

# Estratégias de Acoplamento de Sinais *Power Line Communication* em Circuitos de Média Tensão

Luís F. Sauthier\* Alexandre C. Oliveira\*\*  
Maurício de Campos\* Paulo S. Sausen\* Airam Sausen\*  
Benedito A. Luciano\*\* Rene R. Emmel Jr.\*\*\*

\* *Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul, RS, (e-mails: luis.sauthier@unijui.edu.br, campos@unijui.edu.br, sausen@unijui.edu.br, airam@unijui.edu.br).*

\*\* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB (e-mails: aco@dee.ufcg.edu.br, benedito.luciano@dee.ufcg.edu.br)*

\*\*\* *Departamento de Redes Subterrâneas, CEEE-D - Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica, RS (e-mail: ReneEJ@cee.com.br)*

---

**Abstract:** Power Line Communication (PLC) technology is already consolidated in several European countries, in addition to countries like the USA and Canada. However, its use in Brazil is still quite restricted, especially due to the particularities of the Brazilian electric networks. In this sense, currently dedicated and purposeful studies of techniques / methodologies for adapting this technology to the characteristics of Brazilian networks are still rare. The main objective of this work is to analyze strategies for coupling PLC signals in medium voltage circuits, in electrical energy distribution systems, through Inductive Couplers and Power Transformers already present in the distribution systems. All evaluative tests are carried out from a set of data obtained from an energy concessionaire in the south of Brazil aiming to analyze the real behavior of PLC technology in a typical Brazilian network.

**Resumo:** A tecnologia *Power Line Communication* (PLC) já está consolidada em vários países europeus, além de países como os EUA e Canadá. No entanto, o seu uso no Brasil ainda é bastante restrito especialmente pelas particularidades das redes elétricas brasileiras. Nesse sentido atualmente estudos dedicados e propositivos de técnicas/metodologias de adaptação desta tecnologia para as características das redes brasileiras ainda são raros. O principal objetivo deste trabalho é analisar estratégias de acoplamento de sinais PLC em circuitos de média tensão, em sistemas de distribuição de energia elétrica, através de Acopladores Indutivos e Transformadores de Potência já presentes nos sistemas de distribuição. Todos os ensaios avaliativos são realizados a partir de um conjunto de dados obtidos de uma concessionária de energia do sul do Brasil objetivando analisar o real comportamento da tecnologia PLC em uma típica rede brasileira.

*Keywords:* PLC; Communication; Medium Voltage; Distribution; Monitoring; Coupling

*Palavras-chaves:* PLC; Comunicação; Média Tensão; Distribuição; Monitoramento; Acoplamento

---

## 1. INTRODUÇÃO

Em um Sistema de distribuição de energia elétrica, para que sejam atingidas as especificações que definem uma "Smart Grid", uma infraestrutura de comunicação torna-se imprescindível. Apenas com a implantação de um sis-

\* Os autores agradecem ao programa de P&D Aneel e a CEEE-D pelo financiamento do projeto "Interligação de Subestações de Sistema Reticulado Subterrâneo através de Rede de Comunicação PLC (Power Line Communication) operando sobre o barramento de Média Tensão", objeto do contrato CONVEX No CEEE-D/5000002033.

tema de comunicação adequado, que possibilite ampliar a medição das grandezas dos sistemas elétricos (distribuição/transmissão), torna-se possível implantar sistemas de automação, sistemas de proteção, funções de controle, sistemas avançados de operação e gerenciamento da rede que abrangem os conceitos de auto reconfiguração, detecção e localização de faltas, entre outros. Neste sentido, fabricantes de equipamentos e concessionárias de energia tem buscado desenvolver soluções que possam atender aos requisitos de comunicação estabelecidos por esses novos sistemas. A busca por soluções, em um primeiro momento, ocorreu de forma "desordenada", onde cada fa-

bricante/concessionária desenvolvia seu próprio padrão de *hardware* e *software*. Atualmente este estágio foi superado e entidades como IEEE, CENELEC e IEC tem criado grupos para orientar as ações no sentido de padronização. Ainda que a questão da padronização tenha sido vencida, possibilitando a integração de dispositivos/sistemas de diferentes fabricantes, a escolha da(s) tecnologia(s) para implantação de um sistema de comunicação para suporte aos sistemas/serviços no ambiente das *Smart Grids* ainda não dispõem de procedimentos de escolha bem definidos. Aspectos como: taxa de transmissão, segurança de dados, sistema proprietário, sistema de terceiros, disponibilidade de canal, cobertura e outros, devem ser analisados adequadamente em razão da aplicação pretendida.

Em um cenário onde existem diversas tecnologias coexistindo, como por exemplo, redes de cobre, redes de fibra ótica, redes sem fio (CDMA, GSM, GPRS, WiMAX, 5G, Wi-SUN, WLAN, WiFi, ZigBee, entre outras) e onde os requisitos da rede de comunicação apresentam uma grande diversidade, não parece infundada a expectativa de que uma solução ótima seja obtida a partir da combinação de diferentes tecnologias como apresentado em Salvadori et al. (2013). Nesse cenário, a tecnologia PLC pode ser apontada como uma solução de interesse, dado que o meio de comunicação já existe (a própria rede elétrica) e também pelo fato da mesma abranger toda a capilaridade que alguns serviços de comunicação exigem, como por exemplo, o "*Smart Metering*".

Em aplicações de "*Smart Metering*" o uso da tecnologia PLC tem se consolidado, sendo contabilizada a instalação de mais de 30 milhões de dispositivos baseados em modems do padrão G3 (G3 Alliance) e mais de 20 milhões de medidores de energia baseados em modems do padrão PRIME (PRIME Alliance) Pirak et al. (2014). Essa base de dispositivos, em sua grande maioria, encontra-se instalada na Europa. O uso da tecnologia PLC em aplicação de *Smart Metering* está, em geral, restrita aos circuitos de baixa tensão, ou seja, a rede elétrica conectada ao secundário dos transformadores de distribuição. A ampliação do uso da tecnologia PLC, para suporte a outras aplicações dos sistemas de distribuição, inclusive contemplando cenários onde existe a inserção de geração distribuída, exige que o confinamento do PLC a rede de baixa tensão seja superado, expandido o seu alcance as redes de média tensão (MT).

Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho é fornecer subsídios para ampliar a discussão da aplicação da tecnologia PLC as redes de Média Tensão brasileiras. A partir da realização da análise das estratégias de acoplamento de sinais PLC em circuitos de média tensão, de sistemas de distribuição de energia elétrica, através de Acopladores Indutivos e Transformadores de Potência já presentes nos sistemas de distribuição.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 é discutido a aplicação da tecnologia PLC na média tensão, a seguir são apresentados estudos relativos a modelagem de transformadores de distribuição para sinais de alta frequência (HF - *High Frequency*) e o impacto dos mesmos no desempenho de sistemas PLC na média tensão. Também é apresentado uma análise dos modelos de acopladores para sinais PLC na média tensão. Já na

Seção 3 é apresentado o estudo de caso com as medições relativas ao estudo do comportamento de transformadores de distribuição aplicados às redes aéreas e subterrâneas. São apresentados e discutidos as medições realizadas no sistema reticulado de distribuição de energia localizado no centro da Cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. E finalmente na Seção 4 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 PLC na Média Tensão

A tecnologia PLC pode ser dividida em duas categorias: PLC Banda Estreita (*NarrowBand PLC* - NB PLC) e PLC Banda Larga (*BroadBand PLC* - BB PLC). Em geral a NB PLC é a tecnologia empregada na implantação dos sistemas de suporte às operações das concessionárias de energia, enquanto a BB PLC tem sido empregada para suporte a serviços de internet através da rede elétrica, o que não impede o seu uso, também para suporte a serviços privados das concessionárias de energia. A NB PLC opera com taxa de dados algumas dezenas de *kilobits* e abaixo da frequência de 1 MHz, Nessa categoria, a normatização dos parâmetros de comunicação seguem um dos seguintes padrões:

- CENELEC EN50065 (CENELEC EN50065-1/A1);
- IEEE 1901.2a (IEEE 1901.2-2015);
- ARIB (ARIB - *Association of Radio Industries and Business*).

A tecnologia PLC utiliza o mesmo cabeamento da rede elétrica e portanto está sujeita a fontes de ruído de amplo espectro e de formas distintas (ruído impulsivo, ruído branco, ruído colorido, entre outros). Além disso, o comportamento da impedância da rede de distribuição varia continuamente, podendo afetar o desempenho do acoplamento entre o circuito da rede e o modem PLC. Uma análise preliminar poderia suscitar a ideia de que o ambiente elétrico nos circuitos de média tensão pudessem apresentar menores níveis de ruído, visto que o acoplamento entre o circuito de média tensão e baixa tensão se dá através de um transformador de distribuição. Contudo, existe a possibilidade de níveis significativos de atenuação entre os circuitos primário e secundário dos transformadores, a propagação de sinais de alta frequência ocorre em ambos os sentidos, sendo mais favorecido o percurso da baixa tensão para a média tensão conforme pode-se verificar na Fig. 1 e Fig. 2.

Nas Fig.1 e Fig. 2 são apresentadas as medições realizadas em uma subestação subterrânea de energia denominada 68-7A, que compõe o sistema reticulado de distribuição de energia instalado no centro da cidade de Porto Alegre. As medições foram realizadas usando um VNA (Analisador de RF), modelo N9912A e um acoplador indutivo MICU 300A OH/LF. O VNA foi ajustado para registrar sinais na faixa de frequência de 30 kHz a 500 kHz, que corresponde à faixa de frequência do padrão IEEE 1901.2a.

Na Fig. 1, observa-se o registro de medição com o acoplador indutivo desconectado do cabo elétrico de média tensão, de modo que fosse possível o registro do nível de sinal correspondentemente nulo. Já na Fig. 2 é apresentado o registro de medição com o acoplador conectado ao

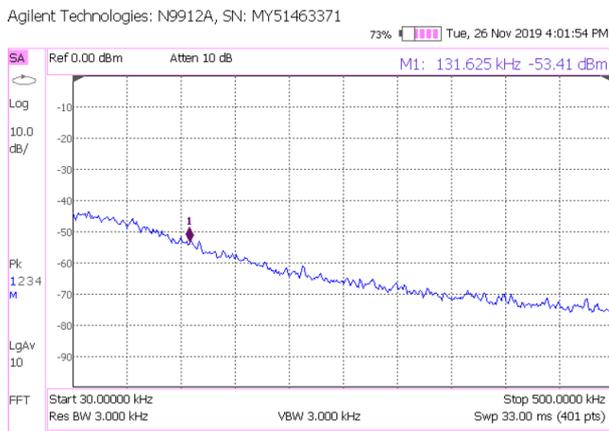


Figura 1. Medição com o acoplador indutivo desconectado do cabo elétrico. Fonte: Autor

cabo elétrico de média tensão. Ao comparar as Figs 1 e 2 percebe-se, de forma clara, a existência de ruído com amplitude, praticamente, uniforme ao longo de toda a faixa de frequências de operação do sistema PLC baseado no padrão IEEE 1901.2a.

