



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GTL/30
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XV

GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS - GTL

USO DE LINHAS ARTIFICIAIS PARA AVALIAR O DESEMPENHO DE TRANSCÉPTORES PLC

**Célio F. Barbosa(*)
FUNDAÇÃO CPQD**

**Eduardo F. da Costa
FUNDAÇÃO CPQD**

**Flávio E. Nallin
FUNDAÇÃO CPQD**

**Carlos Alberto M. Leitão
CEMIG**

RESUMO

Esse artigo apresenta o desenvolvimento de linhas artificiais para simular uma rede elétrica de baixa tensão como meio de propagação de sinais de comunicação através de ondas portadoras (PLC). Inicialmente são calculados os parâmetros da linha artificial e definidos os critérios para representar as cargas. Em seguida é descrita a implementação das células de linha artificial, as quais visam representar as configurações usuais de rede de baixa tensão. Finalmente, são apresentados os resultados de testes com transceptores baseados no chip ST 7590, demonstrando o potencial da utilização de linhas artificiais na avaliação do desempenho dos transceptores PLC.

PALAVRAS-CHAVE

Linha Artificial, Power Line Carrier, Smart Grid, Transceptor PLC

1.0 - INTRODUÇÃO

A transmissão de sinais de comunicação através de linhas de transmissão de energia elétrica é conhecida por Power Line Carrier (PLC) (1), onde uma onda portadora é modulada e transmitida através da linha de transmissão. Recentemente, esta técnica tem recebido grande interesse das concessionárias de energia interessadas na automação e no gerenciamento de suas redes, com aplicações que incluem a supervisão da geração distribuída e a medição remota do consumo de energia (2)-(4).

Embora a comunicação PLC seja uma tecnologia consolidada nas linhas de transmissão, a sua aplicação em redes de distribuição enfrenta diversos obstáculos de ordem técnica. Por exemplo, a configuração da rede com diversas ramificações e fins de linha gera inúmeros pontos de reflexão de onda, resultando no estabelecimento de ondas estacionárias que anulam o sinal PLC em alguns trechos da rede. Também a carga distribuída ao longo da rede impõe séria atenuação e distorção no sinal de comunicação, restringindo o alcance dos transceptores. Além disso, a disseminação de cargas não-lineares (e.g., equipamentos eletrônicos) gera significativo nível de ruído no canal de comunicação, reduzindo a relação sinal / ruído para os transceptores. Como resultado, embora as tecnologias PLC funcionem bem em testes laboratoriais, frequentemente essas tecnologias não apresentam o desempenho esperado em campo.

Este artigo apresenta uma técnica que foi desenvolvida para a avaliação do desempenho de transceptores PLC em laboratório, visando reproduzir as principais características de instalações reais. Essa técnica utiliza linhas artificiais PLC, as quais representam as características físicas das redes elétricas no que diz respeito à propagação de sinais de comunicação. As linhas artificiais também permitem a simulação das cargas distribuídas ao longo da rede, assim como a introdução de ruído no canal de comunicação. Cada módulo da linha artificial representa um comprimento específico de linha, o que permite configurar as diversas topologias de rede existentes na prática.

(*) Rua Dr. Ricardo Benetton Martins, s/n – Prédio 13 – CEP 13.086-902 Campinas, SP, – Brasil
Tel: (+55 19) 3705-6258 – Fax: (+55 19) 3705-6120 – Email: grcelio@cpqd.com.br

As linhas artificiais foram originalmente desenvolvidas para simular linhas telefônicas, como o trabalho realizado por Nyquist (5) que, ao lado de Shannon, é considerado um dos criadores da teoria das telecomunicações. Outras linhas artificiais foram desenvolvidas para simular cabos coaxiais, cabos submarinos e mesmo a propagação de ondas de rádio. De maneira análoga, o desenvolvimento de linhas artificiais para representar as características de propagação de sinais em linhas de energia elétrica é uma decorrência natural do uso de sistemas PLC. Curiosamente, não se encontra na literatura técnica nenhuma referência ao uso de linhas artificiais para sistemas PLC, embora seja evidente que o canal de comunicação constitui a principal fonte de problemas para essa tecnologia. Dessa forma, a linha artificial apresentada nesse artigo constitui uma inovação tecnológica que foi devidamente preservada através de pedido de patente depositado no INPI (6).

