



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

FI/GTL/29  
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**

**LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE ENERGIA ELÉTRICA PARA O USO DE SISTEMAS POWER LINE COMMUNICATION: SURVEY PLC**

**Antonio Angelo Missiaggia Picorone (\*)**  
**CEMIG Distribuição S/A**

**Moisés Vidal Ribeiro**  
**Universidade Federal de Juiz de Fora**

**RESUMO**

Esse trabalho discute a medição e caracterização das redes de distribuição de energia elétrica de baixa tensão (RDE-BT) e externa (*outdoor*) como meio de comunicação de dados para sistemas *power line communication* (PLC). São apresentados os principais parâmetros que auxiliam nessa caracterização e alguns dos parâmetros obtidos a partir de uma campanha de medição realizada na RDE-BT da CEMIG. As estratégias e análises apresentadas podem auxiliar na tomada de decisão quanto ao uso de sistema PLC em redes de energia elétrica (REE) de média e alta tensão, posto que o acoplamento entre o conjunto de medição/REE pode ser facilmente substituído.

**PALAVRAS-CHAVE**

Comunicação de dados, PLC, Caracterização, Campanha de medição, Rede de Energia Elétrica

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A tecnologia *power line communication* (PLC) utiliza a rede de energia elétrica (REE) como meio de comunicação de dados e se enquadra no conceito de tecnologia de comunicação verde, saudável e sustentável (*green, healthy and sustainable communication technology*), posto que a infraestrutura de energia elétrica já se encontra instalada e disponível para uso. Diversos estudos têm sido conduzidos a fim de avaliar o uso da tecnologia PLC para várias demandas de telecomunicações das concessionárias de energia elétrica, principalmente, no que se refere às necessidades das redes inteligentes (*smart grids*), além do acesso banda larga à internet. Vários projetos de P&D, apoiados por concessionárias de energia elétrica brasileiras, foram desenvolvidos para verificar a viabilidade técnica de se utilizar as tecnologias PLC disponíveis no mercado nas REE de baixa tensão (BT) e média tensão (MT).

Entretanto, as experiências com o uso da tecnologia PLC no Brasil, majoritariamente apoiados com recursos de P&D ANEEL têm sido desanimadoras, pois as tecnologias PLC analisadas não foram desenvolvidas a partir das características das REE brasileiras. Na quase totalidade desses projetos de P&D é reportada que o emprego da tecnologia PLC não é confiável devido às características inerentes das REE, tais como: a) foram projetadas para a transmissão de elevada energia à baixa frequência; b) não são blindadas e, portanto, interferem e sofrem interferências de sistemas de comunicação de dados operando na mesma faixa de frequência; c) apresentam comportamento variante no tempo e na frequência devido à dinâmica das cargas conectadas; d) a ocorrência de ruídos impulsivos de elevada potência, do ponto de vista de telecomunicações, reduz consideravelmente o desempenho dos sistemas PLC. Todavia, o emprego de uma tecnologia de telecomunicação pressupõe o conhecimento das informações do meio de comunicação. Noutras palavras, conhecer o meio de comunicação é condição *sine qua non* para desenvolver e empregar sistemas de comunicação de dados que maximizem a utilização dos recursos disponíveis. Assim, para se conhecer os limites de uso das REE como canal de

(\*) Rua Espírito Santo, n° 467 – CEP 36.010-040 - Juiz de Fora, MG – Brasil  
Tel: (+55 32) 3313-6668 – Email: picorone@cemig.com.br

comunicação PLC é importante caracterizar estatisticamente diversos parâmetros que subsidiam a compreensão da propagação dos sinais PLC na REE.

De uma forma geral, pode-se perceber que a maioria dos projetos de P&D relacionados com a tecnologia PLC no Brasil não geraram conhecimento sobre qual é o real potencial das REE brasileira como meio de comunicação de dados, embora esse conhecimento seja de suma importância para indicar aos fabricantes e as concessionárias os requisitos mínimos que as tecnologias PLC devem atender para funcionar com garantia de serviço (QoS). Sem esse tipo de informação, as concessionárias continuarão realizando novos projetos de P&D para verificar o desempenho de novas tecnologias PLC com a abordagem tentativa e erro. Além disso, esse conhecimento fornece subsídios para desenvolvimento de novas tecnologias PLC ou modificações nas tecnologias existentes de forma a garantir o uso efetivo e eficiente das mesmas nas REE brasileiras.

Nesse contexto, o presente trabalho discute a medição e a caracterização das redes de distribuição de energia elétrica de baixa tensão (RDE-BT) e externa (*outdoor*) como meio de comunicação de dados para sistemas PLC. São apresentados os principais parâmetros que auxiliam a caracterização da REE e discutidos, como exemplo de análise desses parâmetros, alguns resultados obtidos a partir de uma campanha de medição realizada na RDE-BT de uma concessionária brasileira. Apesar do presente trabalho ter sido desenvolvido para as redes de BT, todas as estratégias e análises descritas no trabalho podem ser utilizadas em redes de média tensão (MT) e alta tensão (AT), desde que o acoplamento entre o conjunto de medição e a REE seja substituído.

O trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é apresentada a campanha de medição que foi realizada para a obtenção dos dados para a extração das características do canal de comunicação PLC, rede de distribuição de energia elétrica; A Seção 3 apresenta os parâmetros que auxiliam na caracterização do canal PLC; As características do canal PLC *outdoor* analisado são apresentados na Seção 4, finalmente; na Seção 5 são apresentadas as conclusões desse trabalho.

## 2.0 - CAMPANHA DE MEDIÇÃO

O banco de dados utilizado para caracterizar a RDE-BT como canal PLC *outdoor* foi gerado a partir de uma campanha de medição na cidade de Juiz de Fora, MG, Brasil. As escolhas das RDE-BT foram baseadas nas facilidades de acesso às mesmas, no tipo de ligação dos consumidores, monofásico, e o tipo de rede, multiplexada com cores diferentes para cada fase. Além disso, foi levada em conta a classe econômica dos consumidores e as oportunidades de aplicação da tecnologia PLC, pois em algumas situações não se tinha qualquer fornecedor de serviços banda larga no bairro. Dessa forma, pode-se classificar o ambiente escolhido como representativo de um típico consumidor para o uso da tecnologia PLC no Brasil. Essa seção foi escrita tomando como referência (1) e (2).

A campanha de medição foi realizada durante 14 dias em dois bairros distintos da cidade de Juiz de Fora, obtendo amostras da resposta em frequência do canal PLC (CFR, do inglês, *channel frequency response*), ruído e impedância de acesso coletadas no período de 8h00 às 17h00. Tais amostras foram obtidas através de um conjunto de equipamentos e métodos matemáticos utilizados exclusivamente para esse propósito, denominados de *Setup* de Medição. Dois conjuntos de equipamentos foram utilizados: *Setup* TX e *Setup* RX. Basicamente, o *Setup* TX foi projetado para gerar um sinal modulado por divisão de frequências ortogonais (OFDM) e transmiti-lo pela REE sob estudo, a fim de permitir que o *Setup* RX estime a CFR. Além disso, ele é responsável pela medição da impedância de acesso à RDE-BT nos pontos de conexão. O *Setup* RX foi projetado para medir o sinal transmitido pelo *Setup* TX, além de medir o ruído aditivo e os sinais de rádio, que através de uma antena omnidirecional, conectada a uma entrada de dados do sistema de aquisição de dados, capta os sinais de rádio gerados por sistemas de comunicação sem fio, que operam na mesma banda de frequência, ou seja, entre 1,7 e 100 MHz.

Assim sendo, além da aquisição da interferência do sinal de rádio, induzido na RDE-BT por sistemas de comunicação sem fio através de acoplamento, também foi aquisitada a mesma interferência a partir de uma antena omnidirecional. Isso permite analisar qual dos dois tipos de sensores, acoplador capacitivo ou antena omnidirecional, é o mais adequado para o monitoramento de espectro. Além disso, técnicas de sincronização, correção da taxa de amostragem, estimador baseado nos mínimos quadrados (LS, do inglês, *least square*) e equalizador forçado a zero (ZF, do inglês, *zero-forcing*) foram utilizadas. Maiores detalhes sobre os equipamentos utilizados na campanha de medição serão apresentados oportunamente. Por questões estratégicas, como ajuste manual da potência transmitida, o *Setup* RX foi instalado no poste da RDE e o *Setup* TX ao lado do medidor de energia elétrica da unidade consumidora. Diversas configurações de posicionamento do *Setup* TX e *Setup* RX na RDE-BT foram utilizadas para a formação do banco de dados

### 2.1 Composição do *Setup* de Medição

Como já foi dito, o *Setup* de Medição é formado por um conjunto de equipamentos e métodos utilizados exclusivamente com o propósito de estimar a resposta em frequência do canal (CFR, do inglês, *channel frequency response*) ruído e impedância de acesso da RDE-BT. A Figura 1 mostra o diagrama em blocos do *Setup* TX,

detalhando as conexões entre os equipamentos que o constituem. Os pontos A e B indicam os pontos de alimentação dos equipamentos. A energia é fornecida por um gerador a diesel. Um transformador de isolamento e um nobreak são usados para isolar o circuito do *Setup TX* da fonte de energia e para evitar interrupções de energia durante um curto período de tempo, respectivamente. Também nessa figura, Fase e Neutro indicam a conexão do *Setup TX* à RDE-BT usada para injetar o sinal.

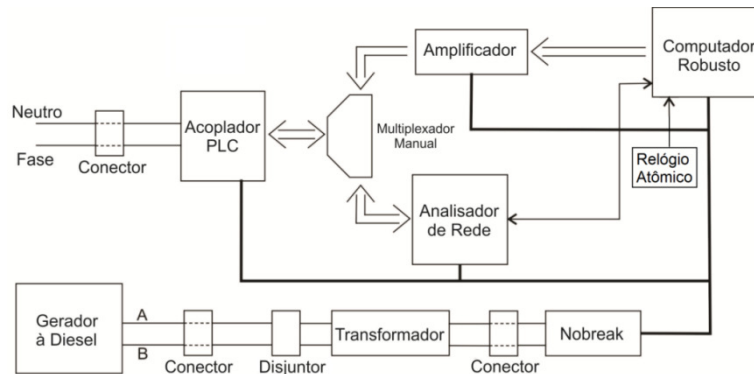


FIGURA 1 - Diagrama em blocos do *Setup TX*.