Dado que o percurso dos sinais de alta frequência são favorecidos no sentido da baixa tensão para a média tensão, através do transformador de distribuição, infere-se desta análise que há um maior nível de confinamento dos sinais no circuito de média tensão. Não obstante haver a prevalência de transmissão de sinais da baixa para a média tensão, dado que a diferença de nível de atenuação pode ser pequena, a depender do modelo do transformador de distribuição, pode-se considerar na implantação de um sistema PLC na média tensão as seguintes topologias:

- Injeção/recuperação de sinal através de acoplador PLC instalado na média tensão. Nessa opção de topologia, em sistemas que usam cabeamento com malha de terra (caso do sistema subterrâneo do centro da cidade de Porto Alegre) a conexão do circuito PLC ocorre preferencialmente entre o núcleo do cabo e sua malha de terra, dado a facilidade de realização desse tipo de conexão. Nessa conexão o sinal PLC é injetado entre o núcleo do cabo e sua malha de terra. O sinal pode ser injetado usando acopladores indutivos ou

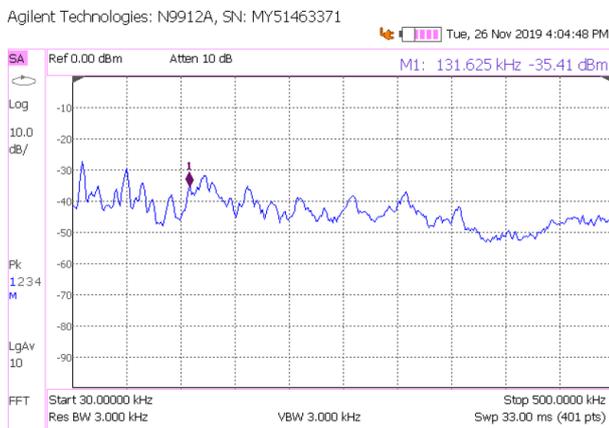


Figura 2. Medição com o acoplador conectado ao cabo elétrico. Fonte: Autor

- capacitivos, sendo que para as bandas CENELEC, recomenda-se o uso de acopladores capacitivos;
- Injeção/recuperação de sinal no circuito de baixa tensão, usando o transformador de distribuição como elemento acoplador entre os circuitos de média e baixa tensão.

## 2.2 Modelo de alta frequência para transformadores de distribuição

Na literatura técnica, o comportamento do transformador de potência submetido a sinais de frequência variável é conhecido como assinatura do transformador. Assim, constitui-se uma linha de pesquisa que envolve determinação de parâmetros, diagnósticos de falhas e estudos de transitórios eletromagnéticos, conforme apresentado em Alshuhaibani et al. (2016) e Filipović-Grčić et al. (2015).

Um dos primeiros trabalhos no qual foi proposta uma abordagem sobre a análise de resposta em frequência aplicada a transformadores de potência foi publicado em 1978 Dick and Erven (1978). O método ficou conhecido, internacionalmente, como “*The Frequency Response Analysis (FRA)*”, sendo objeto de estudo de grupos de trabalho ligados a diversas instituições tais como: IEEE, CIGRÉ e IEC.

No Brasil, uma das primeiras experiências com a medição de resposta em frequência aplicada a transformadores de potência foi apresentada em 1997 (Oliveira (1997)), onde os autores apresentaram a modelagem para o sistema PLC, transformador de média tensão/baixa tensão (MT/BT), cabos aéreos ou subterrâneos, e simulações por ATP/EMTP. Segundo os autores, com a aplicação do método por eles apresentado é possível avaliar a influência do sinal de frequência de 50Hz sobre a atenuação da transmissão da PLC na faixa de frequência de 1 a 30MHz. Na modelagem do transformador, foi feita uma observação importante e pertinente: o fato de os parâmetros do transformador (R, L e C), quando submetidos a frequências elevadas, variam com a frequência e não podem ser considerados como parâmetros lineares.

Na modelagem de transformadores submetidos à altas frequências (circuito elétrico equivalente) devem ser levados em consideração: as indutâncias próprias das bobinas do primário e do secundário e as mútuas entre elas, o efeito pelicular (*skin effect*). Além das perdas por correntes parasitas e as capacitâncias própria das bobinas e mútuas entre elas, assim como o efeito do comprimento dos cabos nos lados de média tensão (MT) e de baixa tensão (BT) Aguiar (2007), Gustavsen (2016).

Algumas dificuldades no estabelecimento de modelos representativos dos parâmetros dos transformadores monofásicos e trifásicos de forma exata dizem respeito às trajetórias dos fluxos magnéticos de dispersão, à anisotropia magnética e à não-linearidade do material do núcleo e à própria geometria de todas as partes que compõem esses equipamentos Jurisic et al. (2016). Entretanto, algumas dessas dificuldades têm sido mitigadas ou superadas por meio de trabalhos de pesquisa e desenvolvimento realizados desde o início do decênio de 1990 Ahmad (1992), assim como alguns trabalhos publicados recentemente, dentre os

quais Aljohani et al. (2016), Alsuhaibani et al. (2016) e Hussain et al. (2017).

O desenvolvimento e a realização de sistemas de medição *in loco* com vistas à obtenção do comportamento de transformadores de potência submetidos a sinais de frequência variável é importante, porque a maioria desse tipo de transformador se encontra instalados em subestações, onde permanecem energizados e submetidos às condições não controláveis, como por exemplo, sazonalidades e interferências eletromagnéticas. Como os transformadores de potência são equipamentos de grande porte, o desligamento e o transporte até laboratórios especializados para a realização de testes sob condições controladas implica em custos elevadíssimos e logística complexa, sobretudo se esses transformadores estiverem instalados em câmaras ou subestações subterrâneas localizadas em zonas urbanas densamente povoadas.

Face ao exposto, torna-se relevante o desenvolvimento de sistemas de medição *on line*, automatizado, dotado de ampla faixa de frequência e segurança na operação, que possa ser aplicado com o transformador operando normalmente, sem o inconveniente de ter que desligá-lo, como por exemplo, o “sistema de ponte auto balanceada” desenvolvido em Aguiar (2007).

Para simplificar a análise, a resposta em frequência (assinatura do transformador) pode ser dividida em faixas de frequências dentro das quais podem ser identificadas as principais contribuições para as ressonâncias causadas pelos efeitos indutivos e capacitivos, conforme ilustrado na Fig. 3.

Nas baixas frequências (abaixo de 2 kHz) predominam os efeitos da impedância de magnetização do núcleo, da reatância de dispersão e da capacitância dos enrolamentos. Entre 2 kHz e 20 kHz, as ressonâncias são determinadas pelas interações entre os enrolamentos. De 20 kHz a 1 MHz, a maior contribuição para a resposta em frequência tem origem na estrutura própria do enrolamento. Acima de 1 MHz, os efeitos dos cabos de conexão do sistema de medição são os responsáveis pelos picos de ressonâncias da resposta em frequência e os resultados obtidos devem ser interpretados com cuidado, sobretudo no que diz respeito aos enrolamentos de alta tensão (AT) conectados às buchas muito longas Picher et al. (2017).

