

# ESTUDO E SIMULAÇÃO DE UM NEURO EQUALIZADOR DE DECISÃO REALIMENTADA USANDO ALGORITMO RPNLMS EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES PLC

**Luiz Henrique S. Silva (1); Fabrício G. S. Silva (2); Mariana V. Andrade (3)**

(1) IFBA- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Rua Emídio Santos s/n – Barbalho - Salvador, e-mail: [luizhenrique.12@hotmail.com](mailto:luizhenrique.12@hotmail.com) (2) IFBA, e-mail: [fg\\_simoes@yahoo.com.br](mailto:fg_simoes@yahoo.com.br)

(3) IFBA, e-mail: [mari.varela@ig.com.br](mailto:mari.varela@ig.com.br)

## RESUMO

A transmissão de dados via rede elétrica tem sido alvo de estudo de muitos pesquisadores por apresentar um grande potencial de expansão dos serviços de comunicações, porque aproveita a infra-estrutura instalada do sistema de fornecimento de energia e, além disso, utiliza as saídas de potência disponíveis em todos os cômodos da residência como um terminal de comunicações, representando praticidade e acima de tudo, custo reduzido. Entretanto, a rede elétrica é um meio hostil para a transmissão de dados, devido aos seus efeitos nocivos como o ruído colorido e impulsivo, Interferência Intersimbólica (ISI) e não-linearidade. Para compensar a ISI, o sistema PLC usa OFDM, mas essa técnica de transmissão requer amplificadores lineares que conceitualmente são de baixa eficiência, ou seja, consomem mais potência DC para produzir a potência de transmissão. No entanto, como existe uma necessidade mundial de economia de recursos naturais, faz-se necessário usar amplificadores de alta eficiência, onde o consumo de potência DC é menor para atender a potência RF de transmissão. Entretanto, esses amplificadores são não-lineares e, portanto, são nocivos à técnica OFDM. Com intuito de manter o uso de amplificadores não-lineares e compensar os efeitos da ISI, o presente trabalho propõe o uso de um equalizador de decisão realimentada treinado com um algoritmo adaptativo de rápida convergência, o qual é eficiente, simples e numericamente robusto. Constatou-se que a técnica utilizada obteve êxito na filtragem da ISI e um bom desempenho se tratando de taxa de erro de bit (BER), os resultados obtidos nesse artigo são bastante promissores para o uso de equalizadores neurais na prática.

**Palavras-chave:** Filtragem adaptativa, equalização de sinais, sistemas PLC.

## 1 INTRODUÇÃO

A integração dos sistemas de comunicações e tecnologias de multimídia tem se tornado a força chave para o impulso da rede global de informação. Cada vez mais, novos dispositivos têm sido desenvolvidos a fim de garantir o acesso da informação de forma fácil, rápida e segura. Portanto, é nesse contexto de crescente mudança nas tecnologias das comunicações que o uso da infra-estrutura dos sistemas de potência para a transmissão de dados (PLC- Power line communication) tem se destacado pela sua capacidade de agregar à rede elétrica uma rede de dados, unificando diferentes serviços em um único sistema.

Entretanto, o uso da tecnologia PLC apresenta uma série de limitações para a transmissão eficiente da informação, já que a rede elétrica é um canal de comunicações bastante hostil devido à presença de ruído colorido e impulsivo e interferência intersimbólica (ISI- Intersymbol Interference), que podem causar detecção errada dos símbolos pelo receptor. Para reduzir o efeito da ISI, o sistema PLC usa OFDM (orthogonal frequency division multiplex) que consiste em uma técnica de transmissão paralela de  $N$  subportadoras ortogonais com taxa de transmissão de  $R$  bits/s cada uma, cuja taxa de transmissão final é  $NR$  bits/s (ZIERMMERMANN,2000). Entretanto, a não-linearidade reduz a ortogonalidade entre as subportadoras, produzindo Interferência Intercanais (WILLIAM,1995). Por essa razão, deve-se usar amplificadores de potência linear.

