

Grupo de Estudo de Sistemas de Distribuição-GDI

Modelagem de Transformador de Distribuição para Análise de Transmissão de Dados via Rede de Energia Elétrica

LARA HOFFMANN SATHLER*; ALBERTO DE CONTI; LUIS MATHEUS B. CAMELO; DENIS G. B. MARIANO;
UFMG

RESUMO

Este trabalho caracteriza o comportamento de um transformador de distribuição monofásico empregado em zonas rurais no Brasil para estudos de *Power Line Communication* (PLC) em banda estreita. Transformadores possuem comportamento variável na frequência, o que interfere na qualidade do sinal PLC. Por isso, estudos de viabilidade da aplicação de PLC devem considerar a influência do transformador na transmissão de sinais. A modelagem empregada é do tipo caixa preta, que descreve o comportamento do transformador com base na medição de sua resposta em frequência. O modelo proposto é validado por meio de análises nos domínios da frequência e do tempo.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador de distribuição, modelagem caixa preta, *Power Line Communication*, resposta em frequência, resposta transitória.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os desafios operacionais do sistema de distribuição de energia estão sendo modificados devido às mudanças nos perfis de geração e consumo. Esse contexto envolve um cenário de descentralização da geração de energia na qual são incorporadas à rede de distribuição, tanto na média quanto na baixa tensão, mini e microrredes de geração de energia, elementos armazenadores de energia, veículos elétricos e participação ativa dos consumidores, como ilustrado na Figura 1. Para integrar esses novos elementos no sistema de distribuição de energia elétrica são necessários sistemas de comunicação que permitam uma troca eficiente de informações [1].

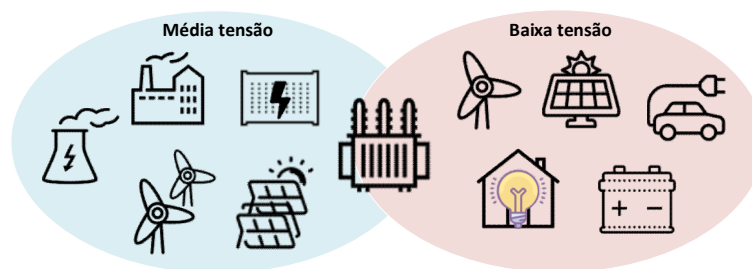


Figura 1 - Interface entre as redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão.

(*) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE)/Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha. Belo Horizonte/MG. Tel: (31) 34093412 Email: lhsathler@gmail.com; conti@cpdee.ufmg.br

Nesse contexto, a utilização da rede de distribuição de energia como canal de comunicação, tecnologia chamada de *Power Line Communication* (PLC), tem despertado interesse mundial por suportar uma grande variedade de aplicações, além da redução de custos de implantação por usufruir da rede já instalada [1], [2]. Dependendo da aplicação, o sistema de PLC deve ser capaz de assegurar não somente a transmissão de dados ao longo de linhas de média tensão, mas também entre redes de distribuição de média e baixa tensão [3]. Contudo, a interface entre essas redes é feita por transformadores de distribuição, como indicado na Figura 1.

O transformador possui um comportamento em altas frequências que apresenta múltiplos pontos de ressonância, fazendo com que o sinal a ser transmitido possa ser atenuado ou amplificado, dependendo da faixa de frequências considerada [4]–[7]. Nos casos em que o sinal a ser transmitido pelo transformador é severamente atenuado, pode ser necessária a instalação de acopladores [8], o que tenderia a elevar o custo de implantação da rede PLC. Isso poderia inviabilizar o emprego dessa tecnologia, por exemplo, em zonas rurais, em que cada transformador atende a poucos consumidores [1]. Assim, é necessário avaliar a resposta em frequência do transformador de forma a verificar se a atenuação do sinal transmitido é aceitável, especialmente na banda estreita de frequências, que tem atraído considerável interesse em aplicações da tecnologia PLC no contexto de redes inteligentes [3], [9], [10]. Uma avaliação no domínio do tempo também é de fundamental importância nas análises da aplicabilidade da tecnologia PLC devido à característica do canal de comunicação, que é seletivo na frequência, variante no tempo e corrompido por ruídos com propriedades estocásticas [11], [12].

Até o presente momento, não é do conhecimento dos autores a existência de estudos que avaliem a viabilidade de transmissão de dados através de transformadores de distribuição rurais empregados no contexto brasileiro. De forma a suprir essa carência, este trabalho propõe uma modelagem de um transformador de distribuição monofásico amplamente utilizado em redes rurais, para análise da influência deste equipamento na transmissão de sinais PLC na faixa de estreita de frequência CENELEC, 3 - 148,5 kHz [13], adotada em vários países europeus. Essa faixa de frequência, que tem sido base de diversos estudos [6], [14]–[16], suporta aplicações de AMI/AMR (*Automatic Meter Infrastructure/Automatic Meter Reading*), gerenciamento pelo lado da demanda e controle direto e indireto de recursos distribuídos [1], por exemplo. A estratégia de modelagem empregada neste trabalho é a do tipo caixa preta [17], em que o comportamento do equipamento é caracterizado a partir da medição de tensões e correntes terminais. A partir das medições, é feita a montagem de uma matriz de admitância variável com a frequência que posteriormente é aproximada por funções racionais através da técnica de ajuste vetorial (*vector fitting*) [18]. A validação é realizada tanto no domínio da frequência quanto do tempo considerando diferentes condições de carga.

