

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA LINHA DE TRANSMISSÃO PARA TRANSMISSÃO DE DADOS

Karine B. Carbonaro, Gilberto A. Carrijo, Yuri G. Santos e Cícero B. Oliveira
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Patos de Minas – Minas Gerais,
karine@eletrica.ufu.br, gilberto@ufu.br

Resumo - Neste artigo apresenta-se uma avaliação do fio elétrico utilizado como canal de comunicação para a transmissão de dados. Desenvolveu-se um estudo analítico e experimental da atenuação quando se varia a frequência. Os resultados obtidos demonstram que este canal é hostil e, portanto afeta a taxa de transmissão dos modems PLC (*Power Line Communications*).

Palavras-Chave - PLC, atenuação, taxa de dados.

EVALUATION OF THE CHANNEL FOR THE DATA TRANSMISSION

Abstract - This article presents an evaluation of the power supply cable for the data transmission. A mathematical and realistic study about attenuation signal when the frequency values vary. The results showed that the channel is a very harsh and then the communication rate of the PLC modems is smaller than the communication rate typical maximum of the 500Mbps.

Keywords - PLC, attenuation, data rate.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, observou-se um interesse crescente na utilização das redes de distribuição de energia elétrica como uma alternativa para o fornecimento de diversos serviços de telecomunicações: aplicações de voz, vídeo e dados.

PLC é um sistema de telecomunicações através de rádio frequências que utiliza como meio de transporte a rede elétrica de distribuição. O princípio básico de funcionamento está na frequência dos sinais gerados, no sistema PLC o sinal de dados é transmitido na faixa de 1 a 30 [MHz], e o sinal de energia elétrica é transmitido em 50/60 [Hz]. Desta forma, os dois sinais podem utilizar o mesmo meio sem que um sinal interfira no outro [1].

Os dois seguimentos de tecnologia PLC são apresentados na Figura 1.

Last Mile Access (outdoor): É a rede de acesso à residência que conecta os usuários com os provedores de acesso. A faixa de frequência é de 1 [MHz] a 10/13 [MHz].

Last Inch Access (indoor): É a rede dentro das

residenciais, comerciais e industriais. A faixa de frequência é de 10/13 MHz a 30 MHz.

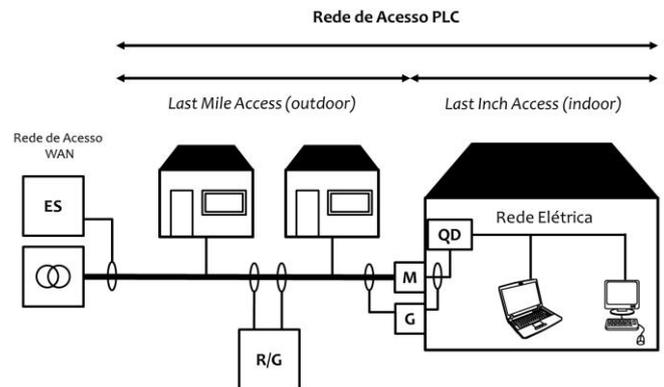


Fig. 1. Visão geral da rede de acesso PLC.

A rede PLC difere nos quesitos de topologia, estrutura e propriedades físicas dos meios convencionais como: par trançado, coaxial ou cabos de fibra óptica. Neste artigo, avaliam-se as características do fio elétrico e a sua função de transferência porque este será utilizado como canal de comunicação para a transmissão de dados.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira. A Seção II apresenta os parâmetros propostos na literatura para a avaliação e análise do fio elétrico. Na Seção III apresentam-se os resultados encontrados em simulação e experimentos realizados em laboratório. Por fim, as conclusões deste trabalho são apresentadas na Seção IV.

II. TEORIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A Figura 2 ilustra o modelo da linha de transmissão destacando os parâmetros primários.

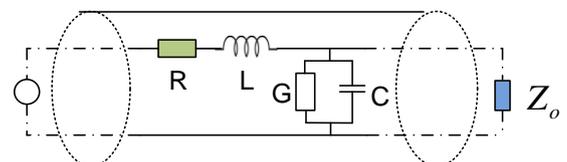


Fig. 2. Modelo da linha de transmissão.

A. Parâmetros primários da LT

Os parâmetros por unidade de comprimento são independentes do tempo e da posição ao longo na linha. Eles são determinados em função das dimensões físicas do corte transversal da linha que, caso variem ao longo de seu eixo,



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

implicarão em parâmetros que também variarão com a posição analisada.

De acordo com a teoria de linha de transmissão (LT – *Line Transmission*) apresentada em [2, 3] os parâmetros primários definidos são: capacitância, indutância, condutância e resistividade.

