Análise Comparativa de Quatro Estruturas de Equalização de Canal de Comunicação Digital

Kaio Jonathas Alencar Gurgel[1], Francisco José Alves de Aquino[2]

[1]Graduando em Engenharia de Telecomunicações, Departamento de Telemática – IFCE. e-mail: kaiojag@gmail.com
[2]Professor Dr. em Engenharia Elétrica, Departamento de Telemática - IFCE. e-mail: fcoalves_aq@ifce.edu.br

Resumo: Em situações práticas, o canal de comunicação tem largura de banda limitada além de o ruído estar sempre presente no receptor, o que leva a uma distorção do sinal recebido. Essa distorção pode ser combatida com o uso de equalizadores. Este artigo descreve um modelo de comunicação digital e estruturas de equalização que podem ser usadas para melhorar o desempenho do sistema quando o canal de comunicação introduz interferência entre os símbolos transmitidos. Essas estruturas de equalização são comparadas para vários cenários em relação à taxa de erro de bit resultante via simulação computacional usando o Scilab (*software* livre).

Palavras–chave: canal de comunicação, comunicação digital, equalização, equalizador largamente linear, simulação computacional

1. INTRODUÇÃO

Uma mensagem digital pode ser definida como sendo uma sequência de símbolos selecionados a partir de um conjunto finito de elementos discretos (“alfabeto”). Como a informação de uma mensagem digital está concentrada em símbolos discretos, um sistema digital de comunicação deveria entregar esses símbolos, com um grau especificado de precisão, no receptor em um intervalo de tempo definido (CARLSON, 1986). A Figura 1 ilustra um modelo de sistema de comunicação digital (PROAKIS, 1995), para um modelo de comunicação mais detalhado ver, por exemplo, Sklar (1983).

O canal de comunicação é o meio físico usado para transmitir o sinal do transmissor ao receptor. Ao passar pelo canal, o sinal transmitido pode ser corrompido de forma aleatória por diversos mecanismos: adição de ruídos, atenuação, seletividade em freqüência, deslocamento de fase, que são, em geral, dependentes do tempo. Por exemplo, o efeito de seletividade em freqüência pode transformar um único pulso transmitido em um trem de pulsos atrasados no receptor. A duração desse trem de pulsos é chamada de espalhamento de atraso (*delay spread*) (RAPPAPORT, 1996).

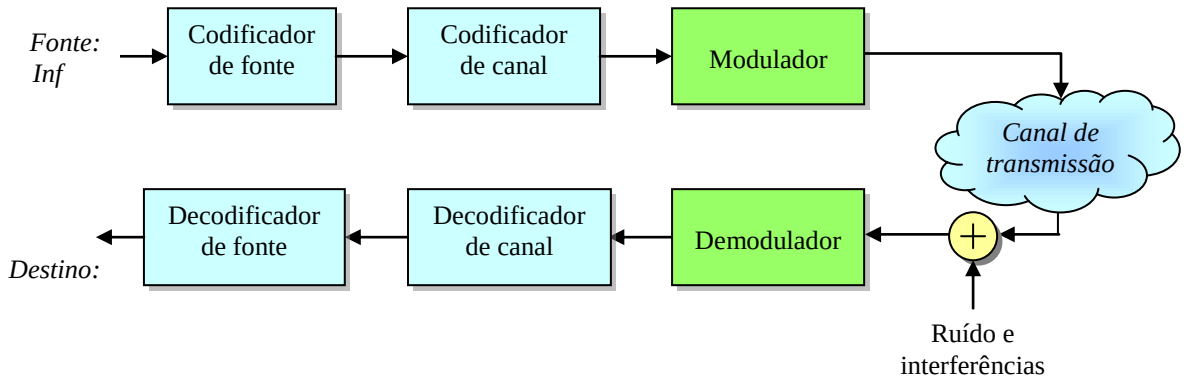

Figura 1 – Modelo de um sistema comunicação digital mostrando os principais blocos

ISBN 978-85-62830-10-5

Em canais de comunicação sem fio (*wireless*), a seletividade em frequência do canal é causada pelo efeito de múltiplos percursos, isto é, o sinal transmitido chega ao receptor por vários caminhos, como ilustrado na Figura 2. Esse efeito é responsável pelo aparecimento da interferência entre símbolos[1] (IES), o que pode degradar fortemente o sinal recebido.

