Sistema Isolado para Transmissão de Sinais PLC entre Terminais de BT e MT de Transformador de Potência de Redes Elétricas Subterrâneas ⋆

Rossana da Silva Pontes * **Alexandre Cunha Oliveira** *
Maurício de Campos ** **Paulo Sérgio Sausen** ***
Luís Fernando Sauthier ***

* *Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, (e-mail: rossana.pontes@ee.ufcg.edu.br, aco@dee.ufcg.edu.br).*
** *Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALE, (e-mail: mauricio.campos@univali.br)*
*** *Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul - UNIJUí, (e-mail: sausen@unijui.edu.br, e-mail: luis.sauthier@unijui.edu.br)*

Abstract: This paper presents an isolated system for transmitting PLC signals, in the frequency range of 100 kHz to 500 KHz, interconnecting the low voltage (LV) and medium voltage (MV) circuits of the electrical distribution network using the power transformer as part of the isolated system circuit. To prove the effectiveness of the system, results of communication tests in substations of an underground reticulated system are presented, using the proposed solution.

Resumo: Neste trabalho é apresentado um sistema isolado para transmissão de sinais PLC, na faixa de frequência de 100 kHz a 500 KHz, interligando os circuitos de baixa tensão (BT) e média tensão (MT) da rede elétrica de distribuição usando o transformador de potência como parte do circuito do sistema isolado. Para comprovação da eficácia do sistema, são apresentados resultados de testes de comunicação em subestações de um sistema reticulado subterrâneo, empregando a solução proposta.

Keywords: Power Line Communication; MV/LV underground reticulated system; inductive coupler; power transformer; by-pass network; isolated system.

Palavras-chaves: comunicação pela rede elétrica; sistema reticulado subterrâneo de MT/BT; acoplador indutivo; transformador de potência; rede de *by-pass*; sistema isolado.

1. INTRODUÇÃO

A utilização dos transformadores de potência da rede elétrica na composição de sistemas de comunicação *Power Line Communication* (PLC) tem sido relatado em diversos trabalhos técnicos Cataliotti et al. (2014), Razazian et al. (2010), Masood et al. (2017), Artale et al. (2013), Cataliotti et al. (2012), Males et al. (2012). Esses trabalhos são suportados por pesquisas na área de modelagem dos transformadores na faixa de frequência das principais normas de comunicação PLC, onde dados e informações de atenuação são determinados para diferentes modelos de transformadores Kikkert (2012), Lefort et al. (2014), Sathler and De Conti (2020). Além de apresentarem modelos que replicam com grande fidelidade os comportamentos reais dos transformadores avaliados, os trabalhos também abordam a capacidade dos transfomadores em propagar sinais PLC de alta frequência entre seus terminais de BT e MT, ainda que haja, entre os trabalhos, conclusões distintas quanto aos perfis de atenuação na faixa de frequência de 100 kHZ a 500 kHZ, como observado em Sathler and De Conti (2020) e Lefort et al. (2017).

No cenários de aplicações onde redes de comunicação clássicas não estão disponíveis, ou sua implantação apresenta elevado custo, são avaliadas em Kikkert (2010) e Kikkert (2011a) redes de acoplamento empregadas em conjunto com transformadores de sistemas monofilar com retorno pela terra (MRT). A avaliação é feita na faixa de frequência da norma CENELEC A. Segundo os autores a rede de acoplamento é efetiva se projetada para ser conecatda aos terminais do transformador com conexão para terra e carcaça. Em Kikkert (2011b) uma versão modificada da rede de acoplamento é apresentada, onde são usados os terminais ativos do transformador e considera-se que os terminais de conexão à terra e carcaça, estão conectados e aterrados. Gráficos de atenuação, considerando redes de distribuição com retorno pela terra de 100 km, com transformadores em suas extremidades, apontam para a efetividade do canal de comunicação PLC.

A capacidade de propagação de sinais PLC através de transformadores de potência são verificadas experimentalmente em trabalhos como Cataliotti et al. (2014), onde a comunicação usando modems ST7580, operando a uma taxa de 4800 bps, é efetuada entre duas subestações interligadas por uma rede operando em 24 kV, com 1,02 km de comprimento. Após a seleção da portadora ótima para uso

⋆ Os autores agradecem o suporte financeiro dado pelo CNPq, Equatorial Energia e PPgEE/UFCG.

com os modems ST7580, os testes consistiram na injeção de sinal PLC no circuito de MT e sua recepção também no circuito de MT, a partir de acopladores PLC capacitivos e em outro teste na injeção de sinal PLC no circuito de BT e recebimento no circuito de MT. Comparando o nível de sinal nos respectivos testes, observa-se uma maior atenuação no sinal recebido do segundo teste. Em Artale et al. (2013) as mesmas subestações e *setup* de teste são usados para validação de estratégia de proteção anti-ilhamento.