Capacitância (C') é a medida da habilidade de um capacitor em reter carga expressa por:

$$C' = \frac{\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\ln\left(\frac{d}{a}\right)} \text{ [F/km]} \quad (1)$$

Em que:

a - raio do condutor.

d - distância entre os condutores.

ϵ_0 - permissividade no espaço livre.

ϵ_r - permissividade relativa do polietileno.

A definição de permissividade relativa efetiva inclui o efeito do dielétrico não homogêneo entre os fios paralelos [4].

Indutância (L'), capacidade de um elemento armazenar energia através de um campo magnético, e também de recuperar essa energia e é definida como:

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{d}{a}\right) \text{ [H/km]} \quad (2)$$

Em que:

μ_0 - permeabilidade no espaço livre.

Condutância (G') é a propriedade que um condutor apresenta a passagem da corrente elétrica, conduzindo eletricidade. Este parâmetro é definido de acordo com [4].

$$G' = \frac{\pi \sigma_d}{\ln\left(\frac{d}{a}\right)} \text{ [S/km]} \quad (3)$$

Em [2] considera-se o efeito pelicular (*Skin effect*) que ocasiona diminuição da densidade de corrente no interior do condutor e o aumento da corrente na coroa mais externa. Este efeito aumenta a resistência aparente de um condutor elétrico, devido à diminuição da área efetiva do condutor e, portanto, a resistência superficial (R_s) dos condutores deve ser definida da seguinte forma:

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi \mu_c}{\sigma_c}} \sqrt{f} \quad (4)$$

Em que:

σ_c - condutividade do cobre.

μ_c - permeabilidade do cobre.

No sistema PLC, segundo a referência [5] a transmissão é realizada em alta frequência, portanto, a resistividade (R') da linha de dois fios relaciona-se com a variável frequência como expressa na equação (4).

$$R' = \frac{R_s}{a\pi} \text{ [\Omega/km]} \quad (5)$$

B. Parâmetros secundários da LT

Na análise da linha de transmissão de dois fios com pequenas perdas e dielétricos homogêneos devem-se avaliar também os parâmetros secundários [6]. Para determinar estes parâmetros considerou-se a aproximação para altas frequências porque o PLC opera na faixa de MHz. Portanto, a impedância característica (Z_0) é calculada de acordo com a equação (6).

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}}{C'} = \frac{120\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{d}{a}\right) \cong \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (6)$$

Outro parâmetro de análise do cabo é a impedância característica complexa (Z_L). De acordo com a equação (7) [7], ela é determinada a partir dos valores calculados a priori da: capacitância, indutância, resistência e condutância.

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (7)$$

Os valores da capacitância, indutância, resistência e condutância também são utilizados para se determinar a constante de propagação (γ) [8] na equação (8).

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (8)$$

Em que:

α - constante de atenuação [Neper/km].

β - constante de fase [rad/km].

As equações supracitadas definem a função de transferência de uma linha de comprimento l ($H_l(f, l)$).

$$H_l(f, l) = e^{-\alpha l} e^{-j\beta l} \quad (9)$$

A resposta em amplitude levará a determinação da atenuação (A) crescente com a distância e a frequência definida na equação (10).

$$A \cong 8,686.l.\alpha(f) \text{ [dB]} \quad (10)$$

Já a resposta em fase levará a determinação do atraso de grupo específico $\left(\frac{\tau_g}{l}\right)$ como na equação (11).

$$\frac{\tau_g}{l} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\beta}{df} \text{ [s/km]} \quad (11)$$

III. AVALIAÇÃO ANALÍTICA

Nesta seção apresenta-se um estudo da propagação de ondas na linha de transmissão constituída de dois fios ilustrada na Figura 3.

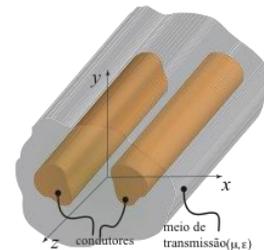


Fig. 3. Linha de transmissão de dois fios [11].

As características do fio elétrico utilizado na montagem estrutural da rede elétrica experimental para os testes da tecnologia PLC segue a norma NBR (Norma Brasileira) 13.248. A especificação detalhada é descrita na Tabela I de acordo com as características apresentadas no site do fabricante.