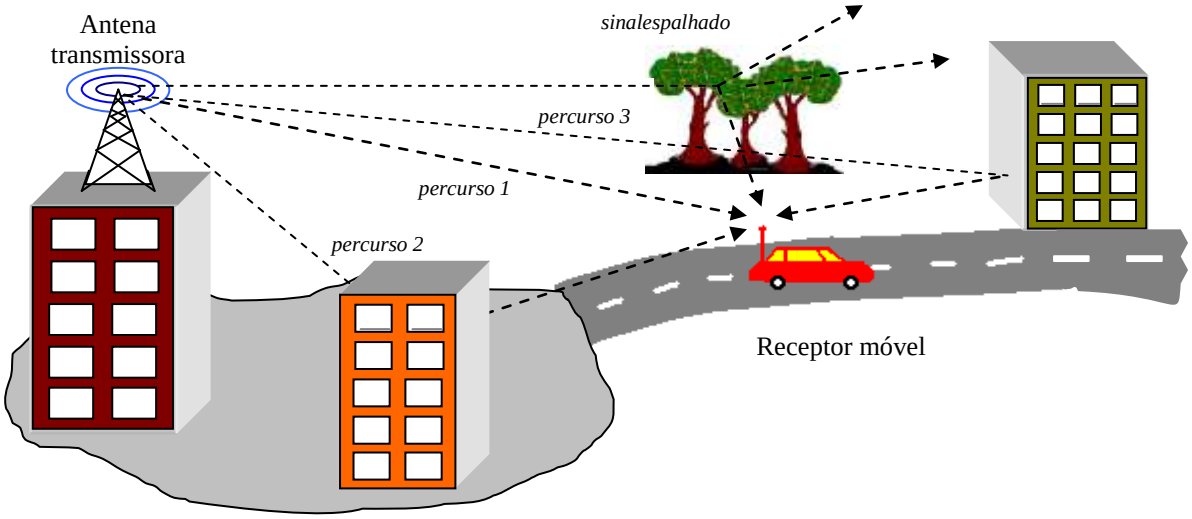

Figura 2 – Meio de propagação com múltiplos percursos (canal seletivo em freqüência)

Para combater a distorção introduzida pelo canal de comunicação pode-se usar um equalizador de canal. Em muitas situações, o canal é variante no tempo e desconhecido. Logo, esse equalizador deve ser uma estrutura de filtragem adaptativa que usa algum tipo de algoritmo iterativo para o ajuste dos seus coeficientes (PROAKIS, 1995;RAPPAPORT, 1996).

Neste artigo são comparados quatro equalizadores: linear, largamente linear, DFE (*decision-feedback equalization*) e DFE largamente linear. Os detalhes teóricos sobre esses equalizadores podem ser encontrados em Proakis (1995), Pimentel (2007) e Gerstacker et al. (2003).

2. NOTAÇÃO MATEMÁTICA E EQUALIZAÇÃO

Com base no que foi apresentado na seção anterior, o sinal digital recebido, depois de amostrado, pode ser expresso por:

$$x\,k \;=\; \sum_{n=0}^{L} a\,k-n\;h_n\;k \;+\eta\;k\;, \qquad (1)$$

sendo L o comprimento do canal, η o ruído aditivo, considerado gaussiano de média nula e variância σ^2_n, $a[k]$ o símbolo transmitido no instante k e $x[k]$ o sinal recebido. A função do equalizador é então minimizar a interferência entre símbolos sem amplificar demasiadamente o ruído e gerar na saída um sinal próximo a um símbolo da constelação transmitida com um possível atraso Δ. A diferença entre o símbolo e o sinal calculado pelo equalizador é o erro de equalização instantâneo, $\varepsilon[k]$. Em geral, os algoritmos usados para adaptar os coeficientes dos equalizadores buscam minimizar o valor absoluto ao quadrado desse erro, isto é, tentam minimizar a função $J = \mathrm{E}\{|\varepsilon[k]|^2\}$. Um dos algoritmos mais

[1] O termo "intersimbólico", apesar de uso corrente na literatura técnica brasileira, não é encontrado entre os vocábulos do dicionário Aurélio.

utilizados para essa função, pela sua simplicidade e robustez, é o algoritmo LMS (*least mean square*), para detalhes e informações ver, por exemplo, Qureshi (1985).