2.0 - TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

O transformador de distribuição abordado neste estudo, tipicamente aplicado em zonas rurais no Brasil, está ilustrado na Figura 2 (a). O equipamento é monofásico de 10 kVA, 7967 kV / 240-120 V com derivação central no enrolamento de baixa tensão. Com quatro terminais acessíveis, o terminal de média tensão é referido como terminal 1, os terminais de baixa tensão como 2 e 3, com tensões simétricas, e um terminal neutro solidamente aterrado como N, conforme o diagrama esquemático ilustrado na Figura 2 (b).

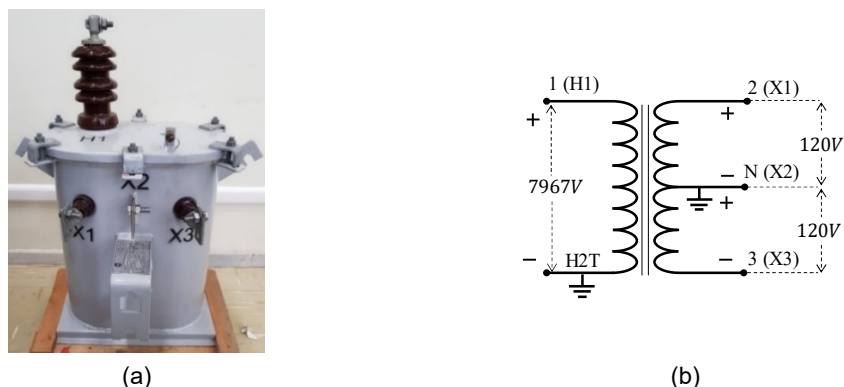


Figura 2 - (a) Transformador de distribuição monofásico de 10 kVA; (b) diagrama esquemático.

3.0 - MODELAGEM DO TRANSFORMADOR

A modelagem do transformador pode ser classificada de acordo com a disponibilidade de informação das características construtivas do equipamento. Caso o modelo faça uso exclusivo de informações construtivas e de projeto do transformador (materiais, dimensões e disposição de núcleo, enrolamentos e carcaça), sem depender de qualquer dado de medição, diz-se que este é do tipo caixa branca. Caso não se disponha desse tipo de informação, o modelo resultante é obtido exclusivamente a partir de medições realizadas em seus terminais, sendo

denominado tipo caixa preta. Finalmente, se o modelo fizer uso combinado tanto de dados de medição quanto de características construtivas do equipamento, diz-se que ele é do tipo caixa cinza [17]. Pela indisponibilidade de informações das características internas do transformador abordado neste trabalho, o levantamento do modelo é baseado na estratégia caixa preta.

2.1 Modelagem caixa preta

A caracterização do comportamento terminal do transformador desse estudo é realizada através da matriz de admitância na faixa de frequência de 3 kHz a 148,5 kHz, que é regulamentada pelo CENELEC [19], [20]. Cada elemento da matriz de admitância (Y) estabelece uma relação entre tensões (V) e correntes (I) medidas nos terminais do transformador como mostrado na equação (1). Para o transformador em estudo (Figura 1), que possui 3 enrolamentos, a matriz de admitância possui dimensão 3x3, como indicado na equação (2).

$$I = YV \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

A matriz de admitância deve ser capaz de reproduzir o comportamento do transformador tanto nas condições em que os terminais se encontram em curto-circuito quanto a vazio. Por isso, no modelo proposto neste trabalho, os elementos externos à diagonal principal da matriz foram modificados a fim de incluir as relações de transferência de tensão. Considerando que a matriz de admitância é perfeitamente simétrica, isto é, que $y_{ij} = y_{ji}$, é possível reformular os elementos da matriz como segue na equação (3).

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{33}t_{32}t_{31} - y_{22}t_{21} & y_{33}(t_{32}t_{21} - t_{31}) \\ y_{33}t_{32}t_{31} - y_{22}t_{21} & y_{22} & -y_{33}t_{32} \\ y_{33}(t_{32}t_{21} - t_{31}) & -y_{33}t_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Nessa equação, t_{32} é a relação entre a tensão medida nos terminais 3 e 2 para aplicação de tensão senoidal no terminal 2 assumindo o terminal 1 em curto circuito, t_{31} é a relação entre a tensão medida nos terminais 3 e 1 para aplicação de tensão senoidal no terminal 1 assumindo o terminal 2 em aberto, e t_{21} é a relação entre a tensão medida nos terminais 2 e 1 para aplicação de tensão no terminal 1 considerando o terminal 3 aberto.