O comprimento da conexão à terra influencia a resposta em frequência. Para alcançar uma alta reprodutibilidade, sugere-se usar o menor comprimento possível puxando a malha firmemente ao longo do corpo da bucha. Um dos erros de conexão mais comuns é o contato indesejado da malha de aterramento com o terminal da bucha. Tal erro influencia a resposta em frequência principalmente nas frequências mais altas. Para mitigar ou eliminar tal erro, recomenda-se usar uma cobertura isolante para as malhas trançadas, a fim de evitar este curto-circuito Rädler and Uhrig (2019).

### 2.3 Acopladores PLC para Média Tensão

Em Costa et al. (2017) é apresentado um estudo detalhado relativo a acopladores para aplicações PLC, tanto para tecnologias de banda estreita, como também de banda larga. Considerando o critério de conexão física para classi-

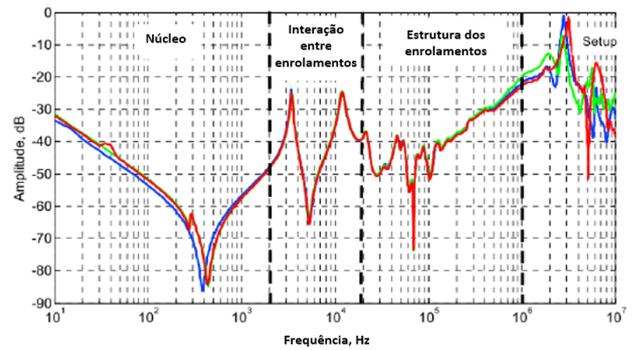


Figura 3. Principais contribuições dos elementos ressonantes na resposta em frequência. Fonte: Adaptado de Picher et al. (2017)

ficção dos dispositivos de acoplamento, são apresentados quatro tipos de acopladores: Capacitivos, Indutivos, Resistivos e do tipo Antena. Os acopladores resistivos são indicados para aplicações em baixa tensão e os acopladores do tipo antena apresentam significativos níveis de atenuação. Como os circuitos de média tensão representam o cenário de interesse nos estudos apresentados neste trabalho, desconsidera-se o estudo do acoplamento resistivo. Como já comentando anteriormente, sendo o ambiente elétrico dos circuitos de média tensão fortemente impactado pelo ruído oriundo dos circuitos de baixa tensão, o nível de atenuação do acoplador passa a ser um elemento relevante no projeto de um sistema de comunicação PLC, sendo priorizado o uso de acopladores com baixas perdas de acoplamentos. Portanto, os acopladores do tipo antena também são desconsiderados no estudo que se segue.

Os acopladores capacitivos são constituídos por um conjunto de capacitores conectados em série, de modo a prover o nível de tensão que suporte a tensão nominal do sistema em que o mesmo será conectado. Esta conexão dá-se através da fixação de uma das extremidades do acoplador ao cabo de média tensão e a outra extremidade sendo aterrada. Como é característico dos capacitores os mesmos apresentam baixas impedâncias para sinais de alta frequência e elevada impedância para sinais de baixa frequência. Assim, o sinal de 60Hz da rede é fortemente atenuado pelo acoplador capacitivo, enquanto que o sinal PLC, de alta frequência, transita por um caminho de menor impedância (por essa característica, os acopladores capacitivos são os que apresentam os menores fatores de perda de inserção) Costa et al. (2017). Há dois modelos de acopladores capacitivos: acoplador isolado e acoplador não isolado. O acoplador isolado utiliza um transformador para isolamento galvânica, sendo recomendado para uso em sistemas tensão alternada. Os modelos não isolados tem um menor custo mas deixam o sistema de comunicação mais susceptível aos transitórios do circuito de potência de média tensão.

Os acopladores indutivos, de forma semelhante aos acopladores capacitivos, podem oferecer isolamento galvânica ou não. No caso dos acopladores não isolados, o elemento indutivo do isolador é acoplado diretamente ao cabo de média tensão. No caso dos acopladores isolados, os mesmos são instalados envolvendo o cabo. Em geral são do tipo “Split Core”. Ambos os modelos não exigem o desligamento

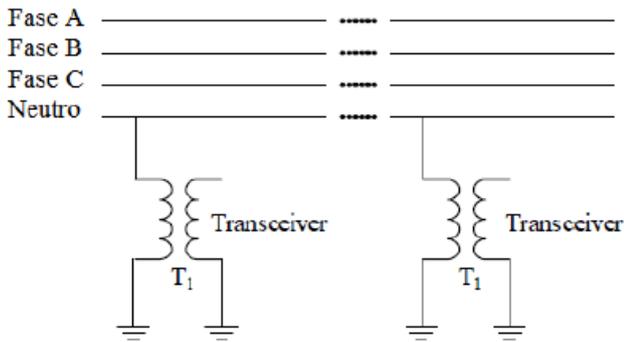


Figura 4. Diagrama elétrico de acoplador indutivo não isolado (série). Fonte: adaptado de Costa et al. (2017)

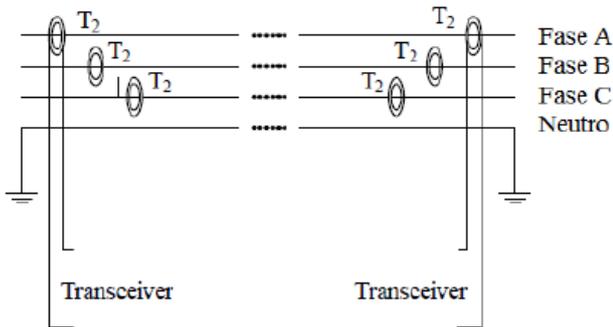


Figura 5. Diagrama elétrico de acoplador indutivo isolado shunt. Fonte: adaptado de Costa et al. (2017)

do sistema elétrico para sua instalação, sendo contudo, mais simples e de menor complexidade a instalação do modelo isolado "Split Core". O princípio de operação do acoplador indutivo do tipo "Split Core" equivale ao de um transformador de corrente com relação de espiras de  $1/N$ , onde "N" representa o número de espiras que compõe a bobina do acoplador. De modo a apresentar o maior fator de acoplamento possível, que se reflete em menores perdas de inserção, menores perdas de retorno e maior faixa de frequência de operação, o uso de núcleos policristalinos em formato toroidal são recomendados. O formato toroidal do núcleo minimiza os fluxos de dispersão e o material policristalino apresenta elevada permeabilidade magnética em faixa de frequência correspondente a das tecnologias PLC que seguem o padrão IEEE 1901.2a (até 500 kHz) IEE (2013).