Os amplificadores lineares são de baixa eficiência, ou seja, consomem muita potência DC para produzir a potência RF necessária na saída. Entretanto, os amplificadores de alta eficiência minimizam o consumo de potência DC, mas são não-lineares.

Considerando o uso de amplificadores não-lineares e a retirada da técnica OFDM, filtros adaptativos devem ser utilizados no intuito de atenuar os efeitos dispersivos do canal. O papel desse filtro, chamado de equalizador de sinais, é tal que a sua resposta em frequência é o inverso da resposta do canal, de forma a anular as distorções provocadas pelo mesmo.

Os filtros adaptativos como os equalizadores de decisão realimentada (DFE - Decision Feedback Equalizers ) têm mostrado uma grande capacidade de reduzir os efeitos da ISI de maneira mais eficiente que os equalizadores convencionais. No entanto, equalizadores implementados com redes neurais, chamados de Neuro Equalizadores, apresentam maior desempenho na equalização de canais não-lineares (SANTOS, 2008). Tendo em vista isso, o presente trabalho propõe o uso de um equalizador de decisão realimentada implementado com redes neurais e treinado com um algoritmo adaptativo de rápida convergência, o qual é eficiente, simples e numericamente robusto a fim de corrigir os efeitos dispersivos que as não linearidades do canal PLC causam no processo de transmissão da informação.

## 2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 O canal PLC inhouse

A rede elétrica é normalmente classificada de acordo com os diferentes níveis de tensão em: alta, média e baixa. Sendo que do ponto de vista dos sistemas de comunicações a parte que desperta maior interesse é a rede de distribuição em baixa tensão, pelo fato de está localizada na parte final do sistema e, portanto, sendo diretamente responsável pelo fornecimento do serviço ao cliente.

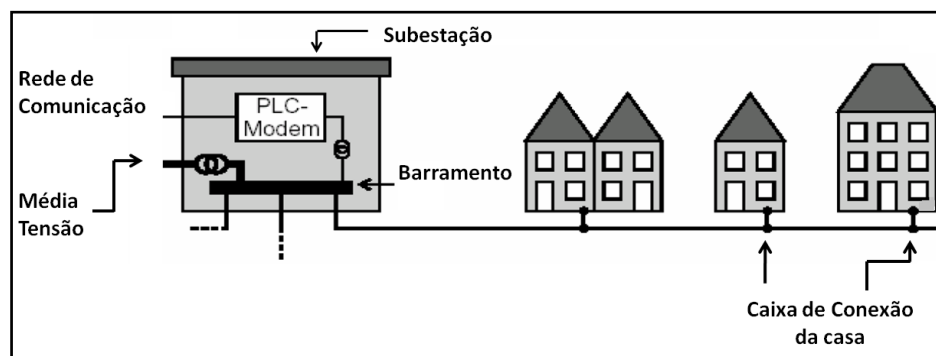


Figura 1- Estrutura de um sistema PLC inhouse (OPERA, 2005)

Pode-se visualizar na Figura 1 um sistema de distribuição de energia, que começa na subestação abaixadora e termina na instalação do cliente, onde tanto a subestação quanto o sistema PLC estão aplicados ao barramento, o último por sua vez continua a transmitir dados por um conjunto de cabos de banda larga ou fibras ópticas até o ponto de conexão, no qual a rede elétrica se une com a de dados e por fim alcança a instalação do cliente. O sistema PLC descrito é chamado de *inhouse* ou de baixa tensão, pois a integração da rede elétrica com a de dados ocorrem próximo da residência, assim para que o usuário tenha acesso a informação é necessário apenas conectar um modem PLC na tomada e desfrutar da rede de dados.

A grande vantagem dessa tecnologia está associada à utilização da infra-estrutura já existente do sistema de fornecimento de energia para a transmissão de dados, a fim de expandir os serviços de comunicações para um número imensurável de pessoas, levando informação, conectividade e inclusão digital.