O multiplexador manual configura o *Setup TX* em um dos dois possíveis modos de operação. O primeiro é para estimar a CFR. Nesse modo de operação, o sinal armazenado na memória do computador industrial é transferido para a memória da placa de geração de dados. Em seguida, o equivalente no domínio do tempo do sinal, na saída do conversor digital-analógico (DAC - do inglês *digital-to-analog converter*), é injetado na entrada do amplificador. A amplificação do sinal é ajustada manualmente para garantir que o *Setup RX* receba o sinal transmitido, que foi distorcido pelo canal PLC e corrompido pelo ruído aditivo. O sinal na saída do amplificador é enviado para a entrada do acoplador PLC. Finalmente, a saída do acoplador PLC é responsável por injetar o sinal amplificado na RDE-BT, através do ponto de conexão. O segundo modo de operação proporciona o uso do *Setup TX* para medir a impedância de acesso no ponto de conexão entre o *Setup TX* e a RDE-BT. Neste cenário, o analisador vetorial de rede é conectado diretamente aos terminais do acoplador PLC, o que permite que ele meça a impedância de acesso nesse ponto. A caracterização, *a priori*, do acoplador PLC permite a remoção de sua influência sobre as medidas. Finalmente, as medidas de impedância de acesso são armazenadas na memória do computador industrial.

A Figura 2 ilustra o diagrama em blocos do *Setup RX*. Como no *Setup TX*, A e B designam o ponto de conexão da fonte de energia (gerador diesel). Um nobreak e um transformador isolador são utilizados. Fase e Neutro denotam o ponto de conexão do *Setup RX* com a REE sob estudo. O acoplador PLC é posicionado entre a REE e a placa de aquisição de dados, instalada no computador industrial. Essa placa de aquisição tem dois canais de conversores analógico-digital (ADC - do inglês, *analog-to-digital converter*) que são conectados ao acoplador PLC e à antena. Como o *Setup RX* é fixado ao poste, um notebook é usado para acessar remotamente o computador industrial. O acesso remoto faz uso de uma rede sem fio *ad hoc*. O *Setup RX* é responsável por receber e armazenar o sinal transmitido pelo *Setup TX*. Além disso, ele mede os sinais de rádio, simultaneamente à transmissão de dados feita pelo *Setup TX*. A aquisição de sinais de rádio tem por objetivo, por exemplo, monitorar o espectro. Outra função do *Setup RX* é medir o ruído aditivo na rede de energia elétrica e, ao mesmo tempo, os sinais de rádio, ambos medidos quando não existirem sinais sendo transmitidos pelo *Setup TX*.

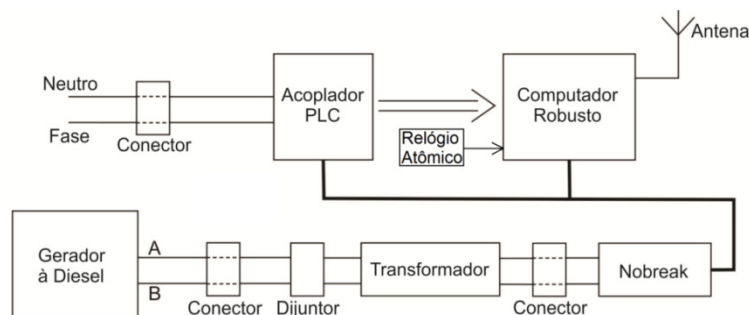


FIGURA 2 - Diagrama em blocos do *Setup RX*.

De uma forma geral, o procedimento adotado para a realização das medições é o seguinte:

1. Medição da resposta em frequência do canal PLC: para medir a CFR do canal PLC, constituído pelo meio entre a saída da placa de geração de dados do *Setup TX* e a placa de aquisição de dados do *Setup RX*, é

usado o *Setup* TX com o acoplador PLC conectado ao amplificador de sinal. Com a placa de geração de sinais instalada dentro do computador industrial, um sinal constituído por símbolos OFDM é gerado, amplificado e, então, injetado na REE. Assim, a placa de geração de dados gera um sinal analógico correspondente à concatenação de símbolos OFDM. No *Setup* RX, o sinal recebido é armazenado utilizando uma placa de aquisição de dados. Finalmente, a estimativa da CFR do canal PLC é obtida através da aplicação do algoritmo proposto em (3). Basicamente, este algoritmo executa a sincronização de símbolo, correção da frequência de amostragem e a estimação do canal.

