

# ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE UM EQUALIZADOR NEURAL EM UM SISTEMA DE COMUNICAÇÕES PLC

Mariana V. ANDRADE (1); Fabrício G. S. SILVA (2)

(1) IFBA, Rua Emídio dos Santos s/n, Barbalho, Salvador-BA, (71) 2102-9456, e-mail: [mari.varela@ig.com.br](mailto:mari.varela@ig.com.br) (2) IFBA, e-mail: [prof.fsimoies@gmail.com](mailto:prof.fsimoies@gmail.com)

## RESUMO

Com a crescente demanda dos sistemas de telecomunicações e automatização, o crescimento na utilização de aplicações como compartilhamento de voz, dados e multimídia necessitam, cada vez mais, de sistemas de comunicações com alta velocidade em banda larga para transmissão de informações. A expressão *Power Line Communication (PLC)*, também conhecida como *Power Line Telecommunication (PLT)* ou *Broadband Communications over Power Lines (BPL)* é empregada para identificar tecnologias, equipamentos, aplicações e serviços que proporcionem comunicações sem a necessidade de cabeamento adicional ao da rede elétrica. Originalmente, as linhas de energia elétrica foram criadas para transmissão de energia na faixa de frequência 50-60Hz. Por esta razão, sinais indesejados como o ruído térmico, ruído impulsivo, provocado pela inserção e remoção de cargas ao longo da linha de energia e o ruído de banda estreita prejudicam bastante o sistema PLC. Por isso, o canal PLC constitui-se em um meio extremamente hostil para transmissão de dados, introduzindo ao sinal Interferência Intersimbólica (ISI), distorções e atenuação. Com o intuito de reduzir a ISI e diminuir as taxas de erro de bit (BER) do sinal transmitido, o uso de equalizadores neurais define-se como uma alternativa para canais não-lineares, variantes no tempo e com comportamento aleatório, como o canal PLC. A Rede Neural Artificial (RNA) do equalizador aprende e adapta-se constantemente ao comportamento do canal PLC, ajustando dinamicamente os coeficientes do equalizador para que o mesmo aproxime o sinal transmitido do recebido na detecção do bit. O sistema PLC simulado computacionalmente com resultados apresentados neste artigo possui configuração *inhouse*, modulação em banda básica BPSK e equalizador neural MLP com algoritmo de treinamento baseado no gradiente descendente. O ambiente de simulação computacional é o Matlab versão 7.0, utilizando a neural network *toolbox* como suporte para o equalizador neural.

**Palavras-chave:** Canal PLC *inhouse*, Equalizador Neural, Redes Neurais Artificiais, Interferência Intersimbólica, Modulação em Banda Básica BPSK

## 1. INTRODUÇÃO

O canal PLC (Power Line Communication) pode ser apontado como uma maneira de implementar uma cadeia de comunicação universal voltada para serviços de Internet (incluindo compartilhamento de dados, voz e aplicações multimídia). (CARVALHO 2006).

Todavia, por possuir característica de propagação multipercuro, o canal PLC introduz ao sinal transmitido Interferência Intersimbólica (ISI). Para reduzir o efeito da ISI, o sistema de comunicação PLC possui como alternativa o uso da técnica de transmissão OFDM [7] que necessita de amplificadores lineares que são conceitualmente de baixa eficiência. No contexto atual existe uma necessidade mundial de economia de energia elétrica através do uso de equipamentos que racionalizem os recursos naturais. Por esta razão, existe uma preferência evidente por amplificadores com alta eficiência na transmissão. Entretanto, a eficiência e a linearidade são características antagônicas, ou seja, amplificadores eficientes são não-lineares.

A não-linearidade é prejudicial à técnica de transmissão OFDM porque reduz a ortogonalidade entre as subportadoras, produzindo a ICI (Interferência entre Canais) e conseqüentemente, aumentando a taxa de erro de bit (BER) [7]. Neste contexto, o artigo apresenta resultados sobre o uso de Equalizadores Neurais e Canais Não-Lineares (amplificadores não-lineares) considerando um cenário sem a técnica de transmissão OFDM.