Usando notação vetorial, a Equação (1) pode ser reescrita como:

$$x\ k\ = \boldsymbol{h}^T\ k\ \boldsymbol{a}\ k\ + \eta\ k\ , \tag{2}$$

sendo **h**[*k*] um vetor contendo os coeficientes do canal no instante *k*, **a**[*k*] o vetor de dados transmitidos e $(.)^T$ representa transposição. Esses vetores precisam possuir dimensão compatível. Em sua forma básica, o algoritmo LMS pode descrito por (PROAKIS, 1995):

$$y\ k\ = \boldsymbol{w}^H\ k\ \boldsymbol{x}\ k\ , \tag{3a}$$

$$\varepsilon\ k\ = d\ k\ - y\ k\ , \tag{3b}$$

$$\boldsymbol{w}\ k+1\ = \boldsymbol{w}\ k\ + \mu\varepsilon\ k\ \boldsymbol{x}^*\ k\ , \tag{3c}$$

sendo **x**[*k*] um vetor de dados recebidos, **w**[*k*] um conjunto de coeficientes de filtragem, (.)* a operação de conjugação complexa, e $0 < \mu << 1$ o passo de adaptação. O sinal estimado *y*[*k*] passa por dispositivo de decisão que calcula o símbolo recebido.

2.1 Equalizador Linear

Na Figura 3 é possível verificar a estrutura de um equalizador linear. Obviamente os símbolos transmitidos passaram por um canal de comunicação digital o qual adicionará ruído e distorção ao sinal que esta sendo transmitido. Na recepção o sinal precisa ser amplificado, como o sinal já esta com ruído e distorções, quando ele é amplificado o ruído e as distorções também são amplificadas, sendo por tanto necessário o uso de um equalizador.

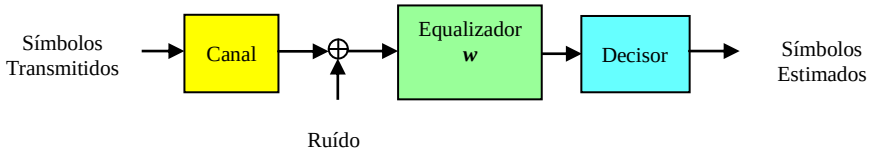

Figura 3 – Estrutura do Equalizador Linear

2.2 Equalizador Largamente Linear

A estrutura de um Equalizador Largamente Linear é semelhante a estrutura de um Equalizador Linear. A diferença estrutural pode ser vista na Figura 4, onde sinal que chega sofre uma operação de conjugação complexa e alimenta outro filtro. A soma das saídas desses dois filtros (***w*** e ***w****) alimenta o dispositivo de decisão.

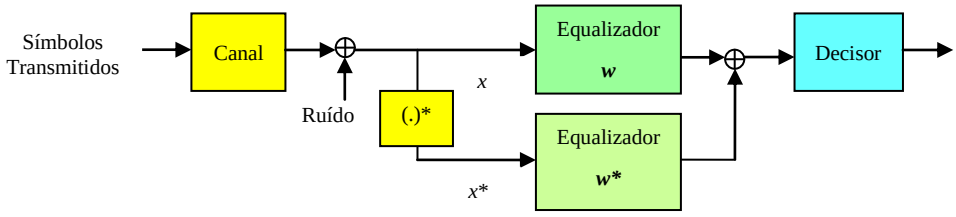

Figura 4 – Equalizador Largamente Linear

2.3 Equalizador DFE

Diferentemente do Equalizador Linear e Largamente linear, no Equalizador DFE, assim como sugere a sigla, é apresentada uma realimentação (Figura 5). Essa realimentação pode aumentar muito o desempenho desse equalizador quando comparado com um equalizador linear, desde que os símbolos sejam decididos corretamente. Isso ocorre quando o nível de ruído e distorção é suficientemente reduzido pelo filtro de alimentação, caso contrário poderá ocorrer uma rajada de erros.

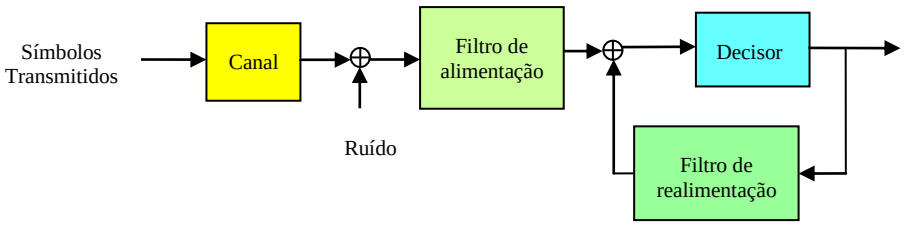

Figura 5 – Estrutura do Equalizador DFE

2.4 Equalizador DFE Largamente Linear

A estrutura do Equalizador DFE Largamente Linear é a combinação de um DFE tradicional com a um equalizador largamente linear, como mostrado na Figura 6.

