

Técnica OFDM Aplicada a Power Line Communications

J. L. Silva, T. M. Siqueira, B. N. Souza, L. F. Rocha, C. J. Munaro,
E. O. T. Salles, M. E. V. Segatto¹ e H. G. Tostes²

RESUMO

O presente artigo descreve as atividades de pesquisa realizadas no projeto “Desenvolvimento e Análise de um Sistema de Transporte de Informações Através da Rede de Distribuição de Energia Elétrica da ESCELSA Utilizando a Tecnologia PLC Power Line Communications” realizado pela Universidade Federal do Espírito Santo em conjunto com a ESCELSA. A técnica OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) vem sendo amplamente estudada para uso em sistemas com aplicações de última milha. O uso de redes PLC desperta muito interesse quando caracterizada como um canal dispersivo. Nessa pesquisa a técnica OFDM é proposta como solução eficiente para uso em sistemas PLC. Os resultados foram obtidos através da simulação, em MATLAB, de um modelo de canal PLC e outro AWGN. Para o algoritmo OFDM houve a simulação de diferentes técnicas de modulação (QPSK, 16-PSK e 256-PSK) com duas medidas de portadoras e introdução de ruído branco gaussiano.

PALAVRAS-CHAVE

Transmissão de dados via rede elétrica, técnica OFDM.

I. INTRODUÇÃO

A introdução da Internet no início da década de 90 ocasionou uma explosão da demanda por transmissão de dados em alta velocidade. Atualmente, o uso de redes PLC vem despertando um grande interesse em pesquisas em torno do assunto. As principais vantagens dessas redes são [1]: infraestrutura de cabeamento já pronta e existente em praticamente todas as cidades do mundo; diversos pontos de acesso disponíveis em uma mesma sala; alta taxa de transmissão de dados; e, em muitas das situações, é o único meio físico de ligação (energia + dados) existente.

Por utilizar a rede de distribuição de energia elétrica o sistema PLC difere consideravelmente em topologia, estrutura e propriedades físicas quando comparado aos meios convencionais de telecomunicações (cabos par trançado, coaxial e fibra ótica). Por esta razão é de fundamental im-

portância conhecer detalhadamente a função característica destas redes [2].

As características adversas do canal PLC impossibilitam a comunicação de dados a altas taxas de transmissão utilizando esquemas de modulação de portadora única. Utilizar a modulação OFDM é uma das melhores soluções para combater os ruídos impulsivos do canal PLC provocados por múltiplos percursos, radiodifusão, reflexão, chaveamento, bancos de capacitores, etc. Devido a sua robustez, a modulação OFDM garante a confiabilidade na transmissão via rede elétrica [3] [4].

Pode-se ressaltar algumas das principais características da modulação OFDM: melhor aproveitamento do espectro de frequências; possibilidade de se adaptar às condições do meio de transmissão (pela avaliação da relação sinal/ruído); redução significativa da necessidade de equalização de canal; menor suscetibilidade aos problemas de sinais advindos de múltiplos percursos; menor sensibilidade ISI (*Inter-Symbol Interference*); maior imunidade aos ruídos impulsivos e aos rápidos enfraquecimentos de sinal; ganhos adicionais pela utilização de técnicas de melhoria do sinal (entrelaçamento e codificação) no domínio da frequência, relativo aos obtidos pela utilização dessas técnicas no domínio do tempo; e menor sensibilidade à seletividade em frequência causada por múltiplos percursos e altas taxas de transmissão.

O objetivo deste trabalho é efetuar a simulação de um canal PLC, baseado nos estudos desenvolvidos por Dostert [1], para transmissão de dados digitais utilizando a técnica OFDM com diferentes modulações.

As seções subsequentes introduzem alguns conceitos relativos às redes PLC e à técnica OFDM. Em seguida são abordados: a metodologia utilizada; os resultados experimentais; e os comentários e conclusões relativas ao trabalho.

II. TOPOLOGIA DA REDE PLC

A tecnologia PLC utiliza a rede elétrica para transmissão de dados, vídeo e imagens a altas taxas de transmissão. É um modelo assimétrico que contém uma estrutura do tipo ponto-multiponto, pois, com o auxílio de um protocolo multiusuário, provê informações distribuídas para diversos usuários ao mesmo tempo. A Figura 1 ilustra uma topologia do sistema para acesso rápido à internet. Nessa

¹ Os autores trabalham no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo. e-mail: segatto@ele.ufes.br.