Entretanto, o uso do sistema PLC apresenta uma série de limitações associadas com a hostilidade da rede elétrica como meio de transmissão de dados, que provoca distorções na interpretação dos símbolos pelo receptor. Os principais efeitos de distorção apresentados pela rede elétrica são: ruído colorido e impulsivo, atenuação dos cabos e o desvanecimento por multipercurso, provocado por múltiplas reflexões do sinal na rede elétrica (OPERA, 2005).

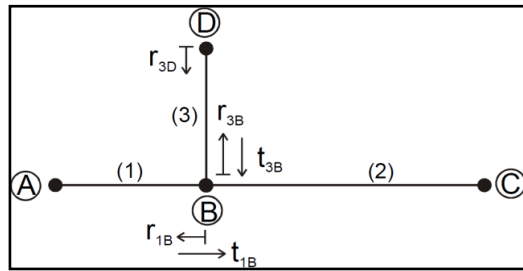


Figura 2-Multi-percurso entre a linha e o ramo (OPERA, 2005).

Na Figura 2 pode-se visualizar um esquemático ilustrativo do desvanecimento por multipercurso em canais PLC, que se refere ao fato da propagação entre o transmissor e receptor acontecer por vários caminhos de comprimentos diferentes, resultado das inúmeras reflexões que o sinal transmitido sofre devido à presença, conforme Figura 2, das impedâncias A, B e C. Logo, o receptor recebe uma série de réplicas do sinal com diferentes atrasos interferindo entre si, podendo causar erros de detecção dos símbolos (OPERA,2005).

As alterações e interferências citadas devem, dentro da viabilidade física e da capacidade de realização, ser compensadas no receptor. Em geral, antes da decodificação do sinal, faz-se necessário o uso de equalizadores de sinais nos receptores. A finalidade destes é compensar os efeitos comentados, minimizando o nível de distorção dos símbolos.

## 2.2 O Problema da Equalização

Os projetos em comunicações digitais visam solucionar as duas principais consequências da ação nociva do canal: a interferência intersimbólica (ISI) e o ruído. Para isso, requer-se um sistema que compense o efeito da resposta ao impulso do canal. A priori para o caso ideal em que as características dinâmicas do canal são inteiramente conhecidas, é possível projetar os filtros de transmissão e recepção de forma que a ISI seja pequena e simultaneamente limitar o efeito do ruído colorido no receptor, minimizando a probabilidade média de erro de símbolos. (LUQUE, 2005).

Entretanto, quando as características dos canais não são totalmente conhecidas e o uso do par de filtros (transmissor e receptor) projetados na base de um canal com características médias pode não reduzir adequadamente a ISI. Então faz-se necessário o uso de equalizadores adaptativos os quais provêm um controle preciso da resposta temporal do canal e utiliza a capacidade total de transmissão

A operação do equalizador adaptativo envolve duas fases: a de treinamento e a de ajuste (validação). Durante a fase de treinamento transmite-se, para identificar o canal, um sinal de teste conhecido pelo sistema e simultaneamente, o equalizador recebe um sinal que corresponde a resposta desejada, da qual é subtraída a saída do equalizador para obter o sinal erro da transmissão, que por sua vez, é utilizado para o ajuste adaptativo dos pesos dos coeficientes do equalizador. O algoritmo de aprendizagem é utilizado para realizar a atualização dos coeficientes em cada período dos símbolos, partindo dos valores iniciais.