2. Medição do ruído na REE: para esta medição, apenas o *Setup* RX é utilizado, uma vez que não é necessário transmitir qualquer sinal. Os sinais recebidos são armazenados na memória da placa de aquisição de dados e, remotamente, movidos para a memória do computador industrial.
3. Medição da impedância de acesso no ponto de conexão: para a medição da impedância de acesso, apenas o *Setup* TX é requerido. Ele foi configurado no modo em que o acoplador PLC é conectado ao analisador de sinais portátil. Dessa forma, é realizada a medição da impedância de acesso apenas no ponto de conexão entre o ramal de energia elétrica da RDE-BT com o medidor de energia elétrica da unidade consumidora.
4. Medição dos sinais de rádio: neste caso, os sinais de rádio foram obtidos em duas situações distintas. Na primeira, o sinal é transmitido pelo *Setup* TX através da REE. Durante esta transmissão, os sinais de rádio são adquiridos pela placa de aquisição de dados através do canal ADC conectado à antena. A segunda situação refere-se à aquisição na ausência de transmissão de sinal na REE, ou seja, sem o *Setup* TX.

### 3.0 - PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO CANAL PLC

Existe uma grande semelhança entre os efeitos na variação do sinal recebido provocado pela REE com os efeitos observados no meio de comunicação sem fio. Assim, nesse trabalho adotou-se a classificação dessas variações do sinal recebido, no tempo e frequência, como a utilizada em comunicação sem fio, ou seja, classificações de canais com desvanecimentos, os quais podem ser classificados em larga-escala e em pequena-escala. No caso do canal PLC, o efeito de desvanecimento em larga-escala ocorre com a variação da distância entre o transmissor e receptor PLC, além da RDE-BT, como a conexão e/ou retirada de cargas da REE, dinâmica dos transformadores de média para baixa tensão, reatores para iluminação pública, medidores de energia elétrica, etc. Assim, o efeito do desvanecimento em larga-escala no canal PLC é descrito como a atenuação média do meio em função da distância entre o transmissor PLC e receptor PLC, dada a frequência utilizada para a comunicação de dados.

Por outro lado, o desvanecimento em pequena-escala no canal PLC refere-se a rápida variação do nível do sinal devido à interferência destrutiva ou aditiva no mesmo. Essas interferências são provenientes das variações dos estados das cargas conectadas ao barramento formado pelo circuito de distribuição de energia elétrica com o tempo. Essas cargas possuem uma variação dinâmica, algumas sendo conectadas e desconectadas aleatoriamente ao barramento, outras comutando em sincronismo com a frequência fundamental da REE. Esse dinamismo das cargas implica numa variação na impedância de acesso às redes de energia elétrica, que, consequentemente, gera pontos de descasamentos de impedâncias resultando em reflexões do sinal incidente. Esses sinais refletidos ao convergirem para o receptor PLC, juntamente com o sinal que percorre o barramento, diretamente do transmissor para o receptor, resultam numa propagação de sinal classificada como multipercurso. Dependendo da extensão do multipercurso, a CFR do canal PLC pode ser caracterizada em seletivo em frequência ou plano em frequência. Dependendo da variação temporal do canal PLC, devido a velocidade em que essas cargas mudam de estados (conectadas/desconectadas) no barramento o desvanecimento em pequena-escala pode ser classificado como desvanecimento lento ou desvanecimento rápido, dando origem aos canais seletivos no tempo. Então, para se caracterizar a REE como meio de comunicação de dados, baseando-se no efeito de desvanecimento, uma série de parâmetros deste meio deve ser considerado, dentre os quais destacam-se (4):

- i) **Ganho médio:** Uma vez que o canal PLC é tido como seletivo em frequência, a atenuação do canal é frequentemente relatada pela atenuação média do canal, ou o ganho de potência médio do canal, que é dado por (5):

$$\overline{G}_n = \sum_{l=0}^{L-1} |h_n[l]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |H_n[k]|^2, \quad (1)$$

em que a última igualdade foi obtida usando o teorema de Parseval e  $H_n[k]$  representa o k-ésimo coeficiente da transformada discreta de Fourier da  $n$ -ésima resposta ao impulso do canal (CIR, do inglês, *channel impulsive response*) analisada.

- ii) **Duração da resposta ao impulso:** A CIR obtida por qualquer processo de medição é corrompida por ruídos inerentes à esse processo. Esses ruídos não desaparecem com o tempo. Obter uma boa aproximação da duração da CIR é essencial para a estimativa do efeito de espalhamento temporal do canal de comunicação. Assim, a

duração da resposta ao impulso é geralmente definida como o intervalo de tempo que contém uma percentagem  $\kappa \in \mathbb{R} \mid 0 \ll \kappa < 100$  da energia total da resposta ao impulso do canal. Valores típicos desses percentuais são 99%, 99,9% e 99,99% (6). A duração da CIR do canal PLC *outdoor* foi estimada utilizando-se a estratégia de cálculo denominada de estimativa da energia do sinal (SEE, do inglês, *signal energy estimation*) (6). O SEE estima e acumula a energia do sinal de cada amostra de dados até quando a contribuição a partir das medições dos dados restantes para a energia total do sinal tornar-se insignificante. Este ponto específico no tempo é, então, identificado como o ponto de terminação do sinal. É importante salientar que a duração da CIR não é um bom indicador para quantificar a interferência intersimbólica (IIS) introduzida pelo canal PLC, pois canais com curta duração podem introduzir mais IIS do que canais com longa duração. Entretanto, a duração da CIR é um resultado que é aplicado para se obter diversos outros parâmetros relacionados ao desvanecimento em pequena-escala.

