

Comparação das Técnicas de Modulação Multiportadoras Aplicadas às Comunicações via Rede Elétrica

Tadeu L. Dezan, Jair A. L. Silva, Klaus F. Côco, Evandro O.T. Salles e Marcelo E. V. Segatto

Resumo — Neste trabalho são comparados três tipos sistemas ortogonais de modulação digital multiportadora: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*, *Discrete Wavelet Multitone (DWTM)* via *Extended Lapped Transform (ELT)* e *Wavelet Packet Modulation (WPM)*. São descritas as principais características de cada sistema e uma análise comparativa sobre um canal multipercurso do desempenho é apresentada.

Palavras-chaves — Comunicação via rede elétrica, Transmultiplexer, Modulação multiportadora.

Abstract—In this work it is compared different approaches to implement digital multicarrier modulation: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, *Discrete Wavelet Multitone* via *Extended Lapped Transform* and *Wavelet Packet Modulation*. The principal features of each one are described and a performance analysis over a multipath channel is evaluated.

Index Terms— Power Line Communication, Transmultiplexer, Multicarrier Modulation.

I. INTRODUÇÃO

A rede elétrica começou a ser utilizada como meio de comunicação de dados a partir da década de 20, logo após o término do processo de eletrificação das cidades [1]. Na época já era possível a transmissão de voz via portadora de frequência. Razões históricas, como a não confiabilidade e a inoperância do sistema telefônico nessa época faziam da rede de alta tensão um ótimo meio de transmissão bidirecional de mensagens de gerenciamento, monitoramento e localização de falhas. As tarefas de telemetria e monitoramento não eram adequadas e nem economicamente viáveis em longas distâncias na linha telefônica, enquanto que na rede de alta tensão, o fluxo de transmissão de dados bidirecionais em portadoras de frequência, moduladas em amplitude e em frequência, era relativamente bom [1].

As linhas de média e baixa tensão usadas para distribuição de energia elétrica, começaram a ser utilizadas também para comunicação de dados em 1930, através do envio de portadoras de informação em frequências próximas da frequência da rede elétrica [1], permitindo o fluxo de informações por transformadores com baixa atenuação.

Entretanto, a taxa de transmissão era muito baixa (ordem de poucos bits por segundo), a comunicação era unidirecional e a potência de transmissão muito alta. Para tráfego de informações de distribuição de cargas, isso era suficiente, mas era inadequado para telemetria e controle remoto.

Hoje em dia a técnica de comunicação de multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é usada para comunicação de dados na rede elétrica de baixa tensão, conhecida como *Power Line Communication (PLC)* [1,2]. Esta técnica é um tipo de modulação multiportadoras (MCM – *Multi Carrier Modulation*), que permite obter taxas de transmissão de ordem de Mega bits por segundo (Mbps). Ao contrário das técnicas antigas o OFDM opera em uma faixa de frequências bem superior à frequência da rede e podem, portanto, trabalhar em baixa potência, minimizando os efeitos que o canal PLC provoca no sinal de transmissão.

O princípio da modulação multiportadoras (MCM – *Multi Carrier Modulation*) consiste na divisão de uma seqüência de bits em vários subcanais, cada um associado a sua própria portadora [3]. Assim, cada portadora de um subcanal, denominada subportadora, transmite parte da informação desejada. Com isto, tem-se um símbolo de maior duração e conseqüentemente maior imunidade a ruídos impulsivos, muito comum em canais dispersivos, em relação a sistemas de portadora única [4].

A fim de se conseguir a robustez e confiança necessárias para as aplicações requeridas, a partir do início da década de 90 os sistemas MCM tornaram-se o padrão adotado nestas aplicações [4]. Como exemplo pode-se citar: *Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)* [5], *Very High Data Rate Digital Subscriber Line (VDSL)*, *Digital Audio Broadcasting (DAB)*, *Digital Video Broadcasting (DVB)* e outros.

O sistema mais difundido entre os tipos básicos de MCM é o OFDM [1–4]. Este padrão ou sua variação, conhecida como DMT (*Discrete Multitone*), são as técnicas empregadas nas aplicações descritas acima. O OFDM também é um forte candidato para integrar o padrão da 4ª geração de telefonia celular bem como o da televisão digital [6].

Outro tipo de sistema MCM muito conhecido é o proposto por Sandberg e Tzannes [15] para aplicações que utilizam fio de cobre como meio de transmissão, chamado de DWTM. Essa técnica MCM baseia-se no emprego de bancos de filtros de síntese e análise, para o transmissor e receptor respectivamente, que pode ser representado por uma estrutura *transmultiplexer (TMUX)* [11].