O artigo é organizado como segue. Inicialmente é apresentada a teoria que permite a representação do meio de transmissão através da associação de componentes com parâmetros concentrados, assim como o artifício utilizado para representar as cargas conectadas na rede. As linhas artificiais são então construídas e são descritos os testes realizados visando avaliar o desempenho de transceptores PLC baseados no chip ST 7590 (7), que opera com modulação OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) (8), (9) e no padrão Prime (10).

Este trabalho foi financiado pela Companhia Energética do Minas Gerais (CEMIG), através do Projeto P&D D379, que faz parte do programa de P&D regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

2.0 - PARÂMETROS DE UMA LINHA ARTIFICIAL PARA PLC

Esta seção descreve o projeto de uma linha artificial para PLC e, ao mesmo tempo, traça um paralelo com linhas artificiais para telefonia. Essa descrição aborda os principais parâmetros do meio de transmissão: resistência (R), indutância (L), capacitância (C) e condutância (G).

A rede elétrica de baixa tensão utilizada como referência para o cálculo dos parâmetros da linha artificial considerada nesse trabalho é composta por condutores nus isolados pelo ar, conforme mostrado na Figura 1. Para o caso de outros tipos de rede, basta refazer o cálculo dos parâmetros elétricos. Por exemplo, para uma rede de cabos multiplex, composta por condutores isolados e trançados, haverá um aumento na capacitância e uma redução na indutância por unidade de comprimento, resultando na redução da impedância característica do meio de transmissão. Em outras palavras, as linhas artificiais podem representar qualquer tipo de rede, desde que os seus parâmetros sejam corretamente calculados.

2.1 Resistência (R)

Uma linha de energia elétrica normalmente apresenta uma resistência série muito pequena em comparação com uma linha telefônica. Por exemplo, um condutor típico de distribuição de energia elétrica (e.g., CA 4/0 AWG) apresenta uma resistência em corrente contínua de 0,267 Ω/km , enquanto um condutor típico de linha telefônica (e.g., Cu 26 AWG) apresenta uma resistência de 130 Ω/km . Portanto, o efeito da resistência do condutor na propagação de sinais é muito diferente para essas duas redes.

Cabe ressaltar que essa diferença mantém-se significativa mesmo quando é considerado o efeito pelicular causado pelas frequências relativamente altas do sinal PLC. Barbosa et al. (11) apresentam um estudo que quantifica o efeito da resistência na propagação de sinais PLC, levando em consideração tanto o efeito pelicular quanto o efeito do solo de condutividade finita. Com base nos resultados apresentados em (11), verifica-se que o efeito da resistência do condutor na propagação de sinais PLC de faixa estreita em linhas de baixa tensão são desprezíveis, uma vez que o comprimento dessas linhas raramente ultrapassa alguns quilômetros.

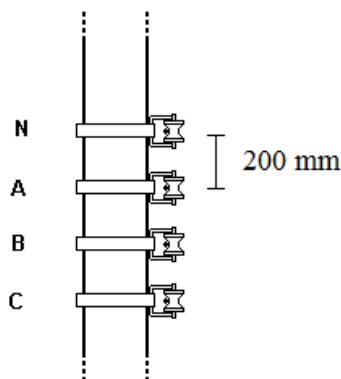


FIGURA 1 - Configuração de condutores típica de linha de distribuição em baixa tensão.

2.2 Indutância (L)

Uma linha de energia elétrica apresenta uma indutância normalmente bem maior do que a de uma linha telefônica. Por exemplo, um par de telecomunicações apresenta uma indutância da ordem de 0,7 $\mu\text{H/m}$, enquanto um par de condutores de uma linha elétrica apresenta uma indutância da ordem de 1,8 $\mu\text{H/m}$. Portanto, embora com valores bem diferentes, tanto a linha artificial para telefonia quanto a linha artificial PLC devem ter uma indutância em série. Observe-se que a indutância (em $\mu\text{H/m}$) entre dois fios paralelos depende do raio dos condutores (r) e da distância entre eles (d), conforme expresso pela Expressão 1 (obtida da referência (12)):

$$L = 0,4 \ln \left(\frac{d}{r} \right). \quad (1)$$

Um aspecto interessante dessa expressão é que a função logaritmo torna a indutância pouco sensível a variações nos parâmetros d e r . Isto significa que uma linha artificial PLC construída para uma linha típica será também representativas para outras linhas, mesmo que varie, por exemplo, o diâmetro do condutor utilizado. A Tabela 1 mostra a indutância para diversos condutores utilizados em linhas de distribuição, considerando a configuração da Figura 1 e diferentes modos de propagação. Observa-se que a variação das indutâncias é relativamente pequena, podendo-se escolher o condutor CA 1/0 AWG como representativo para esse tipo de rede.

