



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
Trabalho de Conclusão de Curso

Transmissão de Dados Através da Rede Elétrica

Diogo Marcel Silva Lopes

Campina Grande, Setembro de 2008



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Transmissão de Dados Através da Rede Elétrica

Trabalho de conclusão de curso apresentada à
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da UFCG, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Edmar Candeia Gurjão

Campina Grande, setembro de 2008

Diogo Marcel Silva Lopes

Transmissão de Dados Através da Rede Elétrica

Trabalho de conclusão de curso apresentada à
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da UFCG, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em _____ de _____ de 2008

Banca Examinadora

Orientador: Edmar Candeia Gurjão

Examinador: Bruno Barbosa Albert

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter sempre iluminado meu caminho. Aos meus pais e irmãos, por todo o apoio, incentivos e exemplos de vida. Aos amigos e colegas de jornada, em especial a Euler Macedo pela dedicação e ajuda no desenvolvimento desse projeto. Ao meu orientador por quem tenho admiração e respeito. E por fim, a todos aqueles que sempre torceram para que eu viesse a me tornar um Engenheiro Eletricista.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Lista de Figuras..... | 7 |
| Lista de tabelas | 9 |
| RESUMO | 10 |
| ABSTRACT | 11 |
| 1 Introdução..... | 12 |
| 1.2 Objetivos do trabalho..... | 13 |
| 1.3 Benefícios..... | 14 |
| 1.4 Desafios | 14 |
| 1.5 Organização do trabalho..... | 16 |
| 2 A Rede Elétrica Como Canal de Comunicação..... | 17 |
| 2.1 Introdução..... | 17 |
| 2.2 Restrições Técnicas..... | 17 |
| 2.2.1 Impedância variável..... | 17 |
| 2.2.2 Indutância elevada dos fios | 18 |
| 2.2.3 Filtros EMC de eletrodomésticos | 18 |
| 2.2.4 Distorção de sinal | 18 |
| 2.2.5 Instalações trifásicas | 19 |
| 2.3 Efeitos na Transmissão..... | 19 |
| 2.3.1 Ruídos Presentes na Rede..... | 20 |
| 2.3.2 Atenuação de Sinais..... | 21 |
| 2.3.3 Atenuação em Função da Distância..... | 21 |
| 2.3.4 Atenuação em Freqüência..... | 22 |
| 2.4 Regulamentação | 24 |
| 3 Métodos de Modulação Digital Para Transmissão de Dados..... | 26 |
| 3.1 Introdução..... | 26 |
| 3.2 Processo de Modulação..... | 26 |
| 3.3 Transmissão Digital com Portadoras | 27 |
| 3.3.1 ASK (<i>Amplitude Shift-Keying</i>)..... | 28 |
| 3.3.2 PSK (<i>Phase Shift Keying</i>)..... | 29 |
| 3.3.3 FSK (<i>Frequency Shift Keying</i>) | 31 |
| 4 Implementação Prática | 34 |
| 4.1 Introdução..... | 34 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2 Sistema de Transmissão PLC..... | 34 |
| 4.2.1 Determinação das Freqüências..... | 35 |
| 4.2.2 Modulador FSK..... | 36 |
| 4.2.2 Demodulador FSK..... | 40 |
| 4.3 Rede de Acoplamento..... | 43 |
| 4.3.1 Construção dos Transformadores..... | 44 |
| 4.3.2 Amplificador de Acoplamento..... | 45 |
| Figura 26: Circuito Amplificador..... | 45 |
| 5 Análise Experimental do Sistema PLC..... | 46 |
| 5.1 Introdução..... | 46 |
| 5.2 Planejamento dos experimentos..... | 46 |
| 5.2.1 Considerações sobre os experimentos..... | 46 |
| 5.2.2 Configurações de teste do sistema de controle PLC..... | 47 |
| 5.3 Resultados dos experimentos..... | 49 |
| 5.4 Análise dos Resultados..... | 51 |
| 5.4.1 Influência da distância..... | 51 |
| 5.4.2 Influência da taxa de erro por bit transmitido..... | 53 |
| 6 Considerações Finais..... | 54 |
| Bibliografia..... | 55 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Resultados do experimento A..... | 49 |
| Tabela 2: Resultados do experimento B..... | 50 |
| Tabela 3: Caracteres recebidos e reconhecidos..... | 50 |
| Tabela 4: Análise dos resultados da frequência do sinal transmitido..... | 51 |
| Tabela 5: Média dos valores da frequência do sinal recebido..... | 51 |
| Tabela 6: Cálculo da atenuação no sinal recebido..... | 52 |
| Tabela 7: Erro por Bit transmitido..... | 53 |

RESUMO

O trabalho apresentado aborda um método de comunicação para a transmissão de informação que vem emergindo nos últimos anos: o uso da rede elétrica como meio de comunicação (PLC, sigla em inglês para *Powerline Communication*) entre equipamentos elétricos e computadores aplicados à automação residencial e predial.

Estudos mostram que esta nova tecnologia promete elevar muito as taxas de transmissão de dados para o usuário final. Outro fator muito relevante é a capilaridade que o sistema pode atingir. Hoje segundo dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), são 47 milhões de unidades consumidoras, das quais 85% são consumidores residenciais, em mais de 99% dos municípios brasileiros.

O trabalho aborda a pesquisa e desenvolvimento de um sistema de transmissão de dados que utiliza a rede elétrica de baixa tensão existente e que será constituído de: um circuito transmissor conectado a um computador, que envia os comandos para os dispositivos a serem controlados; e uma unidade alvo, onde serão conectados os circuitos receptores que serão comandados.

O sistema projetado utiliza circuitos integrados especiais que condicionam e tratam os sinais provenientes da rede elétrica com método de modulação definido, e circuitos acopladores que realizaram o isolamento entre os equipamentos e a rede elétrica de 220 v.

No trabalho, também são abordadas as características do meio de transmissão (rede elétrica), uma vez que este tem importância fundamental na recuperação do sinal e na eficiência do sistema, assim como os métodos existentes de modulação digital de sinais.

Palavras Chave: PLC; Rede elétrica; Transmissão de dados; Modulação FSK.

ABSTRACT

The presented work presents the implementation of a communication system device based on the technology *Powerline Communication*. This kind of technology uses the existing electric system network to perform the data transmission and can be used to residential automation.

Studies shows that this technology promises increase the data-communication baud to the final user applications. Another very excellent characteristic is the capillarity distribution that the system can achieve. Today according to ANEEL (National Agency of Electric Energy) data from 47 million consumers, 85%of this amount is residential and are distributed in over 99% of the Brazilian cities.

This work presents the used methodology of research and development of a communication system used for transmitting data using the low voltage power system network. The system is composed of a transmitter circuit connected to a personal computer and it is connected in the electric system using a magnetic coupler, this device sends the data to the receiver and other devices that can be controlled.

The developed system is based on special integrated circuits that conditioning and adjust the signals received from the power network with the defined modulation method, and magnetic couplers circuits performed the isolation between the equipment and the 220 V network voltage.

In the work, the characteristics of communication channel are discussed (low power voltage network), since this has fundamental importance in the data reception and the system efficiency, as well as the existing methods of digital signal modulation.

Keywords: PLC; electric network; data transmission; FSK modulation

1 Introdução

Com o advento de novas tecnologias e o surgimento de novos meios de comunicação, o PLC (*Power Line Communications*) apresenta-se como mais uma tecnologia de acesso à transmissão de sinais de dados, com larga faixa de segurança e confiabilidade.

Utilizando a rede elétrica existente como canal de comunicação, esta tecnologia permite o fluxo de informações através do um mesmo cabo compartilhado que fornece energia elétrica. Como consequência, transforma potencialmente cada tomada de energia já existente em um ponto de acesso a uma rede de comunicação de dados.

Embora muito promissor, o sistema têm enfrentado inúmeros problemas relativos à interferência e ruídos. As primeiras implementações foram difíceis, porque a rede elétrica sofre interferências, como a inserção de harmônicos de equipamentos ligados a ela. Em casa, isso acontece quando se liga um secador ou um liquidificador e o mesmo interfere na TV ou no rádio, por exemplo.

Apenas nos últimos anos a tecnologia PLC vem tendo aplicações e usos disseminados mundialmente. Sua situação atual, em especial, dos produtos já disponíveis para uso no mercado, pode ser assim resumida (Rodrigues, 2004. p.8):

- Disponibiliza canais de comunicação com taxas de até 200 Mbps, possibilitando aplicações de acesso básico internet, voz, dados e distribuição de vídeo e áudio;
- Utiliza todo o cabeamento da rede elétrica de média e baixa tensão, acoplando à rede equipamentos que, sem interferir na condução normal da energia elétrica, inserem os sinais de dados na rede.

Diversas concessionárias de energia no Brasil já realizaram experiências piloto, no sentido de se avaliar as potencialidades da tecnologia PLC para transmissão de voz e dados pela rede elétrica, entre elas a Eletropaulo (São Paulo, SP), CELG (Goiânia, GO), CEMIG (Belo Horizonte, MG), COPEL (Curitiba, PR) e Light (Rio de Janeiro, RJ) (Rodrigues, 2004. p.37-44).

1.2 Objetivos do trabalho

A principal motivação desse trabalho está em demonstrar a versatilidade da tecnologia PLC em projetos de automação residencial, comprovando a sua diversidade de aplicações e sua confiabilidade. O trabalho estará baseado no estudo qualitativo e estatístico da transmissão de dados, onde serão efetuadas transmissões em um sistema de comunicação *simplex* que deverá ser desenvolvido, como está mostrado na Figura 1.