Baseado neste contexto, este trabalho se propõe a analisar o desempenho de diferentes tipos de MCM ortogonais em

relação a um canal PLC com multipercursos. Observe que a ortogonalidade é uma propriedade importante neste tipo de modulação pois garante implementação rápida e que as diversas subbandas possam se sobrepor parcialmente sem que haja interferência entre canais. Desta forma, consegue-se um melhor aproveitamento da banda espectral empregada.

II. MODELO DO CANAL PLC

Nesta Seção um modelo multipercursos para o canal PLC é apresentado. Vários modelos baseados em função 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 Fig. 1 ilustra um modelo simplificado de canal desenvolvido por Zimmermann e Dostert [8]. A função de transferência $H(f)$ apresenta poucos parâmetros e resposta em frequência até 20 MHz. Segundo Zimmermann [8], 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.

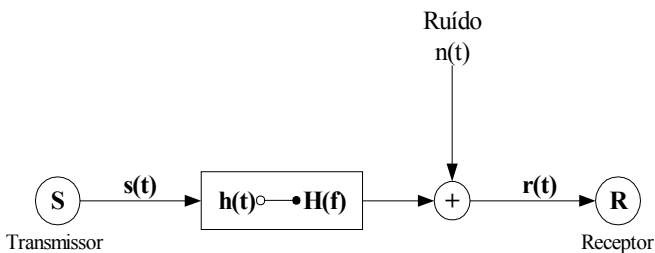


Fig. 1 – Modelo geral do canal PLC.

O modelo simplificado da função de transferência do canal PLC proposto por Dostert é dado por

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

onde os parâmetros são descritos na Tabela I.

TABELA I – PARÂMETROS DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA $H(f)$.

i	Número de Caminhos
g_i	Fator de peso do caminho i
a_0, a_1	Fator de atenuação (usualmente entre 0.1 e 0.2)
k	Parâmetros de atenuação
d_i	Tamanho do caminho i
v_p	Velocidade de propagação da onda no cabo

São considerados os efeitos de propagação do sinal em múltiplos caminhos e de sua atenuação devido às perdas de potência no cabo, em consequência das variações de frequência e de comprimento no condutor. 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 Fig. 2 ilustra um exemplo de curva característica com multipercursos.

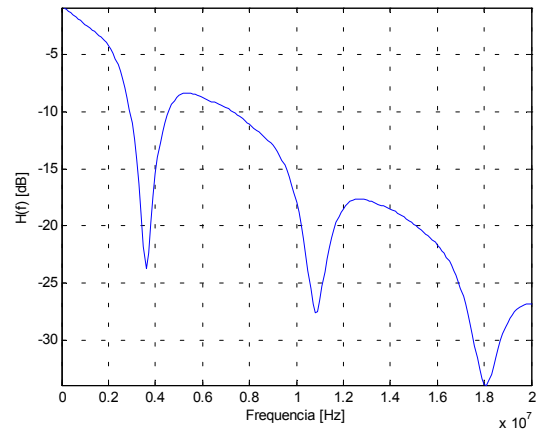


Fig. 2 – Exemplo de função de transferência de um canal PLC com multipercursos.

Em relação aos ruídos encontrados na rede elétrica, Dostert e Zimmermann [9,10] afirmam que o canal PLC não pode ser modelado por um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Basicamente os ruídos do canal PLC podem ser classificados em cinco categorias: ruído colorido de fundo, ruído de bandas vizinhas, ruídos impulsivos periódicos assíncronos com a frequência principal, ruídos impulsivos periódicos síncronos com a frequência principal e os ruídos impulsivos assíncronos.

III. ESTRUTURA TRANSMULTIPLEXER

Um sistema MCM pode ser interpretado como uma estrutura TMUX, ou seja, um sistema composto por banco de filtros que converte um sinal TDM em FDM (*Frequency Division Multiplexing*) e vice-versa [11] como ilustra a Fig. 3 (próxima página). Os diversos sinais de entrada $\{x_0(n)...x_{M-1}(n)\}^t$ são modulados através de M subportadoras $\{f_k(t)\}$ que, posteriormente compõem o sinal de saída $y(t)$.