TABELA 1 - Indutância em função do tipo e da configuração dos condutores.

Condutor		Indutância ($\mu\text{H/m}$)		
Tipo	Diâmetro (mm)	Fase A - Neutro	Fase B - Neutro	Fase C - Neutro
CA 4 AWG	5,88	1,69	1,97	2,13
CA 2 AWG	7,42	1,59	1,87	2,03
CA 1/0 AWG	9,36	1,50	1,78	1,94
CA 2/0 AWG	10,51	1,46	1,73	1,90
CA 4/0 AWG	13,25	1,36	1,64	1,80

2.3 Capacitância (C)

A capacitância de uma linha elétrica é bem menor do que a de uma linha telefônica. Por exemplo, um par telefônico apresenta uma capacitância da ordem de 50 pF/m, enquanto um par de condutores elétricos apresenta uma capacitância da ordem de 7 pF/m. A capacitância entre dois fios paralelos (em pF/m) é dada pela Expressão 2 (obtida de (12)), onde r é o raio dos condutores e d é a distâncias entre eles. De maneira análoga à indutância, a capacitância também é pouco sensível à variação dos parâmetros dos condutores, como mostrado na Tabela 2.

$$C = \frac{27,8}{\ln \left(\frac{d}{r} \right)}. \quad (2)$$

TABELA 2 - Capacitância em função do tipo e da configuração dos condutores.

Condutor		Capacitância (pF/m)		
Tipo	Diâmetro (mm)	Fase A - Neutro	Fase B - Neutro	Fase C - Neutro
CA 4 AWG	5,88	6,59	5,66	5,23
CA 2 AWG	7,42	6,97	5,94	5,47
CA 1/0 AWG	9,36	7,40	6,25	5,73
CA 2/0 AWG	10,51	7,64	6,42	5,87
CA 4/0 AWG	13,25	8,16	6,78	6,17

2.4 Condutância (G)

Uma linha telefônica apresenta uma condutância paralela tão baixa que ela é normalmente desprezada. Por exemplo, um par telefônico tem uma condutância inferior a 10^{-10} S/m. Por outro lado, a presença de cargas faz com que uma linha elétrica de baixa tensão apresente uma condutância paralela da ordem de 10^{-2} S/m ou mesmo maior, o que influi decisivamente na comunicação e requer que o circuito de uma linha artificial PLC deva ter uma condutância paralela. A diferença entre os modelos de linha para telefonia e energia é mostrada na Figura 2, onde se observa que na linha telefônica a resistência do condutor (R) é responsável pelas perdas, enquanto na linha elétrica as perdas resultam das cargas (G).

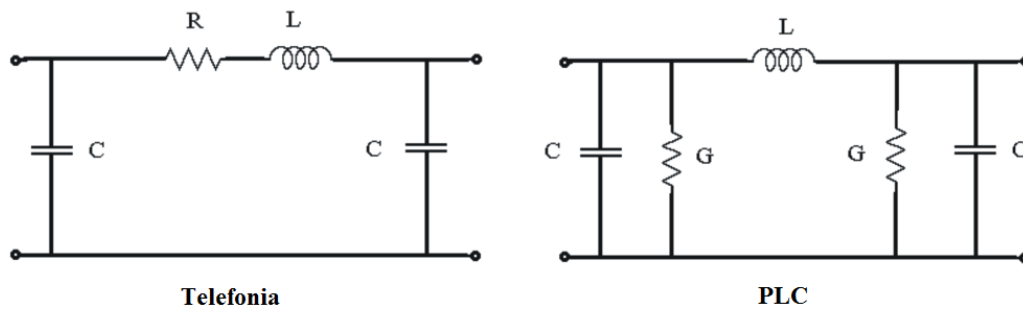


FIGURA 2 – Segmentos de linha artificial para telefonia (esquerda) e PLC (direita).

2.5 Largura de banda

Na implementação da linha artificial para PLC, o primeiro passo consiste na determinação da largura de banda de frequências que se pretende trabalhar. Esta banda de frequências é caracterizada por uma frequência limite superior (f_{max}), definida como a frequência cujo comprimento de onda é muito maior do que o comprimento de um segmento da linha. Um bom resultado pode ser obtido observando-se a relação:

$$f_{max} \leq \frac{c}{10 \lambda_s} \quad (1)$$

onde $c = 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo e λ_s é o comprimento de um segmento da linha.