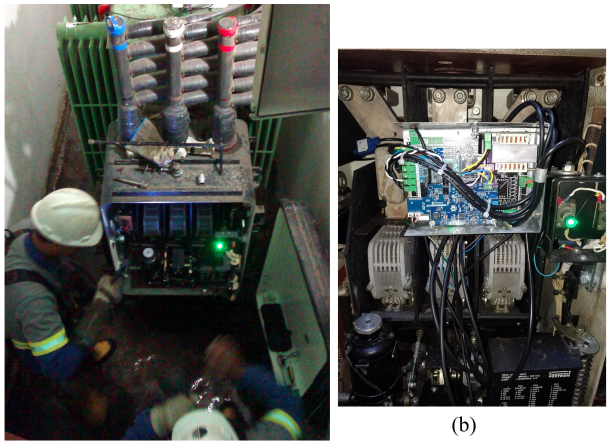
Em Razazian et al. (2010), foram realizados testes de comunicação considerando diferentes percursos para os sinais PLC através dos terminais de BT e MT do transformador de potência. Em todos os *setups* de teste, foram usados acopladores capacitivos. Os resultados demonstram canais efetivos de comunicação nos circuitos de BT e MT. Nos testes de transição de BT para MT e vice-versa, foram observadas perdas de desempenho do modem PLC, exigindo o uso de modulações mais robustas, com menores taxas de transmissão. Mesmo assim, o índice de perda de dados não foi zerado, sendo pior no sentido BT para MT.

Em Males et al. (2012) um *setup* de teste formado por um transformador de 400 kVA e um de 250 kVA, foi implementado. Foram testados modems PLC do padrão PRIME e G3. Três testes foram realizados, e os resultados confirmam a efetividade de comunicação quando a mesma ocorre no circuito de BT. Houve, contudo, uma pequena deterioração da taxa de erro de bit quando um cabo de 50 m foi usado para conectar um dos modems PLC aos terminais do transformador. No teste em que o sinal PLC precisa cruzar dois transformadores, no sentido transformador de 400 kVA (com cargas) para o transformador de 250 kVA (em vazio), usando os modems padrão G3, a comunicação é efetiva. Os modems PRIME apresentam 100 % de perda de pacotes. No sentido transformador de 250 kVA, para o transformador de 400 kVA, nenhum dos modems PLC consegue efetivar um canal de comunicação.

Os resultados apresentados em Males et al. (2012), indicam ser necessária uma combinação de condições para que a comunicação PLC, usando o transformador de potência para transmitir os sinais de comunuicação entre circuitos de BT e MT, se estabeleça. No caso das redes elétricas brasileiras, onde os níveis de ruído são muito mais elevados que aqueles observados em Cataliotti et al. (2014) e Razazian et al. (2010), as condições para obtenção de um canal efetivo de comunicação PLC tornam-se muito mais específicas.

No contexto de Brasil, parece pertinente considerar o emprego de redes de *by-pass*, como a apresentada em Kikkert (2011a). Contudo, da forma como a mesma foi implementada e a forma como é instalada no transformador, torna seu uso praticamente impossível em sistemas subterrâneos, onde é exigido que todos os componentes apresentem algum nível de estanqueidade ou, minimamente, proteção IP68, pois as subestações desses sistemas estão sujeitas a inundação. Além disso, a instalação de um circuito conectando terminais de BT e MT do transformador de potência dificilmente obteria a anuência do corpo técnico das concessionárias de energia que operam sistemas subterrâneos.

Em vista das considerações anteriores, é proposto neste trabalho um sistema isolado que permita a transmissão de sinais PLC entre os terminais de BT e MT do transformador de potência, baseado em acoplador indutivo, com baixo nível de interferência nos equipamentos e circuitos das subestações dos sistemas subterrâneos.



(a) (b)

Figura 1. Protetor: (a) Vista externa e (b) vista das partes internas.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: na seção, 2 do trabalho é descrita a estrutura de uma subestação de um sistema reticulado típico brasileiro; na seção 3 é descrito o sistema proposto; na seção 4 são apresentados resultados de aplicação do sistema e respectivas análises e na seção 5 são apresentados os comentários e conclusões.

