

Escola Politécnica



Universidade de São Paulo

Projeto de Formatura II

Desenvolvimento de um Sistema de Comunicação que Utiliza a Rede Elétrica de Energia para Transmitir Internet – Sistema PLC

Aluno: Ulisses Schena Justino Ferreira
Orientador: José Aquiles Baesso Grimonim
Coordenador: Luiz C. R. Galvão

São Paulo
2007

Sumário

1 - Objetivo	5
2 - Introdução	6
3 - O sistema PLC (Power Line Communications) utilizado neste experimento	8
3.1 - Projeto da Rede	10
4 - Descrição do Sistema PLC	11
4.1 - Circuito de Acoplamento e Filtro de Linha	11
4.2 - Um modelo para o Canal de Comunicação	14
5 - Características do sistema PLC na rede de Baixa Tensão	16
5.1 - Distorção	16
5.2 - Ruído	16
5.2.1 - Relação Sinal-Ruído	17
5.2.2 - Tipos de Ruídos	18
5.3 - Atenuação	19
5.4 - Largura da Banda	19
6 - Geração e Propagação de Harmônicas	21
7 - Efeito das Cargas no PLC	24
8 - Interferência e degradação do sinal	34
9 - Arquitetura Digital do Sistema PLC	37
9.1 - Métodos de Modulação.....	37
9.2 - (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).....	38
9.3 - DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum).....	40
9.4 - GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying).....	40
10 - Aspectos econômicos, Vantagens e Desvantagens	41
11 - Anexo I - Teoria do Espectro de Potência	42
12 - Referências Bibliográficas	43

Resumo

A proposta deste trabalho é avaliar a utilização da rede elétrica de energia de baixa tensão como meio físico para transferência de dados da Internet pela rede Ethernet.

Abstract

The purpose of this work is to analyze the use of the low voltage grid as a physical channel for Internet Data using the Ethernet Network.

1 – Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade da utilização do “PLC in Home” através de uma série de medições e um amplo estudo teórico. Este desenvolvimento envolve a implementação de uma rede Ethernet para a aplicação do sistema PLC.

Deste modo uma aplicação, ao transmitir dados pela rede de baixa tensão nas instalações elétricas do ENERQ, é investigada com o intuito de conhecermos como a rede elétrica atua funcionando como canal de comunicação de dados. São realizados assim estudos sobre as características de transmissão e da rede elétrica em si quando exposta a um conjunto de cargas em diversos pontos da rede. Em seguida, verificamos os efeitos dos ruídos, harmônicas e atenuação sobre a taxa de transferência dos dados.

O canal de comunicação pode ser modelado como tendo uma taxa de ruído que depende da freqüência. O efeito desse ruído sobre a rede é estudado quando a transmissão é estabelecida. É investigado no estudo teórico os métodos de modulação e a robustez do sistema, bem como as características da rede elétrica de baixa tensão.

2 – Introdução

Sistemas com PLC (Power Line Communications) possibilitam o uso da rede elétrica de baixa tensão para transmissão de dados, como a Internet. A principal vantagem desse sistema é o uso de uma infraestrutura já existente.

Por outro lado, as linhas de potência são um dos meios mais inóspitos para transferência de dados, apresentando as seguintes desvantagens:

- Atenuação com a freqüência;
- Acoplamento entre fases;
- Atraso;
- Ruídos e Interferências Eletromagnéticas;
- Falta de segurança.

Com o desenvolvimento tecnológico, permitindo transmissões de sinais por onda portadora em redes de distribuição de energia, temos mais uma opção de conectividade em banda larga, além dos sistemas wireless, de satélite e cabos coaxiais das operadoras de TV por assinatura.

Paises da União Européia, Japão e Estados Unidos já possuem uma certa regulamentação sobre a tecnologia PLC. Questões como ruídos e radiações eletromagnéticas já vem sendo discutidas em congressos e seminários. Um situação interessante foi o caso de um sistema desenvolvido pela Nor. Web no Reino Unido ainda no inicio da tecnologia. Esse sistema emitia um ruído nas ondas de radio na banda de 1-30MHz, que resultou em interferências nos sinais da agência de radio do governo britânico. Conseqüentemente o Departamento de Indústria e Comércio do Reino Unido proibiu o uso do PLC, o que contribuiu para que a Nor. Web se retirasse do mercado.

A segunda geração de PLC vem usando a tecnologia OFDM, pois reduz a interferência nas ondas de radio graças à diminuição da densidade espectral da potência transmitida. A modulação OFDM espalha o sinal em uma ampla largura de banda, reduzindo a quantidade de potência injetada sobre uma única freqüência. Mais detalhes sobre essa modulação no Capítulo 9.

Com o passar do tempo os meios de comunicação vão se integrando e também a exigência de novos meios mais eficientes para transferência de dados, de modo que sistemas PLC sejam uma alternativa barata e viável uma vez que a velocidade alcançada nesses casos pode chegar a dezenas de Mbits, dependendo da presença de cargas no sistema ou da quantidade de usuários conectados.

O sistema PLC também é uma solução para serviços de telemetria destinados ao consumidor final, pois pode colocar um serviço Internet/Intranet de uma subestação de eletricidade até a casa do usuário ou seu escritório. Na prática, ele transforma as baixas voltagens da infra-estrutura de um segmento de eletricidade existente em uma intranet, e assim o cliente é atendido por uma LAN (Local Área Network) em sua casa ou escritório. Como o princípio básico desse serviço consiste no monitoramento dos parâmetros principais da rede em tempo real nos pontos estratégicos para a tomada de decisão correta em cada momento, é possível ao centro de operação de uma concessionária de energia elétrica por exemplo, gerenciar o sistema de distribuição de uma área específica conhecendo as informações de cada transformador de baixa tensão, a energia ativa e reativa entregue por fase e a energia medida de casa consumidor

conectado nesse transformador, disponibilizando entre outras informações as perdas de energia por fase de cada intervalo de tempo considerado. O mesmo raciocínio vale para as empresas distribuidoras de água e gás. O resultado será uma otimização dos custos através de ações mais objetivas que visem a minimização de perdas.

Além disso, no caso de transferência de dados, fornece conexão permanente com o usuário, compartilhada para todos os consumidores ligados no transformador, ou seja, se por exemplo o transformador estiver alimentando 45 unidades consumidoras com uma taxa de transferência de 4.5Mbps, no pior caso (se todas os 45 usuários estiverem navegando ao mesmo tempo) a taxa para cada um será de 100Kbps, no mínimo. (um modem de 56K tem uma taxa de 56Kbps no máximo).

3 - O sistema PLC (Power Line Communications) utilizado neste experimento

Foram utilizados dois computadores e dois adaptadores para a execução do projeto. Os adaptadores adquiridos pela Escola Politécnica são do modelo Corinex PLC USB Desktop 220vac, cujas especificações técnicas são as seguintes:

- Permite aos usuários conectarem PC's individuais ou outros dispositivos com interface Ethernet em sua rede local (LAN), através da rede de cabos elétricos 220/240V.
- Padrão IEEE 802.3 ETHERNET 10/100
- Modulação OFDM com técnica de processamento de sinal para ambientes de ruído intenso.
- Taxa de transferência de dados de até 14Mbps com distância de até 200m.
- Permite o compartilhamento de arquivos e aplicativos do PC, entre periféricos e impressoras através da rede elétrica e do acesso à Internet em banda larga.
- Permite o compartilhamento de largura de banda para aplicações de multimídia, incluindo voz, dados, áudio e vídeo.
- Comunicação em multiprotocolo (TCP/IP, NetBEUI, IPX/SPX).
- Suporta encriptação de dados.
- Consumo de potência: 3W
- Temperatura de operação: 0 a 55 graus
- Todos os dispositivos da linha INNOVUS FACINET INTELIGENTE podem ser gerenciados pelo software Open Powerline Management



Figura 1 – PLC Corinex USB Desktop 220 VAC

Cada adaptador é uma placa que permite utilizar a rede elétrica existente em uma residência como meio de transmissão de dados, ou seja, possibilita a montagem de uma rede ethernet sem a necessidade de instalar o cabeamento necessário para uma rede tradicional. O adaptador modula e demodula o sinal ethernet para trafegar em alta frequência pela rede elétrica através de modulação OFDM, utilizando 84 ondas portadoras entre 4 e 21MHz. Toda a comunicação do adaptador está encriptada com o algoritmo DES de 56bits. A utilização dessa tecnologia, segundo o fabricante, alcança

uma velocidade de transferência de dados de até 14Mbps e uma distância técnica máxima de 300m, dependendo da qualidade da rede.

Primeiramente, uma das extremidades do cabo foi conectada à porta USB do computador e a outra ao adaptador. Em seguida, ambos os adaptadores foram alimentados com 220V. A figura a seguir mostra uma lan usando esse tipo de adaptador.

Para analisar o comportamento da rede elétrica durante a transmissão dos dados foram utilizados um osciloscópio digital, uma ponta de prova especial para dividir a tensão por 500 de forma a satisfazer o valor eficaz de tensão máxima do dispositivo, analisador de harmônicos Fluke e analisador de espectro.

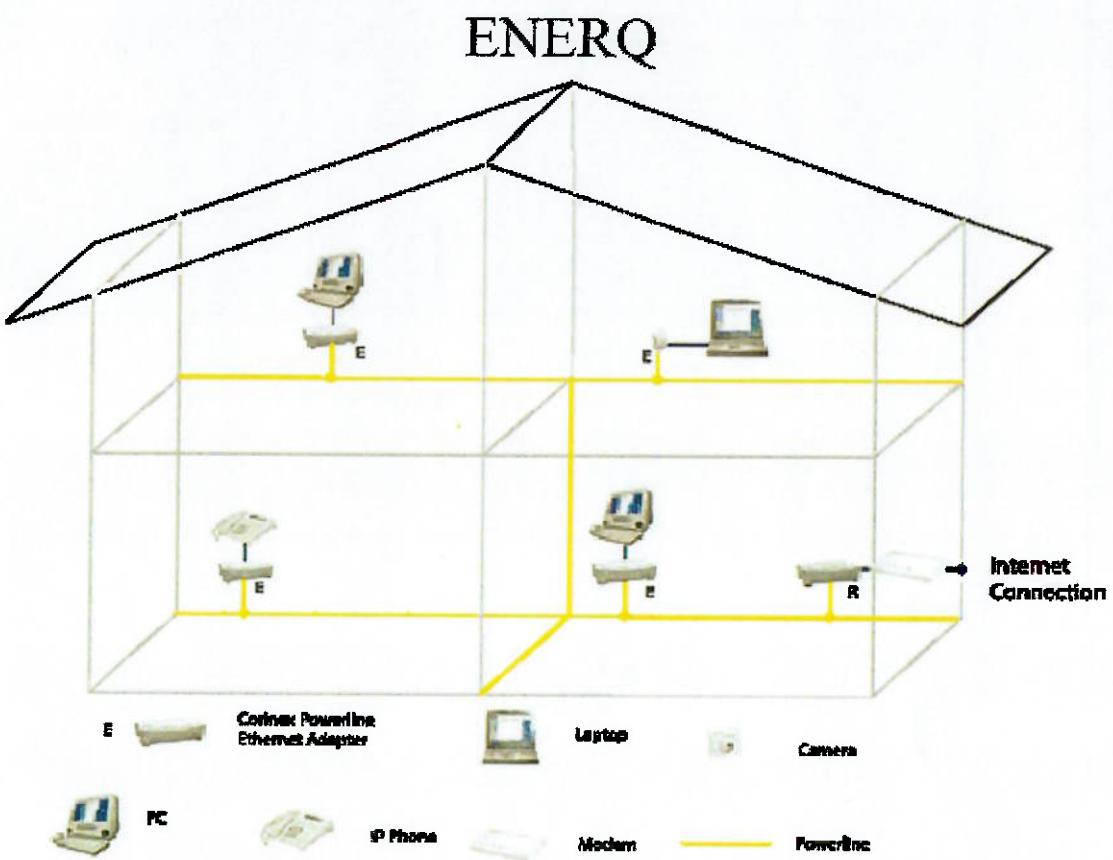
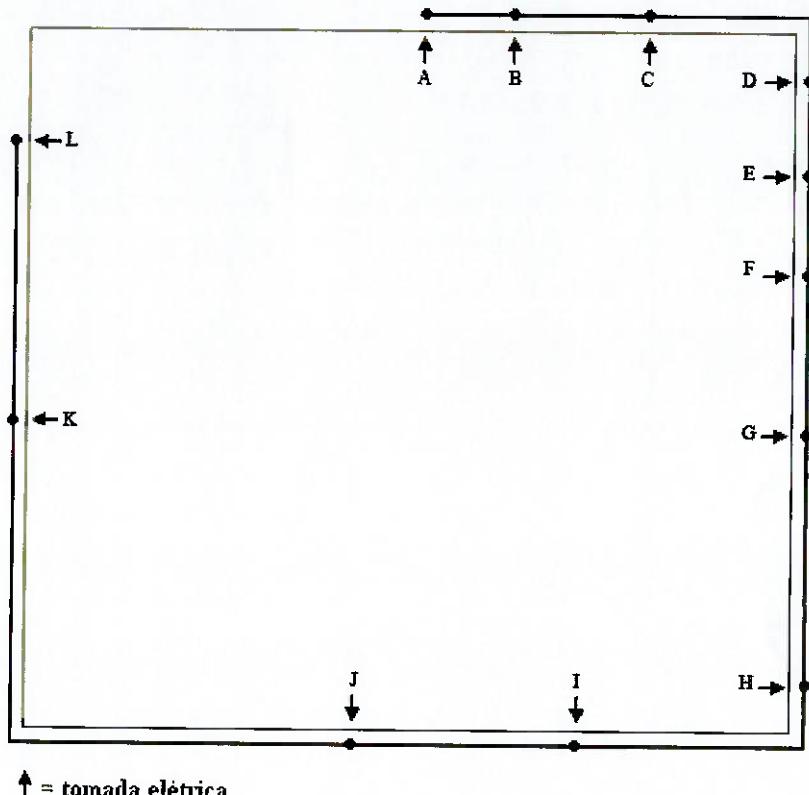


Figura 2 – Rede PLC no ENERQ

3.1 – Projeto da Rede

Para a elaboração dos testes foram escolhidos pontos com espaçamentos conhecidos dentro de uma área com dimensões conhecidas. Trata-se do prédio de Qualidade de Energia (Enerq).