O sinal transmitido no tempo $y(t)$, a partir de uma taxa de Conversão Digital-Analógica (D/A) igual a T_s , pode ser expresso por [11]

$$y(t) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} x_k(i) f_k(t - iMT_s). \quad (2)$$

Especificamente para a análise das propriedades do sistema TMUX, os circuitos relativos aos conversores A/D, conversores D/A e o canal PLC são suprimidos, sendo a saída do bloco transmissor ligada diretamente ao receptor. Desta forma, utilizando a representação polifásica e a identidade de Noble [12], pode-se representar a estrutura da Fig. 3 (próxima página) conforme o sistema exibido na Fig. 4 (próxima página).

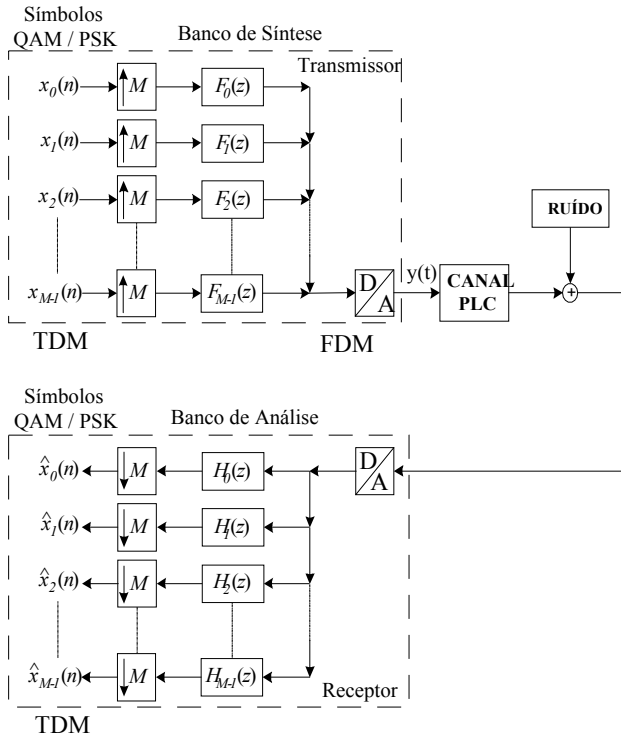


Fig. 3 – Estrutura completa de um transmultiplexor.

Para a condição de reconstrução perfeita (PR – *Perfect Reconstruction*), onde o sinal de saída no receptor é igual ao de entrada no transmissor, usa-se representar o banco de análise (TX) e síntese (RX) por matrizes no domínio de transformação Z. A fim de garantir PR, tais matrizes, também conhecidas como matrizes polifásicas $E(z)$ e $R(z)$ respectivamente, devem satisfazer à condição dada por [12]

$$S(z) = R(z)E(z) = cz^{-m_0} \begin{bmatrix} 0 & I_{M-1} \\ z^{-1} & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

para algum m_0 inteiro. Através de (3) percebe-se que o sinal recebido para um sistema PR é o sinal transmitido atrasado no tempo e atenuado por uma constante c .

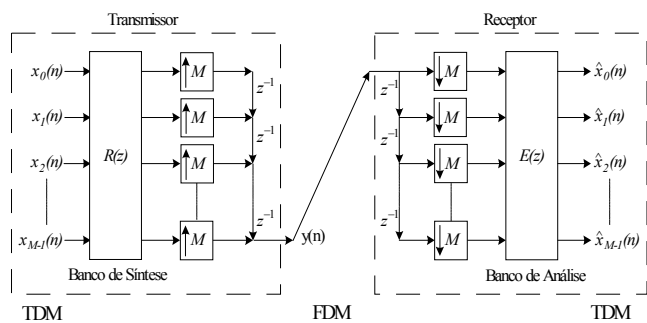


Fig. 4 – Estrutura TMUX utilizando representação polifásica.

Os tipos de sistemas MCM abordados neste trabalho apresentam, além da propriedade PR, a propriedade de ortogonalidade. Isto permite a realização das matrizes $E(z)$ e $R(z)$ através de uma transformada de blocos.

A. OFDM

Os M filtros de análise e síntese são obtidos modulando-se uma função exponencial, e descritos por (para filtros f)

$$f_k(t) = u(t) \cdot e^{-j2\pi g_k t}, \quad (4)$$

em que: $g_k = g_0 + \frac{k}{MT_s}$, $k \in [0, M-1]$.