Por exemplo, se um segmento da linha artificial representar um vão típico de postes urbanos (por exemplo, $\lambda_s = 50$ m), a frequência máxima da linha artificial será $f_{max} = 600$ kHz. Considerando que a linha tem uma indutância de $1,8 \mu\text{H} / \text{m}$, um trecho de 50 m pode ser representado por um indutor de $L = 90 \mu\text{H}$. De maneira análoga, considerando que a capacitância da linha é $7 \text{ pF} / \text{m}$, um trecho de 50 m resulta em 350 pF , os quais são distribuídos em dois capacitores de $C = 150 \text{ pF}$ cada (ver Figura 2).

2.6 Representação de cargas

No projeto de uma linha artificial, é importante que as cargas sejam simuladas enquanto a linha artificial PLC está energizada com tensão de 60 Hz, pois isso permite alimentar os transceptores PLC através da linha artificial, assim como simular a atenuação do sinal provocada pelas cargas reais. Para a simulação de carga em uma linha artificial, é necessário utilizar um artifício que faz com que os transceptores PLC "vejam" a carga, mas a rede elétrica não. Isto é necessário para evitar uma grande dissipação de potência nas cargas da linha artificial. Para tal, insere-se o capacitor C_2 em série com um resistor R , conforme mostrado na Figura 3. O resistor R representa a carga, podendo ter valores relativamente baixos. Já o capacitor C_2 deve ter uma capacitância tal que apresente uma baixa impedância para o sinal de comunicação e uma alta impedância para 60 Hz. Valores típicos podem ser da ordem de $C_2 = 1 \mu\text{F}$ e $R = 10 \Omega$. Observe-se que quando este segmento for submetido a uma tensão de 127 V em 60 Hz , a corrente através de cada resistor será limitada pelo capacitor em 48 mA , resultando em uma dissipação de potência de apenas 23 mW no resistor. Em termos comparativos, se não houvesse o capacitor, a potência dissipada no resistor seria de $1,6 \text{ kW}$. Por outro lado, para um sinal PLC na frequência de 100 kHz , a impedância do capacitor cai para $-j 1,6 \Omega$, o que faz com que a tensão do sinal de comunicação seja aplicada quase integralmente no resistor.

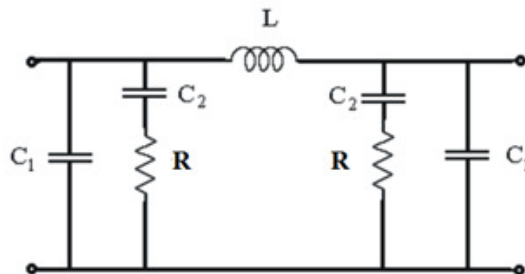


FIGURA 3 - Segmento de linha artificial PLC com carga R.

3.0 - IMPLEMENTAÇÃO DAS LINHAS ARTIFICIAIS

3.1 Montagem das células da linha artificial

O segmento da linha artificial PLC mostrado na Figura 3 é então replicado em vários segmentos para compor um módulo de linha artificial PLC, onde a indutância foi separada ao meio visando permitir que a carga fosse conectada simetricamente. A Figura 4 mostra um módulo de linha artificial PLC de 3 segmentos, onde as cargas podem ser ligadas ou desligadas através das chaves S. Cada módulo de linha artificial foi montado em uma placa de circuito impresso, cuja foto é mostrada na Figura 5. Cada placa foi montada em uma caixa metálica equipada com conectores do tipo BNC. Foram montadas 20 células de linha artificial PLC, sendo 12 representando um vão de 50 m de linha e 8 representando 100 m de linha. Com as 20 unidades é possível montar a maioria das configurações de rede de distribuição de baixa tensão.

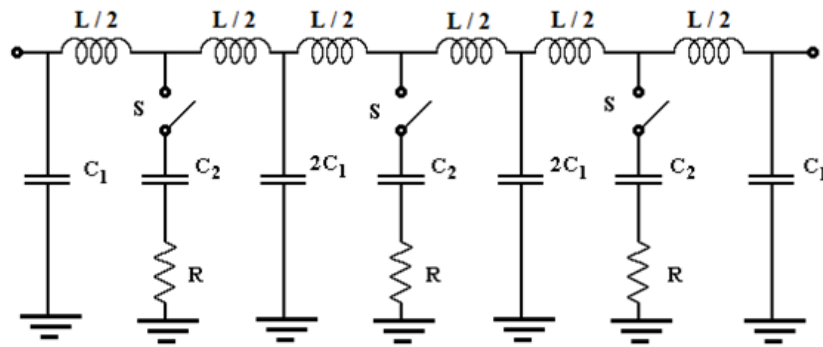


FIGURA 4 - Três segmentos de linha artificial PLC formando uma célula.