2. SUBESTAÇÃO DE SISTEMA RETICULADO

As subestações do sistema reticulado subterrâneo, onde foram realizados os testes, cujos resultados, serão apresentados na sequência, possui um transformador de 500 kVA e acoplado ao mesmo um "PROTETOR", que é um equipamento composto por elementos de comutação, sensores e relé. O protetor é responsável pela conexão do transformador a um barramento CA de BT. Esse sistema subterrâneo de distribuição é composto por 160 subestações subterrâneas de energia que integram o sistema reticulado de distribuição de energia localizado no centro da cidade de Porto Alegre, pertencente a concessionária CEEE Equatorial. Há deferentes alimentadores em MT suprindo as subestações, cujos elementos de manobra estão instalados em abrigos ao nível do solo.

Na Figura 1(a) é possível observar a foto de um protetor aberto e na parte de cima do protetor as buchas do circuito de BT, onde cada bucha possui 5 conexões de saída. As buchas estão identificadas com as cores azul, branco e vermelho. Na Figura 1(b) é possível ver em detalhes as partes internas do protetor, onde no primeiro plano é vista uma placa de comunicação PLC, atrás da mesma os barramentos de potência do circuito de BT, e no canto inferior direito o relé de proteção. Na foto da Figura 2(a) é possível observar os terminais isolados de conexão do alimentador de MT ao transformador e na Figura 2(b), o alagamento da câmara da subestação, onde é possível observar que o transformador, protetor e cabos estão submersos.

(a) (b)

Figura 2. (a) Conexões de MT do transformador e (b) Câmara de subestação alagada.

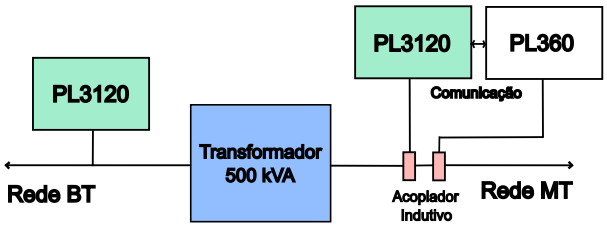


Figura 3. Diagrama do sistema isolado.

O protetor é estanque e pressurizado, não sendo permitido pela concessionária alterar a estrutura da caixa do protetor. Devido ao elevado índice de ocupação da caixa do protetor, há restrições de instalação de novos componentes no seu interior, dado as limitações de espaço no interior do equipamento, sendo possível, apenas, a instalação de pequenos dispositivos, como a placa de comunicação PLC vista na Figura 1(b). Também como pode ser visto na Figura 2(a), as conexões em MT possuem uma robusta proteção de modo a garantir a efetiva isolação dos terminais de MT do transformador e cabos de MT do alimentador.

Se considerarmos o emprego da solução de *by-pass* apresentada em Kikkert (2011a), no ambiente das subestações subterrâneas, retratado de forma sintética nas Figuras 1 e 2, são identificadas algumas questões técnicas relevantes, entre as quais, cita-se:

(1) Fragilização do isolamento elétrico entre os circuitos de BT e MT, devido a conexão de circuito externo interligando os terminais de BT e MT do transformador de potência;
(2) Necessidade de criar uma derivação em T nos terminais de MT para poder realizar a conexão de capacitor e/ou acoplador capacitivo do lado de MT;
(3) Necessidade de garantir a estanqueidade da conexão do capacitor e/ou acoplador capacitivo ao circuito de MT;
(4) Necessidade de utilização de capacitor e/ou acoplador capacitivo com fator de proteção IP68, ou superior;

De todos os itens acima listados, a fragilização do isolamento entre os circuitos de BT e MT seria o de maior impacto na estrutura da subestação subterrânea e que inviabilizaria a adoção da rede de *by-pass* apresentada em Kikkert (2011a).

3. SISTEMA ISOLADO

A capacidade de um transfomador de potência de propagar sinais de alta frequência entre seus terminais de BT e MT, pode ou não ser efetiva e depende das características do sinal de alta frequência a ser transmitido (modulação, frequência, etc.), das características das redes elétricas de BT e MT (por exemplo, impedância, número de ramais), dos níveis de ruído nas redes elétricas, entre outros fatores.