Os filtros adaptativos ou equalizadores de sinais constituem-se em uma alternativa para cumprir o objetivo de todo sistema de comunicações eficaz: diminuir a taxa de erro de bit (BER). Existem diversos tipos de equalizadores de sinais que reduzem a ISI, dentre os quais, destacam-se, o equalizador transversal linear (LTE), o equalizador com decisão realimentada (DFE) e o equalizador com treinamento neural [12].

Neste artigo, foi adotado o equalizador com treinamento neural baseado no MLP (Perceptron Multilayers) [9]. Neste equalizador, é implementada uma rede neural artificial (RNA), tendo como principal objetivo a máxima redução do erro quadrático médio (MSE) do sinal recebido.

Os resultados encontrados foram baseados em um sistema de comunicações PLC inhouse [2] com modulação BPSK, e equalizador neural simulados computacionalmente no Matlab 7.0, utilizando como principal ferramenta para implementação do equalizador o neural network toolbox.

Nas seções subseqüentes serão abordados os seguintes tópicos: Na seção 2.1 e 2.2 serão apresentadas, respectivamente, as principais características dos equalizadores de sinais, destacando o Equalizador Neural e do sistema PLC, com ênfase na configuração inhouse. Nas seções 3, 4 e 5 respectivamente, são apresentados o método aplicado para os resultados encontrados, a análise e interpretação dos dados e a conclusão.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Equalização de Sinais Digitais usando Treinamento Neural**

Os filtros adaptativos ou equalizadores de sinais são utilizados quando as características estatísticas do sinal de entrada (sinal de saída do canal de comunicações) não são inteiramente conhecidas, sendo um dispositivo que ajusta os seus próprios parâmetros com base em uma estimativa estatística das características do sinal de entrada sob algum critério de otimização (LUQUE 1999).

Os filtros adaptativos ou equalizadores de sinais podem ser de laço aberto ou de laço fechado. Os equalizadores de laço aberto utilizam algoritmos não recursivos para o cálculo dos seus parâmetros, tornando-se mais complexos e menos adaptáveis aos sistemas dinâmicos. Já os equalizadores de laço fechado utilizam algoritmos recursivos que atualiza os parâmetros do equalizador automaticamente, aprendendo um pouco mais sobre a característica estatística do sinal de entrada e melhorando conseqüentemente o ajuste dos seus parâmetros. (LUQUE 1999).

As técnicas de equalização utilizadas por tais filtros podem ser de dois tipos: a pré-equalização que ocorre no transmissor e a pós equalização que ocorre no receptor, podendo acompanhar variações no canal de transmissão ou perturbações na entrada do receptor.

Dessa forma, o projeto desses filtros implica em encontrar um algoritmo de ajuste dos parâmetros em situações nas quais as características do sinal de entrada não estão ao todo disponíveis, convergindo a um filtro ótimo, após certo número de interações, com base em um sinal de referência, chamado de seqüência de treinamento.

Logo, os filtros adaptativos realizam a compensação dos efeitos indesejáveis do canal de transmissão de forma a compensar as não-linearidades do canal de transmissão e diminuição da Interferência Intersimbólica (ISI) do sinal transmitido, maximizando a probabilidade de decisões corretas.

O equalizador neural baseado no MLP (Perceptron Multilayers) é capaz de reduzir a ISI em altas taxas de transmissão, além de conseguir atenuar fatores acentuados de não linearidades e conseguir aprender o comportamento de canais aleatórios e variantes no tempo [12].

A rede neural aplicada neste artigo sobre o equalizador possui filtro adaptativo de laço fechado e técnica de pós-equalização com o intuito de reduzir complexidade computacional e adaptar melhor os coeficientes do equalizador.