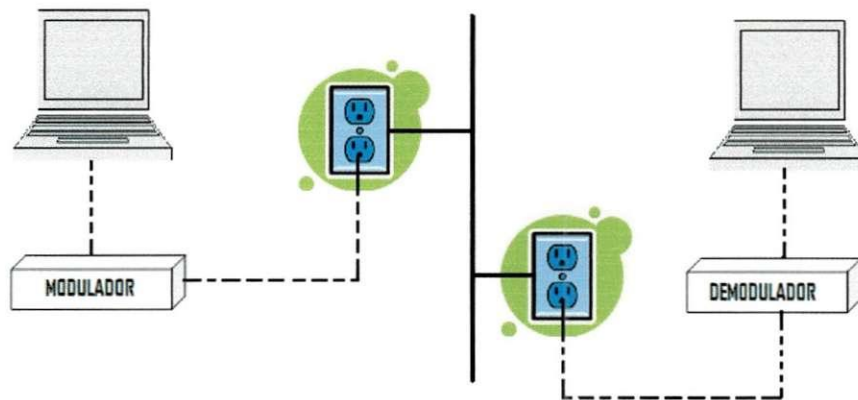


Figura 1- Modelo da arquitetura PLC do sistema

Será utilizada na transmissão a modulação do tipo chaveamento de frequência (*Frequency Shift Keying – FSK*) devido à sua maior imunidade a ruídos e maior facilidade de implementação. Os modems são compostos por circuitos moduladores, demoduladores, amplificadores e pelas redes de acoplamento. .

O modulador implementado baseia-se no circuito integrado XR-2206, o qual é um gerador de funções capaz de produzir senóides de alta qualidade. Suas formas de onda podem ter a frequência modulada por uma tensão elétrica externa. Podem ser geradas duas frequências FSK independentes. Assim, as frequências são chaveadas entre dois níveis f_1 e f_2 .

Já o demodulador será implementado através do circuito integrado XR-2211 que utiliza um PLL (*Phase Locked Loop*) projetado especialmente para aplicações de transmissões de dados. O PLL rastreia o sinal de entrada na banda de passagem projetada.

O circuito amplificador servirá para efetuar o casamento entre a saída do modulador e a entrada da rede de acoplamento bem como, para fornecer potência suficiente ao sinal modulado para transpor a rede de acoplamento.

1.3 Benefícios

Esta técnica em transmissão de informações ajuda a superar o obstáculo existente entre redes elétricas e redes de comunicação. O avanço dessa tecnologia possibilitará a construção de edificações inteligentes e facilitará a interligação entre equipamentos, como por exemplo, em redes locais de trabalho. E este será o maior benefício na utilização de sistemas PLC, com a integração da transmissão de sinais de comunicação e sinais 60 Hz de energia elétrica em um mesmo condutor.

O link de dados tornasse “transparente” para o usuário, embora o equipamento esteja conectado à rede elétrica, tem-se a impressão de que existe um canal separado dedicado à transmissão de dados. Isto também trás com benefício à redução com custos no momento em que não é necessária a criação de um sistema dedicado de comunicação de dados.

Os sistemas de controle distribuídos são hoje a principal aplicação de sistemas *powerline*. As aplicações vão desde o controle de ambientes em edifícios até, a administração e operação de sistemas elétricos de distribuição. Um exemplo seria o controle de aquecimento, da ventilação e do sistema de ar-condicionado em um edifício comercial ou uma indústria. Um sistema de controle deste tipo tem muitos sensores, extensamente espalhados, que medem tanto a umidade do ar quanto a temperatura. Sensores adicionais monitoram a operação destes equipamentos. Em resposta às condições determinadas pelos sensores, o controle do sistema pode tomar certas atitudes, como, por exemplo, fechar ou abrir um duto de ventilação.

Nos sistemas comuns (i.e, que não utilizam a tecnologia *powerline*), cada um dos sensores, é ligado através de um cabo diretamente ao controle central. Em geral, tal cabeamento (com raras exceções) é extremamente dispendioso.

Em geral, o uso de sistemas baseado em tecnologia *powerline* pode ser empregado nas seguintes situações (DUQUE,2001):

- É impraticável ou com custo proibitivo a instalação de cabeamento exclusivo;
- É preciso transferir baixas ou médias quantidades de dados entre múltiplos nós;
- A rede AC (ou DC) está disponível para a comunicação.

1.4 Desafios

Quando os cabos elétricos são utilizados como meio de transmissão, a instalação elétrica domiciliar comporta-se como uma rede de dados onde cada “tomada elétrica” é um ponto de conexão da rede.

O PLC pode utilizar redes de distribuição secundária, onde estão conectados os consumidores, com abrangência de alguns quarteirões por circuito. Requer baixo investimento, pois as tomadas de energia elétrica já serão os pontos de entrada e saída

de dados.

Um dos maiores problemas até hoje no desenvolvimento do PLC está na modulação de sinais. Alguns tipos de modulação utilizados no início da tecnologia PLC são muito sensíveis ao agressivo meio de transmissão "Rede Elétrica". (Rodrigues, 2004. p.12)

Embora a tecnologia PLC ainda não esteja totalmente pronta e regulamentada, algumas vantagens podem ser citadas para mostrar que o PLC é uma alternativa viável para transmissão de dados em banda larga (Rodrigues, 2004. p.16):

- Alta capilaridade do sistema elétrico para diminuição dos custos de implantação;
- Não há necessidade de novo cabeamento (a rede já está ~~pronta~~);
- Barramento compartilhado (significa custo compartilhado);
- Oportunidade de novos negócios e diversificação de atividades;
- Rede doméstica com novas e múltiplas aplicações;
- Fácil instalação.

As desvantagens que atualmente impedem uma massificação da tecnologia PLC estão principalmente ligadas à padronização e regulamentação e em parte pela diversificação e qualidade das redes de distribuição de energia elétrica:

- Mesmo nos países onde já existe exploração comercial, não existe uma regulamentação forte aceita mundialmente. Cada país vem condicionando a regulamentação conforme os avanços da tecnologia. No Brasil, ainda não existe sequer uma regulamentação. Existe apenas uma autorização da ANATEL para realização de testes com a tecnologia;
- A padronização também é outro grande empecilho, apesar das tentativas do PLC fórum, *HomePlug Alliance*, ANATEL e outros órgãos;
- A qualidade das redes elétricas é um problema para algumas concessionárias brasileiras que possuem redes antigas e com necessidade de melhorias até mesmo para o fornecimento de energia elétrica;
- Falta escala de produção, o que encarece os equipamentos;
- O excesso de ruído na rede elétrica brasileira diminui a velocidade de transmissão e pode até silenciar o sinal.

1.5 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em outros cinco capítulos. No capítulo 2 é apresentado um estudo sobre a rede elétrica vista como canal de comunicação de dados, abrangendo os desafios encontrados (ruído, impedância e atenuação) em sua utilização para esse fim. Ao final do capítulo 2 são apresentadas as normas de regulamentação que definem as larguras de banda disponíveis para PLC. No capítulo 3 são apresentados os fundamentos de modulação que possibilitam a comunicação através da rede elétrica.

O capítulo 4 detalha as implementações práticas um sistema de comunicações baseado na tecnologia PLC, assim como os dispositivos que foram escolhidos e os circuitos utilizados. São discutidos os resultados de testes de cada uma das partes do sistema, os problemas encontrados e as suas soluções.

No capítulo 5 são descritos os experimentos realizados com o protótipo do sistema, bem como os resultados inerentes aos mesmos, que tem como objetivo verificar a funcionalidade e a eficiência do sistema em redes elétricas reais.

Finalmente no sexto capítulo conclui-se este trabalho.

2 A Rede Elétrica Como Canal de Comunicação

2.1 Introdução

Serão abordadas neste capítulo as características da rede elétrica como canal de transmissão de dados, restrições técnicas e as tecnologias ou métodos empregados para solucioná-los.

2.2 Restrições Técnicas

Como sabemos as redes elétricas não são projetadas para a comunicação de dados entre dispositivos. Os níveis de ruídos e a atenuação são excessivos em frequências altas (se comparadas a 60Hz para o qual a rede foi projetada), sem levar em conta que parâmetros como impedância e atenuação são variantes no tempo e aleatórios.

A rede elétrica é um canal de transmissão instável na qual a variação de sua impedância com o tempo e com a frequência, e sua variação temporal da sua resposta ao impulso são devidos à grande diversidade de equipamento que podem ser conectados a ela. A impedância dos canais PLC é altamente variante com a frequência, fortemente dependente da localização, tipo e topologia das redes e equipamentos conectados a ela. (Hrasnica et al., 2005)

2.2.1 Impedância variável

A rede elétrica de uma residência é montada de forma que todos os eletrodomésticos, lâmpadas e outros dispositivos sejam ligados em paralelo com a alimentação. Assim a impedância da rede elétrica varia não só de casa para casa, e de tomada para tomada, mas conforme aparelhos são ligados e desligados. O dispositivo que injetar um sinal de alta frequência na rede, entre uma fase e o neutro, enxergará uma carga em paralelo que pode variar de várias centenas de ohms, quando nenhum aparelho estiver ligado e o único consumidor de sinal for a rede de fornecimento, a apenas três ohms, considerando um disjuntor de 40A e cargas resistivas em uma tensão de 127V (pior caso). Um chuveiro é um bom exemplo de carga capaz de mudar totalmente o comportamento da rede. (Marques, 2004)

Quadros de distribuição, fios espalhados, emendas e interruptores também afetam a impedância da rede elétrica.

2.2.2 Indutância elevada dos fios

Os fios que conduzem energia são normalmente longos e espessos, sem nenhum tipo de blindagem, apresentando uma elevada indutância, que para as frequências mais altas, representa uma forte atenuação de sinal.

Para um fio paralelo comum, como o usado em extensões, a indutância é de 0.6mH por metro em média, o que equivale a uma impedância (reatância indutiva) de 4,5 ohms a cada 10 metros. Esta indutância é tal que transmissões PLC raramente ultrapassam 600m de fio quando existem cargas em paralelo e, além disso, a indutância dos fios está sempre presente, diferentemente das cargas parasitas e ruídos.