O sistema isolado de transmissão de sinais PLC entre os terminais de BT e MT, desenvolvido para ser aplicado no ambiente de subestações do sistema reticulado subterrâneo operado pela CEEE Equatorial, emprega dois modems PLC ECHELON, modelo PL3120 nos circuitos de BT e MT, um modem PLC padrão G3, modelo PL360, no circuito de MT e dois acopladores indutivos, com núcleo nanocristalino, conectados no cabo de MT, próximos a bucha de média tensão do transfomador de potência. O diagrama esquemático do sistema pode ser visto na Figura 3. Uma premissa básica seguida no desenvolvimento da solução era de que o sistema deveria ser o menos invasiso possível, de modo a não afetar características importantes das subestações subterrâneas.

A operação do sistema consiste na transmissão de sinais pelo modem PLC ECHELON PL3120 nos sentidos BT->MT e MT->BT e de sinais PLC pelo modem PL360 através do cabeamento dos alimentadores de MT, usando sua capacidade de formação de rede de comunicação, para interligar as subestações do sistema reticulado através do circuito de MT.

O conceito do sistema isolado desenvolvido é de que os modems PLC ECHELON PL3120 instalados em cada lado (BT e MT) do transformador funcionem como módulos repetidores/amplificadores do sinal PLC, enquanto o modem PL360 distribui o sinal através da rede de comunicação que opera sob o barramento de MT. De modo a garantir que um modem PLC não interfira na operação do outro, são empregadas portadoras distintas para cada modelo de modem. Os modems ECHELON PL3120 operam com portadoras em 115 kHz e 132 KHz e o modem PL360 foi configurado para operar na faixa de frequência de 154,68 kHz a 487,5 KHz. Os modems ECHELON são configurados para formarem pares através da configuração de um par de modems com um mesmo número de identificação, permitindo que diferentes pares de modems PLC ECHELON PL3120 compartilhem o mesmo meio físico.

A determinação das frequências de operação dos modems foi orientada pela característica de atenuação do transformador de potência de 500 kVA, usado nas subestações do sistema reticulado subterrâneo. Na Figura 4 são apresentadas as telas de leitura dos níveis de sinal medidos com o analisador de espectro, na avaliação do perfil de atenuação do transformador. Na montagem das 6 telas para composição da Figura, todas as telas do lado esquerdo da Figura correpondem as medições realizadas com a injeção de sinal de teste no terminal de BT e a leitura no terminal de MT. As telas do lado direito da Figura correspondem as medições realizadas com a injeção de sinal de teste no terminal de MT e a leitura no terminal de BT. As telas da 4(a) correspondem a injeção e leitura de sinal na fase 1, as telas da 4(b) correspondem a injeção e leitura de sinal na fase 2 e as telas da 4(c) correspondem a injeção e leitura de sinal na fase 3. Todos os resultados foram obtidos com o transformador desenergizado e o sinal de teste usado para levantamento foi um sinal de 1 V RMS (13.01 dBm), com