Na Fig. 4 e Fig. 5 são apresentados os diagramas elétricos de conexão de acopladores indutivos isolados (conexão "shunt") e não isolados (conexão série).

### 3. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso usado neste artigo refere-se a um projeto de P&D que tem por objetivo o desenvolvimento de sistema de comunicação PLC que permita a interligação de um conjunto de 160 subestações subterrâneas de energia elétrica que compõem o sistema reticulado de distribuição de energia localizado no centro da cidade de Porto Alegre, pertencente a concessionária CEEE-D. O intuito, é estabelecer um sistema de comunicação baseado em tecnologia PLC no circuito de média tensão do sistema. Essas subestações contam com sistema de monitoramento de

grandezas elétricas e ambientais que faz uso de um sistema de comunicação GSM para a transferência dos dados até o centro de controle da concessionária. A interligação das subestações através de uma rede privada (com tecnologia PLC), possibilitará como ação imediata a substituição do sistema GSM pelo sistema PLC. O acoplador utilizado nos testes, é fabricado pela empresa PREMO (Espanha), modelo MICU 300A OH/LF, com corrente nominal de 300A, tensão de trabalho de até 24 kV, faixa de frequência de operação de 30kHz a 500kHz (cobrindo toda a faixa de frequência de NB PLC regido pelo padrão IEEE 1901.2a IEE (2013).

Seguindo as linhas de pesquisa já discutidas avaliam-se duas estratégias para projeto de comunicação utilizando o sistema PLC: (i) estratégia baseada em acoplador e (ii) estratégia baseada no uso dos transformadores de distribuição do sistema reticulado como elementos de acoplamento.

No caso da primeira estratégia que é baseada nos transformadores como elementos de acoplamento, faz-se necessário conhecer o comportamento desses dispositivos em relação a sua resposta em frequência na faixa de frequência dos modems PLC com potencial uso na solução final a partir de modems ECHELON PL 3120 ([www.echelon.com](http://www.echelon.com)), MICROCHIP PL360 ([www.microchip.com](http://www.microchip.com)) e MegaChips MLKHN1501 HD-PLC ([www.megachips.com](http://www.megachips.com)). Este último sendo um modelo de BB PLC. Para realização desse levantamento foram realizados os ensaios descritos a seguir:

- (1) Aplicação de sinal na faixa de frequência de 30kHz a 500kHz usando a função "SWEEP" de gerador de formas de onda arbitrarias, com amplitude de 1V RMS a um enrolamento primário (com relação ao terra, carcaça do transformador) do transformador de distribuição, com os demais terminais do primário conectados ao terra por uma resistência de 50 ohms. A leitura de sinal, é realizada através de um Analisador de Espectro em um terminal secundário (com relação ao neutro) do transformador de distribuição, com os demais terminais do secundário conectados ao neutro por uma resistência de 50 ohms;
- (2) Aplicação de sinal na faixa de frequência de 30 kHz a 500 kHz usando a função "SWEEP" de gerador de formas de onda arbitrarias, com amplitude de 1V RMS a um enrolamento secundário (com relação ao neutro) do transformador de distribuição, com os demais terminais do secundário conectados ao neutro por uma resistência de 50 ohms. A leitura de sinal, é realizada através de um Analisador de Espectro em um terminal primário (com relação ao terra, carcaça do transformador) do transformador de distribuição, com os demais terminais do primário conectados ao terra por uma resistência de 50 ohms;
- (3) Aplicação de sinal PLC usando modem PL 360, configurado para o padrão G3, com modulação DBPSK\_ROBO (modo robusto, onde há envio repetido de símbolos), transmitindo pacote de dados de 97 bytes, com sinal aplicado a um enrolamento secundário (com relação ao neutro) do transformador de distribuição. Os demais terminais do secundário, conectados ao neutro por uma resistência de 50 ohms, onde a leitura do sinal é realizada em um terminal secundário (com relação ao neutro) do transformador de

Tabela 1. Intensidade de sinal PLC recebido x Percurso de propagação do sinal. Fonte: Autor

Percurso de propagação	RSSI
Injeção X3 - Leitura acoplador H1	62
Injeção X3 - Leitura acoplador H3	71
Injeção X3 - Leitura acoplador H2	73
Injeção X2 - Leitura acoplador H2	72
Injeção X2 - Leitura acoplador H3	52
Injeção X2 - Leitura acoplador H1	74
Injeção X1 - Leitura acoplador H1	76
Injeção X1 - Leitura acoplador H2	52
Injeção X1 - Leitura acoplador H3	76
Injeção acoplador H1 - Leitura acoplador H1	111
Injeção acoplador H2 - Leitura acoplador H1	103
Injeção acoplador H2 - Leitura acoplador H2	112
Injeção acoplador H3 - Leitura acoplador H2	107
Injeção acoplador H3 - Leitura acoplador H3	112
Injeção acoplador H1 - Leitura acoplador H3	101
Injeção X1 do transf. 1 - Leitura X1 do transf. 2	89

- distribuição, com os demais terminais do secundário conectados ao neutro por uma resistência de 50 ohms (o terminal de injeção de sinal e de leitura foi o X1);
- (4) Aplicação de sinal PLC usando modem PL 360, configurado para o padrão G3, com modulação DBPSK\_ROBO (modo robusto, onde há envio repetido de símbolos), transmitindo pacote de dados de 97 bytes, com sinal aplicado a um enrolamento secundário (com relação ao neutro) do transformador de distribuição. Os demais terminais do secundário são conectados ao neutro por uma resistência de 50 ohms e a leitura de sinal usando acoplador indutivo e Analisador de Espectro em um terminal primário;
  - (5) Aplicação de sinal PLC usando modem PL 360, configurado para o padrão G3, com modulação DBPSK\_ROBO (modo robusto, onde há envio repetido de símbolos), transmitindo pacote de dados de 97 bytes, com sinal aplicado a um enrolamento primário do transformador de distribuição usando acoplador indutivo. A leitura do sinal, é realizada usando acoplador indutivo e Analisador de Espectro em um terminal primário diferente do transformador de distribuição, com os terminais do secundário conectados ao terra por uma resistência de 50 ohms.