2.2 Medições da resposta em frequência

A medição da resposta em frequência do transformador foi realizada por um sistema automatizado de medição desenvolvido no LRC-UFGM através da aplicação de tensões senoidais na faixa de 3 - 148,5 kHz. Nas medições foram registrados os elementos y_{11} , y_{22} , y_{33} e as tensões transferidas t_{32} , t_{31} , t_{21} . Esses parâmetros foram posteriormente inseridos na equação (3) para a determinação da matriz de admitância. A magnitude e a fase dos elementos de Y estão apresentadas na Figura 3(a) e na Figura 3(b), respectivamente.

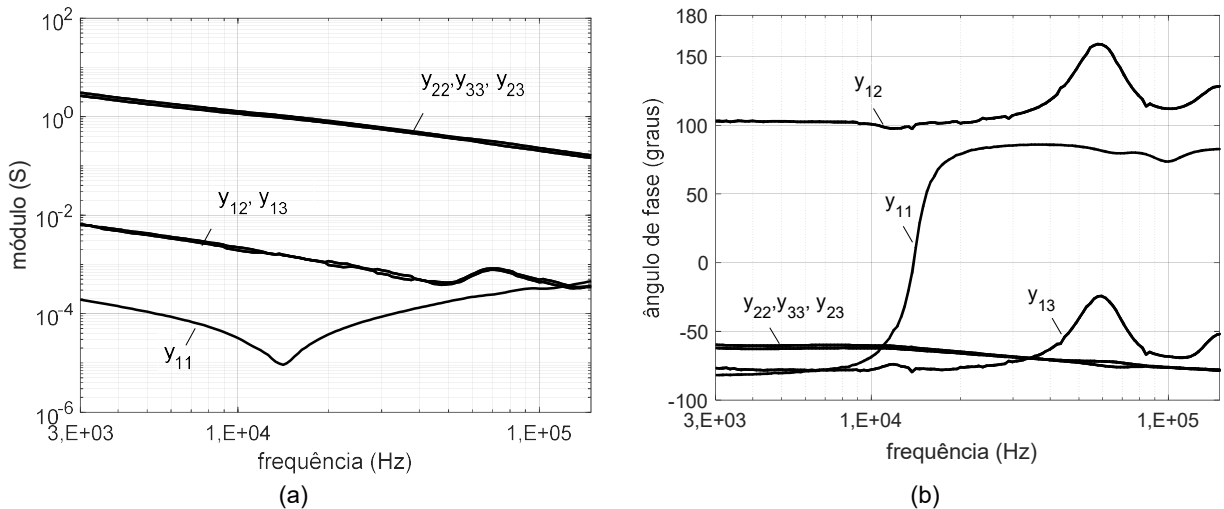


Figura 3 - Magnitude (a) e fase (b) dos elementos calculados a partir das medições da matriz Y .

2.3 Representação matemática dos elementos de \mathbf{Y}

O comportamento dos elementos da matriz de admitância no domínio da frequência deve ser representado matematicamente com o intuito de determinar um modelo que possa ser empregado em simulações nos domínios da frequência e do tempo. Neste trabalho, os elementos de \mathbf{Y} foram ajustados através de funções racionais com o intuito de obter um modelo em espaço de estados. A partir dessa representação, é possível determinar um circuito equivalente para o transformador. Neste trabalho, a técnica escolhida para a síntese é a técnica de ajuste vetorial [14], [16], [17], que garante um modelo estável e que vem sendo utilizado com sucesso na modelagem de transformadores para estudos transitórios [13]. Cada elemento da matriz de admitância do transformador é representado através de funções racionais com saída tanto na forma de polos e resíduos quanto na forma de espaço de estados, como mostrado nas equações (4) e (5), respectivamente.

$$\mathbf{Y}(s) = \sum_{m=1}^N \frac{\mathbf{R}_m}{s - a_m} + \mathbf{D} + s\mathbf{E} \quad (4)$$

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} + s\mathbf{E} \quad (5)$$

Nas equações (4) e (5), s é a variável de Laplace, \mathbf{R}_m representa a matriz de resíduos para cada polo, a_m é o polo (real ou complexo conjugado), N é o número total de polos e \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} e \mathbf{E} são matrizes com dimensões $3N \times 3N$, $3N \times N$, $3N \times N$, 3×3 , 3×3 , respectivamente.

Como o transformador possui um comportamento passivo, o modelo proposto também deve conservar esta característica. Por isso, a etapa de passividade, proposta em [21], deve ser incluída no levantamento do modelo caso esta restrição seja violada. A partir do ajuste obtido pelo método de ajuste vetorial, é possível obter circuitos RLC como aquele ilustrado na Figura 4(a), que devem ser conectados de acordo com a topologia do circuito π equivalente da Figura 4(b) [20], [22].