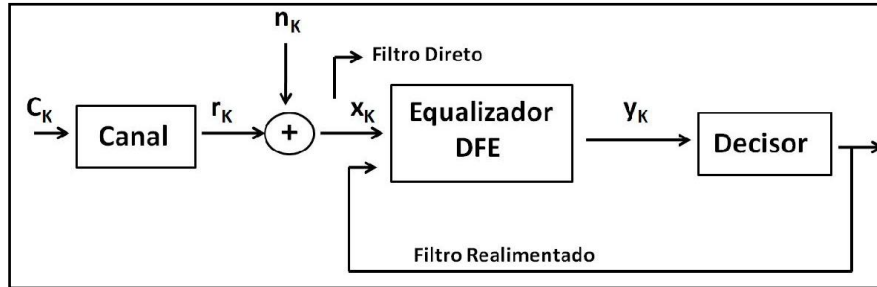
Depois da fase inicial de treinamento os coeficientes do equalizador continuam a ser atualizados, porém desta vez no modo dirigido por decisão que consiste em que o sinal de erro recebe uma estimativa do dispositivo de decisão contido no módulo detector. Em condições normais de operação, as decisões do receptor são corretas com alta probabilidade, portanto, a estimativa do sinal de erro é correta o suficiente de forma que o equalizador adaptativo mantém um ajuste apropriado dos seus coeficientes. Outra característica importante desse tipo de equalizador é poder acompanhar variações lentas do canal ou perturbações na entrada do receptor (LUQUE, 2005).

## 2.3 Equalizadores de Decisão Realimentada Baseado em Redes Neurais

Desde os primórdios das comunicações digitais, o problema da equalização tem despertado significativo interesse por parte da comunidade científica, o que pode ser atestado pelo grande número de esforços de pesquisa envolvendo seus dois principais aspectos: a escolha da estrutura do filtro (equalizador) e o método de ajuste de seus parâmetros (LUQUE, 2005).

O foco desse trabalho é a utilização dos equalizadores de decisão realimentada (DFE) na filtragem adaptativa de sinais, essa técnica tem demonstrado resultados satisfatórios na compensação da interferência entre símbolos.

Esse tipo de equalizador não linear é utilizado em canais com distorção de amplitude significativa, e a sua estrutura pode ser visualizado na figura 4, o qual é formado por um filtro direto (similar ao equalizador transversal linear) e outro realimentado, que são utilizados para realizar a compensação do ruído gaussiano branco e a interferência intersímbolica respectivamente.



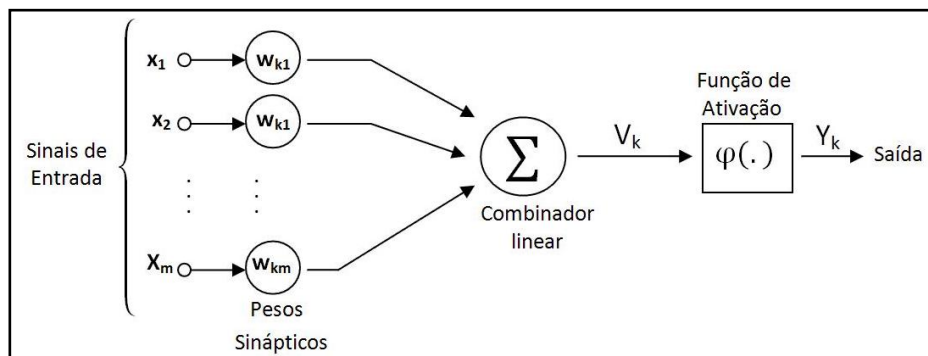
**Figura 4- Estrutura de um equalizador de decisão realimentada.**

O diferencial do equalizador proposto neste trabalho é o algoritmo de treinamento utilizado, pois até então para obter uma taxa de erro médio quadrático baixa em sistemas de comunicação não lineares, era necessário utilizar equalizadores baseados em redes neurais sofisticadas (complexas) e de difícil implementação em hardware (ZHE,2005).

## 2.4 Estrutura do DFE e o Algoritmo de Aprendizado

A estrutura do DFE utilizada pode ser visualizada na figura 5, onde se observa que o DFE apresenta uma estrutura muito simples formada por apenas um único neurônio e um conjunto de nós de entrada, que são combinados tornando-se o argumento da função de ativação.

