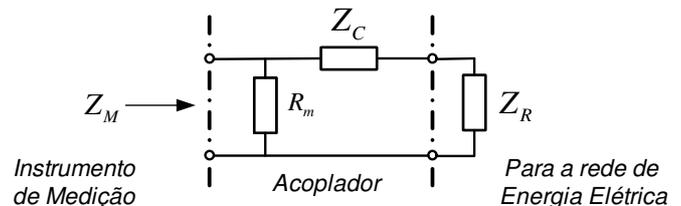


Fig. 3. Circuito equivalente em função da impedância do acoplador e da impedância de acesso à REE.

O parâmetro de espalhamento  $S_{11}$  avalia a porção do sinal que é previamente injetado sobre o componente em teste (*Device Under Test* - DUT) e que retorna ao instrumento de medição.

Considerando o acoplador como parte integrante do sistema de medição, além de considerar o circuito interno do instrumento de medição como um circuito equivalente de Norton, a impedância interna deste, então denominado, sistema de medição, passa a valer

$$Z'_s = Z_c + \frac{R_m Z_s}{R_m + Z_s}. \quad (4)$$

Dessa forma, o parâmetro  $S_{11}$  avaliado pelo instrumento de medição, que se referia ao ponto de entrada do acoplador (lado do instrumento), passa a representar o parâmetro de

espalhamento do ponto de acesso à REE (lado REE do acoplador) pelo sistema de medição, cuja a estimativa da impedância  $Z_R$  pode ser considerada como

$$\tilde{Z}_R = Z_s \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} + \epsilon, \quad (5)$$

em que  $\epsilon \propto |Z_s - Z'_s|$  representa o erro no valor lido no Analisador Vetorial de Rede (*Vector Network Analyser - VNA*) da impedância de acesso à REE devido à impedância inserida pelo acoplador.

A seção III apresenta a campanha de medição realizada e os resultados obtidos neste trabalho.

### III. RESULTADOS

A campanha de medição com o objetivo de caracterizar a impedância de acesso à REE foi realizada nas localidades de Juiz de Fora, Cataguases e Carandaí, MG - Brasil em 30 residências, duas lojas comerciais, uma empresa de Telecomunicações e uma Fazenda. As medidas foram realizadas em tomadas monofásicas, somando-se um total de 1.019 tomadas no cenário urbano e suburbano. A área das residências avaliadas variam entre 50 a 400 m<sup>2</sup>. Todas as tomadas disponíveis nas residências foram consideradas para fornecer uma estimativa final com o maior número de dados possível.

Os parâmetros  $S_{11}$  foram obtidos utilizando-se o analisador de rede vetorial da Agilent Field Fox e o acoplador discutido na seção II. A potência do VNA foi fixada em 0 dBm. Foi realizada uma medição por tomada. Em cada medição é obtido um vetor com 1.001 elementos que representa  $S_{11}$  no domínio da frequência discreta. Considera-se neste trabalho que a impedância de acesso à REE é invariante no tempo durante, pelo menos, 1,5 s, que é a duração do tempo de aquisição de uma medição pelo VNA. Antes das aquisições, o sistema de medição formado pelo VNA, acoplador e cabos foi calibrado para minimizar a sua influência nas medições. Essa calibração consiste em realizar um procedimento definido pelo fabricante do VNA para esse propósito e resulta em fazer com que  $\epsilon \rightarrow 0$  em (5). Assim, depois de calibrado, a estimativa da impedância de acesso à REE é obtida por

$$\tilde{Z}_R \approx Z_s \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}, \quad (6)$$

em que,  $Z_s = 50 \Omega$  para o VNA utilizado.

O acoplador foi projetado como filtro passa-alta e com banda larga, sendo escolhido como  $T_1$  (Figura 2) o modelo ATDT3 1T do fabricante Mini-circuits. O transformador  $T_1$  tem como características a banda de passagem de 1 a 500 MHz e perda de inserção de 2dB. O capacitor  $C_1$  utilizado é do tipo cerâmico, para montagem em superfície (SMD - *Surface Mounted Device*), de 1 nF com tensão de isolamento de 230 V<sub>rms</sub>. Como resultado dessas escolhas, o acoplador apresenta uma atenuação inferior a 5 dB na banda de passagem, que vai de 2 até 500 MHz. A Figura 4 ilustra a resposta em frequência baseada nos parâmetros S do acoplador projetado.