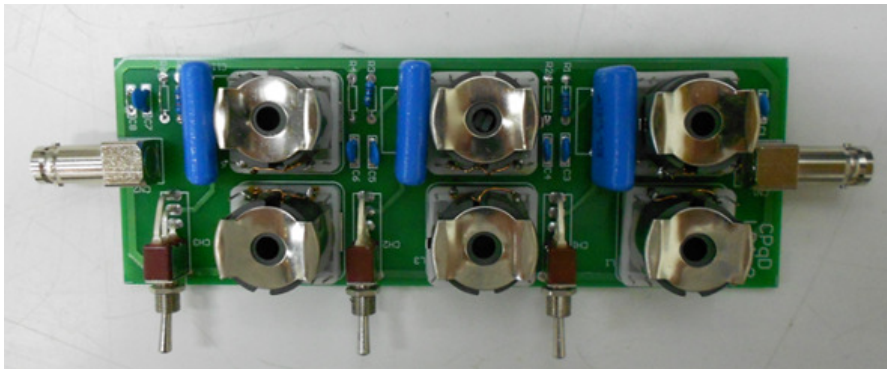


FIGURA 5 - Placa de circuito impresso contendo uma célula da linha artificial PLC.

3.2 Separação da rede local

Para uma simulação com redes artificiais, é necessário impedir que a rede local interfira com o sistema sob teste. Dessa forma, a separação entre a linha artificial PLC e a rede local garante que os resultados dos testes sejam independentes da rede local. Essa função é desempenhada por um filtro passa-baixa, i.e., que deixa passar a energia em 60 Hz para alimentar os transceptores PLC, mas que bloqueia o sinal PLC. Esse filtro foi implementado de acordo com o diagrama mostrado na Figura 6, onde os indutores apresentam alta impedância para o sinal PLC e os capacitores tornam a impedância da rede local irrelevante para o circuito sob teste. A partir de cerca de 10 kHz a impedância do filtro se torna elevada e insensível à impedância da rede local. Para a faixa de frequências de operação dos transceptores utilizados (42 kHz a 89 kHz), a impedância do filtro situa-se acima de 600 Ω .

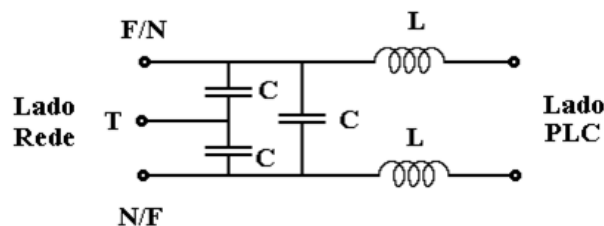


FIGURA 6 - Filtro para separar a rede local. $C = 2,2 \mu\text{F}$ e $L = 1,1 \text{ mH}$.

4.0 - TESTES COM TRANSCETORES PLC

4.1 Descrição dos testes

Com o objetivo de exemplificar a aplicação da linha artificial na avaliação de transceptores PLC, são apresentados os resultados de testes realizados em 9 (nove) configurações de rede de baixa tensão, as quais correspondem aos circuitos secundários dos 9 (nove) transformadores indicados pela CEMIG, todos eles situados na cidade de Sete Lagoas - MG, cujas potências variam de 45 kVA a 150 kVA. A Figura 8 mostra a Configuração 9, onde o triângulo indica a posição do transformador e as setas indicam as posições dos transceptores. Os comprimentos considerados para representar os trechos de rede condutores (em metros) são indicados junto aos mesmos e, entre parênteses, estão os comprimentos reais.

Nos testes realizados foram utilizados dois computadores Dell Latitude D630, dotados de porta serial RS-232. Esses computadores foram alimentados por suas fontes conectadas nas tomadas da bancada, mas antes do filtro PLC, de forma a não interferir nos resultados dos testes. O filtro PLC foi conectado na tomada da bancada e na linha artificial, no ponto correspondente ao transformador. Os transceptor PLC configurado como Base Node (BN) foi conectado na linha artificial no ponto correspondente ao transformador e o transceptor PLC configurado como Service Node (SN) foi conectado na rede na extremidade mais distante do transformador (assumida como pior caso). As posições do BN e do SN são mostradas na Figura 8. A Figura 9 mostra uma vista geral da bancada de testes, onde podem ser vistos os equipamentos utilizados, tendo as células da linha artificial em primeiro plano.