² Hércules G. Tostes é funcionário da Espírito Santo Centrais Elétricas S.A. e-mail: hercules@escelsa.com.br

figura, o sinal proveniente da provedora de serviços chega, via fibra ótica, *cable modem*, ou mesmo por uma solução PLC de média tensão, até um equipamento PLC servidor, normalmente localizado numa subestação. Com o auxílio de equipamentos acopladores, o servidor disponibiliza o sinal nas fases secundárias do transformador, para uma quantidade limitada de clientes.

O usuário, por sua vez, capta o sinal de uma tomada de energia através de um modem PLC, também auxiliado por um acoplador, que filtra o sinal de baixa frequência (50 ou 60Hz). Dependendo do comprimento do enlace e da carga demandada, é necessária a utilização de um repetidor.

A alocação da faixa de frequência a ser utilizada depende da localidade. O Comitê Europeu de Normas Eletrotécnicas normalizou a faixa entre 3 e 148.5 KHz. Os países da América Central e do Sul utilizam a faixa de frequência compreendida entre 1 e 30 MHz para prover serviços de acesso rápido.

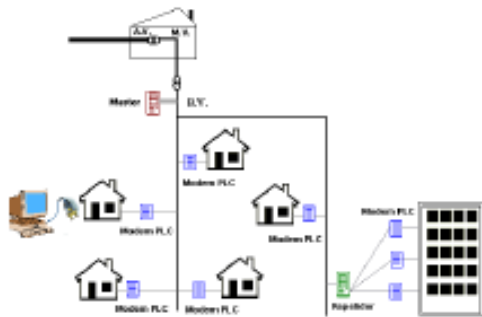


FIGURA 1. Topologia PLC.

III. MODELO OFDM PARA PLC

A técnica OFDM divide a faixa de frequências em vários subcanais iguais, os quais modulam digitalmente em banda base, uma portadora em QAM ou PSK. Isso provê o benefício da diminuição da seletividade em frequência e a dispersão de símbolos no tempo, pois o desvanecimento em cada subcanal é quase plano, diminuindo a complexidade da equalização do canal [5-7].

A ortogonalidade das subportadoras permite uma sobreposição espectral garantindo melhor aproveitamento do espectro de frequência. A alocação de cada subportadora com os pontos de cruzamento de zero das demais no domínio da frequência, e o sincronismo de relógio, mantêm a ortogonalidade no modelo. A perda da ortogonalidade causa interferências entre os subcanais (ICI - *Inter-Channel Interference*) e conseqüentemente interferência entre símbolos (ISI) OFDM. A inserção do intervalo de guarda ciclicamente estendido, caracterizado pela cópia das amostras finais de um símbolo para o início do mesmo, elimina tais interferências. O intervalo também garante a imunidade a ruídos impulsivos e a problemas de sinais advindos de múltiplos percursos. A Figura 2 ilustra o modelo básico OFDM.



FIGURA 2. Modelo básico do modem OFDM.

O processamento digital do sinal OFDM utiliza os algoritmos da transformada rápida de Fourier: IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) e FFT (*Fast Fourier Transform*) e nas etapas de modulação e demodulação dos símbolos OFDM, respectivamente, o que simplifica a implementação do método [8-9].

A utilização de códigos de detecção e correção de erros e a possibilidade de se adaptar às condições do meio de transmissão, pela avaliação da relação sinal/ruído caracterizam a utilização de um modelo OFDM codificado e adaptativo, também chamado DMT (*Discrete Multi-Tone*) em sistemas *wireline*.

IV. O MODELO DO CANAL PLC

Vários modelos apropriados através de funções de transferência de redes elétricas são encontrados na literatura. Contudo são modelos complexos que necessitam do conhecimento de vários parâmetros, que na sua maioria são difíceis de se obter. A Figura 3 ilustra um modelo simplificado de canal desenvolvido por Zimmermann e Dostert [1], que possivelmente venha a integrar o padrão de um canal PLC. A função de transferência $H(f)$ apresenta poucos parâmetros e resposta em frequência entre 500 kHz até 20 MHz. Segundo [1], o erro observado no modelo, em comparações com medidas reais, são advindos da geometria, estrutura e propriedades dos materiais. No entanto, o erro do canal adotado é muito pequeno e as simulações apresentam resultados muito próximos da realidade.