Foram considerados como valores atípicos (*outliers*) as componentes resistivas, capacitivas e do módulo da impedância as amostras obtidas pertencentes ao 1º e 4º quar-

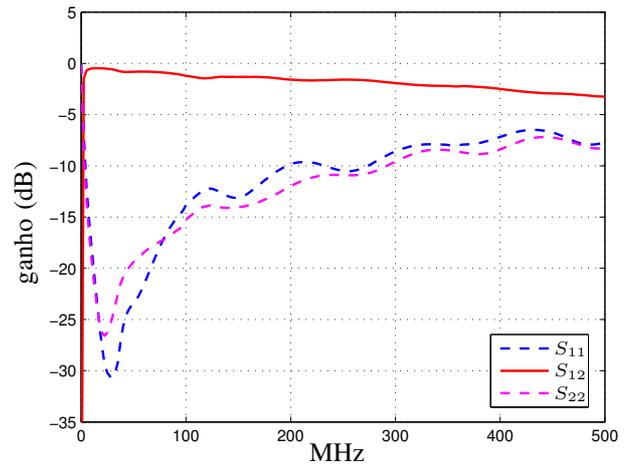


Fig. 4. Parâmetros S do acoplador projetado.

til. Consequentemente, essas amostras foram descartadas nas análises.

A Figura 5 mostra os valores limítrofes mínimos e máximos (linha clara) e os médios (linha escura), obtidos a partir da campanha de medição conduzida, das estimativas do módulo da impedância  $\tilde{Z}_R$  de acesso à REE. Essa figura sugere que o módulo da impedância de acesso à REE diminui com o aumento da frequência. A equação indicada na figura representa a reta obtida por uma aproximação linear do módulo da impedância de acesso à REE. O módulo da impedância de acesso à REE apresenta um valor médio de, aproximadamente, 84  $\Omega$ . Entretanto, foram encontrados valores que excursionam de 52,3  $\Omega$  a 128,8  $\Omega$ .

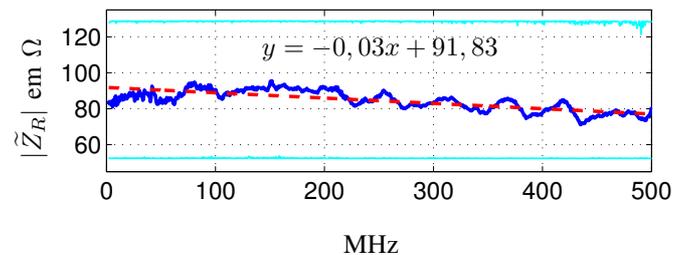


Fig. 5. Módulo da impedância de acesso à REE na banda de frequência entre 2 e 500 MHz.

O gráfico de caixas (boxplot) dos valores estimados do módulo da impedância, da componente resistiva e reativa do ponto de acesso à REE é apresentado na Figura 6, em que a linha vermelha nas caixas indicam a mediana dos valores. Observa-se nesta figura que a componente resistiva, assume com mais frequência valores menores do que a componente reativa do módulo da impedância do ponto de acesso à REE. Além disso, a mesma Figura 6 sugere que não há espalhamentos consideráveis nos valores das componentes analisadas.

A análise da correlação existente entre os valores da componente resistiva ( $R_R$ ) e da componente reativa ( $X_R$ ) da impedância de acesso à REE, indicou a inexistência de correlação entre essas variáveis. A Figura 7 explicita a ausência de

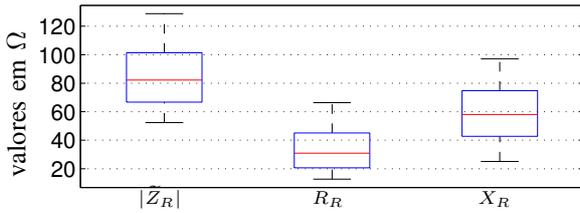


Fig. 6. Boxplot do módulo da impedância, componente resistiva e reativa do ponto de acesso à REE na banda de frequência entre 2 e 500 MHz.

correlação entre  $R_R$  e  $X_R$ , onde se observa que não existe uma relação que possa ser inferida entre essas variáveis. Note que na Figura 7 não foram considerados os *outliers* das componentes resistivas, reativas e do módulo da impedância.