O primeiro teste foi realizado sem nenhuma carga conectada à rede elétrica, portanto livre de perturbações. Os demais testes foram realizados com a presença de cargas distribuídas ao longo da rede elétrica como motores elétricos de uso doméstico (furadeira elétrica, secador de cabelo, etc), televisores ou computadores. Estes equipamentos são, teoricamente, os principais causadores de componentes harmônicas e ruídos na rede elétrica e seus efeitos serão analisados na transferência de dados por meio de PLC.



4 - Descrição do Sistema PLC

A figura abaixo mostra um sistema de comunicação digital usando a rede elétrica como canal de transferência de dados, com o transmissor a esquerda e o receptor a direita. Os parâmetros importantes do sistema são a impedância de saída Z_t do transmissor e a impedância de entrada Z_l do receptor.

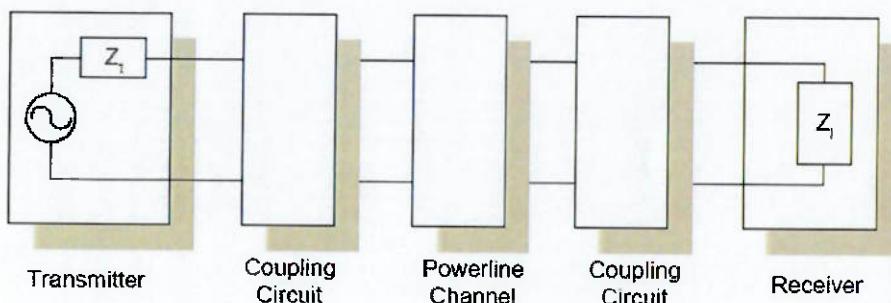


Figura 4 - Sistema de comunicação digital para a rede elétrica

4.1 - Circuito de Acoplamento e Filtro de Linha

Um circuito de acoplamento é usado para conectar o transmissor à rede elétrica. Esse circuito é um dos componentes mais críticos de um sistema PLC. Devido a altas voltagens, variação de impedâncias, grandes amplitudes e distúrbios variando no tempo, tais circuitos precisam ser cuidadosamente projetados para fornecer tanto o sinal de transmissão na banda especificada do projeto quanto o nível de segurança exigido pela aplicação atendendo a normas internacionais. Além disso, dois critérios importantes precisam ser verificados: Impedir que o sinal de 60Hz da rede entre no equipamento e assegurar que boa parte do sinal entre transmissor e receptor está dentro da banda de freqüência usada para a comunicação. Isso aumenta a faixa dinâmica de operação do receptor e garante que o transmissor não introduza sinais de interferência no canal.

A superposição do sinal do PLC no sinal da rede elétrica implica que o circuito de acoplamento e o circuito da rede elétrica devem ser cuidadosamente dimensionados e interconectados de forma que a compatibilidade entre os dois circuitos seja a melhor possível. A rede elétrica e o rede digital operam entre dois extremos: o primeiro com freqüência baixa mas potência, correntes e tensões elevadas ao passo que o segundo opera com altas freqüências e baixos níveis de tensão e corrente. A fim de se projetar um sistema PLC além de uma interface apropriada entre os dois sistemas, o circuito de acoplamento deve ser perfeitamente compreendido. Desta forma, dois métodos de acoplamento podem ser empregados:

- Differential Mode Coupling: neste caso a linha é usada como um terminal e o neutro, o outro.
- Common Mode Coupling: neste caso a linha e o neutro são unidos formando um terminal e o fio terra funcionando como um segundo terminal. Este modo de acoplamento tem a vantagem de fornecer até 30db a mais do que a modo diferencial. Em

alguns países o modo comum não é permitido nas redes de baixa tensão por motivos de segurança.

O circuito de acoplamento deve fornecer a isolamento galvânica necessária entre a rede elétrica e o PLC de maneira que isso pode ser alcançado através de acoplamento capacitivo ou indutivo. Acoplamento indutivo é conhecido por apresentar maiores perdas, mas evita a conexão física entre os dois sistemas possibilitando uma instalação mais fácil e segura quando comparado ao acoplamento capacitivo. Este, por sua vez, funcionando como filtro passa-alta, permite o uso de circuitos mais robustos e fáceis de implementar. O que se observa na prática é uma combinação das duas técnicas.

O projeto do circuito de acoplamento conta com os seguintes componentes:

a) Capacitores de acoplamento: são extensivamente usados como componentes de acoplamento além de fazerem parte de aplicações mais sofisticadas como filtros de ordem alta. Tais capacitores recebem a corrente do sinal portanto devem ser dimensionados para suportarem alta freqüência (a freqüência de ressonância deve ser maior do que a freqüência de modulação). Inversamente eles devem ser capazes de filtrar a tensão da rede (queda de tensão sobre o componente) bem como picos de tensão, consequentemente devem ser dimensionados para suportar tais tensões. Além disso, as características de filtragem são bastante dependentes da carga conectada.

b) Transformadores de acoplamento: a principal função dos transformadores de acoplamento é fornecer isolamento galvânico e casamento de impedância, mas como também recebem os sinais de comunicação de alta freqüência, devem ser dimensionados para tal tarefa. Como a rede apresenta freqüência bem menor e amplitude de tensão elevada, a sua influência na saturação chega a ser na ordem de 10^5 quando comparada ao sinal de comunicação. Assim, o sinal primeiramente passa por um filtro passa-baixa antes de alcançar o transformador.

c) Indutores de bloqueio: são dimensionados para alta freqüência (para impedir a saturação) e para a corrente da rede (para evitar quedas de tensão). Tais indutores precisam bloquear a freqüência de modulação sendo que seu valor está abaixo da freqüência de ressonância. Indutores com núcleo de ar se enquadram bem nesta aplicação.

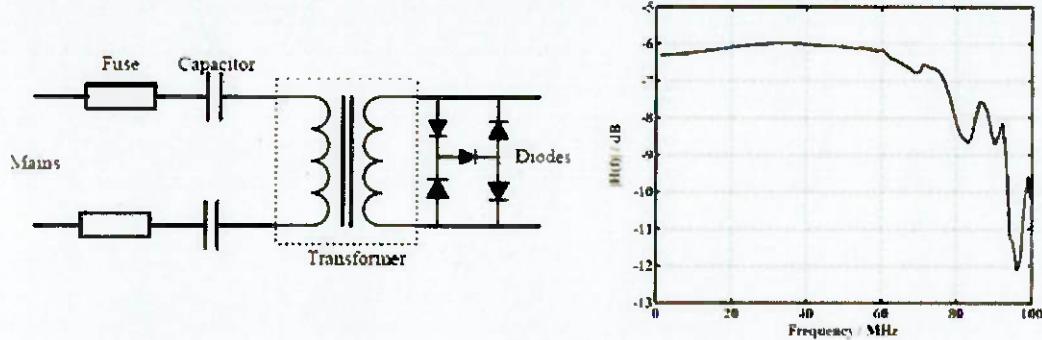
d) Resistores: para circuitos de acoplamento seu uso é evitado, uma vez que implicam em perda de potência tanto para o sinal de potência quanto o de comunicação.

Esquema do circuito de Acoplamento

Um circuito de acoplamento típico emprega geralmente tanto capacitores quanto transformadores. A figura abaixo mostra o esquema de um circuito de acoplamento para PLC.

Esse circuito emprega capacitores de alta voltagem para filtrar o sinal de 50/60Hz e uma combinação de diodos para proteção contra sobretensão.

A figura 6 mostra a função de transferência desse circuito. O circuito de acoplamento não deve influenciar os parâmetros do canal PLC durante as medidas. O efeito desse circuito precisa ser compensado nos dados medidos.



Figuras 5 e 6 - Circuito de Acoplamento e Função de Transferência

Em seguida, um outro esquema de um filtro passivo simplificado. O filtro é um transformador isolado em modo diferencial, permitindo a isolação do dispositivo da rede elétrica. C1, L1 e T1 forma um circuito ressonante série, um filtro passa-alta para definitivamente remover o sinal de 50Hz e seus harmônicos, mas também outros componentes espectrais de baixa freqüência. O varistor serve como uma unidade de proteção contra sobretensão, minimizando o efeito dos transientes. O capacitor C2 filtra a componente continua e não foi colocado quando o filtro foi usado como receptor.

Duas variações de filtro foram empregadas, filtros A e B como mostrados na tabela abaixo. A freqüência de corte é aquela na qual a magnitude da função de transferência é -3db. [8]

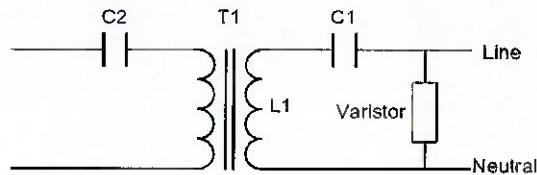


Figura 7 – Circuito de acoplamento simplificado

	Filtro A	Filtro B
C1	0.68 μ F	0.1 μ F
C2	10 μ F	10 μ F
L1	3.9 mH	1 mH
Freqüência de Corte	3 kHz	25 kHz

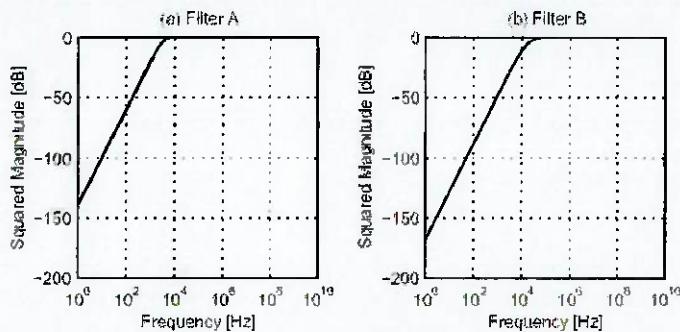


Figura 8 – Resposta em Freqüência dos filtros A e B

4.2 - Um modelo para o Canal de Comunicação

Abaixo está esquematizado um modelo para o canal de comunicação do sistema PLC levando em consideração algumas discrepâncias que reduzem o seu desempenho, tais como:

- Atenuação do sinal
- Casamentos de Impedância entre receptor e transmissor
- Variações temporais dos parâmetros.

Todas as discrepâncias são mostradas com exceção do ruído, uma vez que este é considerado uma perturbação aleatória no processo. O sistema é modelado por filtros lineares variantes no tempo, caracterizados por suas respostas em freqüência [12].

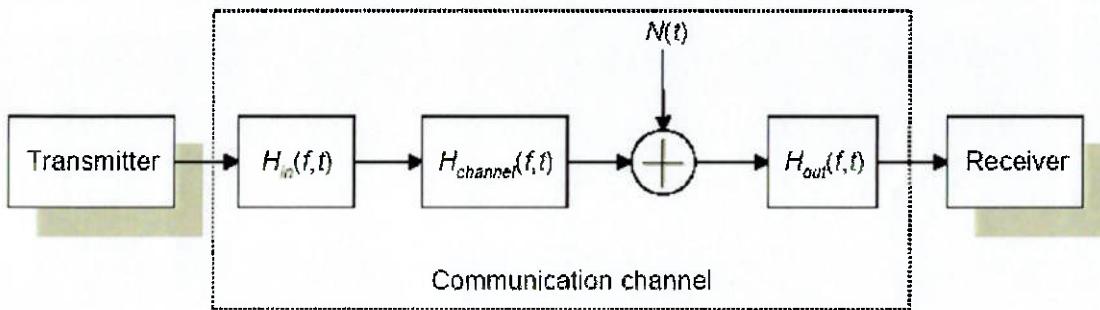
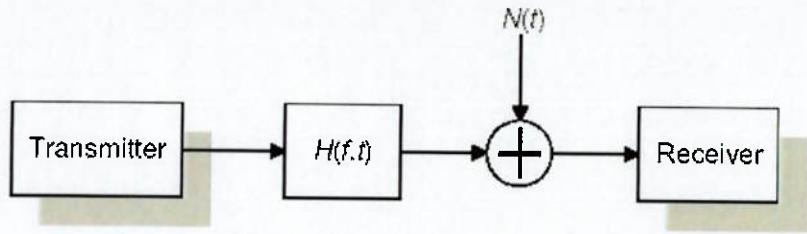


Figura 9 - Discrepâncias presentes no sistema PLC

Este modelo pode ser simplificado como mostrado na figura a seguir. Embora apresente uma estrutura simples, tal modelo detém um grande número de propriedades consideradas essenciais para o projeto de sistemas de comunicação bem como uma avaliação de seu desempenho. [12]

A função de transferência e o ruído podem ser estimados através de medidas ou por meio de análises teóricas. Ainda assim, várias medições e modelos são necessários para um entendimento minucioso da rede devido às variações de suas características.