Os sinais elétricos na rede foram monitorados por um osciloscópio conectado nos pontos correspondentes ao BN e ao SN. A conexão do osciloscópio à rede PLC foi realizada através de acopladores capacitivos especialmente desenvolvidos para essa função (blocos pretos na Figura 9). Esse acoplador bloqueia a tensão de frequência industrial (60 Hz), obtém uma amostra do sinal PLC e apresenta uma alta impedância para o circuito de teste, de forma a não interferir nos resultados.

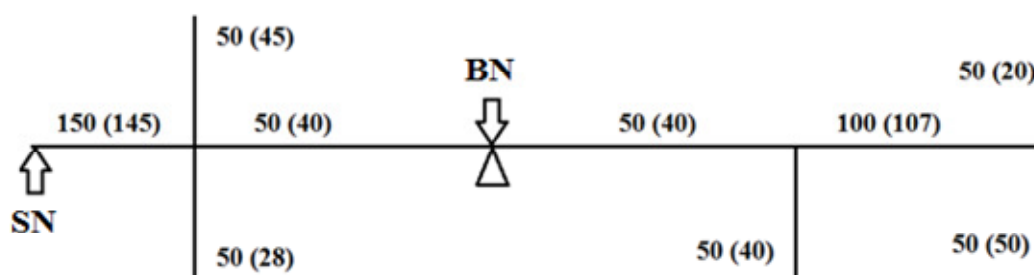


FIGURA 7 - Configuração 9 (Transformador de 150 kVA).

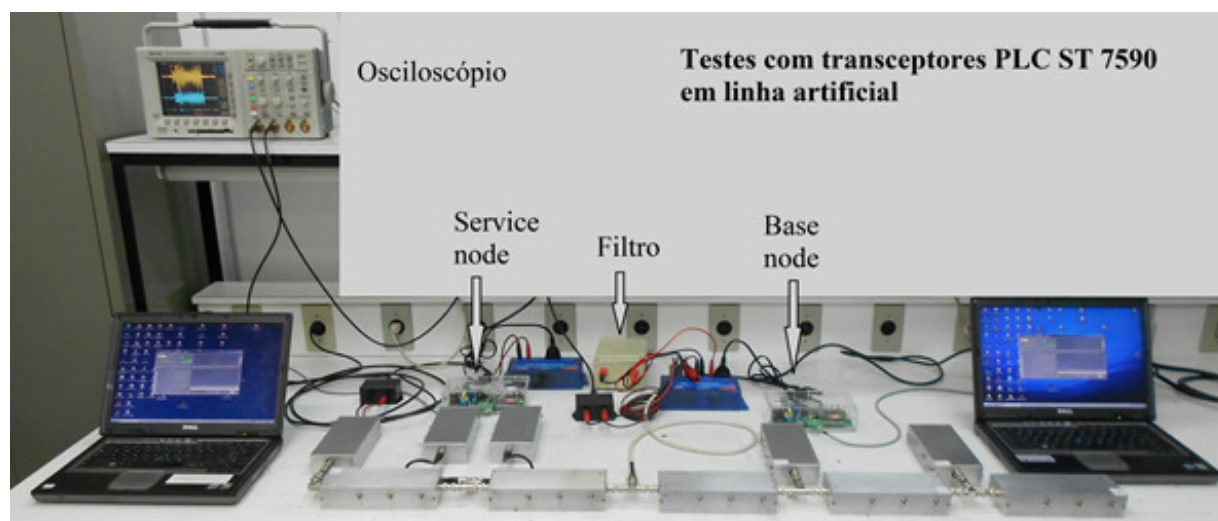


FIGURA 8 - Testes com transceptores PLC em linha artificial (Configuração 9).