A equalização possui duas fases: a de treinamento e a de validação. Na fase de treinamento o equalizador recebe um sinal que corresponde à resposta desejada do sistema (sinal transmitido na entrada do canal) do qual é subtraído da resposta do equalizador obtendo um sinal de erro que por sua vez é utilizado no ajuste adaptativo dos coeficientes do equalizador. O algoritmo que é usado para este ajuste realiza a atualização dos coeficientes em cada período de símbolo. Nesta fase, define-se também o alvo (erro mínimo) a ser alcançado, a quantidade de épocas que a rede neural precisará para inverter a resposta em frequência do canal e o passo de aprendizagem.

Na fase de validação, ocorre uma avaliação do desempenho do equalizador, ou das suas figuras de mérito, verificando o Erro Médio Quadrático (MSE) e a Taxa de Erro de Bit (BER) do sinal transmitido.

## 2.2 O sistema de comunicação PLC

### 2.2.1 Modelo Inhouse

O sistema de comunicação PLC simulado neste artigo possui configuração inhouse, ou seja, é aplicado somente para curtas distâncias em torno da residência.

Um exemplo de aplicação do canal PLC *inhouse* (Figura 1) é o padrão *Home Plug*. O padrão funciona através da utilização de um dispositivo ligado à Internet e a uma tomada elétrica comum. Cada dispositivo (computador, televisão, telefone) ao ser conectado à Internet necessita de um modem também ligado à tomada e ao equipamento, via placa de rede ou porta USB. Os tipos de padrão HomePlug existentes atualmente são: o padrão HomePlug 1.0, para distribuição de Internet residencial, HomePlug AV destinado para transmissões de dados, áudio e vídeo (HDTV) “*in-home*”, HomePlug BPL, que é responsável pelo acesso à internet diretamente pela concessionária de energia e finalmente o HomePlug HPCC. Este padrão permite um alto poder de conectividade e automatização residencial (MAJUMDER, 2004).

### 2.2.2 Características Gerais do Canal PLC

O canal PLC possui comportamento aleatório e variante no tempo, características extremamente hostis para transmissão de informação. O comportamento aleatório do canal PLC é acentuado devido ao fato do mesmo também possuir comportamento não-linear. As características do sinal transmitido podem ser tanto dependentes do tempo quanto da frequência, bem como da localização do transmissor e do receptor dentro da rede [1,3-4].

A rede elétrica é considerada um meio extremamente nocivo ao canal de comunicações devido às reflexões e a atenuação do sinal digital transmitido e aos ruídos presentes. Os ruídos que mais interferem neste sistema de comunicações são: o ruído impulsivo causado pelos equipamentos indutivos e capacitivos ao longo da linha elétrica, o ruído branco ou térmico presente em todos os sistemas de comunicações e os ruídos de banda estreita provocados por interferências de outros sinais de comunicações [6].

As reflexões são causadas por diferenças de impedância característica ao longo da rede elétrica, que pode acontecer entre os componentes de rede e os equipamentos conectados, entre as junções dos cabos de serviço da casa, entre os pontos de conexão da casa ou entre as junções de conexões de uma série de cabos conectados.

As múltiplas reflexões causam ao sinal digital um comportamento multipercurso com desvanecimento seletivo em frequência, ou seja, a propagação do sinal ocorre não somente ao longo de um caminho direto na linha de visão entre o transmissor e o receptor, mas os caminhos adicionais (ecos) são também considerados.

Os principais fatores causadores da atenuação do sinal são o material do cabo (perdas do cabo) utilizado, a frequência do sinal transmitido, a distância percorrida pelo sinal e o comportamento multipercurso devido às reflexões (causadas pelo descasamento de impedância) em pontos de ramificação da residência.

Quanto maior a distância e a frequência, maior é a atenuação do sinal. A atenuação varia com o tempo, devido ao ligamento e desligamento de aparelhos na rede elétrica. Na rede elétrica, o fator predominante para a atenuação é a indutância do cabo utilizado e não a capacitância, pois as impedâncias dos aparelhos que são ligadas à rede são em geral menores que a impedância característica do cabo [3,4].