- iii) **Dispersão temporal:** A dispersão no tempo está relacionada com os atrasos provocados pelos diferentes percursos na propagação do sinal, consequentemente, relaciona-se com o desvanecimento em pequena-escala. Normalmente, é denominada de valor de espalhamento de atraso médio quadrático (RMS-DS, do inglês, *root mean square - delay spread*) e pode ser expressa por (5):

$$\sigma_\tau = \sqrt{\mu_\tau^{(2)} - \mu_\tau^2} = T_s \sigma_0, \quad (2)$$

em que

$$\mu_\tau = T_s \mu_0, \quad \mu_\tau^{(2)} = T_s^2 \mu_0^{(2)} \quad (3)$$

$$\mu_0 = \frac{\sum_{l=1}^M l |h[l]|^2}{\sum_{l=1}^M |h[l]|^2}, \quad \mu_0^{(2)} = \frac{\sum_{l=1}^M l^2 |h[l]|^2}{\sum_{l=1}^M |h[l]|^2}, \quad \sigma_0 = \sqrt{\mu_0^{(2)} - \mu_0^2}, \quad (4)$$

$MT_s$  é a duração da resposta ao impulso eventualmente truncada, posto que  $M < 2N - 1$ ,  $T_s$  é o período de amostragem e  $h[n]$  é a CIR do canal PLC no tempo discreto.

- iv) **Capacidade teórica do canal:** A capacidade teórica de um canal de comunicação seletivo na frequência e corrompido por ruído gaussiano colorido, quando os sinais transmitidos são estacionários no sentido amplo e descorrelacionados do ruído aditivo, é dada pela capacidade de canal de Hartley-Shannon, expressa por

$$C = \max_{S_x(f)} \left\{ \int_B \log_2 \left( 1 + \frac{S_x(f) |H(f)|^2}{S_n(f)} \right) df \right\}, \quad (5)$$

em que  $B$  é a largura de banda do canal,  $S_x(f)$  é a densidade espectral de potência (DEP) do sinal transmitido,  $S_n(f)$  é a DEP do ruído colorido e descorrelacionado e  $\int_B S_x(f) df = P_x$  e  $P_x$  é a potência de transmissão.

- v) **Tempo de coerência:** O tempo de coerência  $T_c$  é definido como a separação no tempo em que duas amostras distintas do mesmo canal podem ser consideradas correlacionadas no domínio do tempo. Em outras palavras,  $T_c$  é uma medida do intervalo de tempo em que o canal pode ser considerado aproximadamente invariante no tempo. O tempo de coerência está relacionado com o efeito de desvanecimento em pequena-escala e pode ser obtido quando (7)

$$|\rho_h(T_c)| \geq \beta, \quad (6)$$

em que  $\beta \in \mathbb{R} \mid \beta \in (0, 1)$  refere-se ao menor índice de correlação admitido para caracterizar o canal como invariante no tempo durante o intervalo de tempo  $T_c$  e  $\rho_h(\Delta t)$  é a média do índice de correlação individual dos ganhos dos canais tomadas em intervalos de  $\Delta t$  unidades de tempo. A partir desse instante, o tempo de coerência para o índice de coerência  $\beta$  é definido por  $T_c^\beta$ .

- vi) **Banda de coerência:** A banda de coerência do canal PLC indica a largura de banda máxima que pode ser considerada como tendo uma resposta em frequência plana e está relacionada com o desvanecimento em pequena-escala. A largura de banda de coerência  $B_c$  do canal pode ser estimada quando

$$|\rho_H(B_c)| \geq \varphi, \quad (7)$$

em que  $\varphi \in \mathbb{R} \mid \varphi \in (0, 1)$  refere-se ao menor índice de correlação admitido para caracterizar o canal como possuindo uma largura de banda  $B_c$  plana e  $\rho_H(\Delta f)$  é a média do índice de correlação individual dos subcanais da CFR dependente apenas da diferença de frequência  $\Delta f$ . A partir desse ponto, a banda de coerência para o índice de coerência  $\varphi$  é dada por  $B_c^\varphi$ .

A fim de exemplificar o uso do *Setup* de Medição, a seguir são apresentados os resultados da análise de alguns parâmetros que auxiliam a caracterização do canal PLC *outdoor*. Uma análise detalhada do resultado da campanha de medição da RDE-BT realizada com o *Setup* de Medição pode ser obtida em (4).

#### 4.0 - CARACTERÍSTICAS DO CANAL PLC *OUTDOOR*

Para a análise das características do canal PLC *outdoor* apresentadas a seguir foram considerados 33 ciclos da frequência fundamental da RDE-BT (60 Hz) em pontos distintos da mesma. Em cada ciclo da REE ( $T_0 \cong 16,67$  ms) foram coletadas aproximadamente 723 respostas em frequência do canal PLC com comprimento de  $2N = 4096$  amostras por CFR, além do prefixo cíclico de tamanho igual a  $L_{pc} = 512$ , à uma frequência de amostragem de  $F_s = 200$  Msps (amostras/segundos). Dessa forma, foi obtida uma CFR a cada símbolo OFDM transmitido para a sondagem, ou seja,  $T_{ofdm} = (2N + L_{pc})/F_s = 23,04$   $\mu$ s. Assim, no total foram avaliados  $33(T_0/T_{ofdm}) = 23.919$  CFR medidas de canais PLC *outdoor*. A Tabela 1 resume, de acordo com (3), os principais parâmetros adotados na campanha de medição.