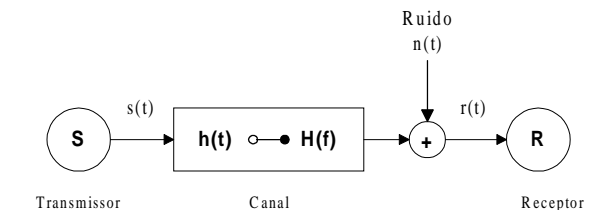


FIGURA 3 - Modelo geral do canal

A equação (1) representa o modelo simplificado da função de transferência do canal PLC proposto por Dostert [1]. Nesta, são considerados os efeitos de propagação do sinal em múltiplos caminhos e de sua atenuação devido às perdas de potência no cabo, em conseqüência das variações de frequência e de comprimento no condutor.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{Termo de peso}} \cdot \underbrace{e^{-(a_0+a_1 f^k) d_i}}_{\text{Termo de atenuação}} \cdot \underbrace{e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}}}_{\text{Termo de atraso}} \quad (1)$$

O termo de peso (g_i) representa o produto entre a transmissão e a reflexão do sinal ao longo do caminho i . O termo não depende da frequência e representa um valor real no modelo simplificado. O atraso de propagação no caminho i é descrito pelo *termo de atraso*. O aumento da atenuação com o aumento da frequência e do comprimento do cabo, ou seja, a característica passa-baixa da função de transferência é designada pelo *termo de atenuação*. A Figura 4 ilustra o modulo dessa função para a topologia apresentada na Figura 5. A Tabela 1 descreve os parâmetros utilizados na equação 1.

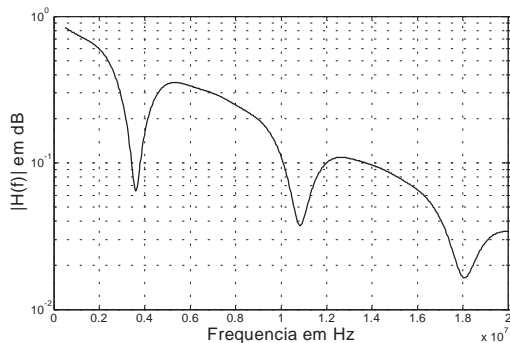


FIGURA 4—Modulo da função de transferência do canal PLC modelado.

TABELA 1
PARÂMETROS DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA H(F).

I	Número de caminhos
A_0, a_1	Parâmetros de atenuação
K	Fator de atenuação (usualmente entre 0.1 e 0.2)
g_i	Fator de peso do caminho i
d_i	Tamanho do caminho i

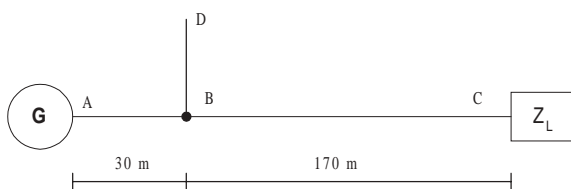


FIGURA 5—Modelo de experimento para geração da função de transferência.

O cálculo da função de transferência utilizado neste trabalho foi baseado na Figura 5 [1]. O modelo consiste em uma simples representação de uma linha de 200m com os terminais casados (extremidades A e C da figura), e uma derivação em aberto (B-D) de 12m a 30m do transmissor (A). O modelo considera apenas o caminho direto e as 3 primeiras reflexões na derivação [1].

Para análise do desempenho do sistema PLC utilizando a técnica de multiplexação OFDM, foram realizadas simulações de transmissão de uma seqüência de pouco mais de 8 milhões de bits através de um canal AWGN com múltiplos percursos. É analisada a taxa de erro de bit (TEB) em função da razão entre a potência do sinal e do ruído (S/R) das diversas modulações por subportadora empregadas. As constantes da equação (1) estão na Tabela 2 e foram obtidas da referência [1].

Os casos simulados descrevem a transmissão de símbolos OFDM com 400 e 200 portadoras moduladas em QPSK, 16-PSK e 256-PSK com intervalo de guarda 25% do tamanho da FFT.

TABELA 2

PARÂMETROS DO CANAL PLC.

Parâmetros de Atenuação					
$k=1$					
Parâmetros dos Caminhos					
i	g_i	d_i	i	g_i	d_i
1	0.64	200	3	-0.15	248
2	0.38	224	4	0.05	272

V. RESULTADOS

A análise do sistema PLC utilizando OFDM foi realizada de duas formas. Inicialmente o canal foi considerado somente AWGN, posteriormente, o canal PLC descrito na seção IV foi adicionado. Foram medidas a Taxa de Erro de Bits (TEB) em função da relação sinal-ruído (S/R) considerando o sistema com 200 e 400 subportadoras. Em todos os experimentos foram utilizadas as modulações QPSK, 16-PSK e 256-PSK nas subportadoras.

As Figuras 6.a e 6.b mostram, respectivamente, as curvas de TEB para o sistema utilizando 200 e 400 subportadoras para os canais AWGN e PLC.