O objetivo neste trabalho é estudar e simular arquiteturas cada vez mais simples, de rápido processamento e fácil implementação em hardware.



**Figura 5- Estrutura do DFE.**

O algoritmo utilizado no treinamento do equalizador foi o RPNLMS (recursive proportionate normalized least mean-square). Esse algoritmo pertence à família dos filtros proporcionais adaptativos que tem como mérito: a capacidade de atribuir diferentes taxas de aprendizado aos coeficientes dos pesos, que são adaptativamente ajustados e outra vantagem é o fato que a taxa de aprendizado ser proporcional a magnitude dos coeficientes. O algoritmo pode ser lido como:

$$\hat{y}_t = f(\hat{w}_t^T x_t) \quad [\text{Eq. 01}]$$

$$e = \hat{y}_t - y_t \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$\mu_t = \mu_{t-1} - \frac{(\mu_{t-1} g_t)(\mu_{t-1} g_t)^T}{1 + g_t^T \mu_{t-1} g_t} \quad [\text{Eq.03}]$$

$$w_t = w_{t-1} + \mu_t g_t e_t \quad [\text{Eq. 04}]$$

Onde  $\mu_0 = \alpha I$  é a taxa de aprendizado,  $g_t = x_t g(w_t^T x_t)$  é o vetor gradiente da função não-linear  $f(w^T x_t)$  no tempo  $t$ , sendo que a função utilizada neste trabalho foi a tangente hiperbólica  $f(o) = \tanh(o)$ , portanto,  $g(o) = 0.5(1 - f(o)^2)$ . O mérito desse algoritmo está na livre escolha do parâmetro de aprendizado, rápida convergência, grande robustez numérica, fácil implementação em hardware e estrutura mais simples do que os algoritmos RLS utilizados nesse tipo de aplicação.

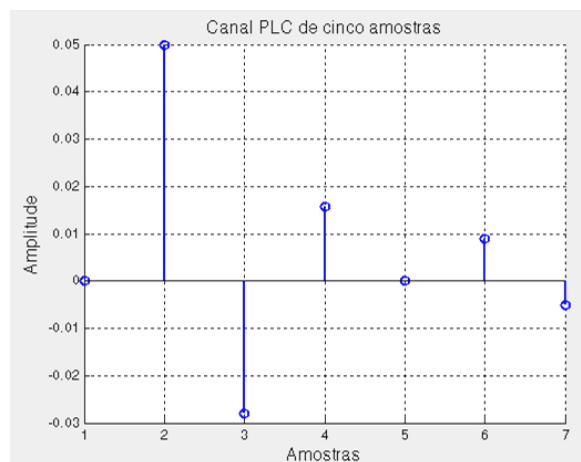
### 3.0 METODOLOGIA

#### 3.1 Modelagem do canal PLC inhouse

Foi usado o modelo de canal PLC de cinco percursos apresentado na Tabela 1 (OPERA,2005). O modelo do canal PLC apresentado nesse artigo foi realizado com base em medições de campo, portanto apresenta uma confiabilidade maior em relação aos modelos teóricos utilizados em simulações de equalização de canais de comunicação.

**Tabela 1- Parâmetros do sistema inhouse de 5 percursos.**

Amostra	Delay das amostras (μs)	Resposta ao impulso
1	0.2	0.05
2	0.036	-0.0281
3	0.4	0.0158
4	0.63	0.0089
5	0.68	-0.005



**Figura 6- Resposta ao impulso do modelo inhouse.**

### 3.2 Etapas de treinamento e validação do Sistema

O sistema de comunicações foi simulado no software Matlab, a informação recebeu uma modulação BPSK e foi transmitida pelo canal PLC inhouse de cinco percursos significativos (descrito na seção 3.1) com a posterior adição de ruído gaussiano branco de relação sinal ruído que varia de 4 a 14 dB, conforme Figura 7.