TABELA 1 - Parâmetros principais adotados na medição

Descrição	Valor
Frequência de amostragem	$F_s = 200$ MHz
Número de subportadoras	$N = 4096/2$
Modulação	BPSK
Tamanho do prefixo cíclico	$L_{pc} = 512$
Duração do símbolo OFDM	$T_{ofdm} = 23,04$ $\mu$ s
Resolução na frequência	$\Delta_f = 48,83$ kHz
Período da frequência fundamental da RDE-BT	$T_0 = 16,67$ ms

As características do canal PLC *outdoor* analisadas nesse trabalho são: ganho médio, duração da resposta ao impulso, dispersão temporal e tempo de coerência. As análises foram realizadas considerando o uso da banda de frequência de 1,7 a 30 MHz ( $BF_{01}$ ) por ser a que está regulamentada para o uso do PLC na Europa, 1,7 a 50 MHz ( $BF_{02}$ ) por ser regulamentada no Brasil e 1,7 a 100 MHz ( $BF_{03}$ ) por ser uma opção de uso futuro. Foram também consideradas 3 classes de distâncias entre o transmissor e o receptor: D1, D2 e D3. Essas classes foram definidas considerando-se a distância média entre os equipamentos instalados para a medição do canal PLC *outdoor*. A Tabela 2 e Tabela 3 indicam as bandas de frequências e as distâncias consideradas em cada classe, respectivamente.

TABELA 2 - Denominação das classes e bandas de frequências analisadas em MHz.

Classe	Banda de frequência
$BF_{01}$	1,7 a 30 MHz
$BF_{02}$	1,7 a 50 MHz
$BF_{03}$	1,7 a 100 MHz

TABELA 3 - Denominação das classes e distâncias entre o transmissor/receptor em metros.

Classe	Min	Max	Média
$D1$	3	30	15
$D2$	40	60	50
$D3$	70	100	85

A Figura 3 mostra a variação do ganho médio do canal PLC em função da banda de frequência considerada e da distância entre o transmissor e o receptor utilizado para a medição do canal PLC. Essa figura confirma o fato de que a atenuação do canal PLC aumenta com a distância e com a frequência utilizada. Além disso, informa que caso se utilize técnicas de acesso ao meio por divisão de frequência, deve-se alocar os usuários mais distantes em frequências mais baixas e usuários mais próximos ao concentrador nas frequências maiores, pois pode-se considerar uma atenuação média para  $D1$  de, aproximadamente, 23 dB na faixa de frequência de 1,7-30 MHz e 46 dB para 1,7-100 MHz, enquanto para  $D3$  a atenuação média é de 53 dB e 65 dB para a banda de frequência de 1,7-30 MHz e 1,7-100 MHz, respectivamente. A figura informa também que a diferença de ganho imposta pelo canal PLC de 1,7-50 MHz comparada com 1,7-100 MHz para a distância  $D1$  é semelhante à diferença na maior distância analisada ( $D3$ ) quando se considera as bandas de frequência de 1,7-30 MHz e 1,7-100 MHz. De uma forma geral, a Figura 3 indica que a atenuação média do canal PLC *outdoor* de 1,7-50 MHz é aproximadamente 10 vezes a atenuação imposta pelo canal na banda de 1,7-30 MHz para curtas distâncias ( $D1$ ), enquanto que para distâncias maiores ( $D3$ ) essa relação diminui para aproximadamente 5 vezes. Já para a banda de frequência 1,7-100 MHz, a atenuação em relação a banda de 1,7-30 MHz é de aproximadamente 200 e 20 vezes para, respectivamente, a maior e menor distância analisada.

Para a estimativa da duração da CIR do canal PLC *outdoor* foram considerados os percentuais de energia ( $\kappa$ ) de 99%, 99,9% e 99,99% da energia total da CIR, além de um limite imposto ao algoritmo SEE que restringe o valor máximo do resultado da duração da resposta ao impulso do canal PLC *outdoor* em 5,12  $\mu$ s. As estatísticas dos tempos de duração da CIR do canal PLC *outdoor* para as bandas de frequências 1,7-30 MHz, 1,7-50 MHz e 1,7-100 MHz podem ser vistas em (4). Embora a abordagem utilizada para o cálculo da duração da CIR baseada no SEE seja realizada no domínio do tempo discreto, apenas como ilustração, a Figura 4 retrata uma CIR, no domínio do tempo contínuo, obtida na campanha de medição dos canais PLC *outdoor* na RDE-BT na banda de frequência

de 1,7 a 100 MHz, e os pontos onde o SEE indica como final da CIR, considerando os valores estimados para os diversos  $\kappa$  e sua ocorrência em pelo menos 90% dos casos analisados.