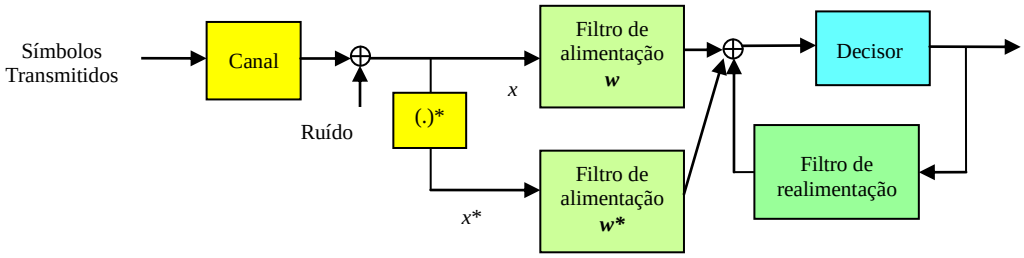

Figura 6 – Estrutura do Equalizador DFE Largamente Linear

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os quatro equalizadores foram comparados por meio de uma simulação para três canais diferentes e sob diversas condições de relação sinal ruído, os resultados das simulações estão expostos nas Figuras 7, 8 e 9. Em cada simulação foram gerados 20.300 símbolos aleatórios de uma constelação BPSK e calculada a taxa de erro ao fim da sequência de treinamento na saída dos equalizadores. Os primeiros 300 símbolos são usados com sequência de treinamento para os equalizadores, todos usando o algoritmo LMS de passo fixo (μ = 0,010) para adaptação dos coeficientes. Para a obtenção de cada curva, foram rodadas dez simulações, com a transmissão total de 203.000 símbolos.

O equalizador linear usado nesta simulação tem 21 coeficientes complexos. Já a sua versão largamente linear tem 15 coeficientes complexos. O equalizador DFE tem 21 coeficientes no filtro de alimentação e 10 coeficientes no filtro de realimentação. Para o DFE-LL esses valores são 15 e 8, respectivamente. Os canais usados estão definidos na Tabela 1. O canal h1 foi definido por Porat e Friedlander (1991), sendo um canal bastante seletivo e que causa uma grande distorção do sinal. Os canais h2 e h3 são menos seletivos.

Tabela 1 – Coeficientes dos canais usados

Modelos	h1	h2	h3
Coeficiente 1	0,485 – 0,097*j*	- 0,257 - 0,206*j*	0,527
Coeficiente 2	0,364 + 0,437*j*	0,754 - 0,368*j*	0,353 – 0,624*j*
Coeficiente 3	0,243	0,257 + 0,188*j*	- 0,243 – 0,316*j*
Coeficiente 4	0,291 – 0,315*j*	0,214 - 0,128*j*	- 0,201 – 0,076*j*
Coeficiente 5	0,194 + 0,388*j*	0,128 - 0,086*j*	0,02 + 0,051*j*