Pelo Teorema de Balian-Low [18] sabe-se que a única função $u(t)$ modulada por uma função exponencial que resulta numa base ortogonal é a janela retangular dada por

$$u(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{MT_s}, & 0 \leq t \leq MT_s \\ 0 & , \text{outra situação} \end{cases} \quad (5)$$

Para o caso de função $u(\bullet)$ discreta no tempo, considerando a modulação do sinal $x(n)$ através de um banco de filtros como na Fig. 3 e definindo $y_k(n) = y((nM-k)T_s)$ para $0 \leq k \leq M-1$ a partir de M amostras discretas, pode-se representar o modelo em banda base ($f_0=0$) em (6) a partir de (2) por

$$y_k(n) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} u[(n-1)M - k]T_s \cdot \sum_{m=0}^{M-1} x_m(i) e^{j2\pi km/M} \quad (6)$$

Substituindo (5) em (6), obtém-se a saída da k -ésima subbanda no tempo discreto dada por

$$y_k(n) = \frac{1}{\sqrt{MT_s}} \sum_{m=0}^{M-1} x_m(n-1) e^{j2\pi km/M} \quad (7)$$

Portanto é considerado que o OFDM é um caso particular de um sistema TMUX, no qual utiliza-se uma janela retangular como filtro protótipo modulado através de uma função exponencial.

A Equação (7) representa a transformada Inversa de Fourier (IDFT). Assim, o OFDM utiliza a IDFT no transmissor para modulação e a DFT no receptor para demodulação. A forma eficiente de implementação da DFT e da IDFT é por meio da transformada rápida de Fourier, i.e. FFT, e sua inversa, IFFT. Um aumento no número de subportadoras a ser transmitidas implica em um aumento no número de pontos da FFT. O custo computacional associado a uma FFT é de $N \log_2 N$ onde N é o número de pontos da transformada sendo facilmente implementado por arquiteturas baseadas em processamento de sinais.

Para a redução da Interferência Inter-Simbólica (ISI) os sistemas OFDM empregam um intervalo de guarda, minimizando multipercurso de símbolos OFDM [13]. Entretanto, os intervalos de guarda devem ser colocados de forma a não causarem ICI (Interferência Inter-Canal). A solução deste problema veio com o emprego da extensão cíclica do intervalo de guarda, onde se acrescenta ao início de cada símbolo uma certa quantidade de amostras da parte final do mesmo [14]. A ICI e a interferência multidimensional (MDI) são zero quando mantidas a ortogonalidade entre as subportadoras.

B. DWMT

Um sistema alternativo MCM, denominado DWMT, foi introduzido por Tzannes [15] e é baseado em filtros wavelets de M bandas. O sinal transmitido $y_k(n)$, a partir de uma taxa D/A igual a T_s , é dado por

$$y_k(n) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} u[(n-i)M - k]T_s \cdot \sum_{m=0}^{M-1} x_m(i) \cdot \cos(w_m \cdot kT_s + \phi_m). \quad (8)$$

A Equação (8) pode ser interpretada como a saída de um sistema de banco de filtros co-seno modulados com filtro protótipo $u(n)$. Para este caso existem várias possibilidades de projeto do filtro $u(n)$, atendendo ou não a propriedade PR. Quando a condição PR não é atendida o sistema é denominado “Banco de filtros co-seno modulado pseudo QMF (*Quadrature Mirror Filter*)” [12]. A realização mais difundida para DWMT é feita através da ELT (transformada ortogonal obtida por janelas suaves modulando funções coseno IV) desenvolvida por Malvar [16], pois satisfaz as condições de ortogonalidade, PR e implementação por meio de um algoritmo rápido denominado Fast ELT.

Na ELT os filtros protótipos apresentam um tamanho igual a $2KM$, onde M é o número de subbandas e K é o fator de sobreposição, ou seja, existe no tempo uma sobreposição dos filtros de cada subbanda. Assim, ao contrário da IDFT/DFT, onde M símbolos de entrada geram M símbolos de saída, na ELT M símbolos de entrada geram $2KM$ símbolos de saída (Figura 5). Assim, consecutivos blocos de saída possuem uma sobreposição de $2KM - M$ símbolos. A partir do resultado da soma dos símbolos onde ocorre sobreposição, consegue-se gerar M símbolos de saída para cada M símbolos de entrada com um atraso $D = 2K - 1$ no transmissor.

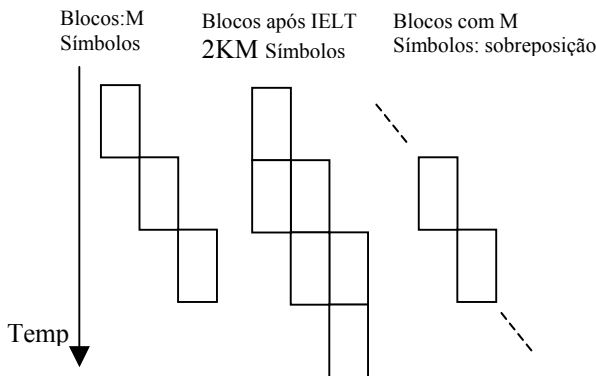


Fig. 5 – Blocos para cálculo usando IELT.