Figuras 10 - Modelo simplificado do canal de comunicação

5 - Características do sistema PLC na rede de Baixa Tensão

De fato a rede elétrica, devido às suas características, é um meio bastante hostil para transmitir dados em uma primeira análise. Mesmo uma simples ligação entre dois pontos apresenta sinal cuja função de transferência é complexa devido a um casamento precário entre as impedâncias das duas cargas nos terminais da rede. Assim a amplitude e fase variam amplamente em função da freqüência a tal ponto que em determinados valores o sinal pode chegar com uma potência inferior quando comparado com a potência do ruído no meio, sendo portanto completamente corrompido pela rede. Além disso, a função de transferência do sistema PLC depende do tempo uma vez que o conjunto de cargas apresenta uma natureza dinâmica: cargas são acrescentadas e retiradas da rede elétrica e ainda ocorre que alguns dispositivos apresentam impedância variando no tempo como fontes chaveadas e alguns tipos de motores.

Como resultado o canal pode apresentar para algumas faixas uma boa qualidade de transmissão, ao passo que para outras faixas a qualidade pode estar depreciada e a capacidade comprometida.

Uma vez que a função de transferência depende tanto do tempo quanto da freqüência, a utilização da rede elétrica para a transferência dos dados requer uma abordagem adaptativa para compensar de alguma forma essas variações, levando ainda em consideração as diversas formas de interferência na rede elétrica que podem ser manifestar tanto na forma impulsiva como dependentes da freqüência. [8]

5.1 – Distorção

Uma vez que a função de transferência depende tanto do tempo quanto da freqüência, a utilização

A distorção consiste numa alteração da forma do sinal durante a sua propagação desde o emissor até ao receptor. A distorção pode resultar do comportamento não-linear de alguns dos componentes que compõem o percurso do sinal ou pela simples resposta em frequência do meio de transmissão.

Em alguns casos, os efeitos da distorção podem ser corrigidos ou minimizados através de técnicas de condicionamento de sinal tais como filtragem.

5.2 – Ruído

Típicas fontes de ruído presentes na rede elétrica são: dimmers, reatores para iluminação, fontes chaveadas e motores com escovas. Estes equipamentos introduzem na rede correntes harmônicas de alta freqüência caracterizando as “emissões conduzidas”. Constituindo outra forma de emissão de ruído, “as emissões irradiadas” são aquelas provenientes de emissoras de rádio em geral ou mesmo de equipamentos geradores de interferência eletromagnética (EMI) como os já citados. EMI sobre sistemas PLC será tratado com mais detalhes no item 8.

Todas essas formas de perturbação provocam perdas de pacotes em um nível que precisa ser considerado, necessitando então de um código de correção de erros no lado da recepção. No caso um código de relação 1:2 é usado, implicando que os dados transmitidos estão duplicados, isto é, para cada bit de dados o sistema do PLC transmite 2 bits no canal correspondente. A experiência tem mostrado, que o canal do PLC é freqüentemente de excelente qualidade para as estações próximas do OM, neste caso não há necessidade de usar o FEC, consequentemente a capacidade do canal é duplicada.

Para a estimativa do nível de ruído do sinal é possível a utilização do espectro de potência, $R(f)$, pois ele descreve como a potência do sinal é transmitida ao longo da faixa de freqüência. Para isso, N amostras são tomadas no domínio do tempo, sendo F_s a taxa

amostral durante N/F_s segundos. Em seguida, calculando-se a Transformada Discreta de Fourier das amostras pode-se obter uma estimativa do espectro de potência.

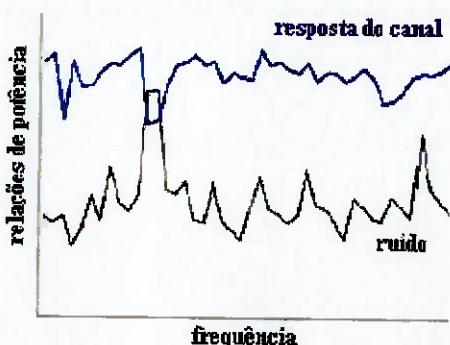


Figura 11 - Resposta ao ruído da rede elétrica

5.2.1 - Relação Sinal-Ruído

Como já explicado, o ruído consiste na alteração de algumas das características do sinal transmitido por efeito de outro sinal externo ao sistema de transmissão, ou gerado pelo próprio sistema. Estes sinais indesejados são de natureza aleatória, não sendo possível prever seu valor em um instante de tempo futuro.

Em muitos casos, o ruído é produzido pelos próprios equipamentos utilizados para implementar os sistemas de transmissão, tais como amplificadores utilizados nos receptores e repetidores. Estes dispositivos produzem ruídos de origem térmica e mecânica, os quais passam a ser processados juntamente com o sinal desejado.

O ruído pode ser aditivo (soma-se ao sinal) ou multiplicativo (o sinal resultante é o produto do sinal transmitido e do ruído).

Uma vez que o ruído é um processo aleatório, este deve ser descrito e tratado como recursos e métodos estatísticos. Seus efeitos no desempenho dos sistemas de transmissão podem ser minimizados através da utilização de técnicas de projeto de circuitos mais sofisticados e filtragem. No entanto, dada a natureza aleatória do ruído, não é possível eliminá-lo completamente do sistema. Os efeitos se fazem sentir através da deterioração da qualidade do sinal transmitido nos sistemas de transmissão analógicos e através da introdução de erros nos sistemas de transmissão digitais. Nestes sistemas, o qualidade do sinal recebido é medida por meio da relação entre a potência do sinal e a potência do ruído – relação sinal/ruído (SNR – Signal to Noise Ratio). Nos sistemas digitais, o desempenho é medido através da probabilidade de ocorrência de erros (BER – Bit Error Rate).

$$SNR = \frac{\text{Received power}}{\text{Noise power}}$$

Este parâmetro está relacionado com a performance do canal de comunicação. Quanto maior o SNR, melhor a comunicação.

Caso a atenuação do sinal transmitido seja muito elevada, a potência entregue ao receptor será muito baixa e não poderá ser detectada. A atenuação nas linhas de energia atinge valores elevados (mais de 100db), impondo limites na distância entre transmissor

e receptor. Uma opção para reduzir esse efeito é o uso de repetidores nos cable-boxes, permitindo distâncias maiores.

O uso de filtros poderia melhorar o SNR bloqueando o ruído gerado internamente por toda a rede. Desta forma, o nível de ruído na rede diminuiria mas deixaria o sistema mais dispendioso.

5.2.2 - Tipos de Ruídos

A seguir estão os diversos tipos de ruídos que podem se manifestar no sistema PLC:

5.2.2.1 - Ruído Gaussiano

O ruído diz-se branco quando a sua densidade espectral de potência média é constante a todas as freqüências, diferente do ruído colorido. As características do ruído são ainda descritas através da função densidade de probabilidade da sua amplitude. Diz-se então que o ruído segue uma distribuição Normal (Gaussiana), de Poisson, etc. Uma das formas de ruído mais utilizadas para modelar este aspecto de um sistema de transmissão é o Ruído Branco Aditivo e Gaussiano (AWGN – Additive White Gaussian Noise).

5.2.2.2 - Ruído Colorido de Fundo

Ao contrário de outros canais de comunicação, o canal PLC não pode ser representado pela presença dominante de ruído gaussiano branco aditivo (AWGN). Dessa forma, uma análise mais apurada das perturbações presentes no ambiente PLC é um pré-requisito inevitável para que sejam levantados modelos mais adequados para representar o canal.

5.2.2.3 - Ruído de Faixa Estreita

São duas as principais fontes deste tipo de ruído: perturbações eletromagnéticas de radio difusão em geral e a perturbação peculiar gerada pelas harmônicas de maior ordem na freqüência de deflexão horizontal dos aparelhos de TV (15,625 kHz PAL-Europa e 15,75 kHz NTSC-EUA). Embora concentrado em faixas estreitas, este tipo de ruído apresenta uma alta densidade espectral de potência tendo, porém, suas maiores contribuições na faixa inferior aos 500kHz.

5.2.2.4 - Ruído Impulsivo Periódico

Com freqüências variando entre 50 e 200kHz, este tipo de ruído é gerado principalmente por fontes chaveadas.

5.2.2.5 - Ruído Impulsivo Periódico Síncrono com a freqüência da rede

Apresentando freqüências de 50 a 100Hz, este tipo de ruído impulsivo apresenta uma curta duração (alguns microssegundos), sendo causado por fontes de alimentação no processo de comutação dos diodos retificadores operando de forma síncrona com a rede.

5.2.2.6 - Ruído Impulsivo Assíncrono

Causado por transientes na rede, este tipo de ruído apresenta curta durações (10 a 100us), podendo alcançar picos de até 2kV ocorrendo de forma aleatória. Devido a estes alto valores, a PSD deste tipo de ruído pode atingir níveis consideráveis acima da PSD do ruído de fundo. Quando permanecem estacionários em intervalos de segundos, minutos e até mesmo horas, podem ser caracterizados como ruídos de fundo: lenta variação e PSD com valores elevados. Para intervalos menores (micro ou milissegundos), a PSD do ruído na rede pode aumentar consideravelmente a ponto de causar erros na transferência dos dados.

5.3 - Atenuação

Para medir a atenuação do canal da rede elétrica, um gerador de funções foi ligado a rede elétrica transmitindo um sinal de freqüência crescente de 1 a 16MHz (Chirp Signal) com magnitude de 2.5V (para 50 Ohms). Este sinal parte de uma freqüência conhecida que é incrementada ou decrementada até atingir a freqüência limite sendo gerado a cada 2 minutos pelo gerador de funções. Quando o sinal alcança o receptor, já sofreu atenuação da rede elétrica. Como esta atenuação é função da freqüência, diferentes partes do sinal são atenuadas com intensidades diferentes de forma que o sinal obtido no receptor fornece a resposta em freqüência do canal na rede elétrica.

Para estimar a atenuação, blocos com N amostras foram sucessivamente tomados do sinal recebido com uma taxa amostral de Fs amostras por segundo. O espectro de potência de cada bloco foi determinado por meio da técnica descrita no Anexo 1. Com o valor máximo de cada bloco (para cada freqüência), podemos estimar a atenuação (assumindo que a potência do sinal recebido é maior que a potência do ruído). Como a duração dos blocos é muito menor que a da freqüência de varredura, uma resposta em freqüência com boa resolução pode ser obtido.

5.4 - Largura da Banda

A freqüência contida na portadora do sinal de informação é de extrema importância. O intervalo de freqüência usado pelo canal de comunicação é chamado largura de banda (W). Em um método específico de comunicação, a largura de banda necessária é proporcional à taxa de bits. Portanto, uma taxa de bits mais elevada necessita de uma largura de banda maior. Se a largura de banda dobra, então a taxa de bits também é dobrada.

Sabemos que a largura de banda é um recurso limitado e precioso, freqüentemente compelida a certo intervalo pequeno. Tal situação adiciona uma restrição aos sistemas de comunicação onde os mesmos estão fixados a uma determinada largura de banda.

Para comparar diferentes sistemas de comunicação, a eficiência da largura de banda (ρ) é definida pela expressão:

$$\rho = \frac{R_b}{W}$$

Onde R_b é a taxa de bits.

Esta expressão é uma medida de qualidade do sistema de comunicação. Hoje em dia, um modem telefônico pode atingir uma taxa de bits de 56,6 kb/s usando uma largura

6 - Geração e Propagação de Harmônicas

Para medir as distorções harmônicas introduzidas na rede elétrica pelo PLC, as correntes e tensões harmônicas foram medidas em vários pontos da rede, como já mostrado em 3.1.

As medições foram realizadas com um Fluke modelo 435, capaz de analisar tensões com precisão de 0.1%, potência ativa e reativa, fator de potência, harmônicas de tensão e corrente (além de 2.5kHz). Além disso, possui um osciloscópio e pode medir THD.

Com uma distância de 5m entre os dois PLCs, as medições mostram que o PLC não afeta as harmônicas de tensão da rede, mesmo com transferência de dados na sua capacidade máxima.