2.2.3 Filtros EMC de eletrodomésticos

Como a carga para o sinal injetado é de natureza reativa, além de resistiva, cada eletrodoméstico terá um comportamento diferente, às vezes independente de seu consumo, como é o caso dos televisores, que possuem filtros passa-baixas contra interferências vindas da alimentação.

Estes filtros são basicamente uma seqüência de capacitores em paralelo com o circuito de alimentação e bobinas em série. Os capacitores têm normalmente menos de 5 mF, mas para uma portadora de 120kHz um capacitor de apenas 1 mF se comporta como uma carga de 1,3 ohm. O que equivale a uma absurda carga resistiva de 37KW.

2.2.4 Distorção de sinal

Mais uma vez o grande vilão são as fontes chaveadas, desta vez por gerarem frequências com harmônicas iguais ou muito próximas à da portadora, modificando o sinal detectado. Como a primeira etapa de uma fonte chaveada é um retificador de onda completa, e este só absorve energia da rede durante os picos de onda, o sinal de baixa frequência que a portadora carrega acaba sendo modulado pela variação de carga e harmônicas da fonte com um ruído intenso de 120 Hz.

Podem ocorrer ainda ecos da portadora devido a sinais que rebatem em terminações de fios e defasagem entre portadoras de diferentes frequências, no caso de mais de uma ser utilizada.

2.2.5 Instalações trifásicas

Em pequenas residências a alimentação é feita com apenas uma fase, e desta forma todos os aparelhos da casa são ligados à rede em paralelo. Assim não importa em que pontos da rede (tomada) sejam ligados os dispositivos PLC, estarão sempre ligados ao mesmo par de fios.

Já em residências maiores, ou mais recentes, a alimentação é trifásica, e a distribuição dos pontos de energia é feita visando igualar a carga em cada fase. O resultado é que em uma mesma casa temos tomadas ligadas a redes diferentes, visto que só o neutro é comum a todas. Ainda que as três fases sejam provenientes do transformador da rua, este é um enorme indutor, capaz de barrar quase completamente as frequências elevadas de pularem entre as fases.

A situação pode ser corrigida colocando-se acopladores entre as fases, que atuam como condutores para o sinal, como no desenho abaixo:

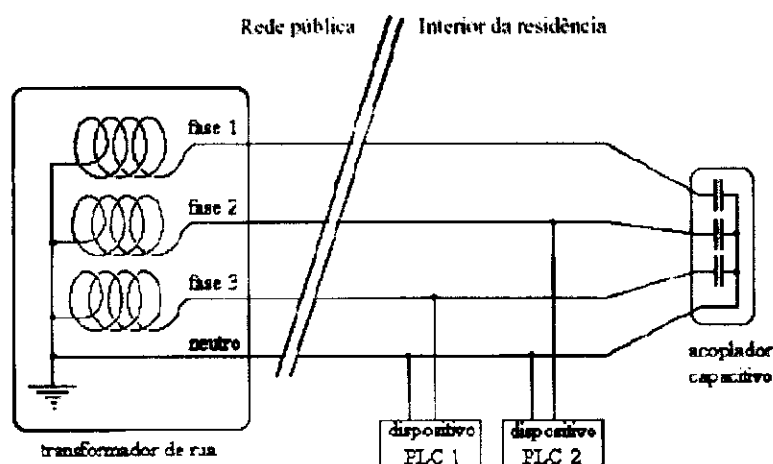


Figura 2 - Esquema de rede trifásica

2.3 Efeitos na Transmissão

Um dos grandes problemas na transmissão de dados em redes de energia elétrica é a injeção de portadoras de alta frequência, necessárias para se alcançar taxas de comunicação adequadas à automação residencial. A rede de energia elétrica, bem como seus componentes (transformadores, capacitores, linhas de transmissão, motores, etc.) tem seu projeto fixado para que haja uma maior eficiência na frequência de operação de 60 Hz, ou em outras palavras, a rede elétrica é projetada para fornecer potência, e não para transmitir dados.

Os principais efeitos na transmissão de dados em redes elétricas podem ser vistos na figura abaixo.

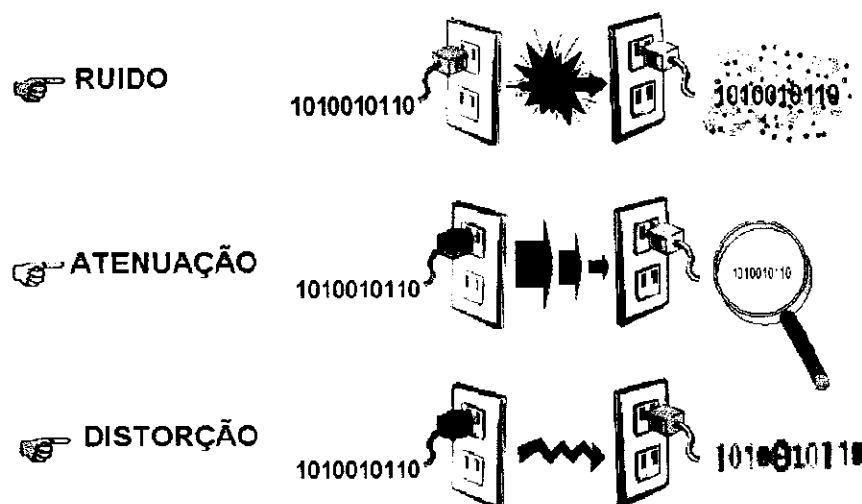


Figura 3 – Principais obstáculos enfrentados na transmissão de dados: ruído, atenuação e distorção, retirada de (SUTTERLIN,2001)

2.3.1 Ruídos Presentes na Rede

Ruído elétrico é o termo utilizado para descrever a interferência na rede elétrica causada por emissão eletromagnética (EMI – *Eletromagnetic Interference*) ou por transmissões de rádio frequência (RFI – *Radio-Frequency Interference*). Quase sempre estas interferências se "somam" ao sinal elétrico alterando suas características. Os principais causadores de RFI são: os transmissores de estações de rádio e TV, as linhas de transmissão de energia de alta potência, eletrodomésticos e as lâmpadas fluorescentes. Já os causadores de EMI mais comuns são: contatos elétricos defeituosos, torres de alta tensão, lâmpadas fluorescentes, dimmers, etc.

Difícilmente o ruído causa problemas muito graves. Os efeitos mais comuns são alguns travamentos no sistema, reinicializações esporádicas, distorções na imagem do monitor, etc. São apresentadas aqui as principais fontes de ruído intermitente ou contínuo.

Motores com escovas: Motores universais, usados em aspiradores de pó, liquidificadores, furadeiras e máquinas de lavar entre outros possuem escovas que geram faíscas constantemente, provenientes do contínuo ligamento e desligamento do rotor, gerando ruído intenso que se estende até alguns kilohertz.

Fontes chaveadas: Fontes chaveadas operam com frequências de chaveamento de 20 kHz a 1 MHz, e este chaveamento produz harmônicas em um amplo espectro. Atualmente, devido a seu pequeno volume em relação à potência são amplamente utilizadas em aparelhos eletrônicos como televisores, computadores e aparelhos de som.

Além disso, o fato de possuírem um retificador de entrada com um capacitor de grande valor faz com que sua impedância varie em função da senoide da rede elétrica, produzindo ruídos de baixa frequência muito fortes.

Dimmers: São controladores de potência baseados em chaveamento a tiristor, em aplicações residenciais são utilizados para controle de intensidade luminosa normalmente, mas algumas máquinas de lavar e mesmo chuveiros e aquecedores fazem uso deste tipo de controle. Estes aparelhos geram ruídos continuamente, numa faixa de frequências de 120 Hz com harmônicas até alguns kilohertz.

Fluorescentes compactas: Cada vez mais esse tipo de lâmpada é encontrado nas residências e prédios, devido a seu baixo consumo (alta eficiência) e por não apresentarem os inconvenientes das fluorescentes comuns. No entanto estas lâmpadas não possuem um reator indutivo, como as convencionais, e sim uma fonte chaveada que opera a alta frequência, dispensando o starter, mas injetando ruído da ordem de alguns kilohertz na rede elétrica.

Entretanto, sugere-se que os sistemas PLC devem ser desenvolvidos utilizando-se métodos de modulação e filtros que anulem ou evitem as frequências atingidas pelos tipos de ruídos apresentados.

2.3.2 Atenuação de Sinais

Considerando os comentários feitos para caracterizar os canais PLC e as descrições encontradas na literatura, constata-se que ao utilizar a rede elétrica para transmissão de dados, deve-se lidar de forma apropriada com os seguintes problemas:

- Atenuação do sinal em função do aumento da distância;
- Atenuação em função do aumento da frequência;
- Atenuação seletiva na frequência;
- Variação da impedância de entrada na rede elétrica, com a variação da frequência;
- Comportamento ciclo-variante no tempo do canal.

2.3.3 Atenuação em Função da Distância

A dependência da distância e da frequência da atenuação de sinais transmitidos por canais PLC nas redes BT externas, é mostrada na figura 3. Nesta figura, o perfil de atenuação é função dos parâmetros básicos do canal. Destacam-se cinco situações diferenciadas pelas distâncias de 100m, 150m, 200m, 300m e 380m, resultando em grupos de funções de atenuações com características diferentes entre si, o que demonstra a forte dependência da atenuação com a distância.