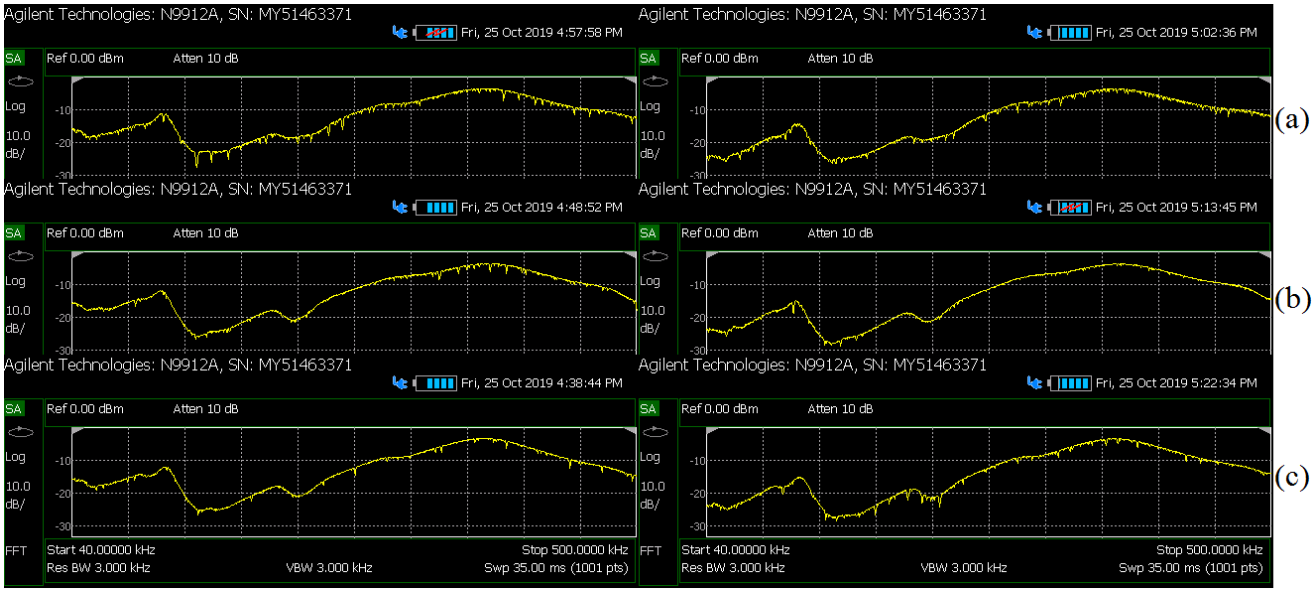


Figura 4. Sinais transformador 500 kVA: (a) injeção/leitura 1/1, (b) injeção/leitura 2/2 e (c) injeção/leitura 3/3.

uma varredura na faixa de frequência de 30 kHZ a 500 kHz.

Ao analisar as medições, observa-se que na faixa de frequência de 40 kHz a 132 kHz, há uma menor atenuação provocada pelo transformador e o nivel de atenuação volta a diminuir novamente para as frequências a partir de 224 kHz, obtendo-se leituras de sinal acima de -20 dBm em ambas as faixas de frequência. A partir do perfil obtido para o transformador de 500 kVA, os modems ECHELON PL3120 foram alocados no ínicio da faixa de frequência em que a atenuação é menor, pois este modem não opera em frequências maiores do que 132 kHz, e o modem PL360 foi alocado na faixa alta das frequências, dado que o mesmo tem a função de transmissão dos sinais PLC apenas através do cabeamento de MT, integrando as subestações em uma rede de comunicação.

4. RESULTADOS DE APLICAÇÃO DO SISTEMA ISOLADO DE TRANSMISSÃO DE SINAIS PLC

O sistema isolado para transmissão de sinais PLC foi avaliado em campo em quatro subestações do sistema reticulado do centro de Porto Alegre. Nos testes foram avaliados as comunicações entre dois pares de subestações, o par de subestações 68/7A e 71/3D, que são conectadas ao alimentador 5-RW, e o par de subestações 57/3D e 68/15B, que estão conectadas ao alimentador 2-RW. Nas Figuras 5(a) e 5(b) são mostrados, respectivamente, os mapas de localização das subestações.

Nas Figuras de 6 a 9 são apresentados os gráficos de espectro de frequência coletados em um dos acopladores indutivos conectados ao barramento de MT de cada uma das subestações onde o sistema foi testado. As Figuras são uma composição de telas, onde a tela (a) corresponde apenas ao sinal do modem PLC PL3120, que está injetando sinal nos terminais de BT do transformador e o sinal está sendo lido, através do acoplador indutivo, no cabo conectado ao terminal de MT do transformador de potência. A tela (b) corresponde aos sinais dos dois modems PLC, PL3120 e

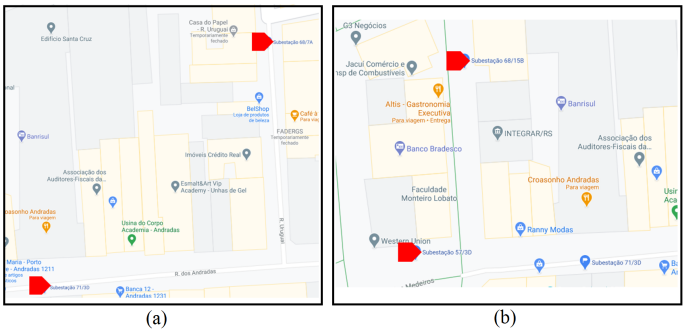


Figura 5. Subestações sistema reticulado: (a) 68/7A e 71/3D, (b) 57/3D e 68/15B.