A Figura 5 mostra a função distribuição cumulativa de probabilidade (FDC) do RMS-DS. Observe que  $\sigma_\tau \leq 0,45 \mu$  s para 90% dos casos considerando a banda de frequência de 1,7 a 100 MHz, o que representa aproximadamente 90 coeficientes da CIR. Logo, pode-se concluir que o comprimento do prefixo cíclico adotado na campanha de medição ( $L_{pc} = 512$ ) é apropriado para este fim. Por outro lado, para valores de  $\sigma_\tau > 3,0 \mu$  s as medições poderiam ser comprometidas. Observe que caso fosse adotado, erroneamente, para o projeto do prefixo cíclico do *Setup* de Medição o valor encontrado para o comprimento da CIR,  $\tau_\kappa = 2,72 \mu$  s ( $BF_{03}$ ), esse valor seria, aproximadamente, 6 vezes maior do que o necessário. Considerando os valores médios do RMS-DS, pode-se dizer que para as RDE-BT *outdoor* Brasileira  $\sigma_\tau \approx 0,16\tau_\kappa$ .

Quanto ao tempo de coerência entre os canais PLC, os resultados indicaram que não existem diferenças significativas na evolução da coerência entre os canais PLC em função da banda de frequência escolhida. Assim, as FDC do tempo de coerência  $T_c$  médio  $\mu_{T_c^\beta}$  para diversos índices de coerência  $\beta$  estão indicadas na Figura 6. A figura indica que em apenas 10% dos casos, o tempo de coerência foi maior do que 9,5 ms para  $\beta = 0,99$  e 15,8 ms para  $\beta = 0,95$ . Não foram observados valores de  $T_c$  menores do que 690  $\mu$  s para  $\beta = 0,90$  e menores do que 460  $\mu$  s para  $\beta = 0,98$ . Entretanto, para  $\beta = 0,99$  não se pode afirmar que  $T_c \geq 230 \mu$  s, posto que o resultado da medição é igual à resolução temporal da estratégia de estimação do tempo de coerência.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Esse trabalho discutiu a importância de se conhecer, *a priori*, as características de propagação do sinal PLC da REE que se pretende utilizar como meio de comunicação PLC. Conhecendo-se as características de propagação do sinal PLC na REE é possível estimar sua potencialidade para o uso de sistemas PLC, sem ter que recorrer ao método de tentativa e erro, em que se conclui sobre a viabilidade ou não do uso de sistemas PLC somente após instalado e testado todo o sistema. Assim, esse trabalho sugere que é extremamente recomendado que se realize uma campanha de medição e uma análise dos dados coletados (*survey* PLC) antes de se instalar qualquer sistema PLC, seja nas REE de BT, MT ou AT.

Foram apresentados os procedimentos, configurações e equipamentos utilizados na campanha de medição realizada com intuito de caracterizar as RDE-BT para uso em sistemas PLC. Alguns resultados dessa campanha de medição foram apresentados, que de forma inédita, representam parte dos primeiros resultados de caracterização das RDE-BT brasileiras para uso de sistemas PLC na banda de frequência normatizada na Europa (1,7 à 30 MHz) e no Brasil (1,7 à 50 MHz). Além disso, também foi analisado parte do comportamento do canal PLC para a banda de frequência de 1,7 à 100 MHz, que é uma oportunidade em aberto para sistemas PLC.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) RIBEIRO, M. V. "4º Relatório Técnico - Características das redes de baixa tensão para transmissão de dados," P&D CEMIG/ANEEL D420 - Desenvolvimento de modem PLC para aplicações de telecomunicações e Smart Grids em redes de baixa tensão, Juiz de Fora, 2012.
- (2) COLEN, G. R.; FACINA, M. S. P.; OLIVEIRA, T. R.; PICORONE, A. A. M.; CAMPOS, F. P. V. D.; RIBEIRO, M. V. "Setup de medição para caracterização de redes de distribuição de energia elétrica externas para sistemas PLC," em XXI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Santos, SP, 2014.
- (3) T. R. OLIVEIRA, A. G. MARQUES, W. A. FINAMORE, S. L. NETTO, M. V. RIBEIRO, "A Methodology for Estimating Frequency Response of Electric Power Grids," Journal of Control, Automation and Electrical Systems, vol. 25, pp. 720-731, 2014.
- (4) PICORONE, A. A. M. Comunicação Digital em Canais PLC: Técnicas de Transmissão, Detecção e Caracterização de Canais PLC Outdoor Brasileiros., Juiz de Fora, MG: (Tese de Doutorado) Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.
- (5) GALLI, S. "A Novel Approach to the Statistical Modeling of Wireline Channels," IEEE Transactions on Communications, vol. 59, no. 5, pp. 1332 -1345, 2011.
- (6) LI, H. ; LIU, D.; LI, J.; STOICA, P. "Channel order and RMS delay spread estimation with application to AC power line communications," Digital Signal Processing, vol. 13, no. 2, pp. 284 - 300, 2003.
- (7) PICORONE, A. A. M.; SAMPAIO-NETO, R.; RIBEIRO, M. V. "Coherence time and sparsity of Brazilian outdoor PLC channels: A preliminary analysis," in IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications, 2014.