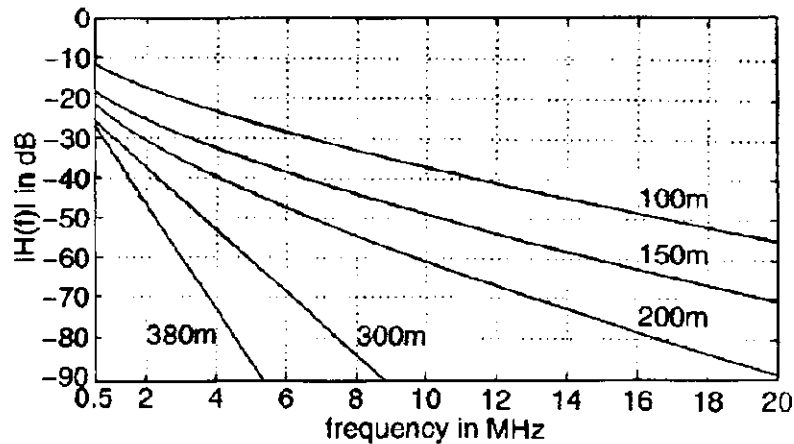


Figura 4 - Atenuação em função do aumento da distância e da frequência. Retirado de (Zimmerman & Dostert, 1999)

Baseado em pesquisas de literatura disponível sobre a modelagem de redes elétricas prediais, em relação às distorções nos sinais de comunicação, podemos resumir que:

- As cargas localizadas entre fases diferentes fornecem um caminho de condução do sinal, porém resultam em uma atenuação entre dois pontos;
- A atenuação dos canais de comunicação é particularmente alta quando o caminho de condução do sinal entre o transmissor e o receptor é longo e contém diversas cargas espalhadas;
- A variação da carga causa mudanças nas características em frequência entre dois pontos;
- Para altas frequências, podem ocorrer efeitos na linha de transmissão quando o caminho entre o transmissor e o receptor é longo. Um sinal de 100 kHz tem 3000m de comprimento de onda, logo, distâncias superiores a 500m podem ocasionar efeitos de linha de transmissão.

2.3.4 Atenuação em Frequência

Ao propagar-se pelo canal, o sinal sofre mudanças tanto de amplitude como de fase, ocasionadas pela absorção de energia do sinal pelo canal. Em uma rede elétrica residencial, tais mudanças são em função da quantidade de cargas ligadas na linha, da geometria e disposição dos condutores, dos tipos de equipamentos instalados, etc. Como tais fatores não são constantes, nem sempre uma relação matemática pode ser encontrada.

Uma solução é a obtenção de parâmetros da atenuação em sistemas elétricos que possam ser considerados representativos. Isso pode ser feito através de medidas de

atenuação de sinais com frequência variável, injetados em pontos estratégicos da rede elétrica, como mostrado na figura abaixo. (Duque, 2001)

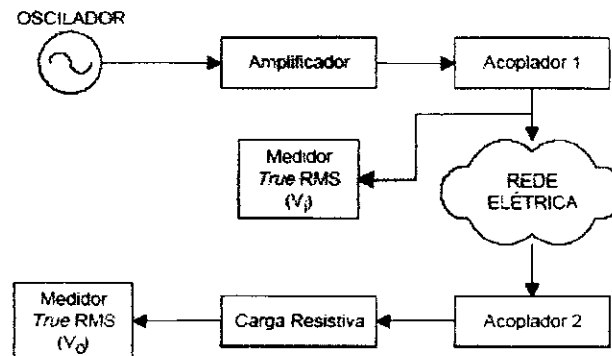


Figura 5 - Obtenção experimental da atenuação em redes elétricas. (Duque, 2001)

O valor em módulo da atenuação da rede elétrica para uma frequência de entrada f_i , em função de uma tensão de entrada V_i e de saída V_o (RMS) é dado por:

$$A(f_i)db = 20 \log\left(\frac{\overline{V_o}}{V_i}\right)$$

Onde a barra indica uma média dos sinais injetados na rede, procedimento necessário para anular o ruído produzido pela rede.

As características da atenuação em frequência em redes elétricas podem ser resumidas abaixo (DUQUE, 2001):

- Exceto por casos onde o caminho em que o sinal percorre é curto, a atenuação em redes elétricas doméstica é tipicamente maior que 20 dB, a não ser que o transmissor e o receptor se situem na mesma fase.
- Quando o transmissor e o receptor estão na mesma fase, a atenuação tende a ser menor do que se estivessem em fases diferentes. Entretanto, as diferenças entre as atenuações na mesma fase e de fases diferentes não são tão significativas. Podem ocorrer casos em que a atenuação na mesma fase seja maior que em fases diferentes.
- A atenuação do sinal tende a crescer com a frequência, embora tal crescimento não seja sempre proporcional.
- A variação das cargas em uma rede elétrica afeta a atenuação da rede elétrica. Como o perfil das cargas varia com o tempo, a atenuação pode ser considerada variante no tempo sobre qualquer frequência. Variações de 20 dB não são difíceis de ocorrer.
- Não é possível encontrar um modelo matemático geral para a modelagem do canal de redes elétricas domésticas

Por fim, podemos ressaltar algumas características que podem ser de vital importância para a transmissão de dados em redes elétricas, tais como:

- Impedância característica uniforme ao longo da linha;
- Baixa atenuação para sinais transmitidos;
- Baixa reflexão e baixa irradiação;
- Baixa captação de sinais externos e ruídos.

O que raramente poderá ser encontrado em uma rede elétrica doméstica, pois como foi afirmado no início do presente capítulo, a rede elétrica é um sistema projetado para transmissão de energia, e não dados. Esta simples afirmação resume uma longa lista de características que diferem uma rede de transmissão de dados do meio físico que se pretende utilizar.

2.4 Regulamentação

As Frequências utilizadas pelos dispositivos de comunicação ao longo de Redes PLC são restringidas pelas limitações impostas por agências reguladoras. Estes regulamentos são desenvolvidos para assegurar uma coexistência harmoniosa de vários dispositivos eletromagnéticos no mesmo ambiente.

Na América do Norte a banda de frequência de 0 a 500 kHz pode ser utilizada em comunicações via rede elétrica, restrição imposta pela FCC americana (Comissão Federal de Comunicações). No entanto, as normas reguladoras da Europa são mais rigorosas. A norma CENELEC (Comitê Europeu de Normalização Elétrica) EN50065 "Sinais na Rede Elétrica de Baixa Tensão" apresenta regulamentações em parâmetros importantes como faixa de frequência e potência do sinal. Essa norma permite que sistemas PLC operem em faixas de frequências entre 3 kHz e 148,5 kHz. Isto impõe duras restrições aos sistemas PLC e poderá não ser suficiente para suportar altas taxa de transmissão, tais como aplicação de vídeo em tempo real, dependendo do desempenho necessário. Por outro lado, evita interferências nas transmissões de ondas de rádio.

De acordo com a presente norma o espectro está dividido em cinco faixas. Elas são: (Pinho, 2005)

- 1) A faixa de 3 a 95 kHz, também chamada de Banda A, é limitada para fornecedores de energia e seus concessionários, e é reservada para uso de telemetria, como coletas de dados de consumo dos usuários na rede elétrica;
- 2) A faixa de 95 a 125 kHz, denominada de Banda B, é limitada aos clientes de fornecedores de energia e não requer o uso de um protocolo de acesso. Essa faixa é usada em aplicações de "Babá eletrônica" ou intercomunicadores;

- 3) A faixa de 125 a 140 kHz, ou Banda C, é limitada aos clientes de fornecedores de energia. Um protocolo de CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), que usa a frequência central de 132,5 kHz para realizar operações simultâneas de vários sistemas dentro desta faixa. As aplicações que operam nesta banda são as de automação residencial e predial e comunicação entre computadores;
- 4) A faixa de 140 a 148,5 kHz, conhecida como Banda D, é limitada aos clientes dos provedores de energia. Nenhum protocolo de acesso é definido para essa faixa de frequência.

No Brasil foi entregue à ANATEL¹ um modelo de regulamentação proposto por integrantes do grupo CBC7². A ANATEL tem provido discussões para criar uma regulamentação do uso da tecnologia. Segundo a revista *PC world* de dezembro de 2003, O PLC ainda não tem aval da Anatel nem da Aneel para funcionar no Brasil, mas a regulamentação "está a caminho". De acordo com as estimativas da agência, a regulamentação para a Internet via rede elétrica deve ficar pronta ao longo de 2004. (*PC World*, 2003).

¹ Agência Nacional de Telecomunicações

² Grupo de estudo coordenado pela ANATEL, com participação de fabricante de equipamentos e concessionárias de energia elétrica. A missão deste grupo é estudar e propor regulamentação para o PLC.

3 Métodos de Modulação Digital Para Transmissão de Dados

3.1 Introdução

A Transmissão de dados através de um canal ruidoso de comunicações requer alguma forma de se separar dados válidos, de ruídos de fundo. O modo mais comum de executar essa tarefa é utilizando algum método de modulação na transmissão de dados, e demodulação no ponto de recepção, para certificar-se de que esses dados apresentados no receptor sejam os mesmos enviados pelo transmissor.

Neste capítulo serão abordados os fundamentos de modulação que possibilitam a comunicação através da rede elétrica. Serão apresentados os principais tipos de modulação existentes, bem como uma breve descrição de cada um deles. Ao final deste capítulo, será detalhada a modulação por deslocamento de frequência ou FSK que é uma técnica simples, porém que apresenta uma boa imunidade a ruídos e uma taxa de transmissão satisfatória, características que fazem dela ideal para a transmissão de dados pela rede elétrica.

3.2 Processo de Modulação

A maioria dos sinais, da forma como são fornecidos pelo transdutor, não podem ser enviados diretamente através dos canais de transmissão. Conseqüentemente, uma onda portadora cujas propriedades são mais convenientes aos meios de transmissão, é modificada para representar a mensagem a ser enviada. A modulação é a alteração sistemática de uma onda portadora de acordo com a mensagem (sinal modulante), e pode incluir também uma codificação.

Em grande parte, o êxito de um sistema de comunicação depende da modulação, de modo que a escolha do método é uma decisão fundamental em projetos de sistemas para transmissão de sinais. Muitas e diferentes técnicas de modulação são utilizadas para satisfazer as especificações e requisitos de um sistema de comunicação. Independente do tipo de modulação utilizado, o processo deve ser reversível de modo que a mensagem possa ser recuperada no receptor pela operação complementar da demodulação.