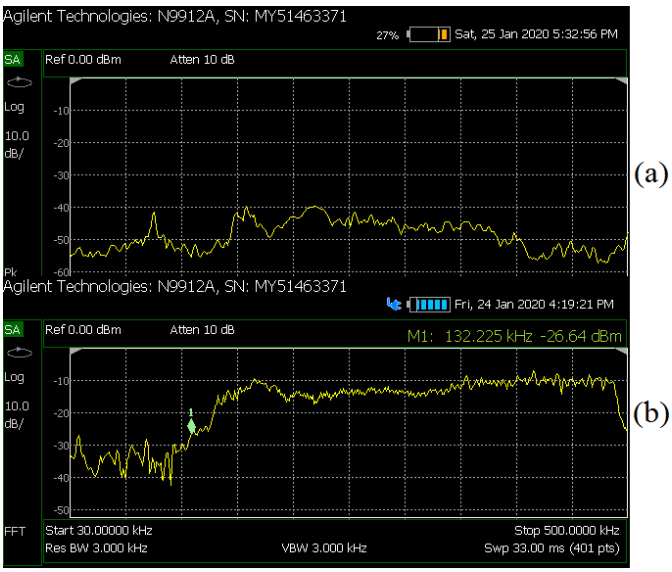


Figura 6. Espectro do sinal PLC na subestação 68/7A: (a) Sinal do PL3120 e (b) sinais do PL3120 e PL360.

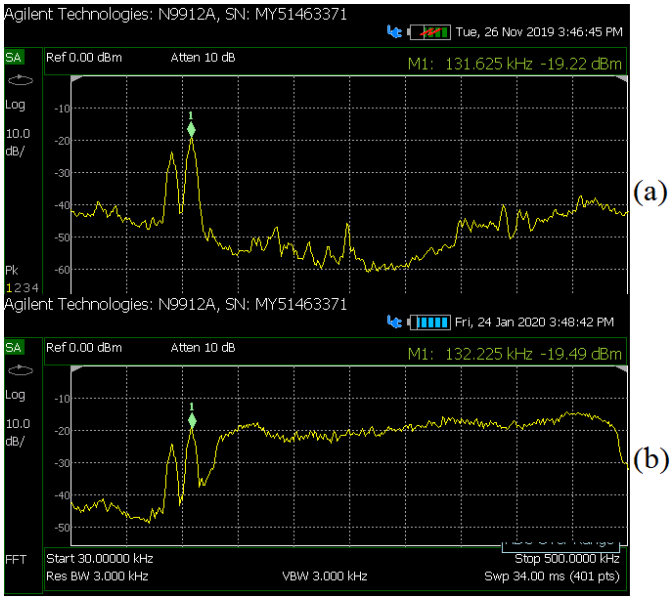


Figura 7. Espectro do sinal PLC na subestação 71/3D: (a) Sinal do PL3120 e (b) sinais do PL3120 e PL360.

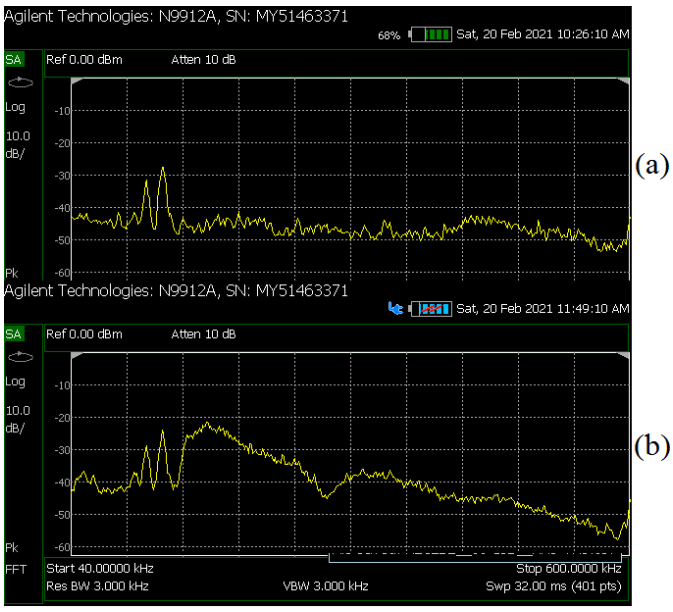


Figura 8. Espectro do sinal PLC na subestações 68/15B: (a) Sinal do PL3120 e (b) sinais do PL3120 e PL360.

PL360, mostrando a separação espectral dos sinais, que evita interferência entre os canais PLC.

Ao obsevar a curva da Figura 6(a), percebe-se que a amplitude do sinal PLC do modem PL3120 está em nível equivalente ao do ruído presente no circuito de MT, na localização da subestação 68/7A. Ao observar a curva da Figura 6(b), percebe-se que o sinal do modem PL360, que já é diretamente injetado nos cabos de MT, apresenta amplitude bastante superior ao nível de ruído e dessa forma pode garantir que a subestação 68/7A possa se integrar de forma efetiva a rede de comunicação que interliga as subestações através do barramento de MT.