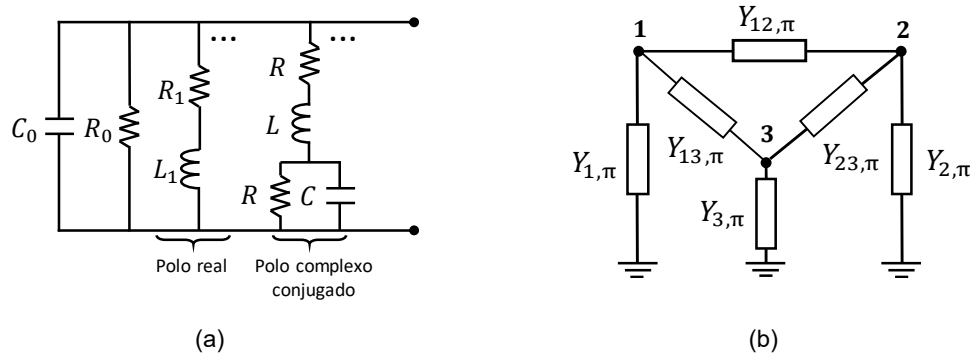


Figura 4 - (a) Circuito genérico de cada ramo do circuito pi equivalente, adaptado de [22] e (b) a topologia do circuito π equivalente, adaptado de [20].

4.0 - RESULTADOS

3.1 Circuito equivalente

Todos os elementos da matriz \mathbf{Y} foram aproximados com um único conjunto de 5 polos, sendo três polos reais e dois polos complexos conjugados. Esse número de polos foi escolhido com base no menor valor que conseguisse reproduzir o comportamento do transformador de forma satisfatória nos domínios do tempo e da frequência. Também, foi necessário garantir a passividade do modelo utilizando a estratégia proposta em [21].

Na Figura 5 estão representados os resultados da magnitude e fase dos elementos ajustados em comparação com os valores medidos. O modelo implementado requereu, em cada ramo do circuito π equivalente ilustrado na Figura 4(b), um ramo puramente resistivo, um puramente capacitivo, três ramos RL série associados aos polos reais, e um ramo RLC associado a polos complexos conjugados. Esse circuito foi implementado no programa ATP (*Alternative Transients Program*), sendo avaliado através da aplicação de diferentes formas de onda de tensão considerando diferentes condições terminais.

Como se observa na Figura 5, a concordância entre as curvas ajustadas (linha tracejada vermelha) e medidas (linha contínua preta) é satisfatória, sendo observado um maior desvio somente nos ângulos de fase. Em tese, a qualidade da aproximação poderia ser aprimorada através do incremento no número de polos. No entanto, no caso

particular avaliado nesse trabalho, o incremento de polos foi testado e não foi observado nenhum ganho significativo na resposta do modelo tanto no domínio do tempo quanto da frequência. Além disso, observou-se que quanto maior o número de polos, maior a dificuldade de imposição de passividade ao modelo. Esse aspecto passou a interferir negativamente na resposta do modelo, levando a resultados com maiores divergências em relação aos dados obtidos nas medições.

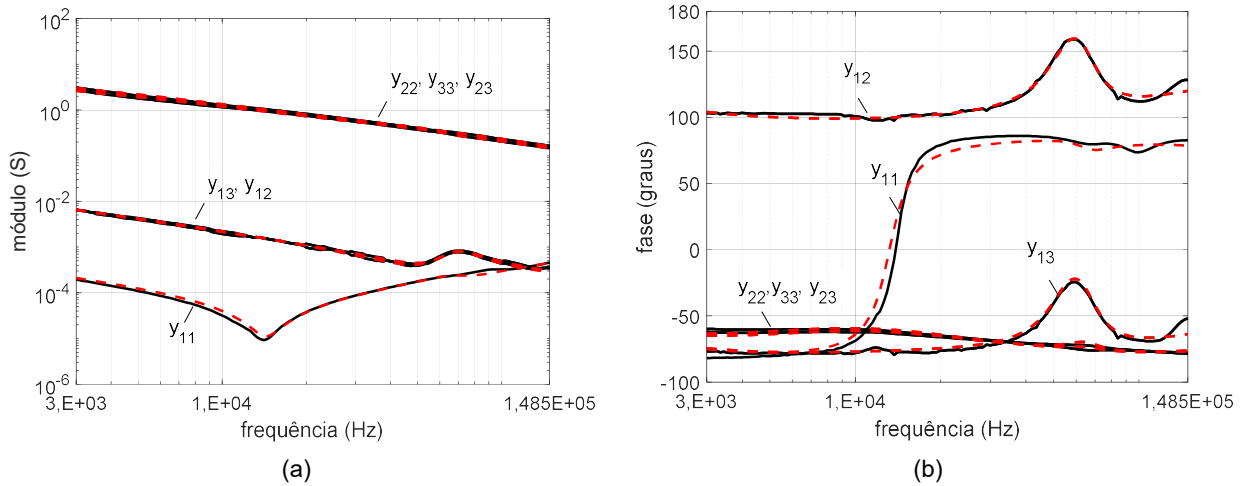


Figura 5 - Magnitude (a) e fase (b) dos elementos ajustados (curvas com linhas tracejadas em vermelho) e calculados (curvas em linha contínua preta) da matriz Y .

