

1

Introdução

A utilização das linhas de potência para fins de comunicação vem recebendo grande atenção nos últimos anos, principalmente devido à grande demanda por serviços de telecomunicações, tais como transmissão de dados multimídia (distribuição de vídeo e áudio, jogos e outras aplicações de dados), o uso de periféricos comuns (impressoras, scanners) e acesso à Internet. As redes de potência podem oferecer largura de faixa suficiente para suportar esses serviços sem a necessidade de novo cabeamento.

A utilização da rede de potência para comunicação não é uma idéia nova [1]. De fato, as empresas do setor elétrico têm usado as linhas de distribuição de alta voltagem para a transmissão de informações relativas a operação, manutenção, registro e administração de carga.

As linhas de potência para comunicação (PLC – *Power Line Communication*) têm sido usadas desde a década de 30, mas não foram consideradas na época um meio conveniente para comunicação devido à baixa velocidade, baixa funcionalidade e alto custo.

Entretanto, novas técnicas de modulação e novas tecnologias têm permitido o uso desse meio para fins de comunicação.

As redes PLC, são muito competitivas quando comparadas às redes de acesso de tecnologias atualmente existentes no mercado, tais como:

- Acesso via par metálico;
- Acesso via fibra óptica;
- Acesso via cabo coaxial;
- Acesso via rádio;
- Acesso via satélite.

A grande virtude é que as linhas de potência para comunicação apresentam uma solução sem a necessidade de nova fiação. Além disso, apresentam saída de potência disponível em todos os cômodos de uma residência, onde o terminal de comunicação possa ser usado, são de fácil instalação e acima de tudo apresentam custo reduzido. Também são mais convenientes em áreas rurais onde os serviços das companhias de telefone ou de cabos não são disponíveis e onde a cobertura de radio é pobre e o acesso por satélite é custoso.

Sendo assim, a comunicação através de linhas de potência vem se mostrando uma solução viável na oferta de serviços de telecomunicações.

Entretanto, o fato das linhas de potência não terem sido originalmente concebidas para comunicação, torna suas características pouco adequadas para a transmissão de sinais de comunicação. Esse canal de comunicação (doravante denominado de canal PLC) é variante no tempo e na frequência e exibe notáveis disparidades entre localizações em função da diferença de topologia da rede, do tipo de fio e das cargas conectadas. Diferentes características podem ser encontradas dependendo do caminho de transmissão selecionado ou do status momentâneo das aplicações elétricas a elas conectadas [2].

O número de elementos presentes na rede e suas características (tamanho do braço, posição relativa, fiação, tipo de carga, etc) determinam o comportamento do canal. De forma geral, a atenuação sofrida pelo sinal é muito alta, mesmo quando as distâncias envolvidas são pequenas, devido ao alto número de braços dentro da rede e do descasamento de impedâncias. Os valores de impedância apresentados pelos equipamentos a ela conectados são bastante diversos, com valores absolutos variando de poucos ohms até kohms.

Geralmente o isolamento entre as linhas de potência de casas vizinhas não é garantido pelos equipamentos elétricos usuais (comutadores, medidores, etc). Assim, circuitos adicionais são necessários para prevenir interferências.

O fenômeno de propagação multipercurso aparece devido às reflexões que o sinal sofre em cada braço de carga encontrada ao longo do caminho do transmissor para o receptor. Essas reflexões multipercurso resultam em distorções do sinal na linha de potência.

Dessa forma, a rede de energia elétrica é uma ambiente hostil para a comunicação já que não foi inicialmente projetada para aplicações de telecomunicações. Assim, muitos trabalhos têm sido propostos para caracterizar e modelar o canal de comunicação PLC [3].

A modelagem dos canais PLC pode ser classificada em duas categorias: a primeira chamada de modelagem *top-down* e a segunda chamada de modelagem *bottom-up* [4].

Na modelagem *top-down*, modelos físicos exatos são substituídos por modelos que descrevem o comportamento do canal com poucos parâmetros. Os parâmetros do modelo são obtidos através de medidas. Essa modelagem é baseada em uma fórmula empírica. Sua implementação é fácil e exige pouca complexidade computacional, porém os parâmetros do modelo dependem de resultados medidos, assim essa modelagem é propensa a erro de medidas.

Esse tipo de modelagem torna possível o estabelecimento de modelos realistas para topologias de redes bem definidas. O problema dessa aproximação é que o modelo estabelecido para uma dada topologia pode somente ser aplicado a topologias similares.