O exercício de comunicação entre os transceptores foi realizado através da seguinte mensagem de 66 caracteres:

Trafego gerado para testes de comunicacao PLC com transceptores ST

Essa mensagem requer 36 ms para ser transmitida. Para cada configuração, os testes foram realizados inicialmente com a linha artificial sem carga. Em seguida, a carga foi sendo adicionada da forma mais uniforme possível, em passos de cerca de 20% da carga nominal do transformador. Para cada nível de carga, foram feitos 10 testes de comunicação, sendo 5 do BN para o SN e 5 do SN para o BN, alternadamente. Se todas as mensagens transmitidas foram recebidas com sucesso, considerou-se que o enlace PLC estava estável nesse nível de carga e passou-se para o nível seguinte, até atingir 100% da carga. Finalmente, foi realizado um teste adicional com 110% da carga nominal, visando representar uma condição de sobrecarga. Caso em algum nível de carga pelo menos uma mensagem não tenha sido recebida, esse nível foi repetido com 100 (cem) transmissões, sendo 50 do BN para o SN, e 50 do SN para o BN, alternadamente.

As células de linha artificial utilizadas são dotadas de 3 cargas, que podem ser acionadas individualmente durante os testes. Cada célula corresponde a um trecho de rede de baixa-tensão de 50 m ou 100 m. Quatro células de 50 m foram modificadas de forma a aumentar as suas cargas (células de carga), e visam representar cargas elevadas concentradas em curtos trechos de rede. Os três tipos de células resultantes e suas cargas individuais são descritas a seguir:

- Célula de 50 m: 0,67 kW por carga;
- Célula de 100 m: 1,34 kW por carga;
- Célula de carga: 4,16 kW por carga.

O número de células de carga utilizado em cada configuração depende da carga total a ser simulada. Essas células de carga foram dispostas de forma simétrica e próxima ao transformador. Cabe observar que os testes realizados correspondem ao modo de propagação fase-neutro. Dessa forma, a carga nominal desse modo é 1/3 da carga nominal do transformador. Por exemplo, a carga plena para um transformador de 150 kVA corresponde a uma carga de 50 kW entre a fase e o neutro considerados na simulação.

4.2 Resultados dos testes

Os testes de comunicação são apresentados na Tabela 3, que mostra o percentual de transmissões que foram recebidas pelo transceptor. Essas taxas são apresentadas para três condições de carga, a saber: 80%, 100% e 110% da carga nominal do transformador. Observa-se na Tabela 3 que as transmissões são realizadas com 100% de sucesso para todas as configurações, desde que os transformadores estejam com até 80% de sua carga nominal. Para a condição em que os transformadores estão em plena carga (100% da carga nominal), todas as configurações apresentam transmissões com 100% de sucesso, exceto aquelas que contêm transformadores de 150 kVA. Finalmente, quando os transformadores estão com sobrecarga (110% da carga nominal), todas as configurações apresentam transmissões com 100% de sucesso, exceto aquelas que contêm transformadores de 150 kVA e 112,5 kVA. Observa-se também que a degradação na transmissão não é simétrica, pois a impedância vista por cada um dos transceptores é diferente e os transceptores ajustam a potência transmitida em função da impedância da rede.

Cabe comentar que a sobrecarga de 110% considerada é relativamente amena, pois admite-se sobrecargas de até 150 % em transformadores de distribuição (13, 14). No entanto, a sobrecarga considerada já é suficiente para provocar uma degradação na qualidade da transmissão PLC, conforme mostrado na Tabela 3.

TABELA 3 - Taxa de transmissões com sucesso (em %) em função da carga.

Conf.	Potência nominal (kVA)	Carga (relativa à potência nominal)					
		80%		100%		110%	
		BS-SN	SN-BN	BS-SN	SN-BN	BS-SN	SN-BN
1	150	100%	100%	86%	80%	86%	54%
2	75	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3	75	100%	100%	100%	100%	100%	100%
4	45	100%	100%	100%	100%	100%	100%
5	150	100%	100%	86%	80%	86%	54%
6	150	100%	100%	100%	50%	94%	18%
7	45	100%	100%	100%	100%	100%	100%
8	150	100%	100%	94%	92%	90%	74%
9	112,5	100%	100%	100%	100%	48%	63%

5.0 - CONCLUSÃO

A utilização de linhas artificiais para avaliar o desempenho de transceptores PLC mostrou-se uma ferramenta eficaz para detectar as deficiências e avaliar as potencialidades dos transceptores. Os resultados dos testes realizados com transceptores PLC baseados no chip ST 7590, mostraram as potencialidades e limitações destes transceptores para as diferentes configurações de rede e carregamentos considerados. Em geral, os transceptores apresentaram um bom desempenho, que pode ser resumido como:

- Para os transformadores carregados com até 80% de sua carga nominal, os transceptores apresentaram uma taxa de 100% de comunicação com sucesso em todas as configurações.
- Para os transformadores carregados com 100% de sua carga nominal, os transceptores apresentaram uma taxa de 100% de comunicação com sucesso em todas as configurações, exceto aquelas contendo transformadores de 150 kVA.
- Para os transformadores carregados com 110% de sua carga nominal, os transceptores apresentaram uma taxa de 100% de comunicação com sucesso em todas as configurações, exceto aquelas contendo transformadores de 112,5 kVA e 150 kVA.