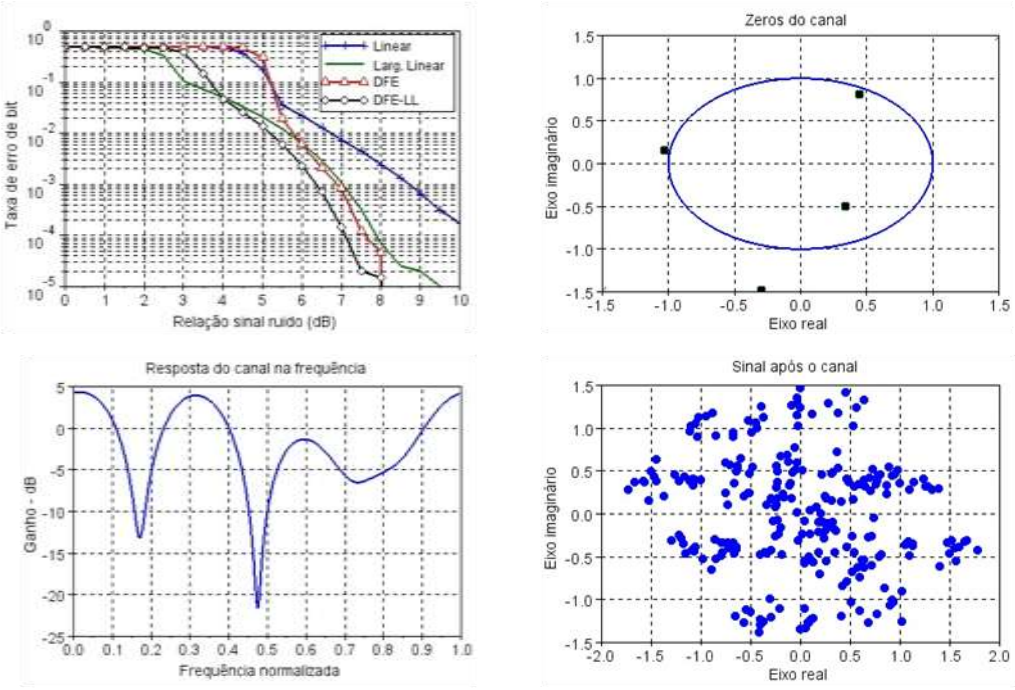

Figura 7 – Desempenho para o canal h1

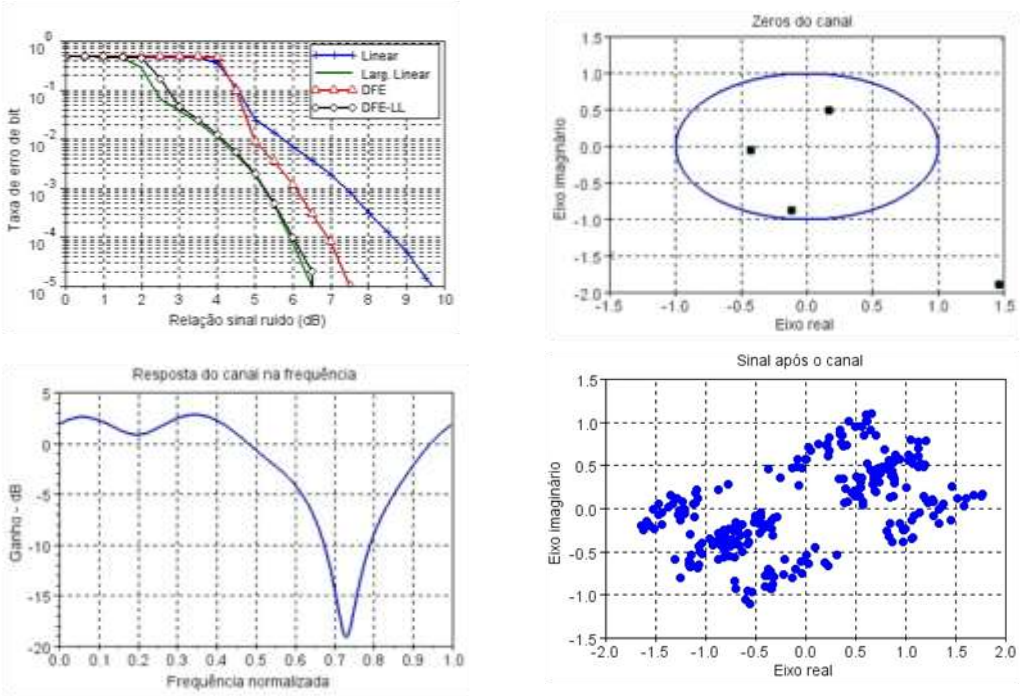

Figura 8 – Desempenho para o canal h2

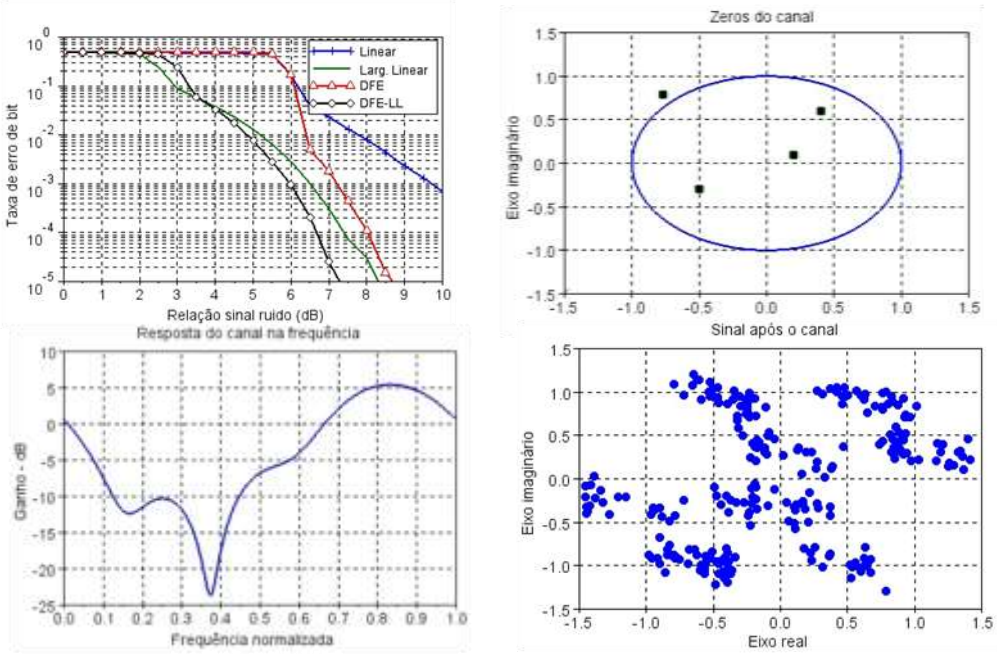

Figura 9 – Desempenho para o canal h3

Em todas as simulações, o equalizador linear apresentou o pior desempenho. Para os canais h1 e h2, o melhor desempenho foi obtido pelo equalizador DFE-LL quando a relação sinal ruído era media ou alta (> 4 dB). Já para o canal h3, o desempenho do equalizador largamente linear e o DFE-LL não apresentaram diferenças significativas. Para uma relação sinal ruído mais alta (> 8 dB), o desempenho do equalizador DFE se aproximava do equalizador largamente linear.

6. CONCLUSÕES

O presente artigo tratou das diferentes estruturas utilizadas no tratamento do sinal contendo ruído e distorções adicionados na recepção do sinal proveniente do canal de comunicação digital. Por meio das simulações realizadas com o auxílio do *software* livre *Scilab* foi possível chegar a algumas conclusões. Usando uma estrutura de equalização linear a quantidade de ruído e distorção presente em um sinal foi reduzida razoavelmente. Utilizando uma estrutura de equalização largamente linear foi possível reduzir ainda mais e aproximar o sinal que foi recebido ao sinal que foi transmitido com um pequeno erro. Além dessas duas estruturas de equalização, foram realizadas ainda simulações com outras duas estruturas de equalização, o DFE e o DFE largamente linear. A diferença mais marcante entre as estruturas é que o DFE possui uma realimentação assim como é mostrado nas Figuras 5 e 6. Seguindo o exemplo do equalizador linear e largamente linear, o DFE largamente linear é superior ao DFE. Com ele obtêm-se um sinal bem mais aproximado daquele transmitido e consequentemente com uma taxa erro também menor. Como trabalho futuro pensa-se