Em todos os ensaios descritos anteriormente os transformadores não estavam energizados. O objetivo era de caracterização dos dispositivos. Foram ensaiados transformadores de 75kVA, 150 kVA e 225 kVA de uso em redes aéreas e um transformador de 500 kVA de uso em sistemas subterrâneos (mesmo modelo usado no sistema reticulado da CEEE-D no centro da cidade de Porto Alegre). Em relação aos ensaios descritos nos itens 3, 4 e 5, em todos os ensaios os 1000 pacotes de dados foram transmitidos sem erro. Nesse aspecto o desempenho é idêntico. Contudo, ao observar o parâmetro RSSI coletado pelo módulo de comunicação do modem PL 360 são observadas diferenças, que são sumarizadas na Tabela 1. Todos os ensaios foram realizados com o transformador de 500 kVA.

Analisando os dados presentes na Tabela 1 percebe-se que o nível de perda de sinal com o uso dos acopladores é menor que os dos demais percursos de propagação. O percurso onde o sinal é injetado e coletado no secundário dos transformadores se coloca em uma posição intermediária

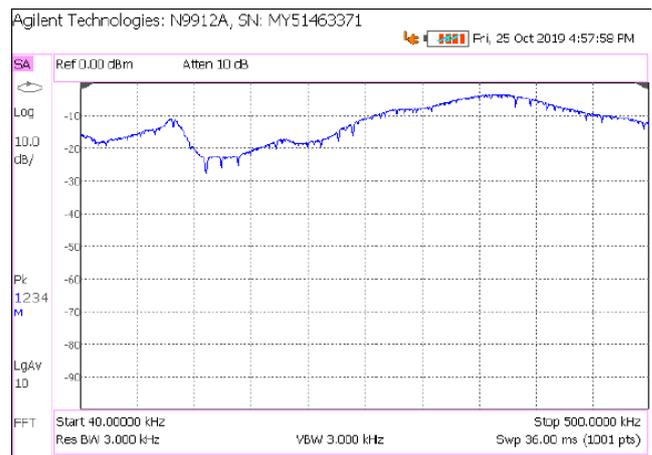


Figura 6. Curva de reposta em frequência entre terminais X1 e H1 do transformador BT-AT. Fonte: Autor

entre as opções analisadas, apresentando uma atenuação total maior que a observada com o uso exclusivo dos acopladores indutivos, mas inferior a opção em que a injeção é realizada através do secundário do transformador e a leitura a partir de um acoplador indutivo. Com relação ao ensaio de resposta em frequência dos transformadores, dado o limite de páginas do artigo, serão apresentadas as curvas dos ensaios com o transformador de 500kVA de uso em redes subterrâneas.

Na Fig. 6 é apresentada a curva de reposta em frequência entre terminais X1 e H1 do transformador de 500 kVA. O sinal foi Injeção no lado de baixa e leitura no lado de alta. Já na Fig. 7 o sinal é injetado no lado de alta e leitura no lado de baixa. Na Fig. 8 é apresentada a curva de reposta em frequência entre terminais X1 e H2 do transformador, onde o sinal de entrada é conectado ao terminal de BT e a leitura nos terminais de AT. Já a Fig. 9, representa a conexão nos terminal de AT e leitura nos terminais de BT. A Fig. 10 representa a resposta em frequência onde o sinal foi injetado nos terminais de BT e a leitura nos terminais de AT. A Fig. 11 representa justamente o oposto.

A análise das curvas apresentadas nas Fig. 6 até a Fig. 11 ratificam as conclusões dos trabalhos referenciados ao longo do texto com relação ao comportamento dos transformadores de distribuição, no que tange a sua capacidade de propagar sinais de alta frequência entre os seus terminais do secundário e primário. Outra observação em relação aos dados obtidos nos diversos ensaios realizados diz respeito ao comportamento do sentido de propagação do sinal. Observa-se que a diferença de amplitude de sinal, quando há, está limitada a 5dB, que corrobora com os valores obtidos em Lefort et al. (2016).

### 3.1 Medidas no sistema de distribuição Reticulado do centro da cidade de Porto Alegre

De modo a avaliar o comportamento das estratégias de acoplamento em um cenário real, foram realizados novos ensaios agora em campo, junto ao sistema reticulado de distribuição de energia da concessionária CEEE-D no centro da cidade de Porto Alegre. Cabe reforçar que este sistema já utiliza a comunicação PLC para obter dados de um relé que esta instalado no interior do protetor do transformador. A comunicação PLC é realizada a partir de um

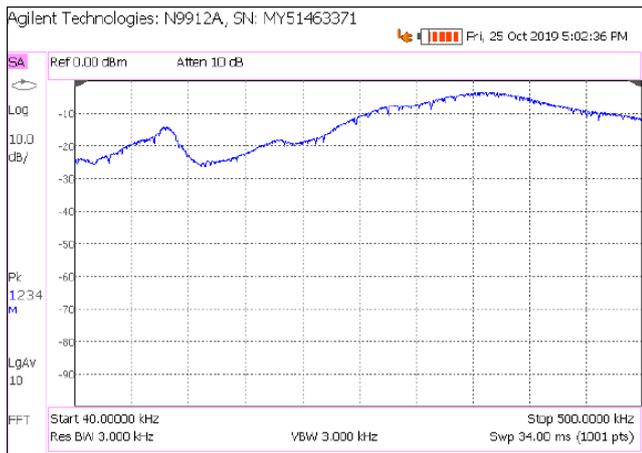


Figura 7. Curva de resposta em frequência entre terminais X1 e H1 do transformador AT-BT. Fonte: Autor