3.2 Domínio da Frequência

O modelo obtido foi validado no domínio da frequência através da aplicação de tensões senoidais no terminal 1 do transformador considerando cargas resistivas de 470, 47 ou 4,7 Ω conectadas nos terminais 2 e 3, além da condição em que estes se encontram a vazio. Esses valores de resistência foram escolhidos devido à sua proximidade em relação à impedância de surto de uma linha de transmissão, à impedância de um cabo e à carga nominal do transformador, respectivamente. Com a alimentação no terminal de alta tensão, foram medidas as tensões transferidas para os terminais de baixa tensão. Os resultados apresentados neste trabalho se referem somente às medições realizadas no terminal 2, uma vez que as tensões medidas no terminal 3 se mostraram praticamente idênticas a essas. Na Figura 6(a), está apresentada a tensão transferida para o terminal 2 na faixa do CENELEC em função do valor da carga conectada ao terminal 2, supondo uma carga de 470 Ω no terminal 3. A partir das tensões transferidas medidas, é possível calcular, através da equação (6), a atenuação do sinal transmitido entre os terminais. Nessa equação, $\alpha(\omega)$ é a atenuação, V_o é a tensão no terminal conectado à carga e V_i é a tensão no terminal conectado à fonte. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 6(b).

$$\alpha(\omega) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_o}{V_i} \right) \quad (6)$$

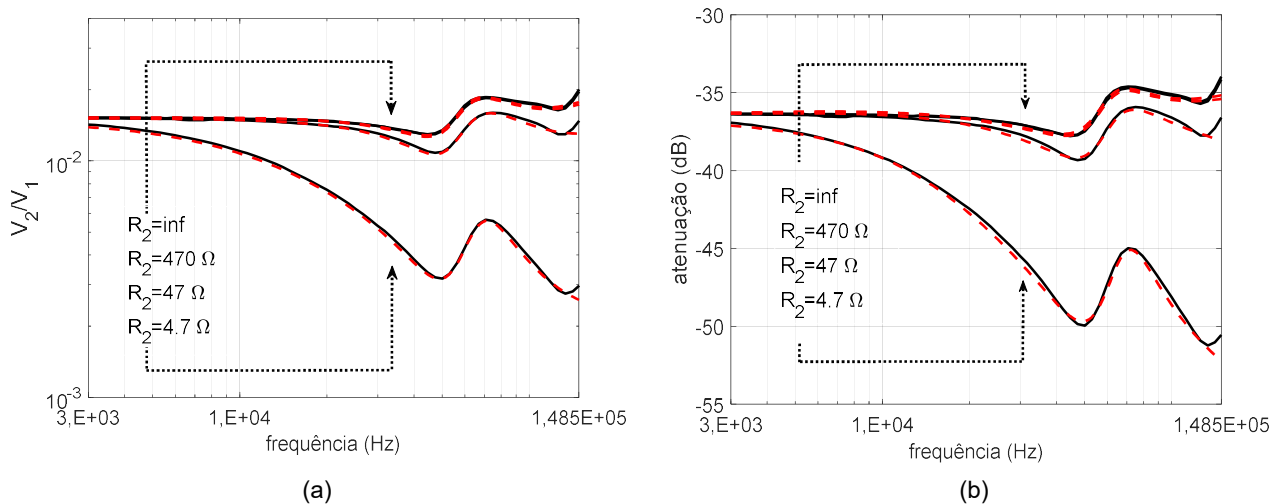


Figura 6 - (a) Tensão transferida; (b) atenuação entre os terminais 1 e 2 calculada a partir das medições (linha preta contínua) e atenuação simulada (linha tracejada vermelha) considerando o terminal 3 conectado a uma resistência de 470 Ω .

A partir da Figura 6, observa-se que os resultados obtidos com o modelo reproduzem adequadamente as medições para todas as condições terminais consideradas, explicitando um comportamento dependente da frequência e variável com a carga conectada ao transformador. Observa-se também que a redução do valor ôhmico da carga determina um aumento na atenuação do sinal, que em todos os casos é de -36,44 dB na região de baixas frequências, consoante com a relação de transformação nominal do transformador. Para a carga de 4,7 Ω conectada ao terminal 2, a atenuação é acentuada bastante variável no intervalo de frequência considerado, diferentemente das demais condições terminais. Para as demais cargas, percebe-se que é possível obter uma leve redução da atenuação do sinal em frequências próximas a 148,5 kHz. Essa faixa de frequência pode, portanto, ser considerada preferencial para a transmissão de sinais PLC na faixa do CENELEC.