Os coeficientes da transformada ELT são expressos por

$$p_{nk} = h(n) \cdot \sqrt{\frac{2}{M}} \cdot \cos\left[\left(n + \frac{M+1}{2}\right)\left(k + \frac{1}{2}\right)\frac{\pi}{M}\right] \quad (9)$$

$n = 0, 1, \dots, 2KM-1$ $k = 0, 1, \dots, M-1$

onde $p_{n,k}$ denota o elemento da n -ésima linha e k -ésima coluna da matriz transformada \mathbf{P} ($2KM \times M$)

Para o projeto da janela $h(n)$, tem-se $KM/2$ possibilidades a fim de atender a condição de PR [16]. Assim, o critério a ser

escolhido depende da aplicação requerida. Malvar [16] baseou-se na técnica de minimização da energia na banda de rejeição para desenvolvimento do filtro protótipo $h(n)$. Este critério possui boa eficiência espectral e por isso pode ser utilizado na aplicação requerida (DWMT), além de oferecer algoritmo rápido. Em relação a complexidade computacional, segundo Malvar [16] a Fast ELT requer $M/2(2K + \log_2 M + 3)$ operações de multiplicação e $M/2(2K + 3\log_2 M + 1)$ operações de adição para a sua implementação.

C. WPM

Wavelet packets (WP) foi introduzido por Coifman, Meyer e Wickerhauser [17] generalizando a relação entre aproximação multiresolução e wavelets onde o espaço de aproximação multiresolução é decomposto em um espaço de baixa resolução mais um espaço de detalhes. Assim, a partir de uma base ortonormal duas outras bases ortonormais podem ser geradas [18]. Estas duas bases podem especificar um par de filtros QMF de modo a, dado $g(n)$, $h(n) = (-1)^{1-n}g(1-n)$. Considerando os filtros em Z , ($G(z)$ e $H(z)$) a WP pode ser descrita como uma estrutura em árvore de um banco de filtros e representada pela Fig. 6 [12], significando o banco de análise de uma estrutura TMUX.

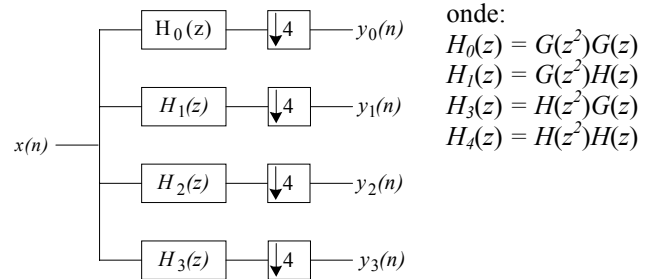


Fig. 6 – Representação no domínio da frequência dos filtros $H_k(z)$.

Supondo um sistema MCM tipo WPM com k estágios, o sinal transmitido $y(t)$ a uma taxa T_s é expresso por

$$y(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{+\infty} x_m(n) \cdot h_{k,m}(t - nT_s), \quad (10)$$

onde $x_m(n)$, $n \geq 0$ são os símbolos transmitidos, $h_{k,m}(t)$ é a função WP da m -ésima subbanda e M o número total destas.

A WPM, como a DFT, mapeiam M símbolos de entrada em M símbolos de saída e possui algoritmo rápido para sua realização com complexidade $2ML \log_2(2ML)$ [18], onde L é o número de coeficientes dos filtros $H_k(z)$ e $G_k(z)$.

IV. ANÁLISE DE DESEMPENHO

Nesta Seção o desempenho de um sistema PLC é analisado para os três tipos de modulação multiportadora: OFDM, DWMT e WPM. O modelo para o sistema PLC, Fig. 7 (próxima página), consiste de uma linha de 200 m com os terminais casados (extremidades A e C da Fig.), 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.

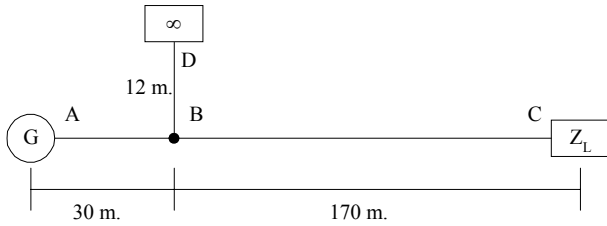


Fig. 7 - Modelo de experimento para geração da função de transferência.