Cabe destacar que as linhas artificiais podem representar as mais diversas configurações de rede que possam ser encontradas em campo, bastando realizar as conexões adequadas entre as diversas células de linha artificial. Além disso, as linhas artificiais desenvolvidas nesse projeto constituem uma ferramenta que permitirá a avaliação comparativa do desempenho de diferentes modelos de transceptores PLC de faixa-estreita.

A próxima etapa deste trabalho consiste na avaliação do desempenho dos transceptores PLC frente à aplicação de sinais interferentes (ruído) na linha artificial, cujos resultados deverão ser objeto de publicação futura.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CHEEK, R. C. Transmission and Distribution Reference Book, Chapter 12 - Power-Line Carrier Application. Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, 1950. Estados Unidos.
- (2) SHAVER, D., Narrow band PLC solution for AML achieve long distance communication and flexibility with immediate market impact, IEEE Int. Conf. on Consumer Electronics, pp. 603-604, Jan. 2011. Estados Unidos.
- (3) ROPITAULT, T., LAMPROPULUS, A., VERANTHAM, R., CHIUMMIENTO, P., Realistic model for narrow band PLC for advanced metering, IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications, pp. 624-629, Out. 2013, Canadá.
- (4) SANZ A., PINERO, P. J., IDIAGO, J. M., STEBAN S., Narrow band power line communication evaluation in complex distribution networks, IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications, pp. 266-271, Nov. 2014, Itália.
- (5) NYQUIST H., Artificial line, Patent US 1 601 037, Set. de 1926. Estados Unidos.
- (6) BARBOSA C. F., Linha artificial para avaliação de transmissão de sinais de comunicação de uma linha elétrica, Pedido de Patente n. BR 10 2013 0130575, depositado no INPI em Maio de 2013. Brasil.
- (7) ST, "ST7590: OFDM Narrow band power line networking system on chip", disponível em www.st.com.
- (8) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, Narrow band OFDM power line communication transceivers – Physical layer specification, ITU-T Rec. G.9955, Dec. 2011. Suíça.
- (9) INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, Narrow band OFDM power line communication transceivers – Data link layer specification, ITU-T Rec. G.9956, Dec. 2011. Suíça.
- (10) PRIME ALLIANCE, Interoperable standard for advanced meter management & smart grid, disponível em www.prime-alliance.org.
- (11) Barbosa, C. F., Effect of finitely conducting earth on the propagation of carrier signals over single-wire earth-return power lines, Anais do Int. Conference on Grounding and Earthing, Nov. 2012. Brasil.
- (12) STEVENSON, W. D., Elements of power systems analysis, McGraw-Hill Book Company, 2nd edition, 1962. Estados Unidos.
- (13) ABNT NBR 5440: 2014, "Transformadores para redes aéreas de distribuição - Requisitos", versão corrigida em 2014. Brasil.
- (14) ABNT NBR 5416: 1997, "Aplicação de cargas em transformadores de potência - Procedimento", confirmada em Agosto de 2013. Brasil.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Célio Fonseca Barbosa nasceu em de Nova Lima - M.G. em 1961. Possui os títulos de Engenheiro (1983), Mestre (1988) e Doutor (2009) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Trabalhou de 1984 a 1998 na Telecomunicações Brasileiras SA (Telebrás), onde exerceu diversas funções gerenciais. Trabalha desde 1998 como pesquisador da Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), onde desenvolve projetos de pesquisa para os setores elétrico e de telecomunicações. Atua também desde 2000 como relator para proteção contra descargas atmosféricas da União Internacional de Telecomunicações (UIT), sendo atualmente Chairman do Grupo de Trabalho 5.1 (Prevenção de Danos e Segurança). Seus interesses de pesquisa atuais incluem a proteção contra descargas atmosféricas, o monitoramento de linhas de energia elétrica e a propagação de sinais de comunicação nestas linhas. Maiores detalhes podem ser obtidos em <http://lattes.cnpq.br/0432330534636280>.