Além disso, para redes compostas por um grande número de braços, o cálculo dos parâmetros do modelo podem se tornar complexos para um determinado percurso particular.

Esse tipo de modelagem é apresentado em [5] e [6]. Muitos modelos foram apresentados nessa direção, mas o modelo apresentado por Zimmermann e Dostert é o que considera um maior número de fenômenos físicos presentes no canal, sendo o mais utilizado na literatura [5, 7, 8].

A modelagem *bottom-up* é baseada na teoria de linha de transmissão, cujos parâmetros intrínsecos são utilizados para estabelecer a função de transferência do canal [9]. Parâmetros esses provenientes das características dos cabos e da impedância das cargas. Para que o modelo seja realista esses parâmetros têm de ser bem conhecidos.

Embora essa modelagem exija um maior esforço computacional comparada a modelagem *top-down*, esta, entretanto descreve claramente a relação entre o comportamento da rede e o modelo dos parâmetros. Além disso, essa aproximação é mais versátil e flexível já que todos os parâmetros são obtidos de análises. Sendo muito mais fácil de prever as mudanças no canal devido a qualquer mudança dentro da rede.

A precisão de ambos os modelos irá depender de quão precisas são as estimativas dos parâmetros que descrevem a resposta em frequência dos canais PLC.

Os canais PLC também estão sujeitos a diversos tipos de ruídos. O ruído colorido de fundo, ruído de banda estreita, ruído periódico síncrono, ruído impulsivo periódico síncrono, ruído impulsivo assíncrono e ruído impulsivo não periódico [1].

Felizmente, para se ter uma comunicação confiável de alta velocidade sobre as redes de potência, técnicas de processamento do sinal devem ser usadas para combater as adversidades desse ambiente.

As técnicas utilizadas são: i) o espalhamento espectral (*spread spectrum* – SS) ii) a modulação multiportadora (*multicarrier modulation* - MCM).

Normalmente, diferentes esquemas de modulação, tais como o FSK (*frequency shift keying*), CDMA (*coded-division multiple access*) e o OFDM

(*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) são escolhas apropriadas para os canais PLC [10].

Para aplicações banda estreita nas linhas de potência, modulação de uma única portadora tem sido adotada por sua simplicidade, empregando tipicamente FSK, QPSK (*quadrature phase shift keying*) e outras técnicas de modulação [11]. Para a comunicação banda larga em linha de potência utiliza-se a modulação multiportadora.

A modulação multiportadora empregada em canais PLC é a técnica OFDM [12].

O OFDM é uma técnica efetiva para transmissão de altas taxas. Encontra-se em aplicações banda larga, estando presente em diversas padronizações. Sendo adotada no padrão DAB (*Digital Audio Broadcasting*) e também no padrão DVB (*Digital Video Broadcasting*). Outro sistema que utiliza a técnica OFDM é o padrão IEEE 802.11a Wireless LAN [13,14,15].

Para uma adequada operação do sistema OFDM, o receptor necessita estimar de forma precisa o canal.

As técnicas de estimação de canal para sistemas OFDM podem ser agrupadas em duas categorias: Estimação cega e estimação não cega. As técnicas de estimação cega exploram o comportamento estatístico dos sinais recebidos e exige uma grande quantidade de dados para a estimação. Já nos métodos de estimação não cegas, informações prévias ou alguma porção do sinal transmitido estão disponíveis no receptor e assim são usadas para estimar o canal.

As técnicas de estimação não cega podem ser estudadas dentro de dois grandes grupos. O primeiro chamado de DAE (*Data Aided Estimation*), na qual a estimação é feita utilizando-se dados auxiliares e o segundo grupo é chamado de DDCE (*direct decision channel estimation*) [16].

Na primeira técnica de estimação, o símbolo completo OFDM ou uma porção do símbolo, o qual é conhecido pelo receptor, é transmitido e dessa forma o receptor pode facilmente estimar o canal pela demodulação das amostras recebidas. Frequentemente, pilotos são empregados. A precisão da estimação pode ser melhorada pelo aumento de número de pilotos empregado. Entretanto isso introduz um *overhead* e reduz a eficiência espectral.