A Tabela II mostra os parâmetros utilizados para o canal PLC e foram obtidos em [8].

TABELA II – PARÂMETROS DO CANAL PLC.

Parâmetros de Atenuação					
$k = 1$		$a_0 = 0$		$a_1 = 7.8 \times 10^{-10}$	
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

Para a simulação foi considerado que todos os sistemas MCM utilizam modulação constante em todas as 64 subbandas, ou seja, não se emprega modulação adaptativa e possuem potência idêntica de saída. Foi definido que o sistema irá atuar na banda base de 0 a 5 MHz, portanto a taxa de amostragem do sistema é de 10 Msps (amostras por segundo). Assim, a taxa de transmissão é aproximadamente 8 e 16 Mb/s utilizando a modulação 4-QAM e 16-QAM respectivamente.

A Fig. 8 mostra a resposta em frequência da função de transferência do canal simulado com os parâmetros da Tabela II na faixa de frequência definida acima.

Foram considerados no canal PLC simulado os ruídos da rede elétrica modelados por: ruído colorido na banda 0 a 5 MHz, interferência de frequências vizinhas, e os ruídos impulsivos tipo 1 e 2 conforme descrito em [9,10].

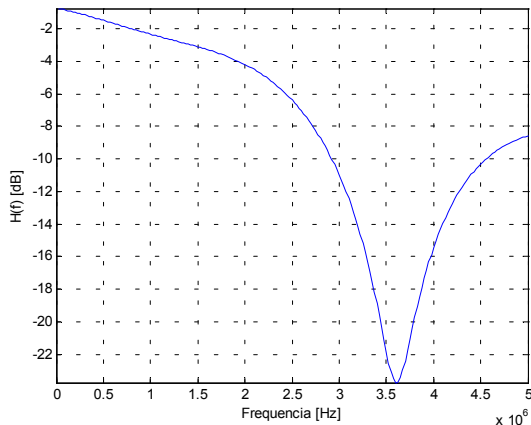


Fig. 8 – Resposta em frequência do canal PLC simulado.

Para validação dos sistemas MCM construídos foram realizadas simulações em um canal AWGN utilizando uma seqüência pseudo-aleatória de pouco mais de 3 milhões de bits. O desempenho do sistema foi analisado através da Taxa de Erro de Bit (BER- *Bit Error Rate*) em função da relação Sinal-Ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*).

Conforme [14], um sistema MCM tem que obter a mesma resposta de um sistema de portadora única em canais AWGN.

A confirmação do resultado é visto na Fig. 9 e é válida para todos os sistemas MCM utilizados neste trabalho.

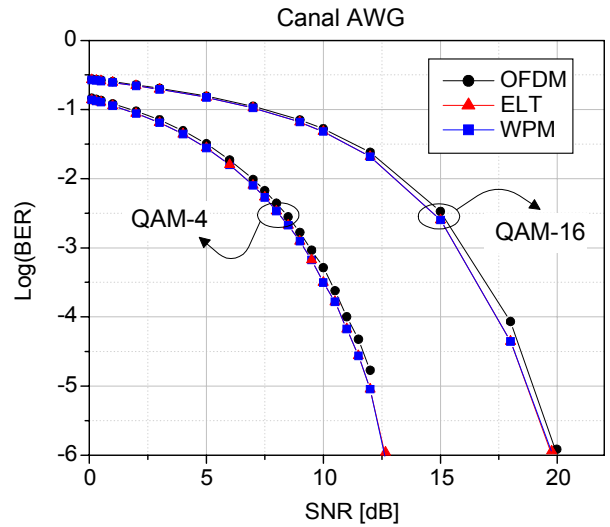


Fig. 9 – Confirmação dos sistemas MCM perante o canal AWGN.

A Fig. 10 mostra o resultado das simulações para o canal PLC utilizando os sistemas MCM estudados. A ELT apresentou melhor resultado para custo computacional ($K=3$), enquanto que para a WPM, a melhor base foi a Haar. Nota-se em todos os casos a ocorrência do fenômeno de “cauda”, ou seja, com um aumento do valor da SNR a BER fica estabilizada em um determinado valor. Isto ocorre devido aos ruídos impulsivos síncronos e, principalmente, aos ruídos impulsivos assíncronos existentes na rede elétrica.