Especificação	Valor
Seção	2,50[mm ²]
Isolação	0,80[mm]
Diâmetro externo	3,30[mm]
Diâmetro interno	1,80[mm]

O valor de seção determina um raio de 0,9mm e mediu-se a distância entre os condutores de 10[mm]. As constantes utilizadas foram: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}[H/m]$, $\epsilon_0 = 8,8542[pF/m]$, $\epsilon_r = 2,26$, $\sigma_c = 5,8.10^7[S/m]$ e $\mu_c = 0,9999906\mu_0$. Os resultados da aplicação destes valores nas equações dos parâmetros primários (1), (2), (3), (4) e (5) são apresentados na Tabela II.

Tabela II – Parâmetros primários da linha de dois fios.

Parâmetro	Valor obtido
C'	26,012[pF/m]
L'	0,9667[μH/m]
R'	$9,3093.10^{-5} \cdot \sqrt{f} [\Omega/m]$
G'	1,9498[ps/m]

O fio apresenta impedância característica definida na equação (6) de aproximadamente 192Ω e impedância característica complexa determinada a partir dos valores calculados a priori da: capacitância, indutância, resistência e condutância de $(1,3447 - i.1,3308).10^3\Omega$, de acordo com a equação (7).

Para fins de compreensão da influência do comprimento do fio elétrico na atenuação propõe-se que o cálculo da equação (10) seja realizado em cinco cenários de redes de tamanhos distintos. Observando o gráfico ilustrado na Figura 4, conclui-se que o aumento do comprimento ocasiona aumento da atenuação na rede. A curva diferenciada representa a distância máxima determinada pelo fabricante do adaptador PLC.

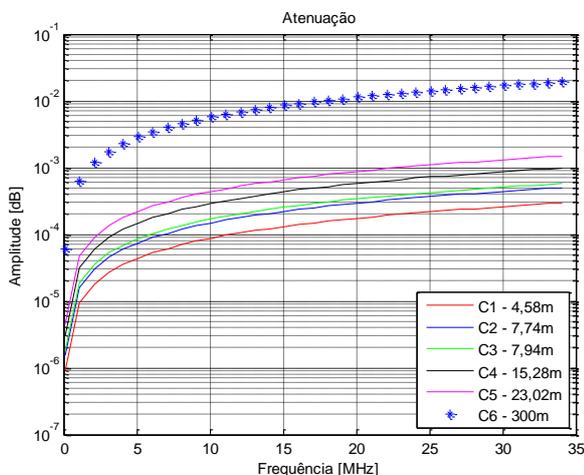


Fig.4 – Atenuação pela frequência com a variação do comprimento da linha de transmissão.

A. Avaliação experimental do fio elétrico

A verificação da atenuação na rede PLC experimental seguiu a topologia ilustrada na Figura 5 e dividida em duas partes:

Circuito para injetar o sinal: No ponto Tx, transmissor, a tomada conecta-se ao circuito formado por indutor, capacitor e transformador de RF (Rádio Frequência). Estas conexões caracterizam o circuito acoplador para a transmissão de dados. Com o objetivo de evitar que o sinal da rede elétrica na frequência de 60[Hz] retorne para o equipamento gerador queimando-o e induzir o sinal gerado na rede elétrica. O gerador de ondas arbitrárias (AGILENT 33500B) conecta-se apenas ao transformador e gerou sinais com amplitude máxima em 10[Volts] e frequência variando de 1 a 30[MHz].

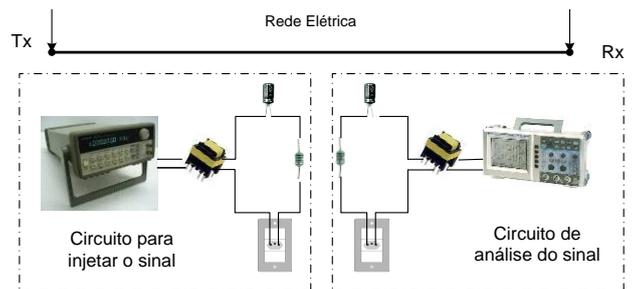


Fig. 5. Circuito de análise da atenuação na rede elétrica.

Circuito de análise do sinal: No ponto Rx, a coleta das medidas foi feita através do osciloscópio (MINIPA MO-2200 de 200[MHz]). Neste ponto, utilizou-se o circuito acoplador com a função de filtro, permitindo a passagem dos sinais nas frequências de 1 até 30[MHz]. Este filtro eliminou o sinal da rede elétrica (110[V] e 60[Hz]). Durante a leitura dos valores no osciloscópio houve variações no valor da tensão recebida. Isso ajuda a explicar a diferença entre os valores simulados e experimentais.

B. Análise da taxa de transmissão na rede elétrica

No laboratório montou-se uma rede elétrica com a topologia física apresentada na Figura 6.