A eficiência da modulação / demodulação é um processo que determina a precisão dos dados provenientes do receptor. Por conseguinte, uma reflexão cuidadosa deve ser dada à seleção de um adequado regime de modulação e demodulação.

Entre outros aspectos, a operação de modulação permite (Moreira, 1999):

- (i) deslocar o espectro do sinal a transmitir para a banda de frequências mais apropriada/disponível;
- (ii) produzir um sinal modulado com um espectro mais estreito (ou mais largo) que o sinal original;
- (iii) tornar o sistema de transmissão mais robusto relativamente a algum tipo de ruído e/ou interferência;
- (iv) adaptar a sensibilidade do receptor às características do canal.

O receptor recria o sinal de mensagem original a partir de uma versão degradada do sinal transmitido depois da propagação através do canal. Essa recriação é realizada utilizando-se um processo conhecido como demodulação, o qual é o inverso do processo de modulação utilizado no transmissor. Entretanto, devido à inevitável presença de ruído e distorção no sinal recebido, consideramos que o receptor não é capaz de recriar exatamente a mensagem original.

A degradação resultante no desempenho do sistema como um todo é influenciada pelo tipo de esquema de modulação utilizado. Especificamente, consideramos que alguns esquemas de modulação são menos sensíveis aos efeitos de ruído e distorção que outros (HAYKIN, 2004).

3.3 Transmissão Digital com Portadoras

Podemos classificar o processo de modulação em de onda contínua e modulação de pulso. Na modulação de onda contínua, uma onda senoidal é utilizada como portadora. Este tipo de modulação pode ser subdividido de acordo com o tipo de mensagem a ser transmitida (sinal modulante) em (HAYKIN, 2004):

- I - Modulação analógica (mensagens analógicas, como sinais de voz).
- II - Modulação digital (mensagens digitais, como dados de computador).

A transmissão digital de sinais em relação à transmissão analógica possui numerosas vantagens, como taxa de erros muito inferiores, maior facilidade para multiplexação, menores custos na implementação e compatibilidade direta com o controle baseado em eventos discretos, predominante na automação residencial.

Nos sistemas de transmissão digital, os sinais podem ser transmitidos utilizando técnicas de modulação em banda base ou técnicas baseadas em portadoras. Em qualquer dos casos a transmissão pode ser binária ou multi-nível. A qualidade da transmissão é medida através da probabilidade de erro de bit, isto é, da probabilidade de, uma vez transmitido um bit, este seja interpretado pelo receptor de forma errada. Os valores típicos da probabilidade de erro de bit vão de 10^{-4} a 10^{-9} .

As técnicas de transmissão digital com portadoras consistem em fazer variar uma das características de uma onda sinusoidal ao longo do tempo, de acordo com os dados a transmitir. Essas características são a amplitude, a frequência e a fase:

- a) Modulação por deslocamento de amplitude (ou ASK, sigla em inglês para *Amplitude Shift Keying*);
- b) Modulação por deslocamento de fase (ou PSK, sigla em inglês para *Phase Shift Keying*);
- c) Modulação por deslocamento de frequência (ou FSK, sigla em inglês para *Frequency Shift Keying*).

A Figura 6 exibe as formas de onda de um sinal modulado nos métodos básicos de modulação digital.

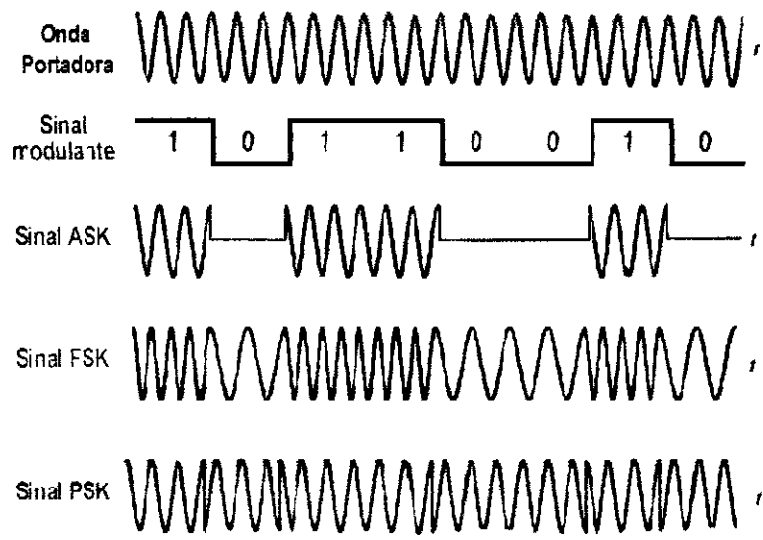


Figura 6: Métodos de modulação digital

3.3.1 ASK (Amplitude Shift-Keying)

É a técnica de modulação mais simples entre as utilizadas para modular sinais discretos (digitais). Consiste na alteração da amplitude da onda portadora em função do sinal digital a ser transmitido. A modulação em amplitude translada o espectro de frequência baixa do sinal binário, para uma frequência alta como é a da onda portadora.

A amplitude da portadora é comutada entre dois valores, usualmente ligado e desligado (na modulação em amplitude multinível podem ser utilizados mais valores). A onda resultante consiste então em pulsos de rádio frequência (RF), que representam o sinal binário "1" e espaços representando o dígito binário "0" (supressão da portadora).

Esta técnica é equivalente a modulação AM para sinais contínuos com um sinal modulante na forma de um pulso retangular. O preço desta simplicidade é a excessiva largura de faixa da transmissão. A técnica de modulação ASK também representa perda de potência relativa a onda portadora.

A largura de faixa da transmissão pode ser reduzida se os pulsos empregados forem formatados (limitados em banda) antes da modulação. Supondo que existe a necessidade de transmitir a seqüência de bits "101001" através da linha, a forma de onda resultante seria a seguinte:

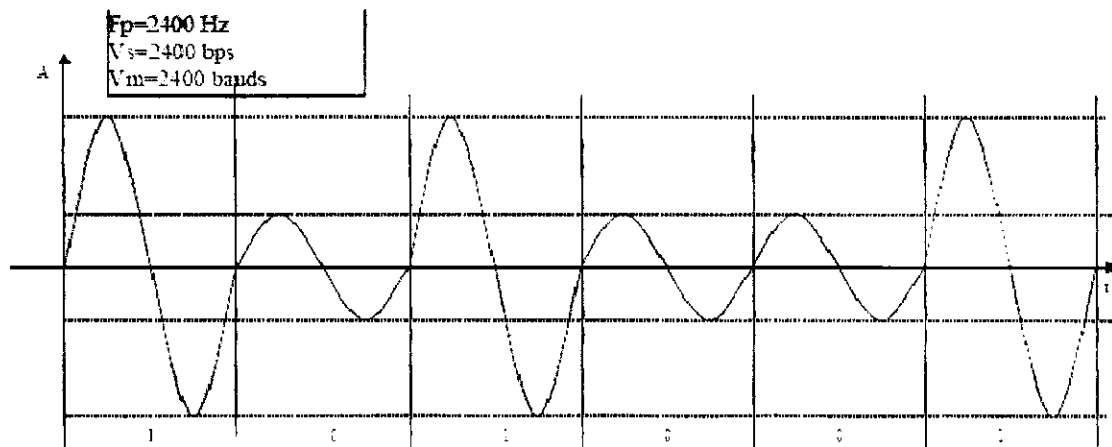


Figura 7: Modulação ASK

O sinal ASK pode ser produzido empregando-se os mesmos teoremas da modulação AM-DSB. As principais características da modulação por chaveamento de amplitude são:

- Facilidade de modular e demodular;
- Pequena largura de faixa;
- Baixa imunidade a ruídos.

Devido a essas características, a modulação por chaveamento de amplitude é indicada nas situações em que exista pouco ruído para interferir na recepção do sinal ou quando o baixo custo é essencial. A modulação ASK é utilizada em aplicações:

- Transmissão via fibras ópticas, onde não existe ruído para interferir na recepção do sinal;
- Transmissão de dados por infravermelho, como os usados em algumas calculadoras;
- Controle remoto por meio de raios infravermelhos, como os usados em aparelhos de tv;
- Controle remoto por meio de radiofrequência, como os usados para ligar e desligar alarmes de carros, residências ou abrir portões.

O sinal ASK divide-se em: se o sinal for binário, variando-se dois níveis (0, espaço e 1, marca) teremos o ASK binário ou BASK; Se o sinal tiver m níveis, sinal multinível teremos o ASK multinível, também chamado MASK.

No caso particular do sinal BASK em que um dos níveis é zero, o sinal produzido equivale a senóide interrompida e por isso é ainda designado por OOK, ou seja, *On-off Keying*.

3.3.2 PSK (Phase Shift Keying)

O PSK é uma forma de modulação em que a informação do sinal digital é embutida nos parâmetros de fase da portadora. Neste sistema de modulação, quando há uma transição de um bit 0 para um bit 1 ou de um bit 1 para um bit 0, a onda portadora sofre uma alteração de fase de 180 graus. Esta forma particular do PSK é chamada de BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Quando não há nenhuma destas transições, ou seja, quando bits subsequentes são iguais, a portadora continua a ser transmitida com a mesma fase.