na combinação de uma estrutura DFE largamente linear e o equalizador largamente linear, para que o desempenho seja melhorado tanto quando a relação sinal ruído é baixa quando essa relação melhora. Também é possível usar uma combinação de equalização com código corretores de erros em conjunto para obter um resultado, em termos de taxa de erro, ainda melhor.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação do Ceará (IFCE), à FUNCAP – Edital 007/2010, Programa Primeiros Projetos no. 0033-00115.01.00/10, e ao laboratório GPICE (Grupo de Processamento de Imagens) pelo apoio material e financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

BELFIORE, C. A., PARK Jr., J. H. **Decision feedback equalization.** Proc. IEEE, vol.67, pp.1143–1157, Aug.1979.

CARLSON, A. B. **Communication Systems:** An Introduction to Signals and Noise in Eletrical Communication**.** McGraw-Hill International Editions, 3a.Edição, 1986.

GERSTACKER, W. H.; SCHOBER, R.; LAMPE, A. **Receivers with widely linear processing for frequency-selective channels**. IEEE Trans. on Communication, vol. 51, no. 9, pp. 1512–1523, setembro 2003.

HAYKIN, S. **Adaptive Filter Theory.** Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.

PROAKIS, J. G. **Digital Communications**. McGraw-Hill, 3a.Edição, 1995.

QURESHI. S.U.H. **Adaptive equalization**. Proc. IEEE,vol.73,pp. 1349–1385,Sept.1985.

RAPPAPORT, T.S. **Wireless Communication: Principles and Pratice**. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.

SKLAR, B. **A structured overview of digital communications— A tutorial review. Part I**", IEEE Commun. Mag., no. 21, pp. 4–17, agosto, 1983.

PORAT, B. e FRIEDLANDER, B. **Blind Equalization of Digital Communication Channels Using High-Order Moments**. IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 39, no. 2, pp. 522-526, fevereiro, 1991.