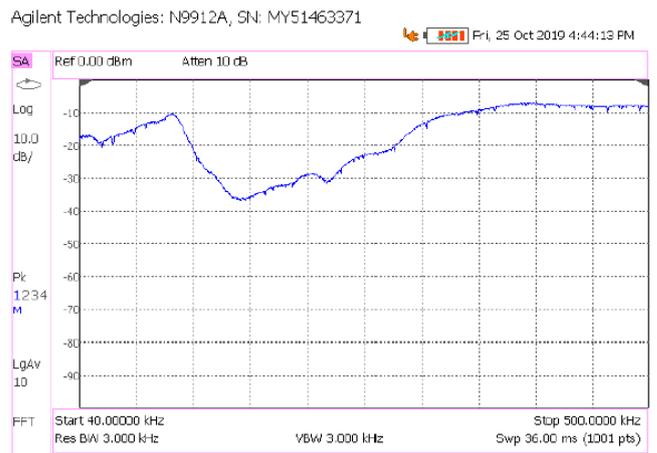


Figura 10. Curva de resposta em frequência entre terminais X1 e H3 do transformador BT-AT. Fonte: Autor

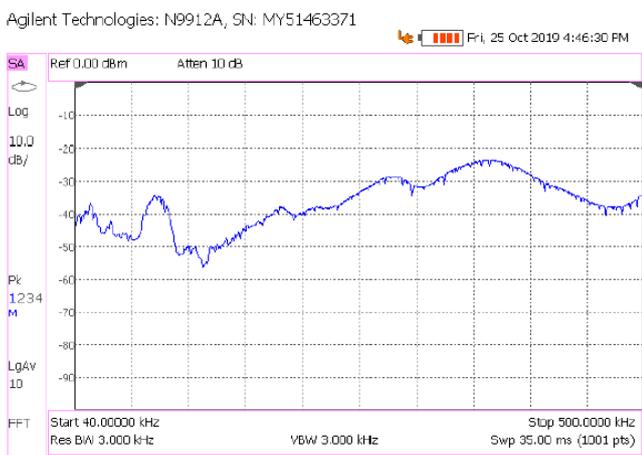


Figura 8. Curva de resposta em frequência entre terminais X1 e H2 do transformador BT-AT. Fonte: Autor

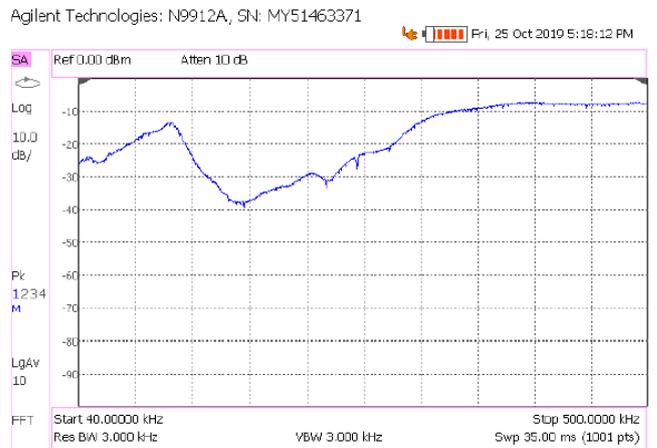


Figura 11. Curva de resposta em frequência entre terminais X1 e H3 do transformador AT-BT. Fonte: Autor

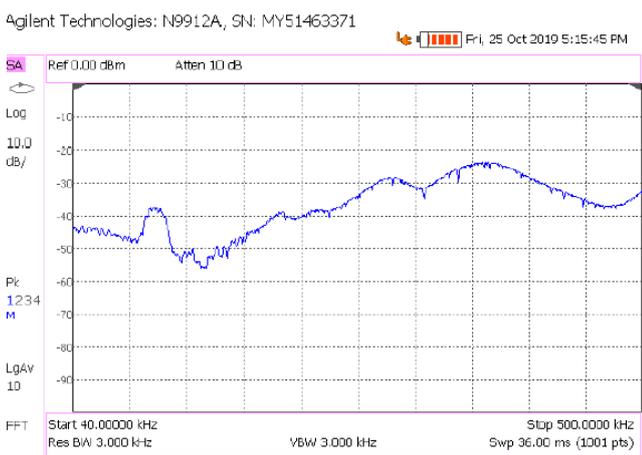


Figura 9. Curva de resposta em frequência entre terminais X1 e H2 do transformador AT-BT. Fonte: Autor

modem modelo ECHELON PL 3120 que opera seguindo o padrão CENELEC banda C. Nesta configuração o modem gera duas portadoras para transmissão dos dados, uma em 115 kHz e outra em 132kHz. Este sistema injeta um sinal PLC no secundário de um transformador de 500 kVA.

Com a instalação de um acoplador indutivo no cabo de média tensão de uma subestação em que o sistema PLC ECHELON estava operando, foi realizada a medição do sinal no circuito de média tensão. Esta configuração corresponde à injeção de sinal através do secundário do transformador e a leitura do sinal a partir de acoplador indutivo no lado primário do transformador. Conforme análise apresentada na seção anterior (ver dados da Tabela 1) esta é a configuração com menores níveis de sinal de recepção. Na Fig. 12 é apresentada a medição realizada com o uso do acoplador e analisador de espectro.

Observa-se que o sinal PLC possui uma amplitude bastante proeminente, o que suscita a possibilidade efetiva desse sinal poder alcançar outras subestações no entorno desta que gera o sinal apresentado na imagem da Fig. 12.