3.3 Domínio do tempo

Os modelos de transformador propostos na literatura para avaliação da transferência de sinais de PLC geralmente são validados somente no domínio da frequência. Uma vez que o canal de comunicação PLC possui propriedades estocásticas variantes no tempo, justifica-se uma avaliação adicional do modelo nesse domínio [11], [12]. Os testes no domínio do tempo foram realizados através da aplicação de um sinal impulsivo no terminal de alta tensão capaz de excitar toda a faixa de frequência de interesse com energia uniforme, sendo medidas as tensões transferidas para os terminais secundários do transformador. Um sinal que excita a faixa de 3 kHz a 148,5 kHz de maneira uniforme foi obtido através da função sinc modulada e o sinal resultante está ilustrado na Figura 7.

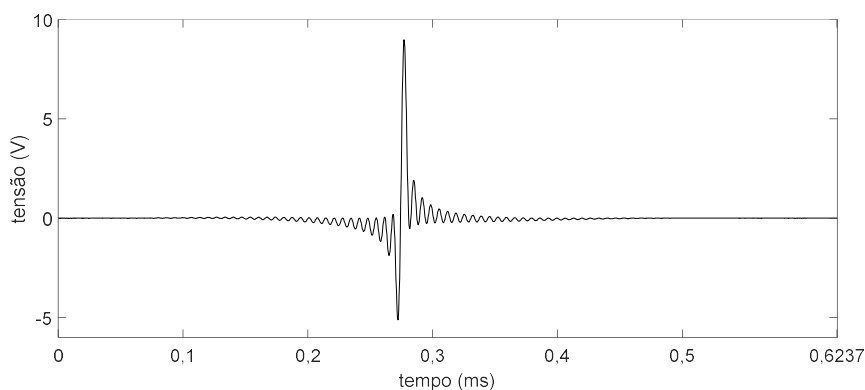


Figura 7 - Sinal de tensão que excita a faixa de 3 kHz a 148,5 kHz

As condições terminais consideradas são as mesmas apresentadas na seção anterior. Os resultados das tensões medidas e simuladas estão apresentados na Figura 8 e se referem ao terminal 2.

O modelo apresentou concordância com as medições para todas as condições terminais verificadas, assim como observado nos resultados obtidos no domínio da frequência, além de demonstrar estabilidade e passividade nas respostas ao sinal impulsivo. Verifica-se que o sinal medido no terminal 2 não apresentou distorções muito significativas em relação ao sinal aplicado no terminal 1 e que a integridade do sinal variou em relação à carga conectada. Assim como observado no domínio da frequência, a tensão transferida apresentou maior atenuação e distorção quanto menor o valor da resistência conectada ao transformador. A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que sinais PLC podem ser efetivamente transmitidos através do transformador desde que se considere uma faixa de frequência de transmissão que preserve ao máximo a integridade do sinal para as diversas condições terminais em que o equipamento possa estar submetido.

5.0 - CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho é propor um modelo de transformador de distribuição monofásico que possa ser empregado na análise da transmissão de dados via PLC na faixa de frequência do CENELEC, 3 a 148,5 kHz. Com base na modelagem caixa preta por matriz de admitância, um circuito equivalente foi obtido através do emprego da técnica de ajuste vetorial.

No domínio da frequência, o modelo proposto demonstrou ser capaz de reproduzir o comportamento do transformador de forma satisfatória para as várias condições terminais consideradas. Foi possível observar que o sinal transferido entre os terminais do transformador é variável com a frequência e com a carga conectada em seus terminais, sendo essa variação mais expressiva para a condição em que a carga de 4,7 Ω está conectada ao terminal 2. Além disso, demonstrou-se ser possível selecionar faixas estreitas de frequência em que a atenuação do sinal é menor que a nominal, o que eventualmente poderia dispensar o uso de acopladores no caso de implantação de tecnologia PLC. Essa situação seria vantajosa por reduzir o custo e a complexidade do sistema a ser implementado, o que seria particularmente importante se for levado em consideração o grande número de transformadores monofásicos instalados em redes de distribuição rurais no Brasil. Nas análises realizadas no domínio do tempo com a aplicação de tensão com característica impulsiva com conteúdo de frequências

representativo de sinais PLC, o modelo demonstrou ser estável e passivo, além de reproduzir satisfatoriamente os dados obtidos em laboratório para todas as condições terminais consideradas.