As alternativas que podem ser aplicadas para minimizar o efeito da atenuação do sinal são as transmissões do sinal com amplitude exagerada e a utilização de técnicas desvantajosas financeiramente, como o uso dos repetidores.



Figura 1 - Modelo do sistema PLC *inhouse* [2].

### 3. METODOLOGIA APLICADA

#### 3.1 Sistema Geral

O sistema de comunicações simulado na plataforma computacional do Matlab, versão 7.0 possui como canal de transmissão da informação o canal PLC *inhouse*, modulação em banda básica BPSK e equalizador neural que usa o *gradiente descendente* como algoritmo de treinamento.

O sistema PLC simulado possui como única fonte de interferência do sistema o ruído branco e é avaliado pela taxa de erro de bit (BER) em função do fator  $E_B/N_0$  (variando de 0dB a 15dB) e pela MSE (erro médio quadrático), encontrada pelo equalizador neural, entre a informação transmitida e a recebida.

O objetivo deste sistema é conseguir aproximar a resposta recebida da transmitida, reduzindo ao máximo os erros no momento da detecção da informação.

A Figura 2 ilustra o diagrama de bloco do sistema simulado.

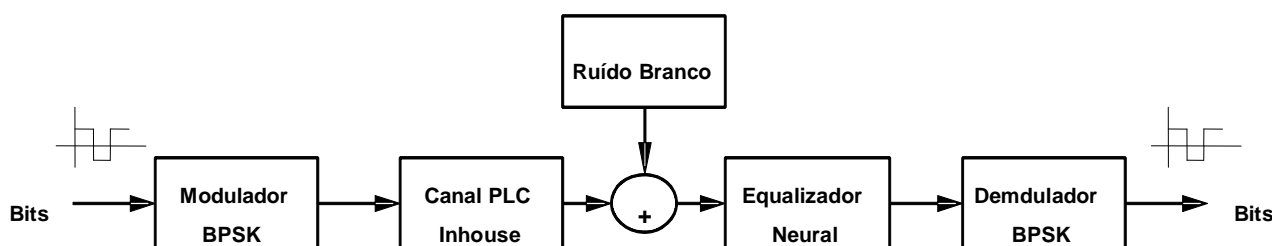


Figura 2 - Sistema de Comunicações PLC simulado computacionalmente na plataforma do MatLab ,versão 7.0.

#### 3.2 O Canal PLC inhouse

O canal PLC inhouse simulado possui apenas cinco percursos refletidos ao longo da linha de transmissão ( Figura 3) , baseado em [2]. A Figura 3 ilustra a resposta em frequência e a resposta ao impulso do canal PLC simulado. As pequenas ondulações presentes no gráfico da resposta em frequência, Figura 3, surgem devido ao descasamento de impedância ao longo da linha de transmissão provocando reflexões ao sinal transmitido. O ambiente multi percurso provoca desvanecimento seletivo em frequência (distorções) e consequentemente, ISI ao sinal transmitido.

O modelo matemático discreto do canal PLC inhouse utilizado foi baseado na Tabela 1[2], onde o termo “h” corresponde a amplitude do impulso do sinal refletido na linha de visão entre o transmissor e o receptor num dado tempo “t” de ocorrência do sinal recebido.