Ao observar a curva da Figura 7(a), percebe-se que a amplitude do sinal PLC do modem PL3120 já apresenta

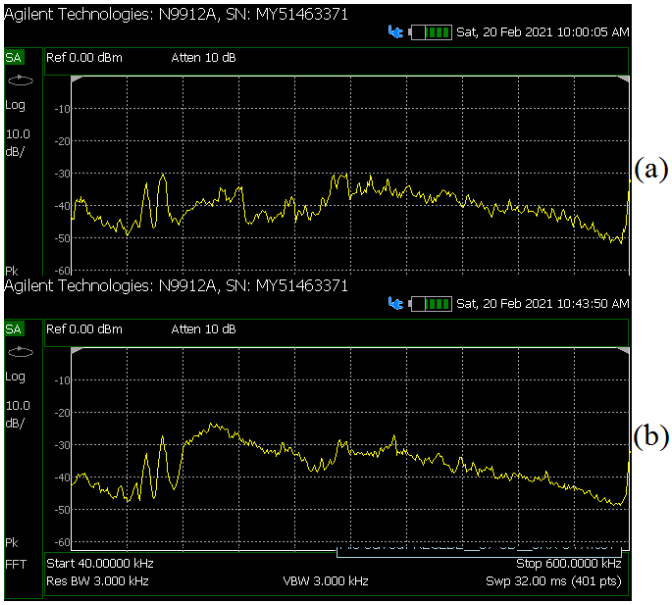


Figura 9. Espectro do sinal PLC na subestação 57/3D: (a) Sinal do PL3120 e (b) sinais do PL3120 e PL360.

nível bem superior ao do ruído presente no circuito de MT, na localização da subestação 71/3D. Ao observar a curva da Figura 7(b), percebe-se que o sinal do modem PL360, que já é diretamente injetado nos cabos de MT, apresenta amplitude equivalente ao do sinal do modem PL3120, indicando que no caso dessa subestação, talvez o uso do sistema isolado de transmissão do sinal PLC não fosse necessário. Contudo, como foi já foi descrito, os modems PL3120 são configurados para uma comunicação ponto-a-ponto, cabendo aos modems PL360 a função de integração das subestações em uma rede de comunicação.

Ao observar a curva da Figura 8(a), percebe-se que a amplitude do sinal PLC do modem PL3120 apresenta nível superior ao do ruído presente no circuito de MT, na localização da subestação 68/15B. Ao observar a curva da Figura 8(b), percebe-se que o sinal do modem PL360, que já é diretamente injetado nos cabos de MT, apresenta amplitude equivalente ao do sinal do modem PL3120, na parte inicial da faixa de frequência de sua operação, entre 154,68 kHz a 487,5 KHz, sendo que esta amplitude vai decaindo ao longo da faixa de operação do modem PLC PL360. Como os sistemas usados nos testes aplicados aos dois conjuntos de subestações foram os mesmos, descarta-se alguma diferença de desempenho com causa do comportamento observado. Está prevista a realização de novos testes para averiguar as possíveis causas desse comportamento assim que possível.

Ao observar a curva da Figura 9(a), percebe-se que a amplitude do sinal PLC do modem PL3120 apresenta nível superior ao do ruído presente no circuito de MT, na localização da subestação 57/3D. Ao observar a curva da Figura 9(b), percebe-se que o sinal do modem PL360, que já é diretamente injetado nos cabos de MT, apresenta amplitude equivalente ao do sinal do modem PL3120, na parte inicial da faixa de frequência de sua operação, entre 154,68 kHz a 487,5 KHz, sendo que esta amplitude vai decaindo ao longo da faixa de operação do modem PLC PL360, da mesma forma como foi observado no

caso da subestação 68/15B. Isso pode indicar que esse comportamento é uma característica do alimentador 2-RW, ao qual estão conectadas ambas as subestações.

Na Tabela 1, estão listados os parâmetros de desempenho relativos ao canal de comunicação no barramento de MT. Na coluna "Sentido de Propagação", estão indicados os percursos avaliados, alternando-se as subestações como nó de transmissão e nó de recepção. Os resultados confirmam a eficiência dos canais de comunicação, inclusive quando se considera que nos testes de comunicação, considerando que, nos testes, 1000 pacotes de dados, cada um com 100 bytes, foram transmitidos em uma janela de tempo de 1 minuto.