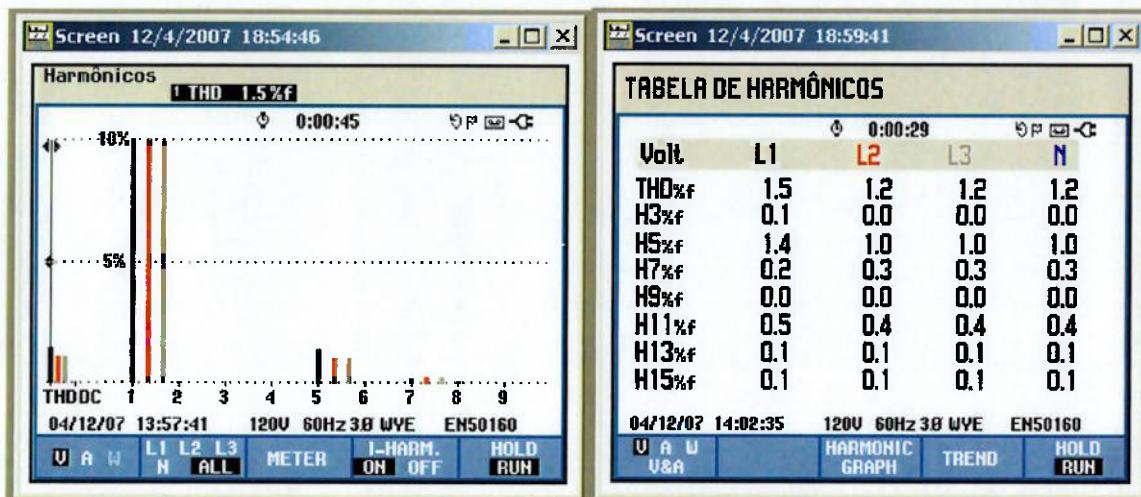


Figura 13 – Rede com PLC e sem transferência de dados

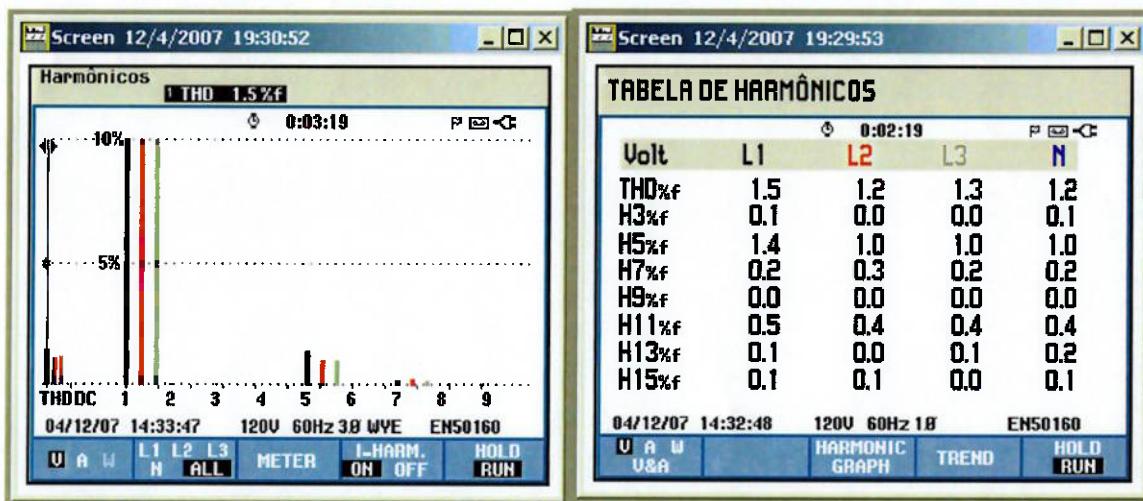


Figura 14 – Rede com PLC e transferência máxima de dados

de banda de 4 kHz apenas, o que proporciona uma eficiência na largura de banda em torno de 14,15 b/s/Hz. Um sistema de medição de dados (por exemplo, a leitura dos medidores de energia elétrica residenciais) para PLC que possua uma taxa de bits de 10kb/s e se comunique dentro da banda A – CENELEG (European Committe for Electrotechnical Standardization) possui uma eficiência de largura de banda de 0,11 b/s/Hz, portanto a performance do modem telefônico é bem maior.

As limitações de largura de banda do meio de transmissão também são consideradas uma condicionante ao desempenho desses sistemas. Se a largura de banda for insuficiente, a forma de onda do sinal é alterada durante a sua propagação, tendo como resultado a introdução entre símbolos, isto é, parte da energia relativa a um símbolo transmitido é recebida durante o período de tempo reservado a símbolos posteriores.

A largura da banda é proporcional a taxa de bits, logo uma ampla faixa é necessária quando ocorrem transmissões com elevadas taxa de bits. Na Europa, a largura de banda permitida é regulamentada pelos padrões CENELEG. O padrão apenas permite freqüências entre 3kHz e 148,5kHz, o que implica em forte limitação ao PLC e pode não ser suficiente para suportar aplicações com elevadas taxas de bits, como vídeos em tempo real, dependendo da performance e da necessidade. A figura abaixo mostra o padrão especificado pela CENELEG. O intervalo de freqüências é dividido em cinco bandas. As duas primeiras bandas (3-9 e 9-95 kHz) são reservadas aos fornecedores de energia e as outras três são reservadas aos clientes dos fornecedores. Assim, ao especificar a banda permitida, o padrão também determina os limites da potência do transmissor.

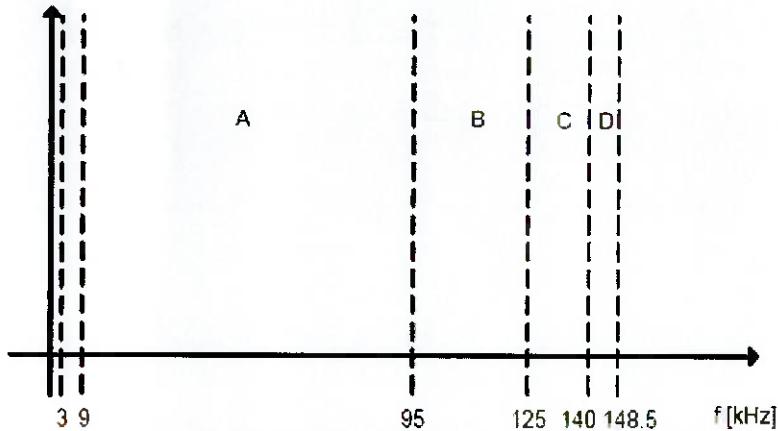


Figura 12 - As bandas de freqüência no padrão CENELEG

Para se aumentar a taxa de transmissão, maiores bandas são necessárias. Estudos recentes tem sugerido o uso de freqüências no intervalo entre 1 e 20MHz. O problema é que parte dessa banda já está sendo utilizada por outros sistemas de comunicação e não podem sofrer interferências. Além disso, esses mesmos sistemas poderiam interferir no sistema PLC. Exemplos de tais sistemas são: transmissão de radio-frequência, radio-amadores e sistemas de navegação aérea. [8]

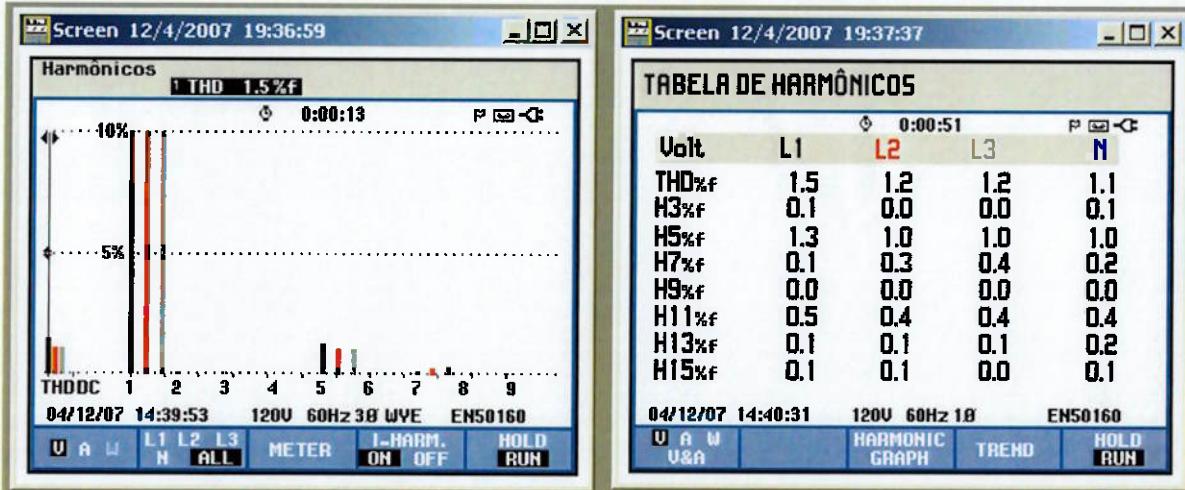


Figura 15 – Rede sem PLC

Os gráficos mostram a corrente e a tensão como porcentagem da componente fundamental. O máximo THD (Total Harmonic Distortion) da tensão (incluindo todos os harmônicos até ordem 40) deve ser menor ou igual a 8% (valor máximo obtido teoricamente, cujos valores individuais médios máximos das harmônicas de tensão para um conjunto de cargas – motores e lâmpadas - são mostrados na figura 16) [10]. O THD é calculado por meio da seguinte equação:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (\mu_h)^2}$$

Onde μ_h é a amplitude relativa das harmônicas com relação à fundamental. A figura seguinte mostra as amplitudes das harmônicas de tensão.

Os valores medidos fornecem THD igual a 1.5% para distância de 5m, valor bastante satisfatório.

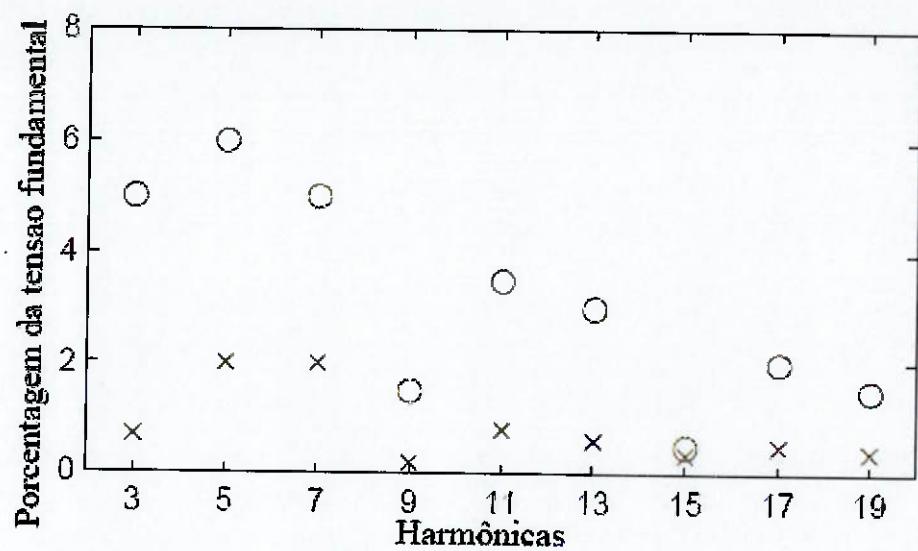


Figura 16 – Harmônicas de tensão – “X” representa as tensões harmônicas de tensão como porcentagem da fundamental. “O” representa os valores máximos permitidos

7 - Efeito das cargas no sistema PLC

As cargas residenciais podem perturbar bastante o sistema, e o grau de perturbação dependerá do tipo de carga e do consumo de energia. O sistema PLC compensa até certo ponto as degradações e mantém a qualidade do acesso até que seu limiar de correção seja ultrapassado, momento em que o PLC começa a falhar e permanece assim até que o nível de perturbação diminua para valores aceitáveis.

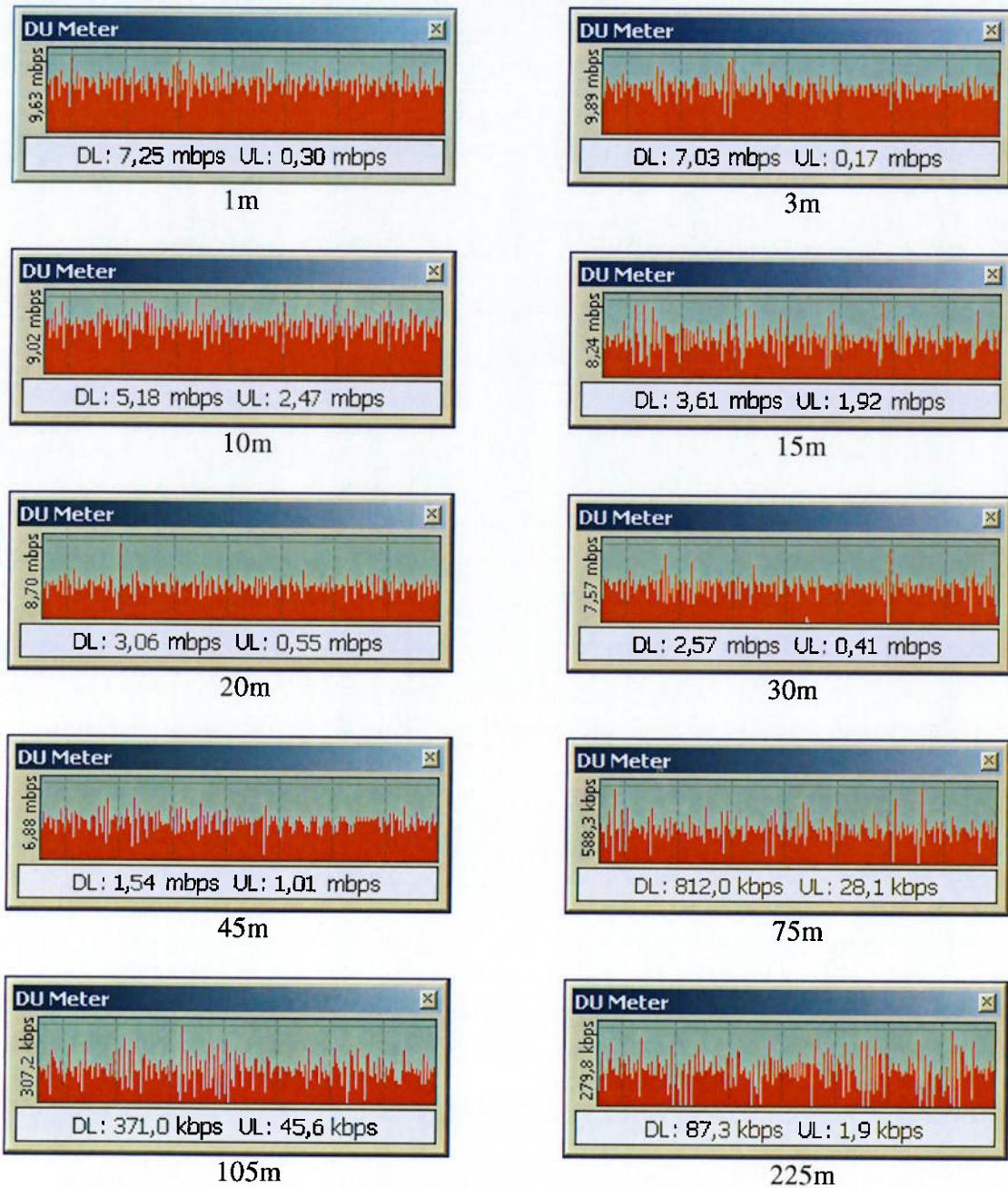
Os efeitos negativos das cargas serão mais acentuados nos PLCs que estejam mais próximos, ao passo que os situados em pontos remotos praticamente não sofrem interferências. Além disso, as harmônicas de tensão injetadas pelas cargas na rede a meia distância possuem limites teóricos médios como mostrados na figura 16.