Esta variação de fase em função da transição de bit do sinal é ilustrada na figura a seguir:

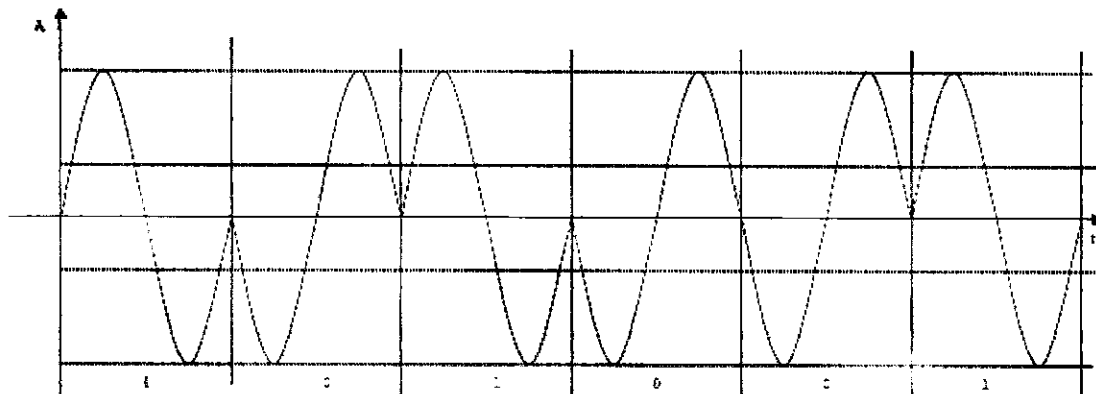


Figura 8: Modulação PSK

Costuma-se classificar o sinal obtido de acordo com a natureza do sinal de entrada:

- Se o sinal for binário teremos o PSK ou BPSK. No caso particular do sinal BPSK, em que um dos níveis se diferencia do outro por oposição de fase (defasagem de 180°), o sinal é chamado de PRK (*Phase reversal Keying*);
- Se o sinal tiver m níveis (sinal multinível) teremos o PSK multinível ou MPSK.

O sinal MPSK tem m níveis de fase presentes e pode ser produzido pela seleção de saídas defasadas produzidas a partir de um mesmo gerador, no receptor pode-se usar detectores de fase em montagem apropriada para comparação. Nas saídas teremos sinais diferentes, sendo que a saída máxima corresponderá ao detector para o qual o sinal recebido estiver em fase com a referência local.

O regenerador tem condição de reproduzir qualquer dos estados originais e o decisor tem condição de reconhecer qual estado deverá ser produzido pelo regenerador.

Como os diferentes sinais produzidos se referem à mesma portadora e diferem apenas pela fase, podemos representá-los como fasores de igual amplitude e angularmente deslocados, no plano da portadora.

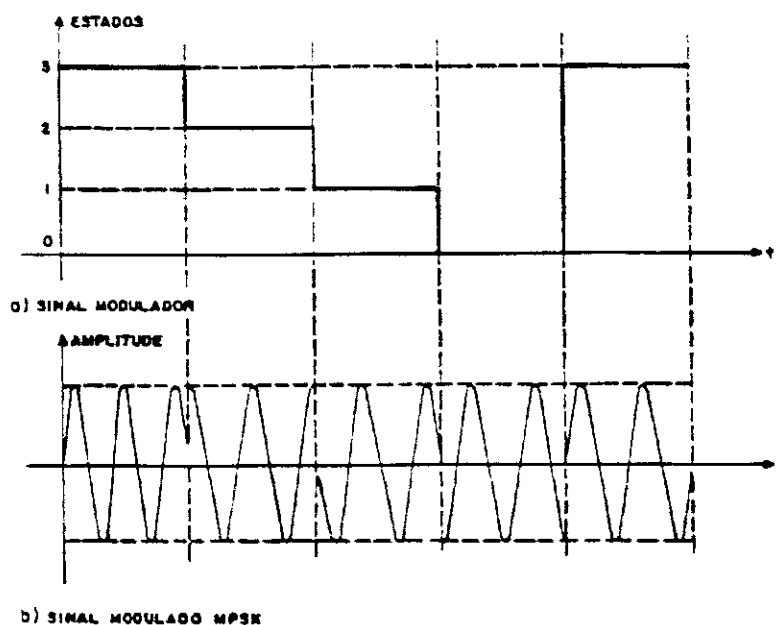


Figura 9: Modulação MPSK

A modulação QPSK é uma técnica de modulação derivada do PSK, porém neste caso, são utilizados parâmetros de fase e quadratura da onda portadora para modular o sinal de informação. Como agora são utilizados dois parâmetros, existem mais tipos possíveis de símbolos nesta constelação, o que permite que sejam transmitidos mais bits por símbolo. Por exemplo, se quisermos transmitir 2 bits por símbolo, ao invés de 1 bit por símbolo como no caso PSK acima, neste caso, como teremos 4 tipos de símbolos possíveis, a portadora pode assumir 4 valores de fase diferentes, cada um deles correspondendo a um dibit, como por exemplo 45° , 135° , 225° e 315° . A figura abaixo ilustra em um diagrama de fase e quadratura (IQ) os 4 possíveis símbolos gerados pela modulação QPSK usando 2 bits por símbolo.

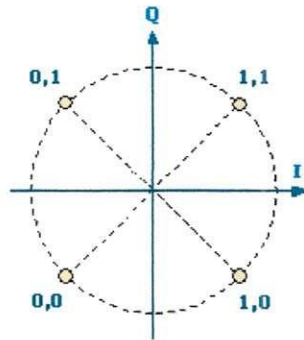


Figura 10: Diagrama ilustrativo QPSK

Entre as características básicas desse método podemos citar:

- Envelope da portadora constante;
- Insensível a variações de níveis;
- Boa detecção de erro;
- Usada em aplicações de densidade de informações intermediária;

3.3.3 FSK (*Frequency Shift Keying*)

A modulação FSK atribui freqüências diferentes para a portadora em função do bit que é transmitido. Portanto, quando um bit 0 é transmitido, a portadora assume uma freqüência correspondente a um bit 0 durante o período de duração de um bit. Quando um bit 1 é transmitido, a freqüência da portadora é modificada para um valor correspondente a um bit 1 e analogamente, permanece nesta freqüência durante o período de duração de 1 bit, como mostrado na figura a seguir.

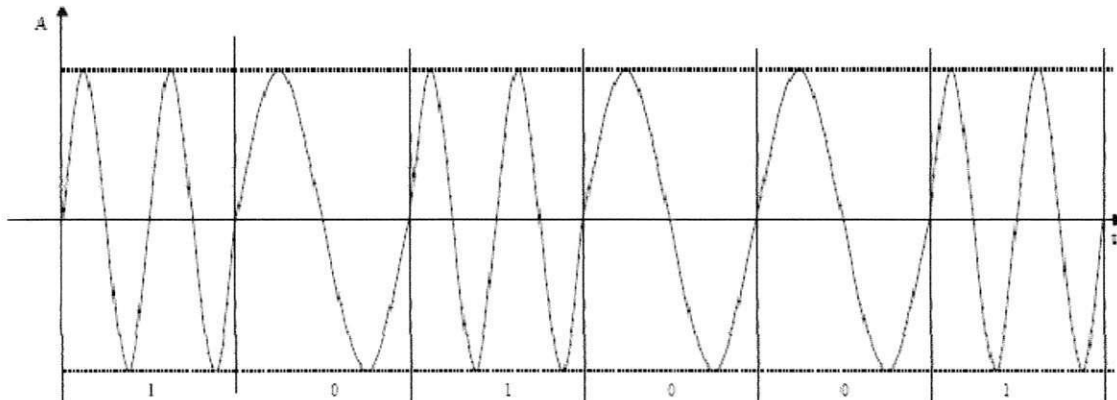


Figura 11: Modulação FSK

A modulação por chaveamento de freqüência, FSK apresenta como principal característica a boa imunidade a ruídos e a simplicidade, quando comparada com a ASK. Como ponto negativo, apresenta a maior largura de banda dentre as modulações digitais, o que impõe limitações quanto à velocidade de transmissão. A modulação FSK é utilizada em modems de baixa velocidade (com velocidade de transmissão igual ou menor que 2400 bps); transmissão via rádio (na transmissão de sinais de rádio controle) (TERSIGNI, 2004).

Construtivamente, a modulação FSK pode ser obtida pela aplicação do sinal digital, com a banda de frequência limitada, na entrada de um VCO (*Voltage Controlled Oscillator* ou Oscilador Controlado por Tensão). As variações de amplitude do sinal digital forçam o VCO a variar sua frequência entre dois valores diferentes, a frequência de marca e a frequência de espaço (TERSIGNI, 2004). A Figura 12 mostra o diagrama de blocos do modulador FSK.

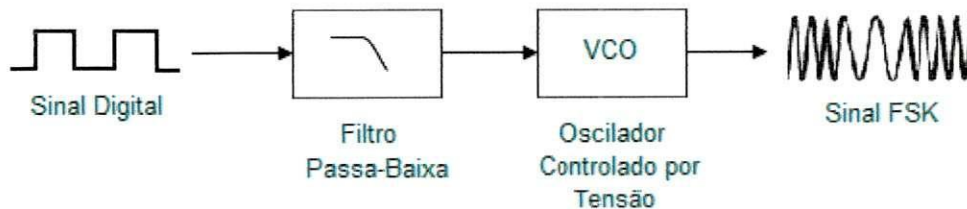


Figura 12: diagrama de blocos do modulador FSK

A largura de faixa do sinal FSK depende da velocidade de transmissão e da diferença entre as frequências de marca (F_m) e de espaço (F_s). A equação abaixo é usada para o cálculo da largura de faixa do sinal FSK (TERSIGNI, 2004).

$$BW(\text{FSK}) = V_m(1 + R) + (F_m - F_s)$$

Onde $BW(\text{FSK})$ é a largura de faixa do sinal FSK em Hz, V_m é a velocidade de transmissão em bps, R é o fator de filtragem do filtro passa-baixa em Hz, F_m é a frequência de marca em Hz e F_s é a frequência de espaço em Hz.

O desvio de frequência utilizado, que é a diferença entre a frequência de marca e a frequência de espaço, está relacionado com a velocidade de transmissão. Normalmente, se usa um desvio de frequência, em Hz, entre a metade e o dobro da velocidade de transmissão, em bps. Para uma velocidade de transmissão de 10 Kbps, podemos usar um desvio de frequência entre 5 kHz e 20 kHz, por exemplo. Quanto maior o desvio, maior será a largura de faixa ocupada e a imunidade contra ruídos (TERSIGNI, 2004).