#### 4. CONCLUSÕES

No presente trabalho são apresentados os resultados parciais do projeto de P&D, que visa o desenvolvimento de uma solução de comunicação PLC a ser aplicada no circuito de média tensão do sistema reticulado de distribuição de energia localizado no centro da cidade de Porto Alegre no estado do Rio Grande do Sul. Para execução desse objetivo, realiza-se uma análise de formas de injeção e

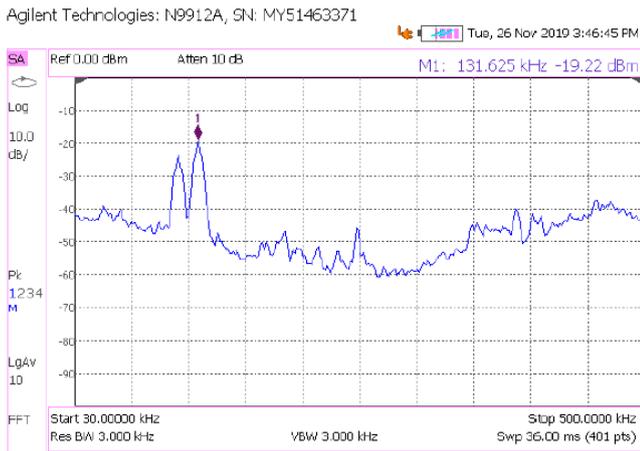


Figura 12. Medição de sinal PLC de modem ECHELON no barramento de média tensão em subestação do sistemas reticulado de distribuição de energia do centro da cidade de Porto Alegre. Fonte: Autor

leitura de sinais PLC no circuito de média tensão, com foco no uso de dispositivos acopladores, bem como no uso dos próprios transformadores de distribuição para essa finalidade. O sucesso de uma ou outra estratégia está relacionado a eficiência com que o sinal possa ser injetado de modo a se sobrepor aos ruídos presentes na rede e que são propagados dos circuitos de baixa tensão para a média tensão, como discutido no texto. Outros aspectos para seleção da solução que atenda ao sistemas reticulado envolvem elementos não necessariamente afins com a questão de eficiência de injeção de sinais. Contudo, dizem respeito às particularidades do sistema reticulado, como a possibilidade de alagamento das câmaras onde estão instaladas as subestações, impondo requisitos de proteção adicionais aos dispositivos aplicados nas subestações, que tem direto impacto na solução baseada em acopladores.

Os testes realizados com modelos de modems PLC e transformadores apontam para a possibilidade concreta de estabelecimento de canais de comunicação usando a tecnologia PLC nos circuito de média tensão. A partir dos resultados apresentados, é possível observar que o nível de atenuação do sinal é menor para frequência mais elevadas dentro dos limites estabelecidos pela CENELEC. Embora o transformador possa ser utilizado como dispositivo de acoplamento, os resultados demonstram uma sensibilidade melhor com a utilização do acoplador diretamente à rede de média. Contudo, mais estudos precisam ser efetivados, em condições reais, com o sistema energizado, de modo que seja possível, de forma segura, estabelecer uma de topologia confiável de comunicação baseada na tecnologia PLC.

## REFERÊNCIAS

(2013). Ieee standard for low-frequency (less than 500 khz) narrowband power line communications for smart grid applications. *IEEE Std 1901.2-2013*, 1–269.

Aguiar, E. (2007). Análise de resposta em frequência aplicada em transformadores de potência. In *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*. Universidade Federal de Minas Gerais.

Ahmad, A. (1992). Contribution a la modelisation des transformateurs de puissance et de leur comportement en haute frequence. (d).

Aljohani, O., Abu-Siada, A., and Shengtao Li (2016). High frequency power transformer modelling for frequency response analysis studies. In *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 291–294.

Alsuhaibani, S., Khan, Y., Beroual, A., and Malik, N. (2016). A review of frequency response analysis methods for power transformer diagnostics. *Energies*, 9, 879. doi: 10.3390/en9110879.

Costa, L., Queiroz, C., Adebisi, B., Costa, V., and Ribeiro, M. (2017). Coupling for power line communication: A survey. *Journal of Communication and Information Systems*, 32. doi:10.14209/jcis.2017.2.

Dick, E.P. and Erven, C.C. (1978). Transformer diagnostic testing by frequency response analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97(6), 2144–2153.

Filipović-Grčić, D., Filipović-Grčić, B., and Uglešić, I. (2015). High-frequency model of the power transformer based on frequency-response measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30, 34–42. doi:10.1109/TPWRD.2014.2327061.

Gustavsen, B. (2016). Eliminating Measurement Cable Effects from Transformer Admittance Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(4), 1609–1617. doi:10.1109/TPWRD.2016.2536704.

Hussain, M., Arbab, N., and Khan, A. (2017). High frequency modeling of transformer using black box frequency response analysis.

Juricic, B., Uglešić, I., Xemard, A., and Paladian, F. (2016). Difficulties in high frequency transformer modeling. *Electric Power Systems Research*, 138. doi: 10.1016/j.epsr.2016.02.009.

Lefort, R., Vauzelle, R., Courtecuisse, V., Idir, N., and Poussard, A.M. (2016). Influence of the mv/lv transformer impedance on the propagation of the plc signal in the power grid. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32, 1–1. doi:10.1109/TPWRD.2016.2550861.

Oliveira, O. B., C.W.R.R.A.C.O.-M.J.C. (1997). Medições de ressonâncias em transformadores de potência. *Anais do XIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*.

Picher, P., Tenbohlen, S., Lachman, M., Scardazzi, A., and Patel, P. (2017). Current state of transformer fra interpretation. *Procedia Engineering*, 202, 3–12. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.689.

Pirak, C., Sangsuwan, T., and Buayairaksa, S. (2014). Recent advances in communication technologies for smart grid application: A review. 1–4.

Rädler, M. and Uhrig, S. (2019). Medições de resposta em frequência (fra) confiáveis e reproduzíveis em transformadores de potência. *O Setor Elétrico*.

Salvadori, F., Gehrke, C.S., De Oliveira, A.C., De Campos, M., and Sausen, P.S. (2013). Smart grid infrastructure using a hybrid network architecture. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(3), 1630–1639. doi:10.1109/TSG.2013.2265264.