Os principais causadores de interferência são os motores de escova, fontes chaveadas, reatores para iluminação, dimmers de Luz e até chuveiros elétricos. Entre os motores domésticos, destacam-se os secadores de cabelos, aspiradores e as furadeiras elétricas.

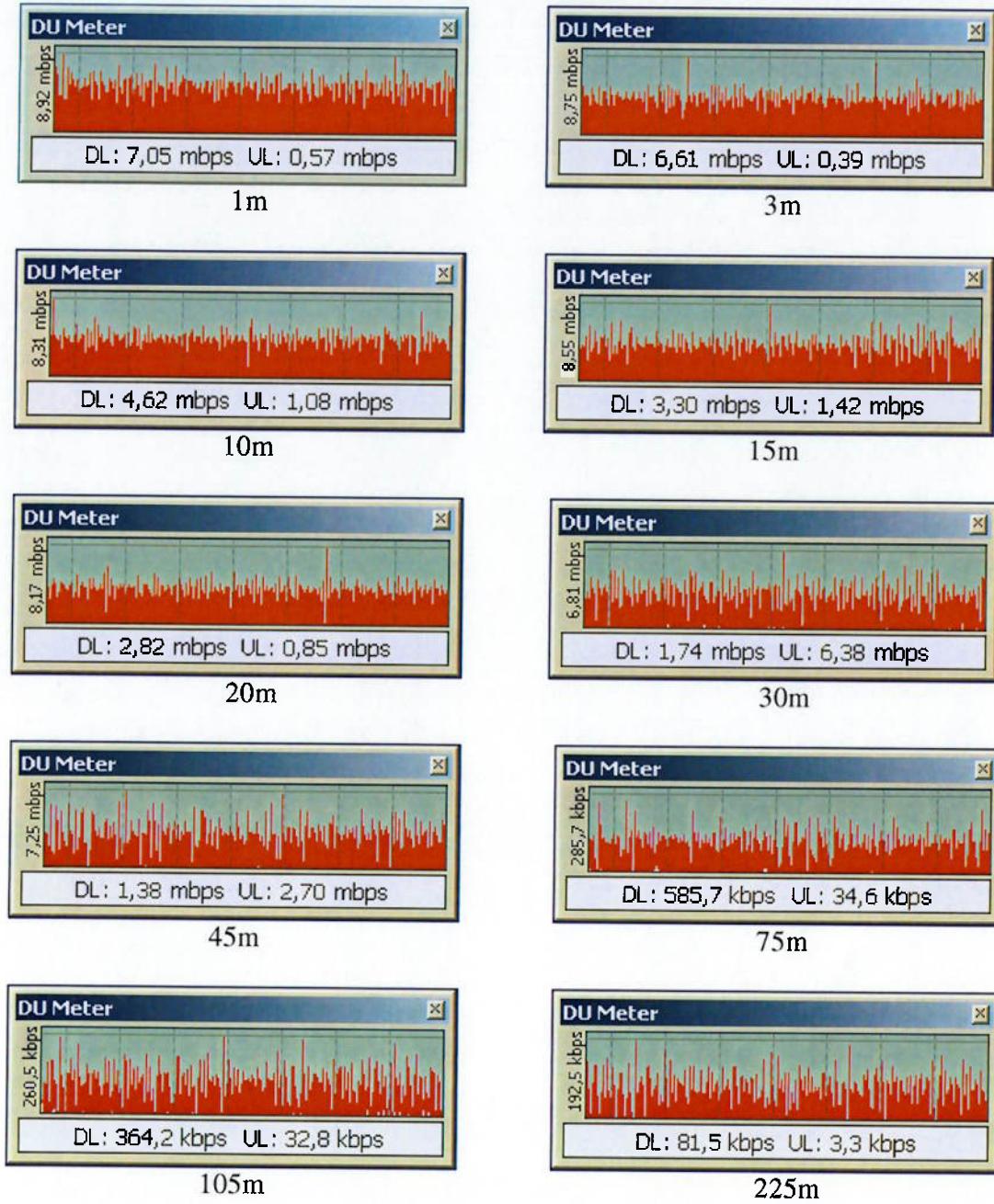
Com a utilização do software Du Meter, foram coletadas as taxas de transferência para Download e Upload em Mbps na situação livre de perturbações. Em seguida, cargas foram inseridas a meia distância entre os dois PLCs e as taxas de transferência para diferentes distâncias foram novamente coletadas.

Cada coluna do gráfico representa intervalos de 30s e abaixo estão os valores médios DL e UL para cada distância.

a) Sem perturbações



b) Carga1 entre adaptadores



Distância(m)	Taxa de Transferência (Mbps)					
	Sem Perturbações	Carga 1 entre Adaptadores	Carga 2 entre Adaptadores	Carga 3 entre Adaptadores	Carga 4 entre Adaptadores	Carga 5 entre Adaptadores
1m	7,25	7,05	7,15	4,52	7,08	7,18
3m	7,03	6,61	6,33	4,39	6,25	7,07
10m	5,18	4,62	5,68	3,25	5,52	5,02
15m	3,61	3,30	3,54	2,28	3,49	3,49
20m	3,06	2,82	2,94	1,99	2,97	2,86
30m	2,57	1,74	1,93	1,67	1,95	2,47
45m	1,54	1,38	1,41	1,00	1,30	1,58
75m	0,81	0,59	0,58	0,53	0,55	0,79
105m	0,37	0,36	0,38	0,24	0,42	0,34
225m	0,08	0,08	0,08	0,05	0,07	0,08

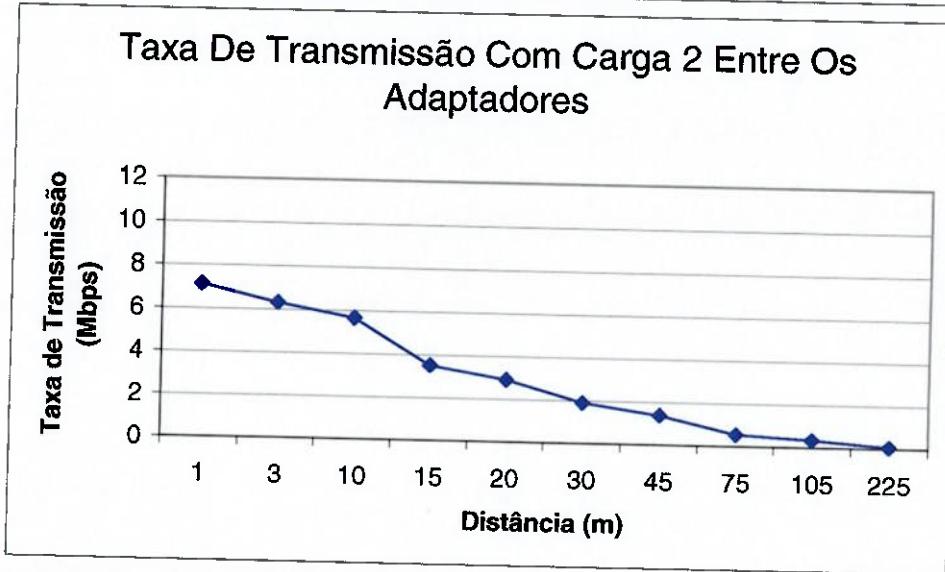
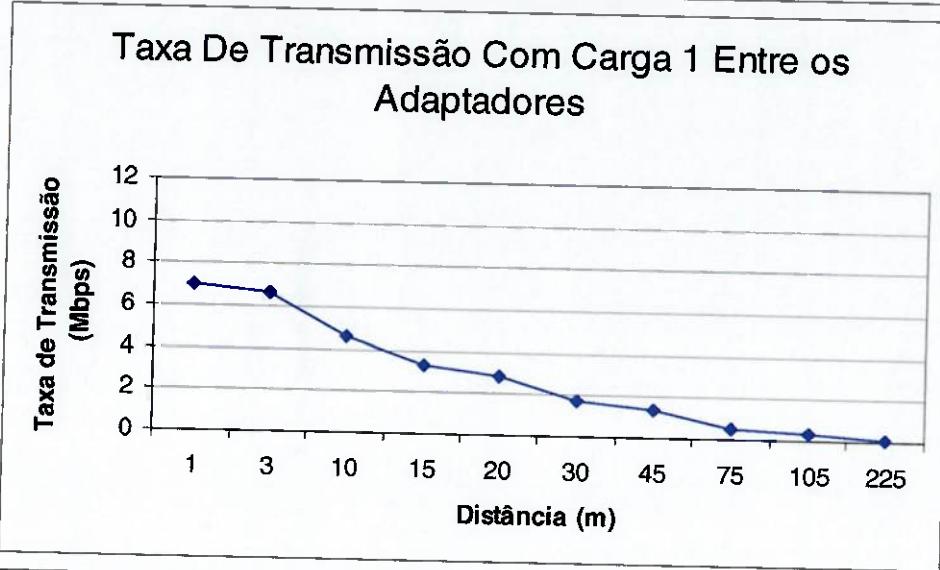
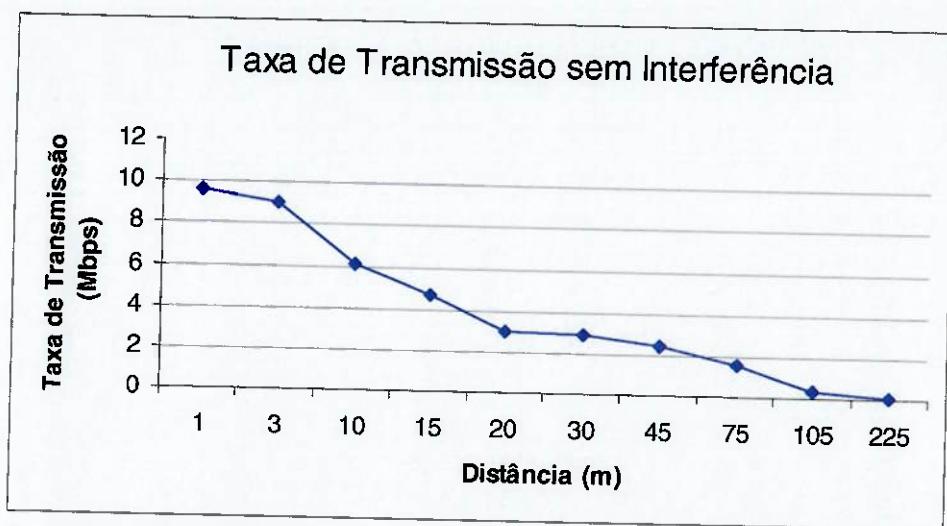
Carga1 : Motor Universal (Furadeira Elétrica)

Carga2: Motor CA (Ventilador)

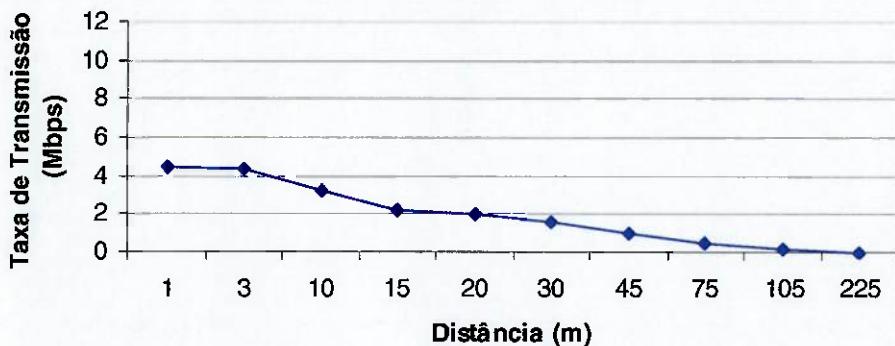
Carga3 : Lâmpadas Fluorescentes Compactas