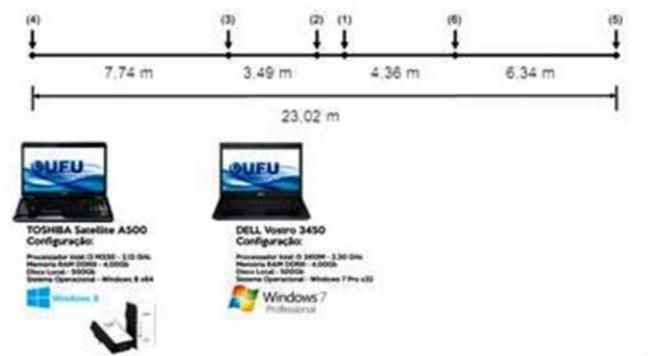


Fig. 6. Rede experimental proposta para os testes.

Na transmissão de dados utilizaram-se os modems PLC com as seguintes características: 500[Mbps] (62,5[MBps]), plug-and-play, atinge até 300 metros e possui QoS (Quality of Service).

Para os experimentos utilizaram-se dois cenários, apresentados na Figura 6.

C1 – ponto transmissor e receptor, (3-1), com distância física de 4,58 [m];

C5 - ponto transmissor e receptor, (4-5), com distância física de 23,02 [m];

O objetivo foi criar uma rede ethernet e verificar a influência da atenuação na taxa de transmissão neste cenário. Ressalta-se que a rede proposta foi constituída com o fio elétrico avaliado nas seções anteriores.

Nos experimentos efetuados variou-se o tamanho do arquivo de vídeo de 800MB para 1,94GB. Os resultados são apresentados nas Tabelas (III) e (IV), respectivamente.

Tabela III – Resultados obtidos na transferência do arquivo de 800[MB].

Parâmetro	C1	C5
Tempo decorrido	1m: 11s	1m: 12s
T.T média [MB/s]	11,60	11,56
T.T máxima [MB/s]	11,92	11,84

O aumento da distância entre os pontos de transmissão e recepção não influenciou significativamente no tempo de transferência do arquivo de 800[MB].

Tabela IV – Resultados obtidos na transferência do arquivo de 1,94[GB].

Parâmetro	C1	C5
Tempo decorrido	1m: 11s	3m: 03s
T.T média [MB]	11,6	11,5
T.T máxima [MB/s]	11,92	11,9

Ao dobrar o tamanho do arquivo, 1,94[GB] que foi transferido na rede demonstrou que o aumento da distância influenciou no tempo de transferência do arquivo.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentou-se um estudo avaliativo do fio elétrico que foi utilizado como canal de transmissão de dados. Na avaliação dos principais parâmetros do fio elétrico verificou-se que este meio atenua o sinal enviado na faixa de frequência de 1MHz a 30MHz, faixa determinada para a transmissão da tecnologia PLC. Baseado nos resultados obtidos nos experimentos em laboratório, conclui-se que a taxa de transferência de dados está adequada uma rede ethernet.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao CNPq pela bolsa de iniciação científica fornecida a um dos autores.

REFERÊNCIAS

[1] M. V. Ribeiro, “*Técnicas de processamento de sinais aplicados à transmissão de dados via rede elétrica e ao monitoramento da qualidade de energia*”, tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.

[2] B. M. Nataros. *Eletromagnetismo*. Tradução de Lara Freitas. Revisão técnica de José Feliciano Adami. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

[3] M. Zimmermann, K. Dostert. *A multi-path signal propagation model for the power line channel in the high frequency range*. Proceedings of the 3 International symposium on power-line communications and its applications. Março, 1999. 45 -51.

[4] F. J. Canete. et.al. *Modeling and evaluation of the indoor power line transmission medium*. IEEE Communications magazine, 41 – 47, 2003.

[5] V. K. Chandna. *Effect of varying topologies on the performance of broadband over power line*. IEEE transactions on power delivery, vol. 25, no. 4, Outubro 2010.

[6] D. M. Pozar. *Microwave engineering*, 3ª ed, Wiley, 2004.

[7] O. G. Hooijen. *A channel model for the low-voltage power line channel, measurement and simulation results*. Proceedings of the 1997 International Symposium on Power Line Communications and its Applications, Essen, Alemanha, 1997, 51 – 56.

[8] M. Zimmermann, K. Dostert. *Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications*. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, vol. 44, no.1, Fevereiro 2002.

[9] DOSTERT, K.. Powerline Communications. Freiburger, Germany: Prentice Hall. 2001.

[10] HENDRIK, C.F. et.al. Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband communications over power lines. USA: John Wiley & Sons, 2010.

[11] E. Fontana. *Eletromagnetismo, capítulo 9: linhas de transmissão*. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.