A demodulação do sinal FSK pode ser feita como no diagrama a seguir. O amplificador limitador tem a finalidade de amplificar o sinal FSK aplicado na entrada do demodulador e eliminar as variações de amplitude e ruídos eventualmente presentes, no sinal de entrada. Na saída do amplificador limitador, teremos um sinal de amplitude constante, que será aplicado aos filtros passa-faixas dos circuitos marca e espaço. O amplificador limitador é o maior responsável pela boa imunidade de ruídos da modulação FSK.

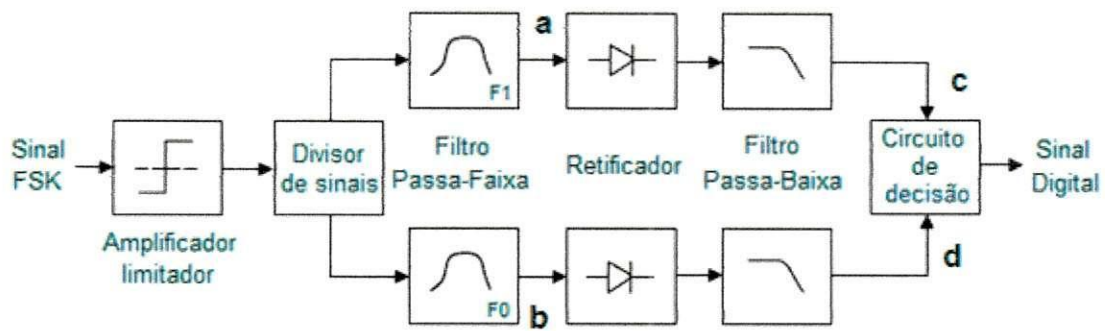


Figura 13: Diagrama de blocos do demodulador FSK

Outra razão para a boa imunidade a ruídos deve-se ao modo como funciona o circuito de decisão usado no demodulador. O circuito de decisão determina o nível de saída em função da amplitude dos sinais em sua entrada. A saída irá para nível alto se a tensão no ponto c for mais elevada que no ponto d. Quando a frequência do sinal recebido for igual a frequência espaço, aparecerá sinal na saída do filtro passa-faixa do circuito espaço, b, o sinal será retificado e depois filtrado pelo passa-baixa, aparecendo uma tensão em d. Como a tensão em d será maior que a em c, o circuito de decisão coloca a saída em nível baixo.

4 Implementação Prática

4.1 Introdução

Como visto nos capítulos anteriores, foram apresentados os métodos de modulação que possibilitam a comunicação pela rede elétrica, em especial a modulação por chaveamento de frequência FSK.

O capítulo teórico do presente relatório sugere uma série de métodos e técnicas de comunicação que se prestam confiável para o desempenho de dispositivo de comunicações PLC em um canal hostil. Modulação e acoplamento foram métodos práticos sugeridos para que sejam implementados e que possuam desempenho adequado.

A idéia inicial é desenvolver um protótipo de um sistema eletrônico base, sob a forma de um módulo independente que poderá ser adaptado e expandido para a criação de produtos para automação e segurança residencial. Este módulo irá codificar as informações a serem transmitidas em um sinal elétrico de baixa frequência, que servirá de modulação a uma portadora de alta frequência, introduzida através de filtros isoladores na rede elétrica.

A portadora, por ter frequência elevada, não se confunde com os sinais da rede elétrica. Em seu destino esta será sintonizada e detectada, e o sinal modulado recuperado juntamente com as informações que carrega. Isto demonstra um princípio de transmissão amplamente estudado e utilizado em telecomunicações.

4.2 Sistema de Transmissão PLC

A fase inicial do projeto teve como foco a verificação prática da permissividade da rede à passagem de sinais, e para isso foi necessário confeccionar um oscilador que gerasse um sinal, no caso uma simples senóide, um amplificador que elevasse o nível deste sinal a um patamar que pudesse ser detectado e finalmente uma maneira de injetá-lo na rede. Para que o sinal pudesse ser diferenciado da fundamental de 60 Hz, de harmônicos e ruídos, fez-se necessário que o sinal tivesse frequência elevada sem, no entanto, sofrer os efeitos da indutância dos fios.

Escolheu-se a codificação baseada em sinalização por chaveamento de frequência ou FSK (*Frequency Shift Keying*), que exige que duas frequências portadoras sejam definidas, e o chaveamento entre elas define os níveis lógicos "0" e "1".

A modulação FSK é apenas uma das variantes da modulação FM, e em geral quando se fala de modulação FM se faz referência a uma portadora que varia pouco em relação a sua frequência central, de forma que filtros e circuitos de sintonia são dimensionados para uma frequência única. Esta pequena variação de frequência é difícil de perceber, e exige circuitos ativos, como o PLL, detectores de quadratura, discriminadores de fase, etc..

Todos estes circuitos são de construção bastante complexa, e sua aplicação se justifica em casos em que a transmissão deve estar dentro de um estreito limite de frequências, com variações de $\pm 1\%$ em relação à frequência base. No entanto, até o momento, não existe nenhuma restrição ao uso de variações maiores, uma vez que o meio físico em questão não possui outros sistemas de comunicação competindo por bandas de transmissão.

Então uma solução mais prática foi adotada, o uso de duas portadoras de frequência próxima a 100kHz, onde a sinalização de bits é feita alternando a portadora entre as duas. O maior afastamento das frequências escolhidas (100 e 125 kHz) possibilita a identificação destas com filtros simples.



Figura 14: Diagrama do codificador FSK

4.2.1 Determinação das Frequências

Antes de iniciar a montagem era necessário determinar a melhor frequência de transmissão, verificando a atenuação da rede em função da mesma. Estudos prévios da bibliografia mostravam que os fios de uma rede comum têm elevada indutância, de forma que frequências na faixa dos megahertz são fortemente atenuadas.

O uso de frequências muito baixas também não é indicado, pois sofrem efeito dos ruídos. Outro fator é a frequência do sinal que carrega informação, que como será visto adiante, situa-se na faixa de 600 Hz a 2 KHz, exigindo uma portadora de no mínimo 50kHz.

Mas para determinar a melhor faixa é necessário um longo estudo, equipamento especial e muitos testes de campo, usando as mais variadas cargas existentes nas residências, e isso em várias instalações elétricas diferentes. Um esforço muito grande e dispendioso em termos de tempo.

Assim a decisão sobre a frequência a ser utilizada foi baseada em consulta bibliográfica, análise de testes de campo realizados por algumas empresas e disponibilizados ao público, e também a partir de exemplos de tecnologias comerciais, escolhendo-se 100 kHz como portadora para os testes iniciais.

4.2.2 Modulador FSK

O circuito de modulação FSK é realizado através da aplicação de um oscilador controlado por tensão (VCO), que produz uma onda AC, onde a frequência de saída é diretamente proporcional à tensão de alimentação DC. Usando-se a forma de onda binária como entrada para o VCO, podemos variar a frequência de saída do sinal senoidal, criando assim a modulação FSK.

O circuito integrado empregado para esse fim é o XR-2206, que é um CI monolítico gerador de funções capaz de produzir senóides de alta qualidade, de alta precisão e estabilidade. Sua frequência de operação pode ser selecionada externamente em uma faixa de 0.01 Hz a mais de 1 MHz. O circuito é idealmente projetado para comunicações e aplicações como gerador de funções que exijam tom senoidal, AM, FM, ou modulação FSK.

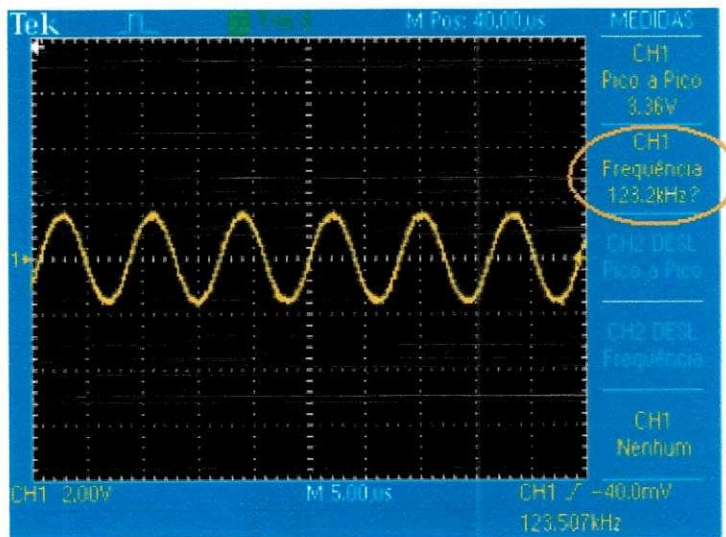
O XR-2206 é, basicamente, constituído de um pré-amplificador de entrada, um detector de fase e um oscilador controlado por tensão (VCO). O pré-amplificador é usado como um limitador, tal que os sinais de entrada acima de 10 mV (rms) são amplificados a um nível constante. O VCO é controlado por uma corrente de entrada ajustada por um resistor (R0) e pela tensão de saída do conversor D/A.