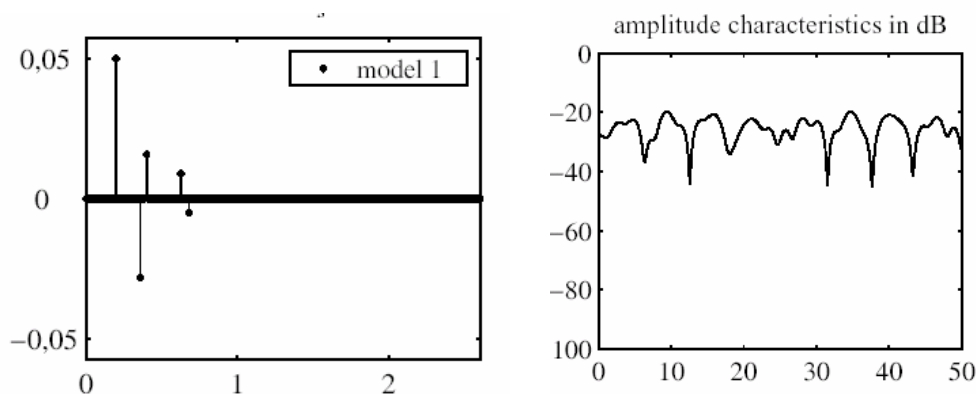
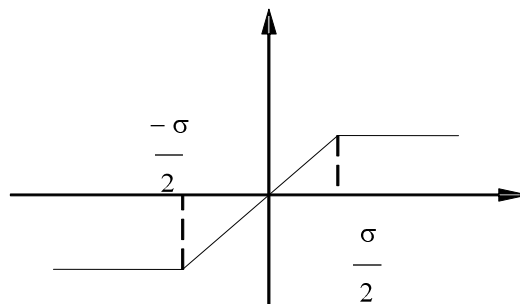


Figura 3 - Resposta ao impulso (esquerda) e resposta em frequência (direita) do modelo do canal PLC inhouse com 5 percursos significativos para a propagação do sinal transmitido[2].

**Tabela 1- Relação entre as amplitudes dos impulsos temporais e o seu tempo de ocorrência [2].**

i	ti(μs)	h (ti)
1	0,2	0,05
2	0,36	-0,0281
3	0,4	0,0158
4	0,63	0,0089
5	0,68	-0,005

O canal PLC inhouse possui também configuração não-linear no sistema simulado. O fator de não-linearidade adicionado ao sinal de saída do canal PLC foi estabelecido de acordo com o desvio padrão do sinal de saída do canal sem não-linearidade, cujo modelo matemático pode ser representado pela Figura 4. A idéia é identificar a variação de amplitude das amostras do sinal de saída e usá-la na definição dos níveis de saturação da não-linearidade.



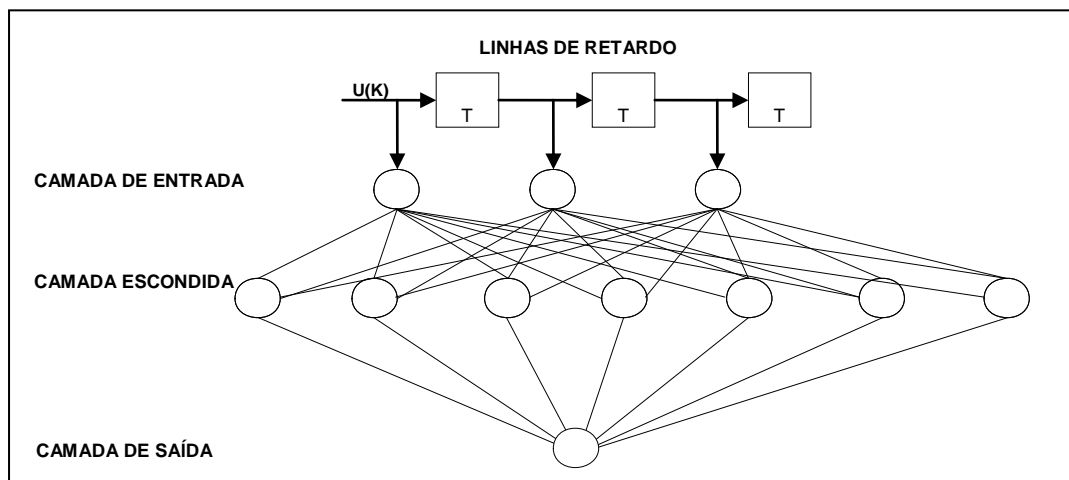
**Figura 4 - Modelo Matemático do fator de Não-Linearidade aplicada ao sinal transmitido pelo canal PLC inhouse.**

### 3.3 O Equalizador Neural MLP

Os parâmetros do equalizador neural simulado computacionalmente com resultados evidenciados neste artigo, foram baseados em um equalizador neural implementado e testado fisicamente em uma rede de comunicação PLC inhouse [11]. O melhor passo de aprendizagem encontrado para este equalizador neste tipo de sistema de comunicação foi de 0.08, testado computacionalmente para um erro mínimo de 0,01 (1%).