Quando os pilotos são designados para todas as subportadoras em um particular símbolo OFDM, um símbolo de treinamento OFDM é obtido (arranjo em blocos do tipo piloto). Esse tipo de arranjo piloto é normalmente considerado para canais pouco variantes e para esquemas de transmissão de dados em

rajadas. Os símbolos de treinamento são então inseridos no início da rajada para estimar a resposta em frequência do canal.

Nos métodos de estimação DDCE, para decodificar os símbolos OFDM em um determinado instante é usada a estimativa inicial canal. O canal correspondente aos símbolos em um determinado instante é então estimado pelo uso de símbolos de informação recém estimados, porém essas estimativas são menos realistas já que o canal pode variar bastante de símbolo a símbolo. Dessa forma, informações adicionais são incorporadas para melhorar o desempenho das técnicas DDCE.

Há muitas técnicas para estimar os canais nos sistemas OFDM. As técnicas de estimação podem ser desempenhadas usando amostras no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Esses estimadores diferem em termos de complexidade, desempenho, praticidade e quais informações a priori são utilizadas [16].

Em [16] são apresentados os principais métodos utilizados para estimação de canal em sistemas OFDM, dentre eles podemos citar os métodos: LS (*Least Square*), LMS (*Least Mean Square*) e ML (*Maximum Likelihood*) e suas variações.

O método LS, em geral, é utilizado como estimativa inicial das suportadoras piloto, as quais são melhoradas via diferentes métodos.

A computação de mínimos quadrados em uma forma recursiva resultou em uma família de algoritmos conhecidos como mínimos quadrados recursivos (*Recursive Least Square – RLS*). Esses algoritmos são conhecidos por possuir uma taxa de convergência rápida, sendo bastante úteis em aplicações onde o ambiente é ligeiramente variante. O preço de todos esses benefícios deste algoritmo é um considerável aumento da complexidade computacional [17,18].

Já o algoritmo LMS é muito popular e tem sido largamente usado devido a sua simplicidade. Porém, seu desempenho é comprometido, devido a sua baixa taxa de convergência [19, 20]. Esquemas alternativos que tentam melhorar este desempenho ao custo de uma complexidade computacional adicional mínima têm sido propostos e extensivamente [20 -23]. Uma abordagem que tem sido empregada com sucesso em situações onde as estatísticas do sinal são desconhecidas é o algoritmo chamado LMS normalizado (*Normalized Least Mean Square - NLMS*) [17,24].

Já o algoritmo ML apresenta um bom desempenho com baixa complexidade computacional.

1.1

Visão geral da tese

1.1.1. Objetivo do trabalho

Esta tese tem como principal objetivo investigar os sistemas PLC no que diz respeito à estimação do canal e avaliar o seu impacto no desempenho da transmissão digital quando se utiliza a técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Nesta tese é apresentado uma técnica de estimação paramétrica do modelo de Zimmerman e Dostert [5], no qual as funções de transferência são obtidas a partir de um circuito elétrico simétrico que descreve típicos canais PLC.

O impacto da modulação OFDM na taxa de erros é estudado em relação à estimação do canal proposta nesta tese. Este desempenho é estudado nos casos em que o receptor utiliza duas técnicas de equalização, a saber, ZF (*Zero-Forcing*) e MMSE (*Minimum Mean Square Error*) [18,24]. Essa avaliação também é feita em duas situações de interesse: nos casos em que o canal é total ou parcialmente conhecido.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho é a utilização das redes de energia elétrica para comunicação que vem se mostrando uma alternativa viável para atender á grande demanda por serviços de telecomunicações.

1.1.2. Estrutura da tese

A tese está organizada da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta a descrição das principais características do meio de transmissão PLC.

O capítulo 3 trata da estimação do canal PLC. Primeiramente é descrito o comportamento multipercurso do sinal nesse meio e o modelo paramétrico de estimação de canal utilizado [5]. É apresentada a proposta de ajuste do modelo de estimação do canal PLC. No final do capítulo são apresentados os resultados obtidos através de simulações realizadas com o objetivo de avaliar o desempenho do método proposto na estimação do canal PLC.

No capítulo 4 são apresentados os principais conceitos da técnica de transmissão e recepção OFDM, onde se avalia também o desempenho desta modulação na forma do seu impacto na taxa de erros em situações de empregos de equalizadores e de conhecimento total e parcial do canal. Sendo avaliado o desempenho desta modulação na taxa de erros em relação a estimação do canal proposta nesta tese.

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas e propostas de trabalhos futuros inspirados nesta tese.