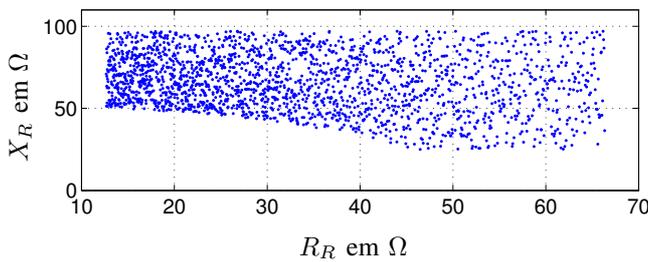


Fig. 7. Correlação entre a componente resistiva e reativa da impedância de acesso à REE na banda de frequência entre 2 e 500 MHz.

Uma vez que existem diversas oportunidades de uso de sistemas PLC em bandas de frequências menores, algumas estimativas da impedância de acesso à REE são apresentadas considerando as bandas de frequências  $B_1$  de 2 MHz a 50 MHz,  $B_2$  de 2 MHz a 100 MHz e, finalmente,  $B_3$  de 2 MHz a 500 MHz.

O boxplot dos valores estimados do módulo da impedância, da componente resistiva e reativa do ponto de acesso à REE para a banda de frequência entre 2 e 50 MHz é apresentado na Figura 8. Igualmente ao observado para banda de frequência de 2 a 500 MHz, essa figura indica que a componente resistiva, assume com mais frequência valores menores do que a componente reativa do módulo da impedância do ponto de acesso à REE. Além disso, a mesma Figura 8, também sugere que não há espalhamentos consideráveis nos valores das componentes analisadas. O boxplot dos valores estimados do módulo da impedância, da componente resistiva e reativa do ponto de acesso à REE para a banda de frequência entre 2 e 100 MHz é bastante semelhante ao da Figura 8, por esse motivo não é apresentado neste trabalho. Finalmente, pode-se observar nas Figura 6 e 8 que a componente reativa da impedância de acesso à REE não se apresentou em momento algum valores com valores negativos. Essa constatação sugere que, em todos os casos analisados a impedância de acesso à REE se comportou com características indutivas.

A Figura 9 mostra o gráfico da função de densidade de probabilidade cumulativa (CDF - *Cumulative Distribution Function*) das componentes resistivas e reativas da impedância de acesso à REE referentes às bandas de frequências analisadas. Essa figura sugere que os valores das componentes resistivas e reativas das impedâncias de acesso à REE pos-

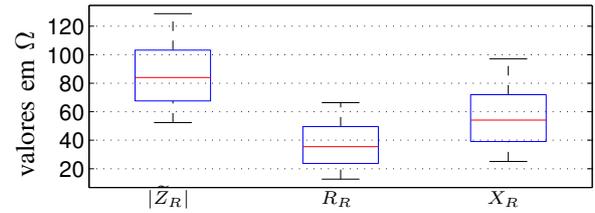


Fig. 8. Boxplot do módulo da impedância, componente resistiva e reativa do ponto de acesso à REE na banda de frequência entre 2 e 50 MHz.

suem distribuições de probabilidades semelhantes, quando se considera as bandas de frequências de 2-50 MHz, 2-100 MHz e 2-500 MHz. A figura sugere que em 50% dos casos, as componentes resistivas e reativas da impedância de acesso à REE estão abaixo, respectivamente, de  $35,5 \Omega$  e  $54,0 \Omega$  para a banda de frequência 2-50 MHz ( $B_1$ ), de  $37,0 \Omega$  e  $57,0 \Omega$  para a banda de frequência 2-100 MHz ( $B_2$ ), e, finalmente,  $30,8 \Omega$  e  $58,7 \Omega$  para a banda de frequência 2-500 MHz ( $B_3$ ).