Carga4 : Aspirador de Pó

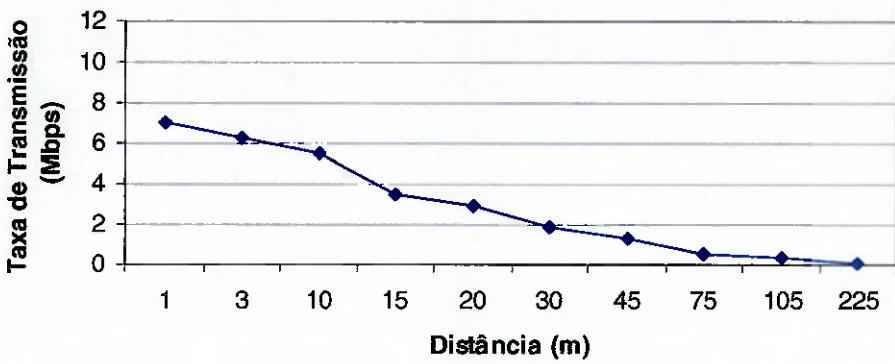
Carga5 : Televisor de 29``



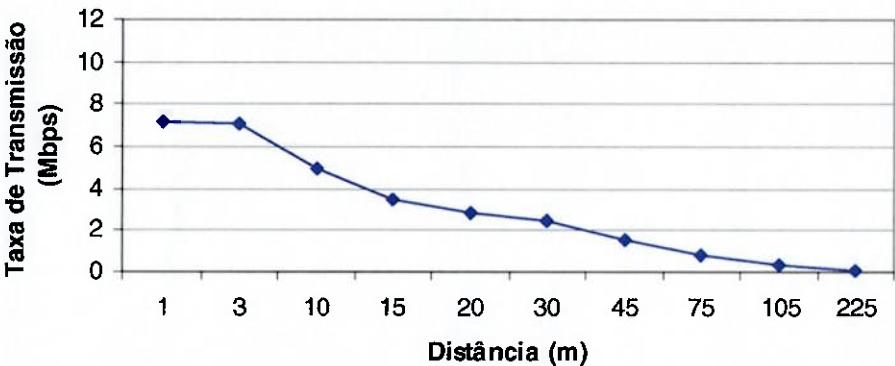
Taxa De Transmissão Com Carga 3 Entre Os Adaptadores

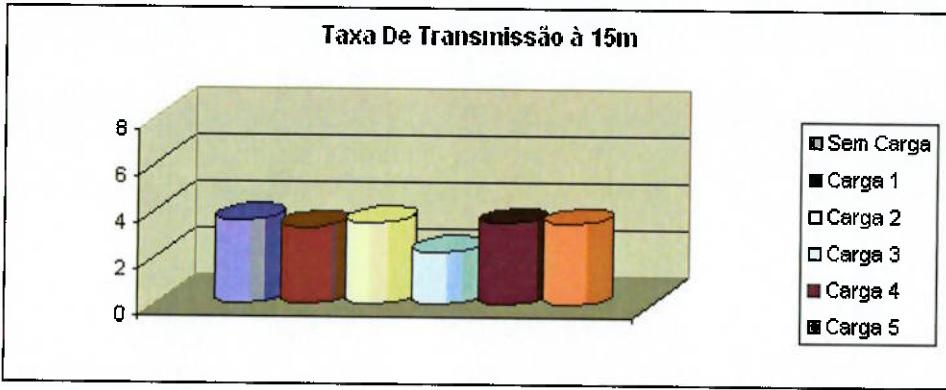
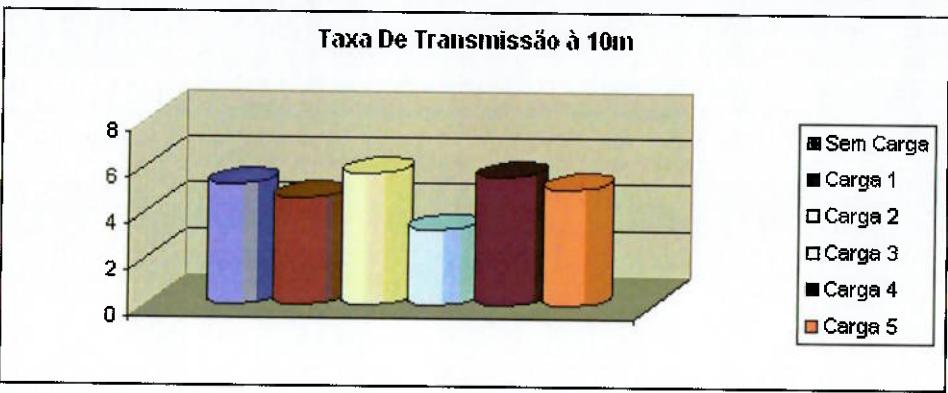


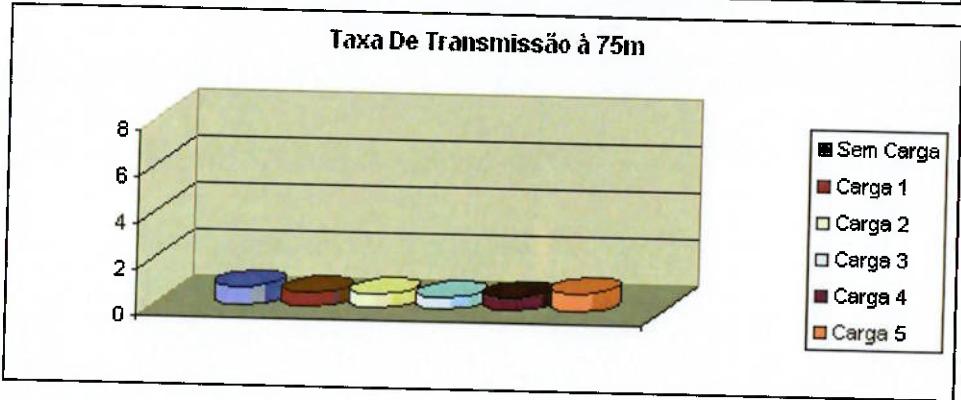
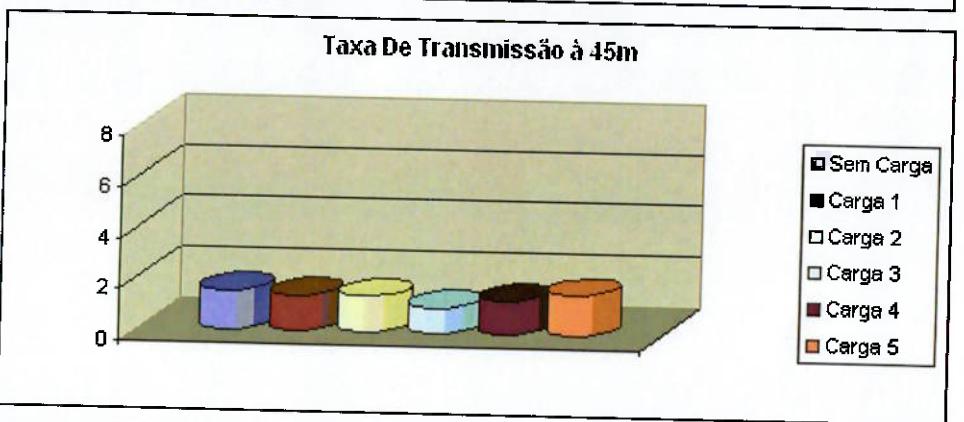
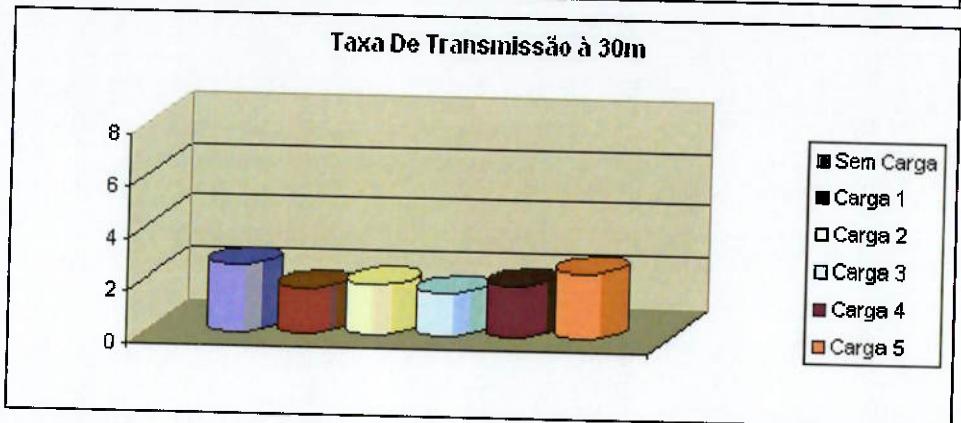
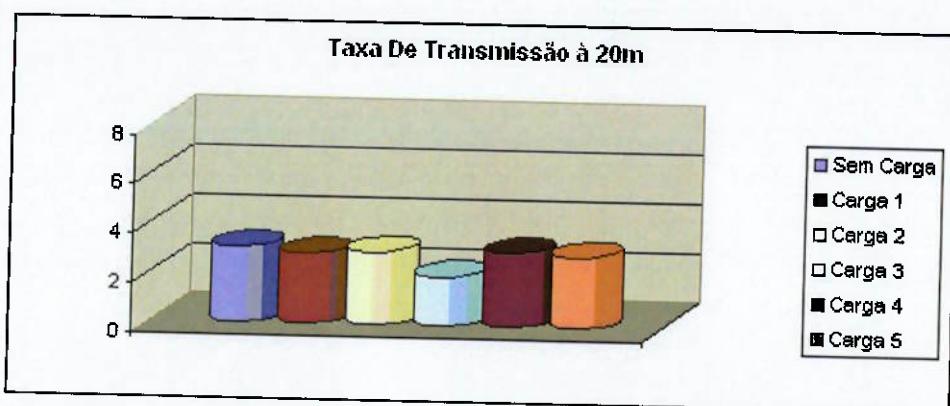
Taxa De Transmissão Com Carga 4 Entre Os Adaptadores

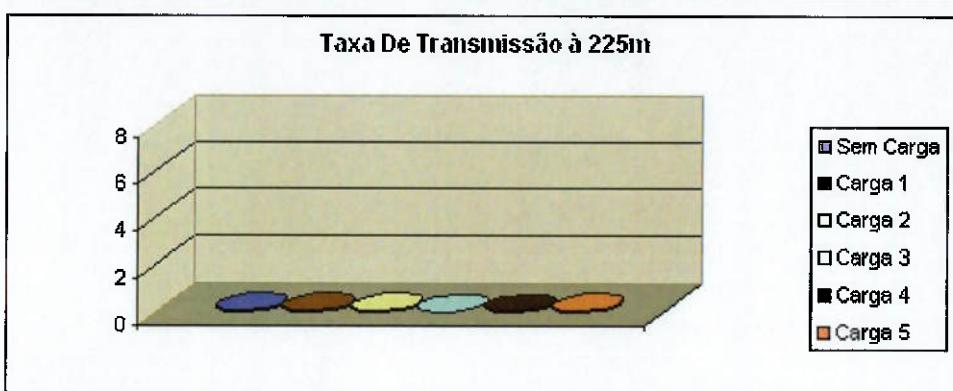
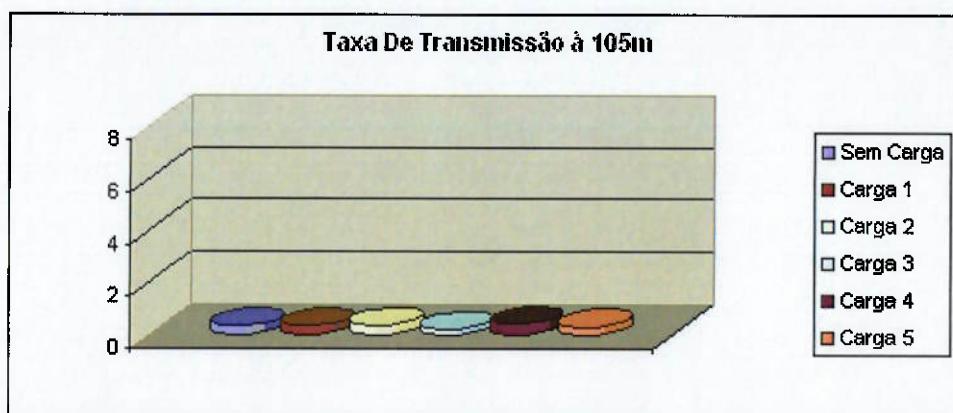