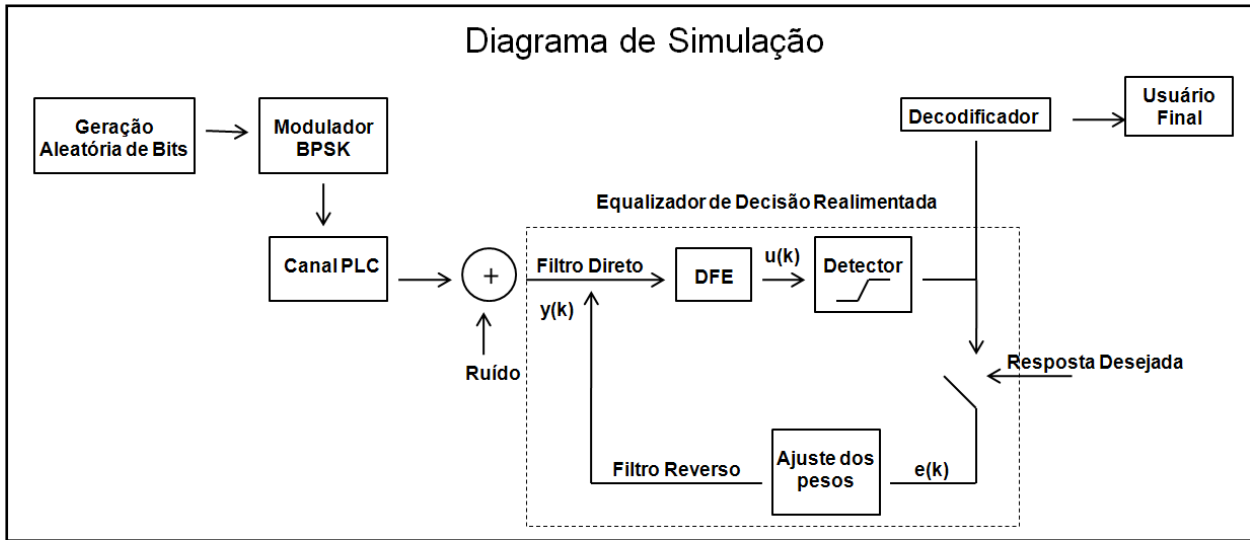


Figura 7-Diagrama de Simulação.

Foram utilizados 1000 bits para treinar o equalizador DFE com uma taxa de aprendizado  $\mu=0.02$  e logo em seguida, no processo de validação, foram usados 100.000 bits para realizar o cálculo da BER (taxa de erro do bit). Por fim, a estrutura do equalizador de decisão alimentada usado nesse trabalho pode ser visualizada na tabela 2.

Tabela 2 – Estrutura do DFE tipo 1 e 2

Equalizador	Atraso das Amostras	Tap's Filtros diretos	Tap's Filtros realimentados	Tap's Totais
DFE Tipo 1	1	2	2	4
DFE Tipo 2	1	5	10	15

Para avaliar o desempenho do DFE frente às situações adversas na transmissão de dados, foi adicionada a não-linearidade e traçada as curvas de MSE e BER para os equalizadores tipo 1 e 2. O intervalo da equação 05 foi determinado através da medida de variância do sinal de saída do canal PLC.