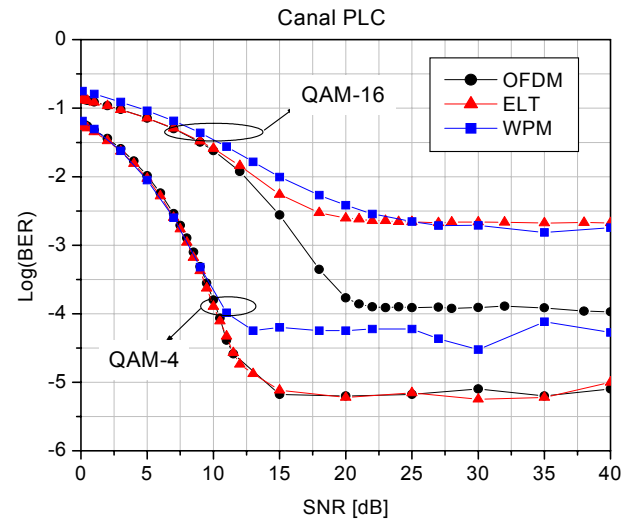


Fig. 10 – BER x SNR para canal PLC modelado.

Na Tabela III (próxima página) o desempenho dos sistemas MCM são comparados perante aos critérios geralmente empregados na análise de banco de filtros: produto espalhamento no tempo x espalhamento na frequência (quanto menor, melhor), relação entre lóbulo principal e o primeiro lóbulo lateral e complexidade computacional (referência OFDM = 100 %).

TABELA III – DESEMPENHO DOS SISTEMAS MCM (* PIOR CASO).

DESCRIÇÃO	OFDM	WPM	ELT
Espalhamento no Tempo	341,25	1365,3	871,05
Espalhamento na Freqüência	0,0123	0,0032	0,0033
espalhamento Tempo × Freqüência	4,20	4,33	2,85
Relação lob. principal × 1° lob. Lateral	13 dB	6,1 dB	45 dB
N° operações de multiplicação	384	2048	480
N° operações de adição	384	2048	800
N° Total de operações (%)	100,00	533,33	164,78

Devido ao multipercurso existente no canal PLC, o fator preponderante para a geração de erro nos símbolos recebidos é a ISI. Como o OFDM apresenta o intervalo de guarda, este possui vantagem em relação aos outros sistemas MCM para combate a ISI. Além disso, pesa o fato do OFDM possuir um menor espalhamento no tempo, acrescentando ainda mais robustez perante a ISI. Por causa disto o OFDM apresentou melhor resultado nesta situação.

Realizou-se testes variando a potência, duração dos ruídos impulsivos e também o intervalo de tempo entre estes, ocasionando uma mudança no patamar do fenômeno de piso da Fig. 10. Assim, quanto maior a potência ou duração dos ruídos impulsivos ou aparecimento destes em intervalos mais curtos, maior é o erro detectado no receptor. Para todos os casos o OFDM apresentou melhor resultado.

Em termos de resposta em freqüência, a ELT apresenta um ganho adicional de 32 dB em relação ao OFDM e de 39 dB em relação a WPM. Conseqüentemente, a ELT possui maior robustez perante a ICI nas situações de perda da ortogonalidade ou aparecimento de interferência de freqüências vizinhas. No entanto, a ICI não é mais danosa no canal PLC utilizado, como demonstrou ser a ISI.

Um fator de muita importância para a avaliação do desempenho de um sistema digital refere-se a complexidade computacional. O cálculo empregado na Tabela IV considera $M = 64$ subportadoras, fator de sobreposição igual $K = 3$ para a ELT e tamanho dos filtros $G(z)$ e $H(z)$ igual a $L = 2$ (referente a base de Haar) para a WPM. Percebe-se que o OFDM leva uma grande vantagem no critério custo computacional, pois apresenta um algoritmo pelo menos 65% mais rápido em relação aos outros sistemas MCM estudados. Além disso, alguns trabalhos [19-22] demonstram que algoritmos simples de equalização resultam em ganho significativo de desempenho para o OFDM, enquanto para os outros sistemas MCM são necessários algoritmos complexos de equalização demandando ainda mais capacidade de hardware.

TABELA IV – Resultado para 64 subportadoras

DESCRIÇÃO	OFDM	ELT	WPM
Multiplicações	384	480	2048
Adições	384	800	2048
Total de operações	768	1280	4096
Total de operações (100% = 768)	100,00	164,78	533,33

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados três tipos de sistemas MCM ortogonais: OFDM, DWMT realização via ELT e WPM. Foram descritas as principais características de cada sistema e posteriormente mostrou-se o desempenho individual quanto a:

resposta em freqüência, espalhamento no tempo e freqüência, complexidade computacional e curva BER em função da SNR para um canal PLC. O canal utilizado apresenta multipercurso adicionado de ruídos impulsivos e interferências de freqüências vizinhas. Os resultados mostraram que o OFDM é a melhor solução para sistemas PLC em comparação à utilização de modulação via ELT e a WPM e quando se observa a relação desempenho × custo computacional.