Taxa De Transmissão Com Carga 5 Entre Os Adaptadores

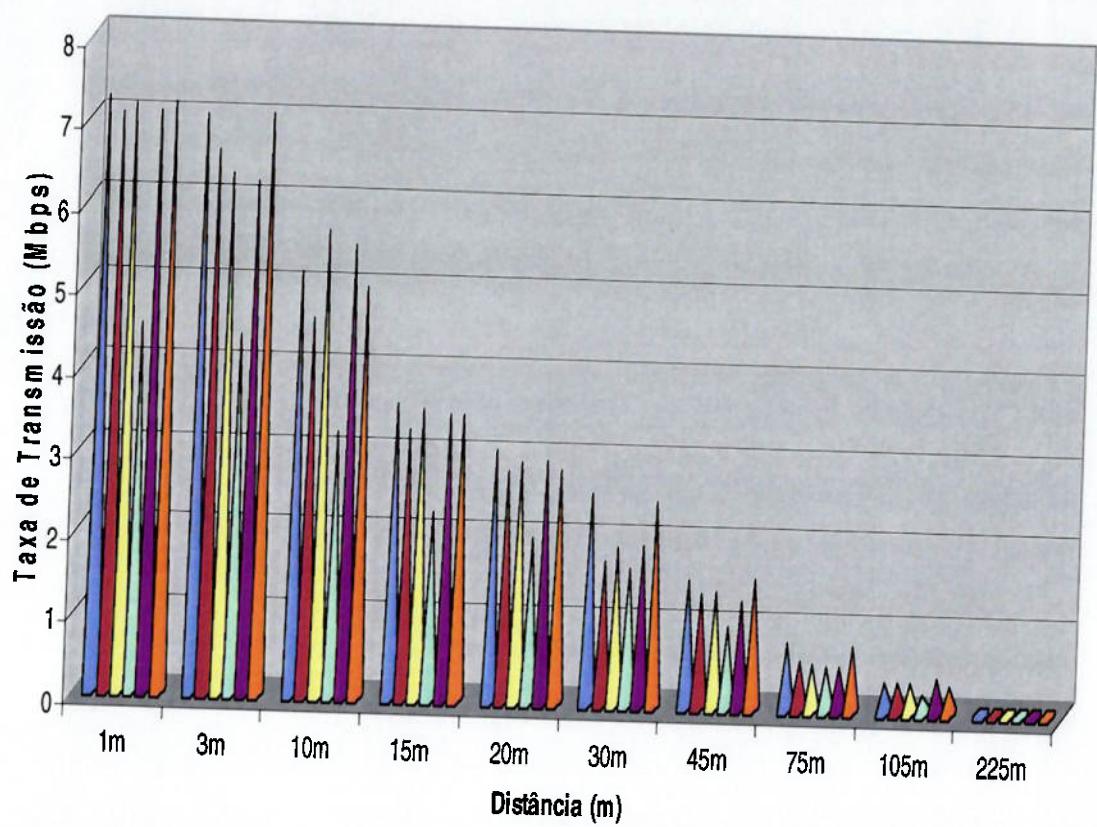








Comparação Entre As Taxas De Transmissão



8 - Interferência e degradação do sinal PLC

Nesta parte do experimento é proposto o seguinte experimento para verificar a interferência de ondas eletromagnéticas na conexão PLC, no Laboratório de Interferência do IEE.

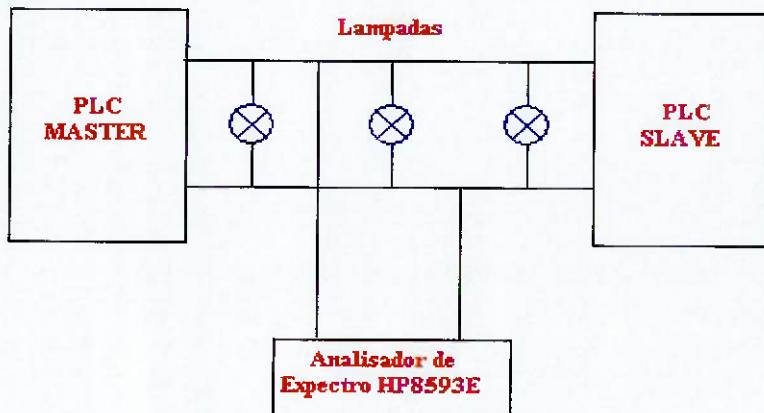


Figura 17 –Circuito Experimental para o Teste RF.

1 - Verificação do espectro da linha apenas com os módulos Master e Slave em operação.

2 - Verificação do espectro da linha com a introdução de cargas lineares (ex. lâmpadas incandescentes).

3 - Verificação do espectro da linha com a introdução de cargas não lineares (ex. lâmpadas fluorescentes compactas).

Experimentos com essa classe de interferência demonstram que Interferência RF pode reduzir em até 60% a taxa de transmissão do PLC e é tida como o principal causa de perturbação. Tais distúrbios podem ser resolvidos com a instalação de filtros apropriados na entrada do PLC. [11]

Também é demonstrado que não há correlação entre sags (quedas temporárias) de tensão e corrente

Na figura abaixo observamos a taxa de transferência quando sob efeito de lâmpada fluorescente tubular com reator passivo (região em vermelho) e lâmpada fluorescente compacta com reator eletrônico (região em verde).

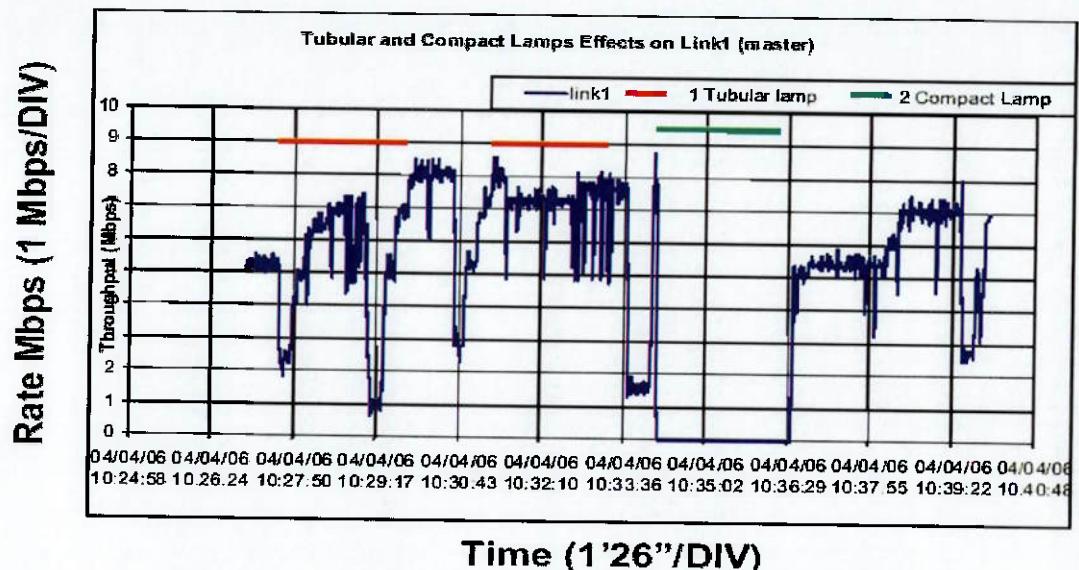


Figura 18 – Taxa de Transmissão com Lâmpadas Fluorescentes

Os dois gráficos a seguir mostram a resposta em frequência do PLC na presença de lâmpadas fluorescentes compactas, com o uso de filtro e sem filtro, respectivamente.

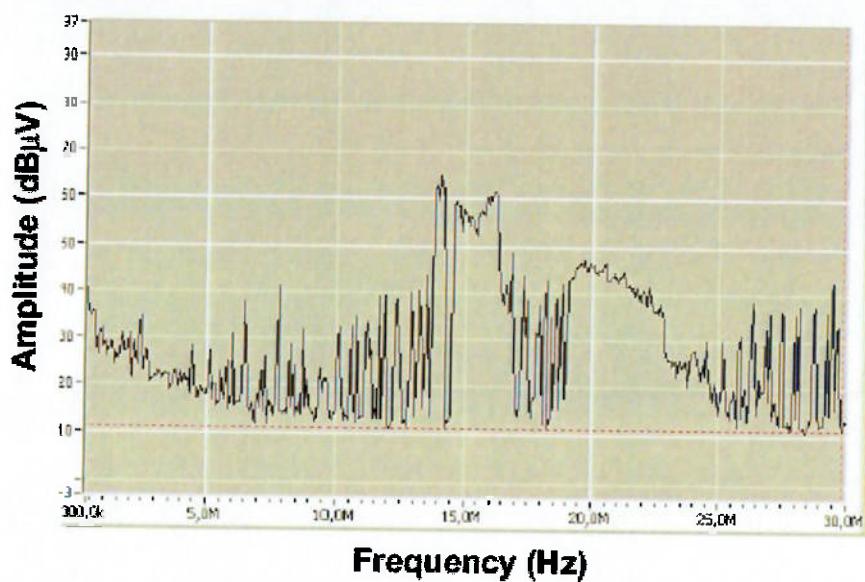


Figura 19 - Lâmpadas fluorescentes com o uso de filtro

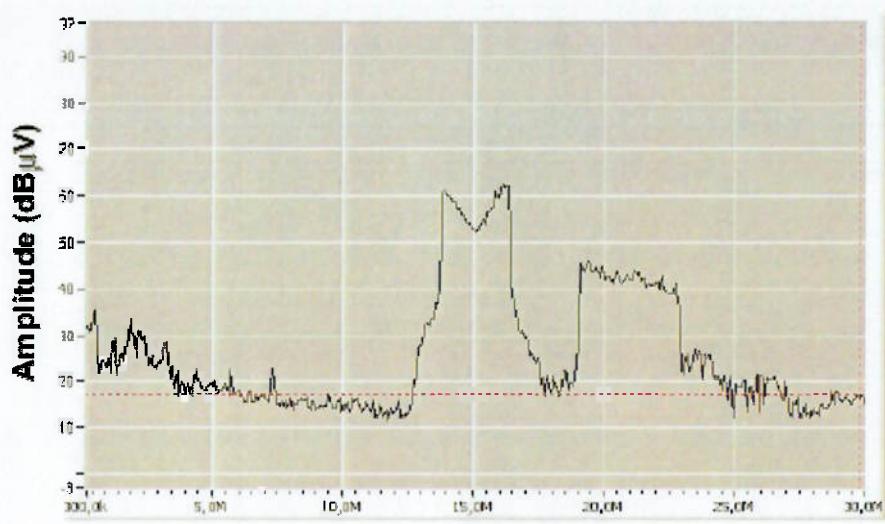


Figura 19 - Lâmpadas fluorescentes sem o uso de filtro

A ausência de filtro provoca uma significativa redução na taxa de transferência, ou até mesmo a queda da conexão. A presença do filtro suprime os distúrbios permitindo taxas de transferência mais altas.

9 - Arquitetura Digital do Sistema PLC

9.1 - Métodos de Modulação

Há muitas escolhas possíveis de modulação para o sistema de comunicação do PLC, cada uma apresentando vantagens específicas e desvantagens. Os seguintes métodos de modulação são aplicáveis ao PLC quando considerada a taxa de dados acima de 1Mbit/s:

1. Spread-Spectrum, em particular, Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS);
2. Broadband Single-Carrier sem equalização;
3. Broadband Single-Carrier com equalização de largura de banda;
4. Broadband Multicarrier com decisão adaptável de equalização de feedback;
5. Multicarrier na forma de OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Para os métodos 4 e 5, o fluxo de dados transmitidos não precisa estar concentrado em uma porção contínua do espectro, mas distribuído sobre inúmeros sub-canais, opcionalmente, com intervalos entre eles. Para o esquema de modulação OFDM, geralmente obtemos um numero maior de sub-canais de mesma largura, sendo que cada um deles pode suportar bits de dados, de acordo com sua qualidade. O método 4 usualmente opera com uma “porção espectral”, ou seja, relativamente poucos canais de diferentes larguras. No entanto ambos os métodos são capazes de lidar com a esperada distribuição desigual dos intervalos no espectro de diferentes larguras que será aplicável ao PLC. O método OFDM oferece claramente o maior patamar de flexibilidade em relação a todos os esquemas listados acima.

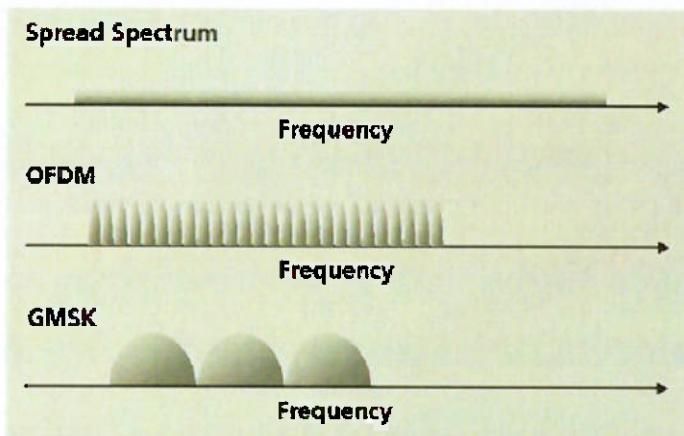


Figura 17 - Tipos de Modulação

9.2 - Multiplexação divisão de freqüência ortogonal, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

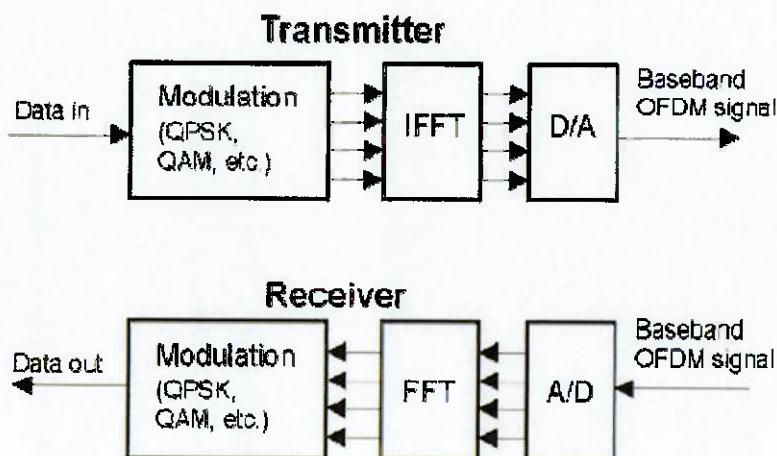


Figura 18 - Transmissor e receptor da modulação OFDM

Em meados da década de 1960, foi introduzido o conceito inicial da multiplexação ortogonal. A OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) é uma variação da multiplexação por divisão de freqüência (FDM) usada nos sistemas de telefonia e nas tecnologias de redes de acesso como o ADSL e VDSL, e mais recentemente nas redes wireless e sistemas PLC. A idéia básica é dividir um fluxo digital de alta taxa de bits em um esquema de baixa taxa e a transmissão paralela usando subportadoras.