O equalizador neural (Figura 5) simulado para o sistema de comunicação PLC *inhouse* tem três nós de entrada, sete neurônios na camada escondida com tangente hiperbólica e uma saída linear. Os nós de entrada correspondem, respectivamente, a amostra atual  $u(k)$ , a amostra anterior  $u(k-1)$  e a amostra atrasada em dois tempos de amostragem  $u(k-2)$ , conforme Figura 5. Todos os neurônios da camada escondida e da camada de saída foram polarizados com o intuito de potencializar os efeitos das funções de ativação aplicadas a cada neurônio.

O equalizador neural utilizado na simulação foi implmentado com o uso da ferramenta *neural toolbox network* do MatLab 7.0



**Figura 5 - Estrutura do Equalizador MLP simulado computacionalmente no Matlab versão 7.0 através do *neural toolbox network*.**

#### **4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS**

Os resultados encontrados nas simulações foram testados para um universo de 100.000 bits transmitidos ao longo do sistema de comunicações PLC inhouse simulado computacionalmente pelo Matlab 7.0 (Figura 2) e podem ser subdivididos em três etapas.

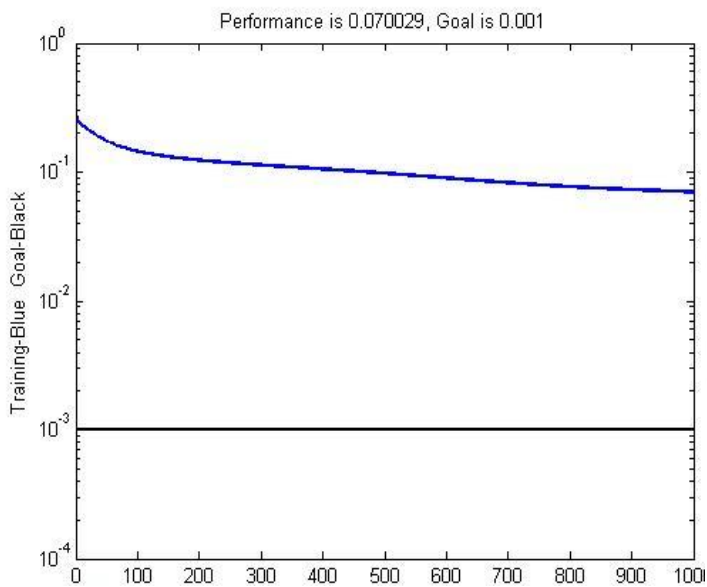
A primeira etapa consiste na simulação de um sistema de comunicações PLC sem equalização e com Interferência Intersimbólica (ISI).

A segunda etapa consistiu na simulação do mesmo sistema de comunicações, com o uso de um equalizador neural para reduzir a ISI e introduzida pelo canal PLC inhouse ao sinal transmitido. O erro médio quadrático obtido durante a fase de treinamento do equalizador considerando um canal linear considerando um canal linear, Figura 6, é 0,07 (7%) entre o sinal transmitido e a saída do canal PLC inhouse na presença de ruído branco.