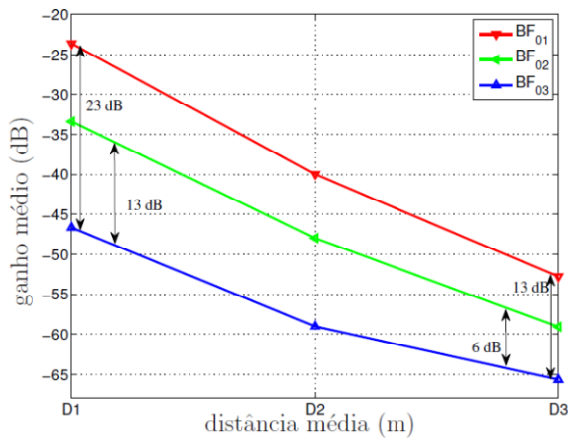


FIGURA 3 - Ganho médio

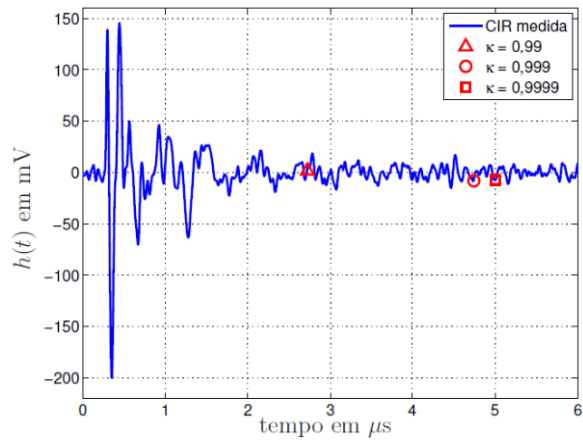


FIGURA 4 - Duração da CIR

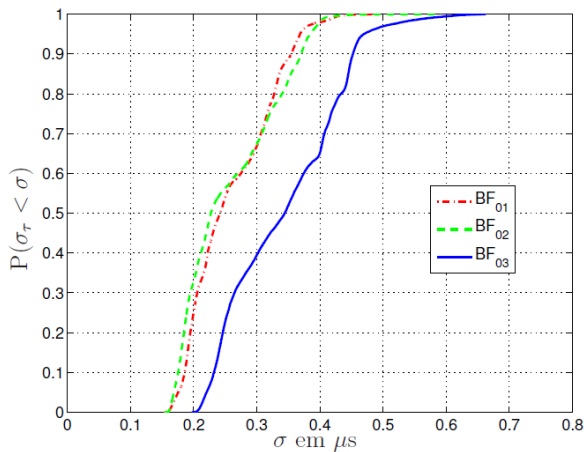


FIGURA 5 - FDC da RMS-DS da CIR dos canais PLC outdoor.

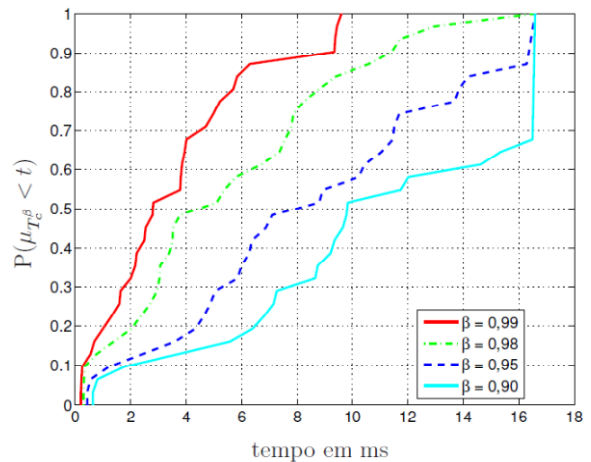
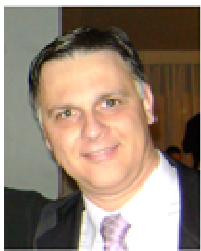


FIGURA 6 - FDC do tempo de coerência da CIR dos canais PLC outdoor.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Antonio Angelo Missiaggia Picorone** nasceu em São João Nepomuceno, MG em 09 de Outubro de 1967. Concluiu o doutorado (2014) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG. Desde 1989 é funcionário da Companhia Energética de Minas Gerais, onde atua como supervisor da área de manutenção em infraestrutura de telecomunicação. É professor do curso de Engenharia Elétrica do CES/JF desde 2008. Suas pesquisas são direcionadas para as áreas de comunicação digital, amostragem compressiva, modelagem e estimação de canais PLC e comunicação para as redes inteligentes.



**Moisés Vidal Ribeiro**, nasceu em Três Rios- RJ, em 23 de Janeiro de 1974. Concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 2005. Foi pesquisador visitante na Universidade da Califórnia, Santa Barbara, em 2004. Professor visitante na Stanford University em 2011 e pesquisador visitante na Princeton University, 2012. Atualmente, é prof. Associado na UFJF e membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFJF. É membro fundador e do Comitê Gestor do INCT de Energia Elétrica (INERGE). É sócio fundador da empresa Smarti9 Ltda. Atua na área de processamento de sinais, comunicação digital de dados, *smart grid*, telecomunicações e *power line communication*.