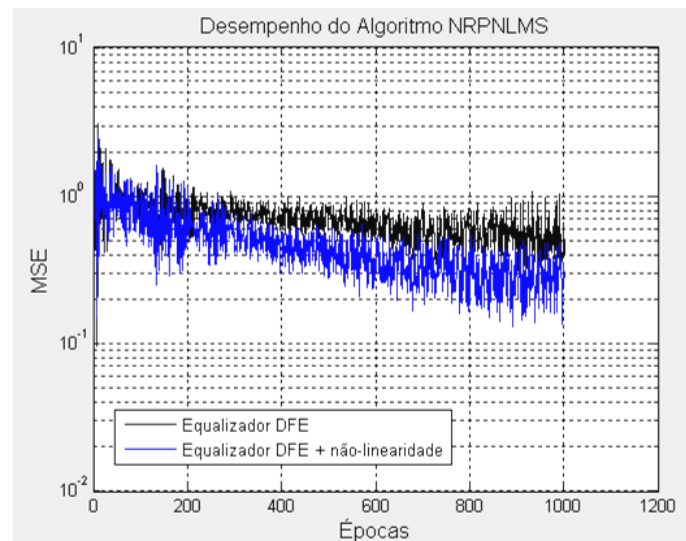
$$\varphi(v) = \begin{cases} 0.04 & \text{se } v \geq 1 \\ v & \text{se } 0.04 > v > -0.04 \\ -0.04 & \text{se } v < -0.04 \end{cases} \quad [\text{Eq. 0.5}]$$

## 4.0 RESULTADOS

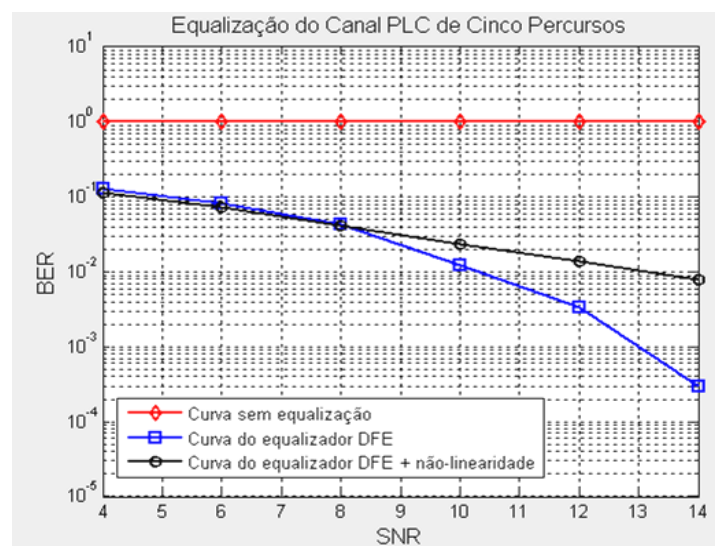
Os resultados das simulações do equalizador de decisão realimentada em canais PLC podem ser visualizada na Figura 6, 7, 8 e 9, onde foram construídas os gráficos do erro médio quadrático (MSE) e a taxa de erro de bit (BER) para as configurações de DFE tipo 1 e 2.

Na figura 6 podem-se observar duas curvas relativas ao erro médio quadrático do equalizador DFE tipo 1, onde na curva de cor preta foi acrescentado uma não-linearidade a fim de avaliar o desempenho do equalizador. De acordo a figura 6, pode-se concluir que o algoritmo consegue realizar os ajustes dos pesos de

forma satisfatória, de tal modo que a MSE fique em torno de  $10^{-1}$ . Posteriormente foi traçado o gráfico da BER (taxa de erro de bit) e os resultados podem ser visualizados na Figura 7.



**Figura 6-Gráfico do MSE para o DFE tipo 1.**



**Figura 7-Gráfico da taxa de erro de bit (BER) para o DFE tipo 1.**

Apesar da simples estrutura do DFE tipo 1, pode-se observar o seu notório desempenho em conseguir reduzir a interferência intersimbólica de maneira que a taxa de erro de bit chegue próximo de  $10^{-4}$ . Outro aspecto interessante é que mesmo sob o efeito da não-linearidades, o equalizador proposto demonstrou uma eficiente compensação da ISI (ver Figura 7).

Comparando os resultados obtidos no presente artigo com o uso do algoritmo RPNLMS com outros existentes na vasta literatura sobre o assunto (ZHE, 2004), pode-se perceber que é necessário utilizar complexas estruturas de redes neurais para conseguir alcançar a mesma taxa de erro de bit presentes neste trabalho.