REFERÊNCIAS

- [1] Dostert K., "Power Line Communications", *Prentice Hall PTR*, Krikenbach – Alemanha, 2001.
- [2] Siqueira T., Silva J., Dezan T., Souza B., Rocha L., Côco K., Tostes H., Segatto M., Salles E. "Técnica OFDM Aplicada a Power Line communications," *II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, Salvador, Brasil, Outubro, 2003.
- [3] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come", *IEEE Communications Magazine*, Issue: 5, pp.: 5 – 14, Maio – 1990.
- [4] A. Pandharipande, "Principles of OFDM", *IEEE Potentials*, Vol.: 21, Issue: 2, pp.: 16 – 19, Abril/Maio – 2002.
- [5] "ASYMETRIC Digital Subscriber Line (ADSL) Metallic Interface", *ANSI/TIE1.4/94-007*, Rev. C – 1998.
- [6] E. Phillip, "Adaptive Techniques for Multiuser OFDM", *Tese de Doutorado*, James Cook University, Austrália, Dezembro – 2001.
- [7] G. W. Wornell, "Emerging Applications of Multirate Signal Processing and Wavelets in Digital Communications", *Proceedings of the IEEE*, Vol.: 84, Issue: 4, pp.: 586 – 603, Abril – 1996.
- [8] M. Zimmermann, K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 50, Issue: 4, pp.: 553 – 559, Abril – 2002.
- [9] M. Zimmermann, K. Dostert, "An Analysis of the Broadband Noise Scenario in Powerline Networks", *Proceedings of the 4th International Symposium on Powerline Communications and its Applications*, Limerick, Ireland, pp.: 131 – 138, Abril – 2000.
- [10] M. Zimmermann, K. Dostert, "Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol.: 44, Issue: 1, pp.: 249 – 258, Fevereiro – 2002.
- [11] A. k. Akansu, P. Duhamel, X. Lin, M. Couville, "Orthogonal Transmultiplexers in Communication: A Review", *IEEE Transaction on signal processing*, Vol.: 46, Issue: 4, pp.: 979 – 995, Abril – 1998.
- [12] P. P. Vaidyanathan, "Multirate systems and Filter Banks", *Englewood Cliffs*, NJ: Prentice-Hall, 1993.
- [13] S. Weinstein, P. Ebert, "Data transmission by frequency division multiplexing using the discrete fourier transform", *IEEE Transactions on Communications Tech.*, Vol.: 19, Issue: 5, pp.: 628–634, Out – 1971.
- [14] L. Hanzo, W. Webb, T. Sèller, "Single and multi-carrier quadrature amplitude modulation", *Wiley Press*, 1998.
- [15] S. D. Sandberg, M. A. Tzannes, "Overlapped discrete multitone modulation for high speed copper wire communications", *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, Vol.: 13, N°.: 9, pp.: 1571 – 1585, Dezembro – 1995.
- [16] H. S. Malvar, "Signal Processing with Lapped Transforms", *Artech House*, Boston – USA, 1992.
- [17] R.R. Coifman, Y. Meyer, M. V. Wickerhauser, "Wavelets and their applications," Jones and Barlett, Boston – USA, 1992.
- [18] S. Mallat, "A wavelet tour of signal processing," *Academic Press*, Paris – França, 1997.
- [19] N. Neurohr, M. Schilpp, "Comparison of transmultiplexers for multicarrier modulation", *Fourth International Conference on Signal Processing Proceedings – ICSP '98*, Vol.: 1, pp.: 35 – 38, Out. – 1998.
- [20] A. D. Rizos, J. G. Proakis, T. Q. Nguyen, "Comparison of DFT and cosine modulated filter banks in multicarrier modulation", *IEEE Global Telecom. Conference, 1994 – GLOBECOM '94*, Vol.: 2, pp.: 687 – 691.
- [21] M.C. Sun, D. P. K. Lun, "Power line communications using DWMT", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2002 – ISCAS 2002*, Vol.: 4, pp.: 493 – 496.
- [22] X. Zhang, G. Bi, "OFDM scheme based on complex orthogonal wavelet packet", *12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Vol.: 2, pp.: 99 – 104, Set/Out – 2001.