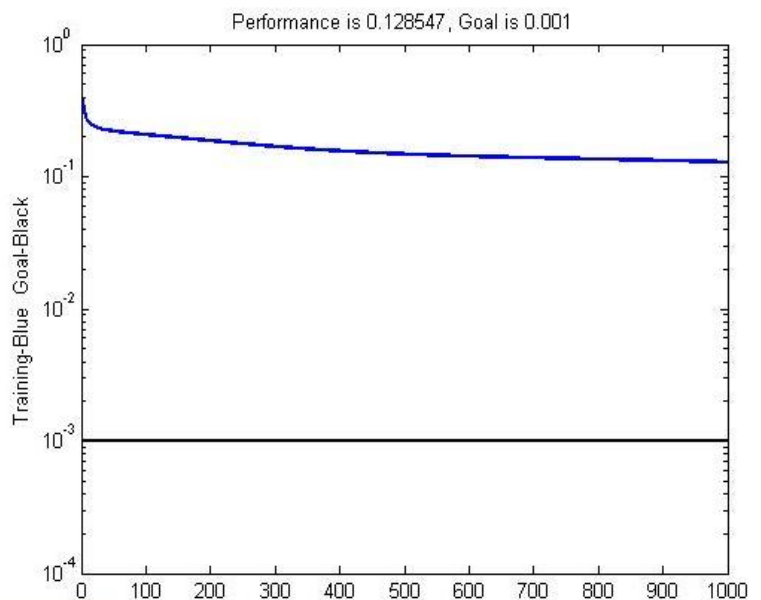
Na terceira etapa, Figura 7, foi adicionada não-linearidade ao canal PLC inhouse. Durante a fase de treinamento, obteve-se um erro médio quadrático (MSE) aproximadamente igual a 0,12 (12%) .

A diferença entre os valores de MSE do equalizador neural para o sistema PLC com não linearidade e sem não linearidade é de aproximadamente 5%, como pode ser observado nas Figuras 6 e 7. A pequena diferença entre os erros obtidos durante a fase de treinamento reflete-se em desempenho similar na taxa de erro de bit (BER), como pode ser visto na Figura 8

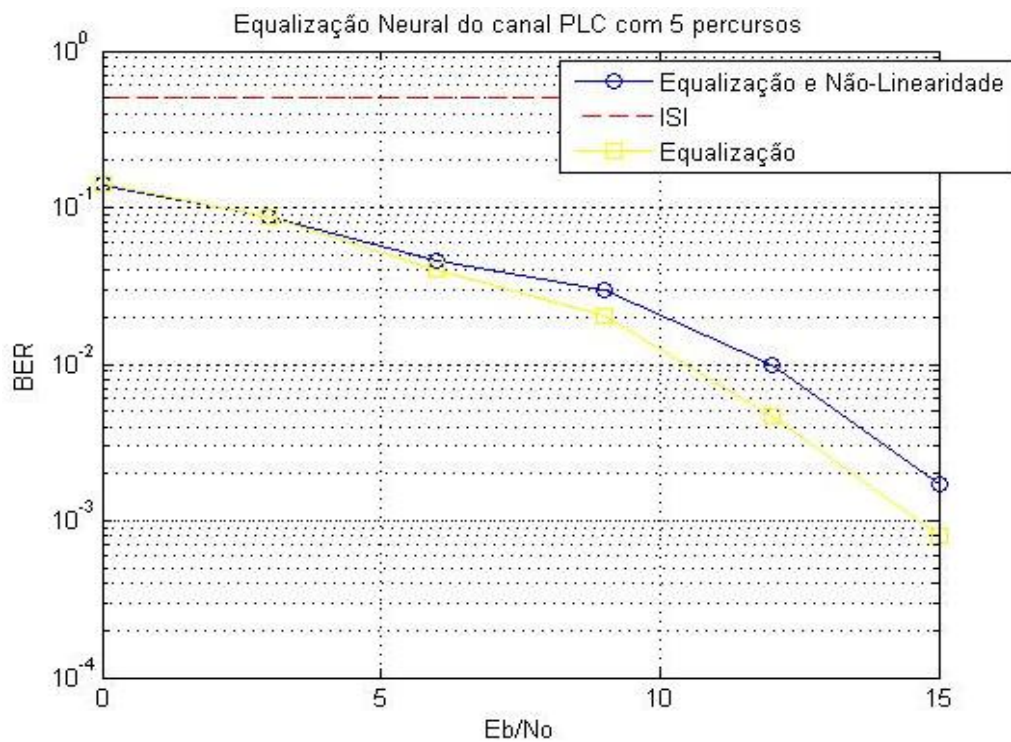
Comparando os 3 cenários descritos, observa-se que a taxa de erro de bit (BER) encontrada para um sistema PLC inhouse sem equalização está na faixa de  $10^{-1}$  e a taxa de erro de bit (BER) encontrada por um sistema PLC inhouse com equalização neural está numa faixa próxima de  $10^{-3}$  , ou seja quase 100 vezes menor. Dessa forma, fica clara a capacidade do equalizador neural em reduzir a ISI e aproximar o sinal recebido ao sinal desejado, diminuindo a taxa de erro de bit (BER) mesmo na presença do fator de não-linearidade adicionado ao canal PLC inhouse.