Por fim, o gráfico da BER (taxa de erro de bit) para o DFE tipo 2 teve um desempenho semelhante ao DFE tipo 1, apesar da estrutura mais robusta (ver figura 8). Portanto, conclui-se que para realizar a equalização de canais PLC de forma eficiente não é necessário um grande número de tap's, a configuração do tipo 1 consegue compensar satisfatoriamente as distorções causadas pelo canal de comunicação, mesmo sob o efeito da não-linearidade, devido a sua topologia mais simples e de fácil convergência.



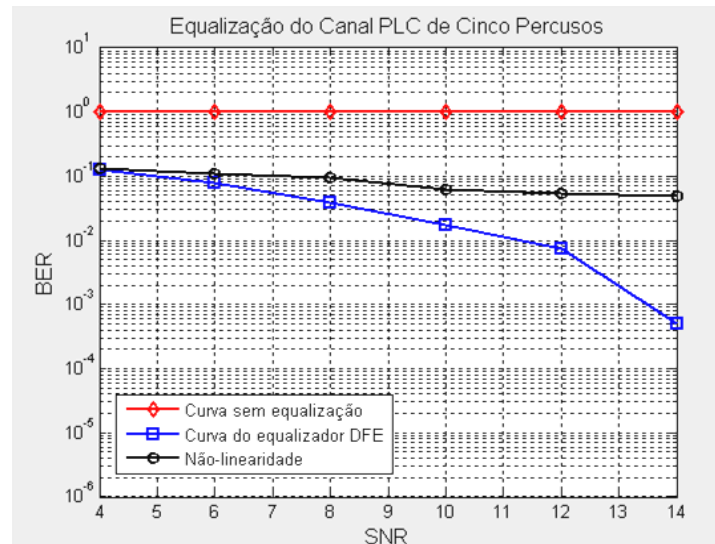


Figura 8- Gráfico da taxa de erro de bit (BER) para o DFE tipo 2.

## 5.0 CONCLUSÕES

A proposta de um equalizador neural com um algoritmo adaptativo de rápida convergência apresentou bom desempenho na compensação da interferência intersimbólica. Apesar da topologia utilizada ser composta por apenas um único neurônio, os resultados obtidos foram tão satisfatórios quanto aqueles apresentados por redes neurais com estruturas complexas (MPL) e de difícil implementação em Hardware.

Os resultados preliminares são promissores com relação ao uso de amplificadores de alta eficiência, pois o equalizador proposto consegue compensar as não-linearidades reduzindo a taxa de erro de bit, o que reforça ainda mais a sua utilização na prática.

## REFERÊNCIAS

HAYKIN, S., **Adaptive Filter Theory**, 4th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002.

LUQUE, W.M., **Implementação monolítica de uma rede neural para a assistência em equalização adaptativa de sinais**, tese de doutorado, UNICAMP, Campinas, 1999.

\_\_\_\_\_. **OPERA** (Open PLC European Research Alliance): “Theoretical postulation of PLC channel model”, 2005.

SANTOS, C. J. C.; LUDWIG, O ;GONZALEZ, P. C., LIMA, A. C. de C.; **Neural Equalizer for Time Varying Channel Using Gauss-Newton Training Algorithm**, IEEE Wire less Communication & Networking Conference, 2008

SKLAR,B.; **Digital Communications:Fundamentals and Application**, 2<sup>nd</sup> ed New Jersey: Prentice Hall,2000

WILLIAM, Y.; Wu Z. Y; **COFDM: An Overview**, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 41, No.I , March 1995

ZHE, C.; LIMA, A. C. de C. **A new neural equalizer for decision- feedback equalization**, IEEE Workshop on Machine Learning for Signal Processing, 2004.

ZIERMMERMANN, M., **A Multipath for the Powerline Channel**, IEEE Transactions on Communications, Vol.50, No.4, Abril 2002.