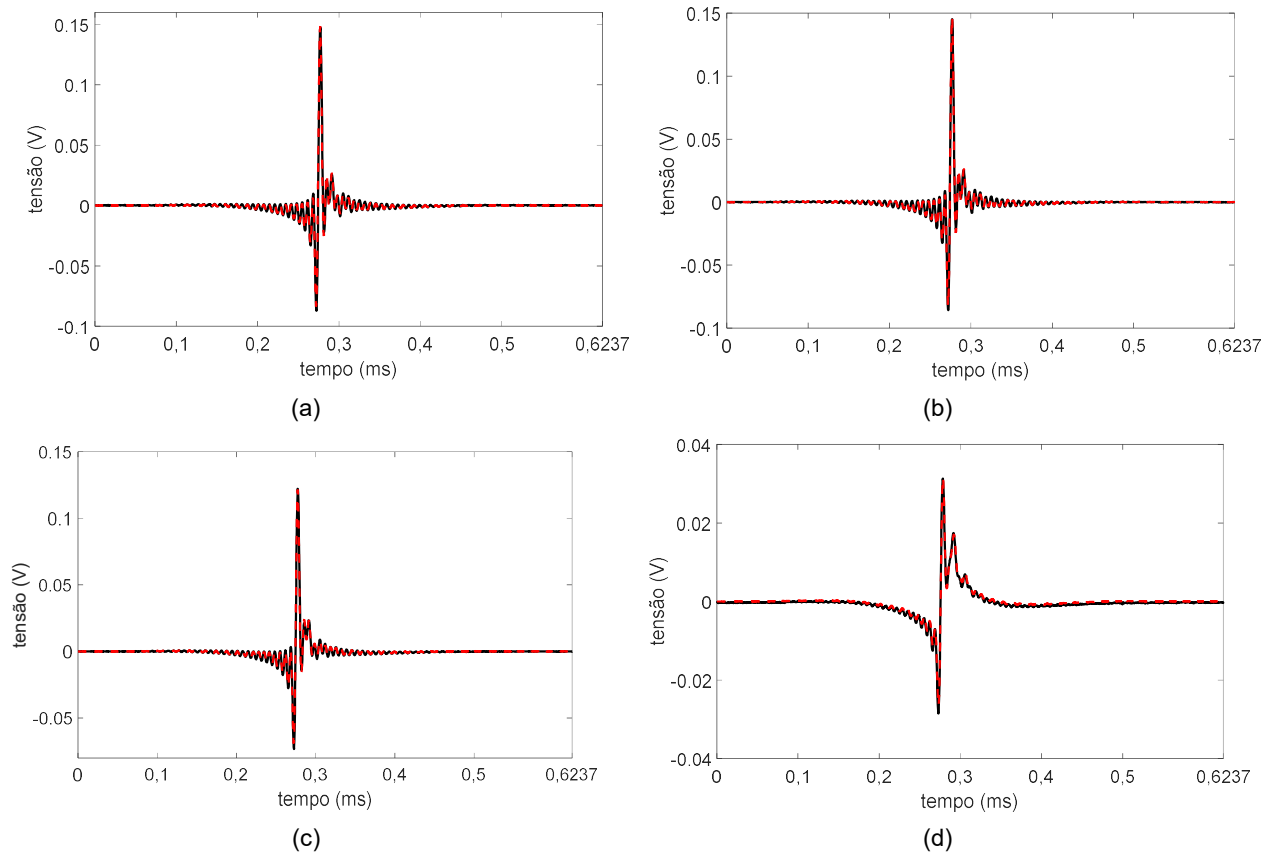


Figura 8 - Tensão medida no terminal 2 (linha contínua preta) e simulada (linha tracejada vermelha) considerando o terminal 2 (a) aberto ou conectado a resistores de (b) 470 Ω , (c) 47 Ω e (d) 4,7 Ω . Em todos os casos, o terminal 3 foi mantido conectado a um resistor de 470 Ω .

6.0 - AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Universidade Federal de Minas Gerais. Teve, também, o apoio financeiro das agências FAPEMIG (TEC-PPM-00280-17) e CNPq (431948/2016-0 e 304117/2016-1). O trabalho dos alunos Denis G. B. Mariano e Luis Matheus B. Camelo foi financiado pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq).

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Galli, A. Scaglione, and Z. Wang, "For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 998–1027, Jun. 2011.
- [2] K. Sharma and L. M. Saini, "Power-line communications for smart grid: Progress, challenges, opportunities and status," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 704–751, Jan. 2017.
- [3] M. Nassar, J. Lin, Y. Mortazavi, A. Dabak, I. Kim, and B. Evans, "Local Utility Power Line Communications in the 3–500 kHz Band: Channel Impairments, Noise, and Standards," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 29, no. 5, pp. 116–127, Sep. 2012.
- [4] T. A. Papadopoulos, A. I. Chrysochos, A. I. Noutsilis, and G. K. Papagiannis, "Simplified measurement-based black-box modeling of distribution transformers using transfer functions," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 121, pp. 77–88, Apr. 2015.
- [5] A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Guaiana, D. Di Cara, N. Panzavecchia, and G. Tine, "Experimental investigation on PLC signal crossing of power transformers," in *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 2014, pp. 1235–1239.
- [6] K. Razavian and J. Yazdani, "Utilizing beyond CENELEC standards for smart grid technology," in *2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, 2011, pp. 1–6.
- [7] R. Lefort, R. Vauzelle, V. Courtecuisse, N. Idir, and A.-M. Poussard, "Influence of the MV/LV Transformer Impedance on the Propagation of the PLC Signal in the Power Grid," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 3, pp. 1339–1349, Jun. 2017.
- [8] C. J. Kikkert, "MV to LV transformer PLC bypass coupling networks for a low cost Smart Grid rollout," in