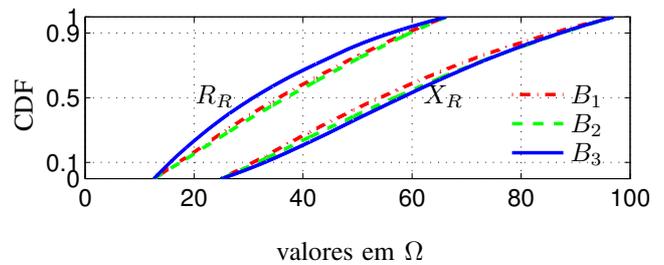


Fig. 9. Média das funções distribuição cumulativa das componentes resistivas e reativas da impedância de acesso à REE na banda de frequência entre 2-50 MHz ( $B_1$ ), 2-100 MHz ( $B_2$ ) e 2-500 MHz ( $B_3$ ).

Finalmente, a Tabela I lista as estatísticas das impedâncias de acesso à REE estimadas para as bandas de frequências de 2-50 MHz, 2-100 MHz e 2-500 MHz.

#### IV. CONCLUSÕES

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a impedância de acesso à REE de baixa tensão e interna para o uso de sistemas de comunicação PLC, cuja banda de frequência está entre 2 MHz a 500 MHz. Foi apresentado e discutido o projeto do acoplador que serve como interligação entre o instrumento de medição e a REE. Resultados de uma campanha de medição conduzida em diversas residências localizadas em três cidades distintas foram apresentados.

Os resultados da campanha de medição sugerem que o módulo da impedância de acesso à REE decai com a frequência. Os resultados indicam que o módulo da impedância de acesso à REE é de, aproximadamente,  $84 \Omega$ , chegando a assumir valores entre  $52,3$  e  $128,8 \Omega$ . Além disso, os resultados sugerem que a impedância de acesso à REE diminui com o aumento da frequência.

Quanto ao comportamento das componentes resistivas e reativas da impedância de acesso à REE, os resultados indicam que não há correlação entre a variação de seus valores. Além disso, foi verificado que em todos os casos analisados

TABELA I  
 ESTATÍSTICAS DA IMPEDÂNCIA DE ACESSO À REE EM  $\Omega$ .

	Mínimo	Máximo	Médio	Desvio padrão	90% acima	90% abaixo
$R_R(B_1)$	12,66	66,33	36,92	15,18	12,2	59,1
$X_R(B_1)$	25,10	97,07	56,29	19,92	30,8	85,9
$R_R(B_2)$	12,66	66,33	37,77	15,25	17,5	59,7
$X_R(B_2)$	25,25	97,07	58,18	20,15	31,7	87,4
$R_R(B_3)$	12,66	66,33	33,53	14,85	15,6	56,2
$X_R(B_3)$	25,10	97,07	59,04	19,56	33,0	87,2

a impedância de acesso à REE possui um comportamento indutivo.

De posse dos resultados desse trabalho, pode-se desenvolver acopladores PLC mais eficientes que possibilitam uma maior transferência de potência entre os transceptores PLC conectados via a REE. Esse é um dos desafios a ser trabalhado.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio no desenvolvimento dos trabalhos à P&D ANEEL, FINEP, CAPES, FAPEMIG, Smarti9, CEMIG e INERGE.

#### REFERÊNCIAS

- [1] A. A. M. Picorone, L. R. Amado, and M. V. Ribeiro, "Linear and periodically time-varying PLC channels estimation in the presence of impulsive noise," in *Proc. International Symposium on Power Line Communications*, 2010, pp. 255–260.
- [2] L. G. da Silva Costa, "Circuitos de acoplamento para transceptores PLC," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Feb. 2012.
- [3] M. Sigle, W. Liu, and K. Dostert, "On the impedance of the low-voltage distribution grid at frequencies up to 500 khz," in *Proc. International Symposium on Power Line Communications*, Mar. 2012, pp. 30–34.
- [4] A. Tonello, F. Versolatto, and A. Pittolo, "In-Home Power Line Communication Channel: Statistical Characterization," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 6, pp. 2096–2106, Jun. 2014.
- [5] M. K. Kazimierczuk, *High Frequency Magnetics Components*, ser. Wiley Interscience. John Wiley and Sons, 2009.
- [6] Y.-S. Kim and J.-C. Kim, "Characteristic impedances in low-voltage distribution systems for power line communication," in *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 2, no. 1, Mar. 2007, pp. 29–34.
- [7] R. Araneo, S. Celozzi, and G. Lovat, "Design of impedance matching couplers for power line communications," in *Proc. International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Aug. 2009, pp. 64–69.