**Figura 6 - Desempenho: Erro Médio Quadrático do equalizador neural considerando um canal linear (Esquerda)**



**Figura 7- Desempenho: Erro médio Quadrático do equalizador neural considerando um canal não-linear (Direita)**



**Figura 8 - Comparação entre a taxa de BER dos sistemas PLC só com ISI (vermelho), com equalização neural (amarelo) sem não-linearidade e com equalização neural com não-linearidade.**

## 5. CONCLUSÕES

O desempenho do equalizador neural mostrou-se satisfatório conseguindo reverter os efeitos destrutivos do canal PLC sob o sinal transmitido, mesmo na presença de não-linearidade. Isto pôde ser comprovado pelas baixas taxas de BER obtidas na simulação do equalizador neural. Além do teste realizado com o canal PLC, pode-se avaliar o desempenho do equalizador na presença da não-linearidade. Os resultados validam o uso de neuro equalização como uma alternativa aos equalizadores convencionais, como DFE e LTE, devido a

capacidade da rede neural de lidar com funções não-lineares. O equalizador compensa os efeitos não-lineares e da ISI, possibilitando o seu uso em conjunto com amplificadores não-lineares que são, conceitualmente, de alta eficiência, ou seja, consome menos potência para realizar a potência de transmissão RF.

É importante dizer que o presente projeto de pesquisa se insere em um trabalho de pesquisa mais abrangente cujo objetivo é avaliar diferentes topologias de redes neurais aplicadas a equalização em sistemas PLC.

## REFERÊNCIAS

1. ZIERMMERMANN, M. **A Multipath for the Powerline Channel**, IEEE Transactions on Communications, Vol.50, No.4, Abril 2002.
2. Opera. D4: **Theoretical postulation of PLC channel model**, Versão 2.0, No. 507667, março 2005.
3. MAJUMDER, A., **Power Line Communications: an overview**, IEEE Potentials, No. 04, pp 0278-6648, outubro/novembro 2004.
4. MELLO, R.S. **Modeling, Simulation and Estimation of PLC Channels**, IEEE Transactions on Communications, No.06, pp 85-89748-04-9, 2006.
5. CARVALHO, F.B.S. **Aplicação de Transmissão de Dados via Rede Elétrica para o Canal de Retorno em Televisão Digital**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, fevereiro 2006.
6. MENG, H. **Modeling and Analysis of Noise Effects on Broadband Power-Line Communication**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.2, abril 2005.
7. PINTO, E. L.A **técnica de Transmissão OFDM**, Revista Científica Periódica de Telecomunicações, Vol. 05, No. 01, junho 2002.
8. VIEIRA, R.C. **Redes Neurais Artificiais: Um Breve Tutorial**, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil.
9. CASTRO, F. C. C. **Redes Neurais Artificiais**, PUCRS, Caps. 1-4.
10. SKLAR, B. **Digital Communications: Fundamentals and Applications**. 2nd.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2000.
11. ZHANG Y. **A Nonlinear Equalization Method Based on Multilayer Perceptron for OFDM Power-Line Communication**, IEEE Transactions on Communications, Vol.20, No.4, Outubro 2005.
12. LUQUE M. W. **Implementação Monolítica de uma Rede Neural para Assistência em Equalização Adaptativa de Sinais**, Dissertação de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Abril 1999.