Em um sistema FDM normal, por exemplo, as portadoras estão suficientemente espaçadas de modo a poderem ser recebidas utilizando filtros convencionais. Entretanto, para tornar a filtragem possível, bandas de guarda têm que ser introduzidas entre essas portadoras, o que resulta em uma diminuição da eficiência espectral.

Na OFDM, ao invés de se utilizar uma banda de guarda entre subportadoras para poder separá-las na recepção, emprega-se uma sobreposição das mesmas, resultando em um ganho espectral de até de 50% em relação à técnica FDM.

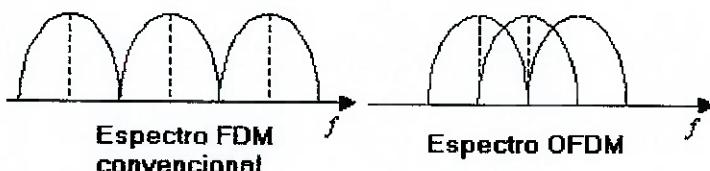


Figura 19 - Modulação FDM e OFDM

Em um sinal OFDM é possível organizar as portadoras de forma que as suas bandas laterais se sobreponham sem que haja interferência entre elas. Para que isso ocorra, as portadoras devem ser matematicamente ortogonais (linearmente independentes), ou seja, no domínio do tempo, o sinal em cada portadora precisa ter um

número inteiro de ciclos no período de símbolo, resultando em zero o processo de integração do produto de todos os sinais no tempo.

A OFDM é portanto uma técnica de transmissão multi-portadoras que divide o espectro em várias sub-bandas. Assim pode-se transmitir digitalmente, a altas taxas de bits, para receptores móveis, portáteis e fixos, especialmente em ambientes multi-percurso.

Antes da transmissão a informação é dividida em um grande número de canais com baixa taxa de bits cada um. Estes são usados para modular as portadoras ortogonais individuais de tal maneira que a duração do símbolo correspondente se torne maior do que o atraso de propagação dos canais de transmissão. As subportadoras são posicionadas de tal forma que os zeros de cada uma coincida com os das outras.

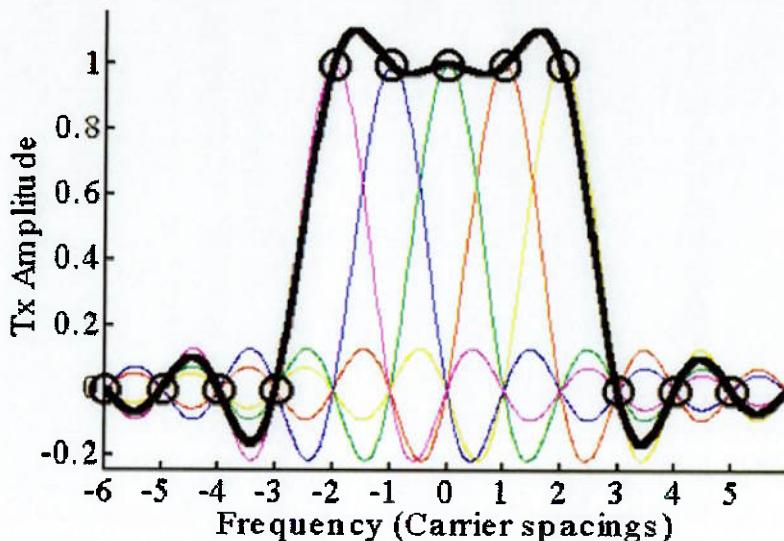


Figura 20 - Exemplo de Distribuição de 5 subportadoras utilizando OFDM

OFDM é uma técnica que apresenta vantagens frente aos problemas de interferências entre freqüências e de ruído impulsivo. Um sistema baseado em OFDM além de proporcionar uma maior taxa de transmissão, apresenta uma alta robustez aos ambientes com desvanecimento seletivo em freqüência.

O grande diferencial do uso da modulação OFDM na tecnologia PLC está na forma como é controlada essa modulação. As freqüências podem ser monitoradas em tempo real, com o sistema alternando o carregamento dos sinais de acordo com a presença ou não de ruídos. Conforme o ruído se propaga pelas diversas freqüências, os sinais são carregados e transmitidos (modulados) em várias freqüências simultâneas, com níveis de carregamento diferentes, e aproveitando as melhores condições possíveis do link, garantindo assim altas taxas de transmissão, boa performance e confiabilidade.

Dessa forma, o sistema pode facilmente se adaptar às mudanças das condições de transmissão da rede elétrica, podendo ainda utilizar filtros para a proteção de serviços especialmente sensíveis a esses tipos de interferências.

Entretanto, algumas desvantagens também existem, tais como: dificuldade de sincronismo das portadoras, sensibilidade aos desvios de freqüência e necessidade de amplificação decorrente do fato de o sinal transmitido não exibir uma natureza constante em sua envoltória, necessitando de um amplificador de potência altamente linear, para

evitar as interferências nas faixas de freqüências mais elevadas devido aos harmônicos das portadoras. Tais harmônicos são gerados na faixa não-linear do amplificador de potência e representam um fato importante nas técnicas de modulação

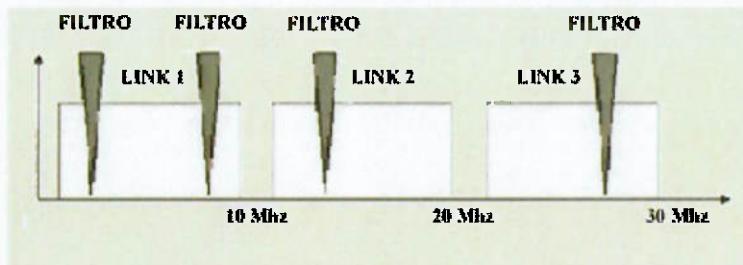


Figura 21 - Sistema OFDM com filtros

9.3 - A seqüência direta de espalhamento do espectro, DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

A técnica da modulação do espectro de propagação é usada extensamente em aplicações militares. Fornece uma densidade espectral da potência muito baixa espalhando a potência do sinal sobre uma faixa de freqüência muito larga. Este tipo de modulação requer, consequentemente, uma largura de faixa muito grande para transmitir diversos Mbits/s. Como a largura de faixa disponível é limitada, esta técnica é ideal para transmitir taxas de dados mais baixas nos cabos de energia elétrica.

É um sistema com alta capacidade de rejeição de interferências (intencionais ou não) devido à geração de códigos pseudo-aleatórios.

9.4 - Modulações estreitas da faixa, GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying)

A Modulação GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) é o mesmo método de modulação utilizado na modulação GSM (Global System for Mobile Communications). O GMSK é um tipo especial de modulação de faixa estreita que transmite os dados na fase da portadora, resultando um sinal de envelope constante. Isto permite o uso de amplificadores menos complexos, sem produzir distúrbios harmônicos.

10 - Aspectos econômicos, Vantagens e Desvantagens

O PLC é uma tecnologia que se encaixa perfeitamente em qualquer segmento do mercado, quer seja ele residencial, corporativo, escolas públicas ou privadas, PMEs ou instituições governamentais como alternativa para o atendimento das necessidades de serviços que exijam banda larga.

É uma tecnologia com grande tendência em se popularizar em razão da simplicidade de instalação e na característica principal de mobilidade, uma vez que uma tomada de energia elétrica se transforma em um ponto de rede LAN de alta velocidade e baixo custo. Além disso, o PLC passa a ser uma alternativa de ultima milha, pois permite converter a malha secundária de uma concessionária de energia elétrica em uma rede de dados de banda larga similar às tradicionais redes LAN, e da mesma forma, disponibiliza a interface Ethernet para o usuário final.

O PLC pode ser considerado um potencial concorrente das tecnologias xDSL e Cable Modem para acesso em banda larga, e poderá viabilizar o unbundling uma vez que a grande vantagem está na capilaridade oferecida pela rede de energia elétrica que alcança 94% dos domicílios brasileiros, segundo censo do IBGE de 2000, tornando-se muito interessante como alternativa de ultima milha e ultima polegada para espelhos e novos entrantes no mercado de telecomunicações, além de possibilitar a viabilidade de projetos sociais do governo como a inclusão social.

A ubiqüidade proporcionada pelo PLC em ambientes externos e internos é uma de suas principais características:

- No caso de ambientes internos (Indoor), as tomadas de energia elétrica existentes na maioria dos cômodos de uma edificação são transformadas em pontos de conexão.
- Nos ambientes externos (Outdoor), a rede de energia elétrica de baixa e media tensão é a infraestrutura com maior penetração no país. Neste caso, o PLC se apresenta como solução viável técnica e econômica para atingir áreas de baixa densidade populacional.
- Uma análise econômica comparativa entre o PLC e outras duas tecnologias de acesso banda larga como o ADSL e o HFC (Cable Modem) indica que a economia proporcionada pelo PLC tende a crescer com o declínio dos custos dos equipamentos e em consequência do crescimento esperado para o mercado de banda larga.
- O PLC nasceu na era da internet e utiliza o protocolo IP na integração de rede e serviços. Através de um único modem o usuário poderá acessar a internet, telefônica (VoIP), TV Interativa, segurança, etc. reduzindo custos com equipamentos desnecessários para o acesso dos serviços.

Uma das grandes desvantagens do uso do PLC é que qualquer "ponto de energia" pode se tornar um ponto de interferência, ou seja, todos os outros equipamentos que utilizam radiofreqüência, como receptores de rádio, telefones sem fio, alguns tipos de interfones e, dependendo da situação, até televisores, podem sofrer interferência, pois a tecnologia usa a faixa de freqüências de 1,7MHz a 30MHz, com espalhamento de harmônicos até freqüências mais altas. Em alguns países, existem movimentos contra a sua instalação.

11 – Anexo I - Teoria do Espectro de Potência

Se $x(t)$ for um sinal de potência determinístico a sua função de autocorrelação é definida como:

$$R_X(\tau) = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_0 T_0^2} \int_{t_0}^{t_0 + T_0} x(t + \tau) x(t) dt$$

Se $x(t)$ for um sinal periódico com período T a sua função de autocorrelação também é periódica com o mesmo período

$$R_X(\tau) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t + \tau) x(t) dt \quad t \text{ — constante}$$

A densidade expectral de potência de $x(t)$ é a transformada de Fourier da função de autocorrelação

$$S_X(f) = F[R_X(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_X(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau$$

Teorema de Wiener-Khintchine (Espectro de Potência representado como integral do tempo)

Significa que a transformada de Fourier inversa de $S_X(f)$ é $R_X(\tau)$

$$R_X(\tau) = F^{-1}[S_X(f)] = \int_{-\infty}^{\infty} S_X(f) e^{j2\pi f \tau} df$$

A potência média do sinal é igual ao valor da sua função de autocorrelação na origem ($\tau = 0$)

$$P = R_X(0) = \left[\int_{-\infty}^{\infty} S_X(f) e^{j2\pi f \tau} df \right]_{\tau=0} = \int_{-\infty}^{\infty} S_X(f) df \quad [4]$$

12 - Referências Bibliográficas

[1] PLC

<http://www.powerlinecommunications.net>

http://www.archnetco.com/english/product/product_s1.htm

[2] Broadband Over Power Line (BPL) and Amateur Radio

<http://www.wirelessbrasil.org>

<http://www.arrl.org/tis/info/HTML/plc/>

[3] Sky DSP Adaptive Techniques for Multiuser OFDM 2001

http://www.skydsp.com/publications/phd_sem/index.htm

[4] Analysis of Linear System

Cheng, David Keun, Addison-Wesley Series in Electrical Engineering

[5] Uso de Power Line Carrier em Iluminação Pública, Projeto de Formatura 2004

Érico Luis de San Vicente, Fredy Takao Aoyagui

[6] A Power Line Communication Network Infrastructure For The Smart Home

Yu-Ju Lin, Haniph A. Latchman, University Of California

[7] Power Frequency Interference Rejection in Power Line Carrier Communication

Wang Huakui, Zhang Liyi, Han Yingzheng, Taiyuan University of Technology

[8] Load Profile and Communication Channel Characteristics of the Low Voltage Grid

Lars Selander, Tonny Mortensen, Goran Lindell, Lund University

[9] Avaliação Tecnológica do PLC “In Home”

Marília Munhoz da Rocha Zimmermann, Universidade Regional de Blumenau

[10] Power Quality Application Guide: Voltage Disturbances

Voltage Characteristics in Public Distribution Systems, Copper Development Association

[11] PLC System Performance Analysis Regarding Power Quality Disturbances

Vellano N. V., Solleto K. T., Pimentel P. R., César L.S., Baldissin A. S.

[12] Digital Communications

J.G. Proakis, McGrawHill, 1995