Tabela 1. Resultado dos testes de comunicação

Sentido Propagação	RSSI médio (dBuV)	Taxa Erro Pacote (PER)
CT68/15B -> CT57/3D	88,0	1,2
CT57/3D -> CT68/15B	89,0	0,0
CT71/3D -> CT68/7A	92,8	0,0
CT68/7A -> CT71/3D	92,0	0,0

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma solução de sistema que expande o alcance da comunicação PLC, integrando circuitos de BT e MT, fazendo uso do transformador de potência como parte do circuito isolado que permite a propagação de sinais PLC entre as redes elétricas de BT e MT. O mesmo conceito aplicado à solução pode ser implementado com outras configurações, como por exemplo, realizar conexão entre o circuito de BT e MT por meio de um LINK de fibra óptica, que evitaria o problema da fragilização do isolamento entre os circuitos de BT e MT, se adotada a soluação da rede de *by-pass* apresentada em Kikkert (2011a). Contudo o exemplo de solução usando fibra óptica, ou outros que empreguem canais de comunicação cabeados, que não sejam baseados na tecnologia PLC, precisariam intervir na estrutura do protetor, podendo levar a perda de sua capacidade de estanqueidade, assim, estas soluções não conseguiriam permitir o acesso aos dados de medições e do relé que ficam confinados dentro do protetor, problema que originalmente se buscou resolver com a solução aqui apresentada e que como verificado a partir de testes em campo, se mostrou eficaz.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa de P&D ANEEL/CEEE Equatorial pelo suporte técnico e financeiro, PPgEE/UFCG e também ao CNPq pelo suporte financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS

Artale, G., Cataliotti, A., Cosentino, V., Nguyen, N., Di Cara, D., and Tinè, G. (2013). Measurement and communication interfaces for distributed generation in smart grids. In *2013 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, 103–107. doi:10.1109/AMPS.2013.6656234.

Cataliotti, A., Cosentino, V., Di Cara, D., Russotto, P., and Tinè, G. (2012). On the use of narrow band power line as communication technology for medium and low voltage smart grids. In *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 619–623. doi:10.1109/I2MTC.2012.6229503.

Cataliotti, A., Cosentino, V., Guaiana, S., Di Cara, D., Panzavecchia, N., and Tinè, G. (2014). Experimental investigation on plc signal crossing of power transformers. In *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 1235–1239. doi:10.1109/I2MTC.2014.6860941.

Kikkert, C.J. (2010). Modeling power transformers for the design of swer line coupling networks. In *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 120–125. doi:10.1109/SMARTGRID.2010.5622030.

Kikkert, C.J. (2011a). Mv to lv transformer plc bypass coupling networks for a low cost smart grid rollout. In *2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 1–6. doi:10.1109/ISGT-Asia.2011.6167075.

Kikkert, C.J. (2011b). Power transformer modelling and mv plc coupling networks. In *2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 1–6. doi:10.1109/ISGT-Asia.2011.6167093.

Kikkert, C.J. (2012). A plc frequency model of 3 phase power distribution transformers. In *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 205–210. doi:10.1109/SmartGridComm.2012.6485984.

Lefort, R., Taquet, B., Vauzelle, R., Courtecuisse, V., Poussard, A.M., and Idir, N. (2014). High frequency mv/lv transformer modelling for power line communication applications. In *18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 30–35. doi:10.1109/ISPLC.2014.6812339.

Lefort, R., Vauzelle, R., Courtecuisse, V., Idir, N., and Poussard, A.M. (2017). Influence of the mv/lv transformer impedance on the propagation of the plc signal in the power grid. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(3), 1339–1349. doi:10.1109/TPWRD.2016.2550861.

Males, C., Popa, V., Lavric, A., and Finis, I. (2012). Performance evaluation of power line communications over power transformers. In *2012 20th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 627–630. doi:10.1109/TELFOR.2012.6419288.

Masood, B., Usman, M., Gul, M.U., and Khan, W.A. (2017). Measurements and characterization of power transformer and low voltage access network for nb-plc. *International Journal of Communication Systems*, 30, e3344.

Razazian, K., Umari, M., Kamalizad, A., Loginov, V., and Navid, M. (2010). G3-plc specification for powerline communication: Overview, system simulation and field trial results. In *ISPLC2010*, 313–318. doi:10.1109/ISPLC.2010.5479881.

Sathler, L.H. and De Conti, A. (2020). Single-phase distribution transformer modeling for narrowband power line communications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(2), 674–683. doi:10.1109/TPWRD.2019.2920519.