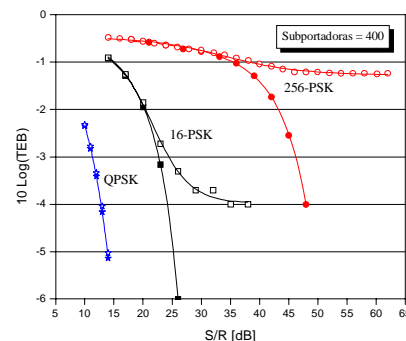
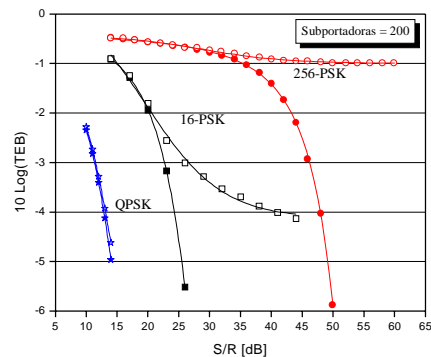


FIGURA 6—Taxa de erro de bits em função da relação sinal-ruído. (a) Sistema com 200 subportadoras; (b) 400 subportadoras. Os símbolos cheios representam o canal AWGN somente e os símbolos vazios representam o canal PLC.

Observa-se pelo gráfico da Figura 6.a que é necessário um acréscimo de aproximadamente 17 dB na S/N do canal PLC do sistema utilizando 16-PSK para manter uma TEB de 10^{-4} . Quando comparado com a modulação QPSK a penalidade do canal PLC é acrescida de 28 dB.

A mesma análise foi feita para o gráfico da Figura 6.b e as penalidades medidas foram 10.75 dB entre os canais AWGN e PLC e de 22 dB entre as modulações QPSK e 16-PSK.

Observa-se que as penalidades diminuam quando o número de subportadoras foi aumentado de 200 para 400. Isso pode ser facilmente explicado se observado que o intervalo de guarda aumenta com o número de subportadoras [6].

Os gráficos também demonstram que a modulação 256-PSK não deve ser utilizado pois os múltiplos percursos introduzidos no modelo de canal PLC faz com que o piso atingido pela Taxa de Erro de Bits seja muito alto

VI. CONCLUSÕES

A técnica de multiplexação OFDM é uma solução propícia para sistemas PLC que utilizam o modelo de canal PLC descrito neste artigo. O uso da modulação 16-QPSK para mapear os bits nas subportadoras do canal AWGN é uma boa solução para aumentar a capacidade de transmissão de cada subcanal. Para o canal PLC essa solução não é válida pois segundo resultados da seção V, a penalidade introduzida pela modulação 16-PSK é elevada quando comparada com a modulação QPSK. Recomenda-se portanto a utilização da modulação QPSK nos subcanais do canal PLC pois, o comportamento do canal em termos de Taxa de Erros de Bits é o mesmo para o canal AWGN.

O aumento da quantidade de subportadoras também pode ser uma boa medida de eficiência espectral. Entretanto, aumentar muito esse parâmetro significa diminuir o espaçamento entre as subportadoras, tornando o sistema mais sensível a interferências no domínio da frequência causando ICI. Aumentar o tamanho da FFT foi a solução utilizada na simulação. Mantendo o intervalo de guarda em 25% das amostras da FFT, aumentase o tamanho do intervalo de guarda. Com isso o sistema tornou-se mais robusto a ruídos e interferências causadas por múltiplos percursos.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dostert, Klaus. **“Powerline communications”**, Pretince Hall PTR, Krickenbach, Dezembro/2000.
- [2] M. Busser, T. Waldeck, and K. Dostert, **“Telecommunication applications over the low voltage power distribution grid”**, in *Proc. IEEE 5th Int. Symp. Spread Spectrum Techniques & Applications*, vol. 1/3, Sun City, South Africa, 1998, pp. 73–77.
- [3] P. Vuckovic, Miroslav L. Dukie, **“OFDMas a possible modulation technique for power line communication”**, VII Telekomunikacioni Forum Telfor’2000, Beograd, 2000.
- [4] Mirko M. Obradovic, F. N. Pavliodou, Danilo M. Obradovic, **“Power line communication based on OFDM”**, Telekomukacione mrze.
- [5] R. W. Chang, Richard A. Gibby, **“A theoretical study of performance of an orthogonal multiplexing data transmission scheme”**, IEEE Transactions on Communications Technology, vol. com-16, n° 4, 1968.
- [6] Pandharipande, Ashish. **“Principles of OFDM”**, IEEE Potentials, pag. 16 a 19, Abril / Maio 2002.