- 2011 *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 2011, pp. 1–6.
- [9] IEEE, “Standard for Low-Frequency (less than 500 kHz) Narrowband Power Line Communications for Smart Grid Applications,” *IEEE Std 1901.2-2013*. pp. 1–269, 2013.
- [10] S. Galli and T. Lys, “Next generation Narrowband (under 500 kHz) Power Line Communications (PLC) standards,” *China Commun.*, vol. 12, no. 3, pp. 1–8, Mar. 2015.
- [11] Z. Tao, Y. Xiaoxian, Z. Baohui, N. H. Xu, F. Xiaoqun, and L. Changxin, “Statistical Analysis and Modeling of Noise on 10-kV Medium-Voltage Power Lines,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1433–1439, Jul. 2007.
- [12] M. Zimmermann and K. Dostert, “Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications,” vol. 44, no. 1, pp. 377–386, 2002.
- [13] CENELEC, “Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz - Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances.” CENELEC - EN 50065-1, 2011.
- [14] A. Cataliotti, V. Cosentino, D. Di Cara, and G. Tine, “Oil-Filled MV/LV Power-Transformer Behavior in Narrow-Band Power-Line Communication Systems,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 61, no. 10, pp. 2642–2652, Oct. 2012.
- [15] L. Marrón, X. Osorio, and A. Sendin, “Low Voltage Feeder Identification for Smart Grids with Standard Narrowband PLC Smart Meters,” *2013 IEEE 17th Int. Symp. Power Line Commun. Its Appl.*, pp. 120–125, 2013.
- [16] D. Borovina, A. Mujcic, M. Zajc, and N. Suljanovic, “Investigation of Narrow-Band Power-Line Carrier Communication System Performance in Rural Distribution Grids,” pp. 61–67, 2018.
- [17] Cigré, *Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System*, no. April. 2014.
- [18] B. Gustavsen and A. Semlyen, “Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061, Jul. 1999.
- [19] B. Gustavsen, “Wide Band Modeling of Power Transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 1, pp. 414–422, Jan. 2004.
- [20] A. Morched, L. Marti, and J. Ottevangers, “A high frequency transformer model for the EMTP,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 3, pp. 1615–1626, Jul. 1993.
- [21] B. Gustavsen and A. Semlyen, “Enforcing passivity for admittance matrices approximated by rational functions,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 97–104, 2001.
- [22] B. Gustavsen, “Computer Code for Rational Approximation of Frequency Dependent Admittance Matrices,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, no. 6, p. 64, 2002.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Lara Hoffmann Sathler – Graduada em Engenharia Elétrica com habilitação em Sistemas de Potência pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2016. Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) com pesquisas relacionadas ao sistema de distribuição de energia elétrica (2019). Atualmente trabalha na FITec (Fundação de Inovações Tecnológicas) no desenvolvimento de projeto P&D ANEEL na área de gerenciamento de recursos energéticos distribuídos. Áreas de interesse: Sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, transformadores e geração distribuída.



Alberto De Conti – Possui graduação (1999), mestrado (2001) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Em 2006, desenvolveu atividades de pós-doutorado como pesquisador visitante na Universidade de Uppsala, Suécia. Desde 2009 é Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG e membro do permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica dessa mesma instituição. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia, atuando principalmente nos seguintes temas: transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos, modelos de componentes de sistemas elétricos para estudos em altas frequências, descargas atmosféricas (proteção de sistemas elétricos e modelagem física do fenômeno), eletromagnetismo aplicado e compatibilidade eletromagnética. É bolsista de produtividade nível 2 do CNPq e bolsista do programa Pesquisador Mineiro (PPM) da FAPEMIG.

Luís Matheus Barbosa Camelo – Cursa Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com previsão de formatura para dezembro de 2020. Atualmente é bolsista de Iniciação Científica, trabalhando com a medição de características terminais de transformadores de potência em ampla faixa de frequências. Áreas de interesse: Sistemas elétricos de potência, com enfoque para transformadores e fontes alternativas de energia.

Denis Guilherme Batista Mariano – Possui ensino médio e técnico profissionalizante pelo Colégio Técnico da UFMG na área de eletrônica (2011) e atualmente cursa graduação em Engenharia de Controle e Automação (2014) na UFMG. Participou de um projeto de iniciação científica de modelagem de transformadores de potência e atualmente participa de um projeto de detecção e diagnóstico de falhas em tempo real apoiado pela Petrobrás.