O VCO produz uma frequência de saída proporcional à corrente de entrada, que é determinada a partir da variação de potenciômetros de ajuste. Com dois pinos de ajuste, duas frequências independentes de saída podem ser produzidas para aplicações FSK, usando-se o pino de controle de entrada FSK. O circuito pode operar com dois resistores de ajuste separadamente, R1 e R2, conectados nos pinos 7 e 8 respectivamente. Dependendo da polaridade do sinal lógico no pino 9, tanto um como outro resistor de ajuste pode ser ativado. Se o nível de tensão no pino 9 for maior que 2 V, R1 é ativado, do mesmo modo, se o nível de tensão no pino 9 for menor que 1 V, R2 é que será ativado. Assim, a frequência de saída pode ser chaveada entre dois níveis f1 e f2:

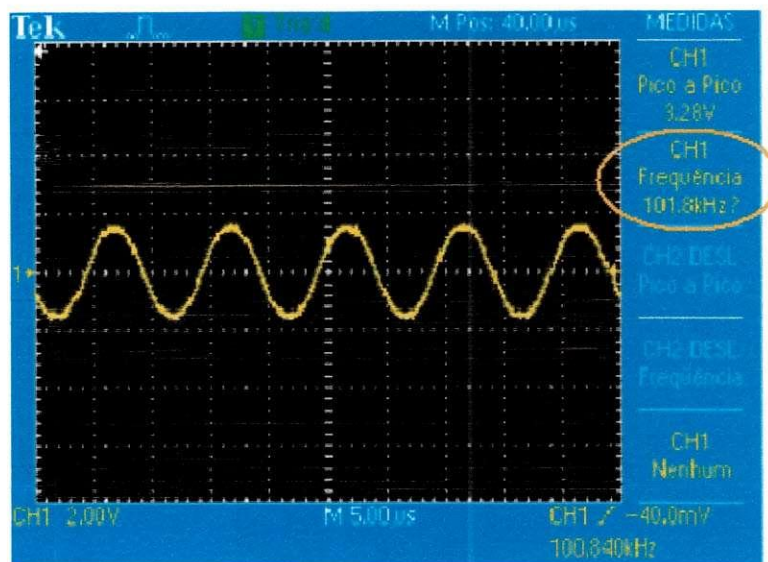
$$f1 = 1/R1C \text{ e } f2 = 1/R2C$$

Como primeira etapa do projeto, tivemos a análise e estudo do diagrama e *datasheet* do CI e posteriormente, a montagem do circuito em *protoboard*, com atenção especial aos cálculos dos capacitores e resistores utilizados para a fixação das frequências de chaveamento, no qual foram especificados o nível lógico '1' com uma frequência f1 de 100 KHz e um nível lógico '0' com frequência f2 de 125 KHz, com C = 1nF.

Depois de verificadas as ligações e componentes, foram feitos teste de funcionamento aplicando-se sinais de +12 V e -12 V na entrada do circuito (que representaram uma constante variando entre 0-1-0 da forma de onda binária), e observadas suas formas de onda em osciloscópio. Os níveis lógicos de frequências foram confirmados com relativa rapidez e estabilidade, onde pode se verificar o correto funcionamento do sistema, demonstradas abaixo.



Bit 0 - 125 KHz



Bit 1 - 100 kHz

Figura 15: Portadora em níveis lógicos 0 e 1.

Na segunda etapa, foi realizada a conexão entre computador e circuito transmissor através da porta serial padrão RS 232. A idéia inicial baseava-se em utilizar a tensão de 12 V na saída da porta serial para alimentar o circuito transmissor, porém o nível de corrente fornecido pela porta, cerca de 1 mA, não foi suficiente para o funcionamento adequado do circuito, que necessita de 6mA em seu modo de transmissão de dados.

A solução escolhida foi a criação de uma fonte de alimentação externa, montada para os primeiros testes. Utilizou-se para isso um pequeno transformador 220 Vca / 15 Vcc e circuito retificador de onda completa, tomando-se o cuidado de utilizar o mesmo terra da fonte de alimentação tanto para o circuito transmissor, como para porta serial. Esse procedimento tinha como objetivo manter a mesma referência e, assim, gerar $\pm 12V$ com relação ao zero da fonte dos dois circuitos.

O software utilizado nos primeiros teste de envio e recepção de dados foi o RealTerm, que é *freeware*, ideal para testar a comunicação entre dois computadores, circuitos com microcontroladores e dispositivos em geral que utilize a comunicação Serial.

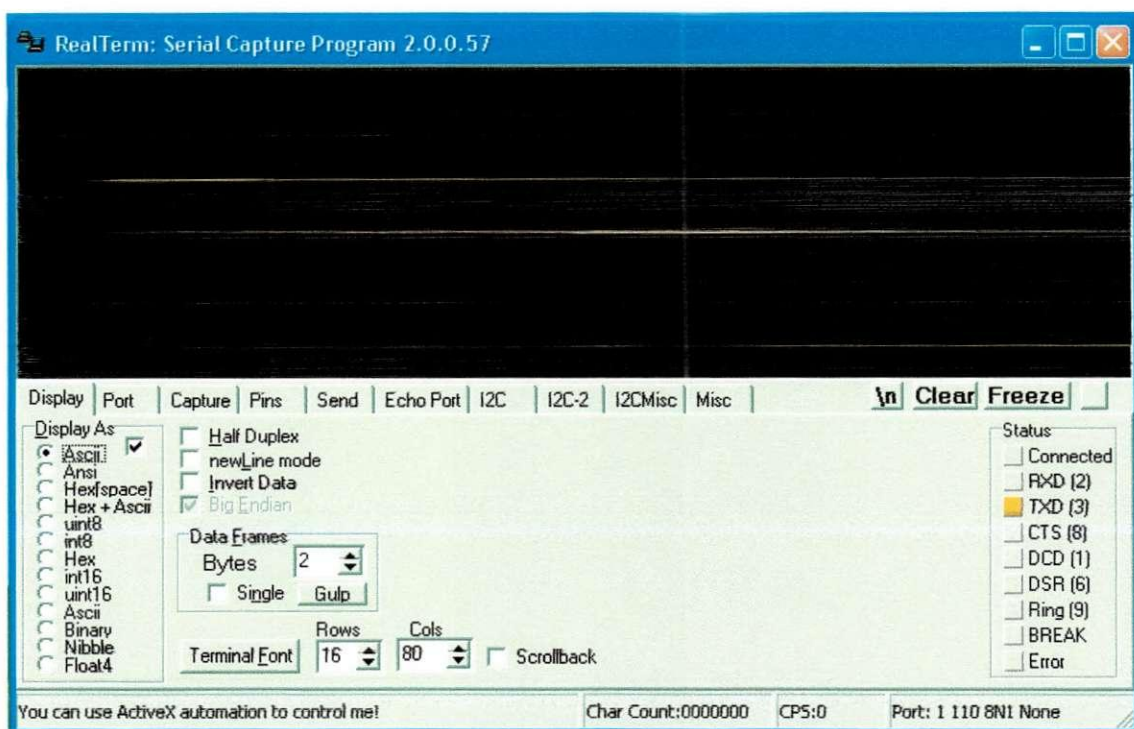


Figura 16: Software de Comunicação Serial

O diagrama funcional do circuito XR-2206 é mostrado na Figura 8 e seu diagrama elétrico na figura 9. Os componentes de seleção e o circuito montado em *protoboard* são mostrados posteriormente

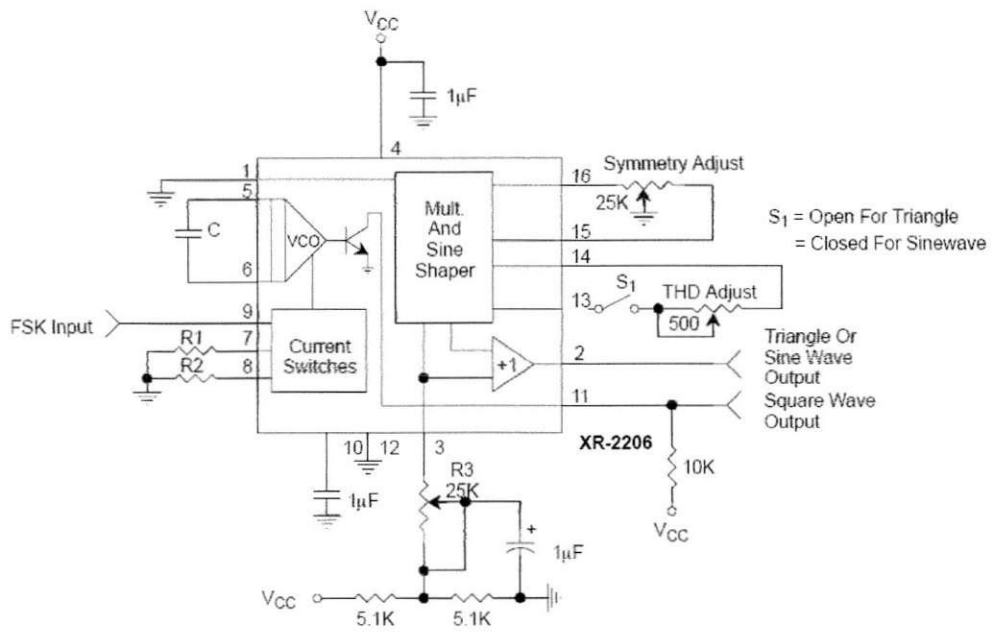


Figura 17: Diagrama Funcional do Modulador FSK

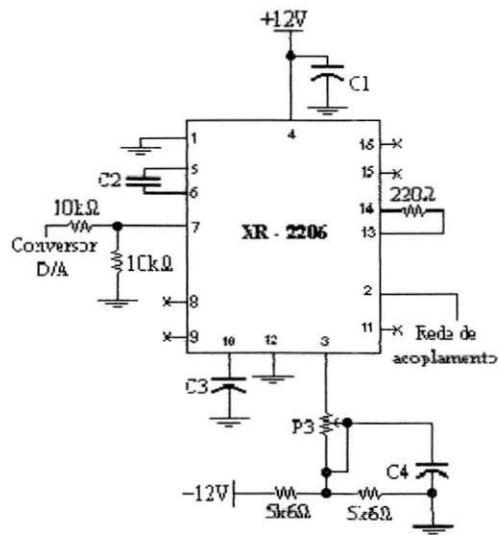


Figura 18: Diagrama Eléctrico XR-2206

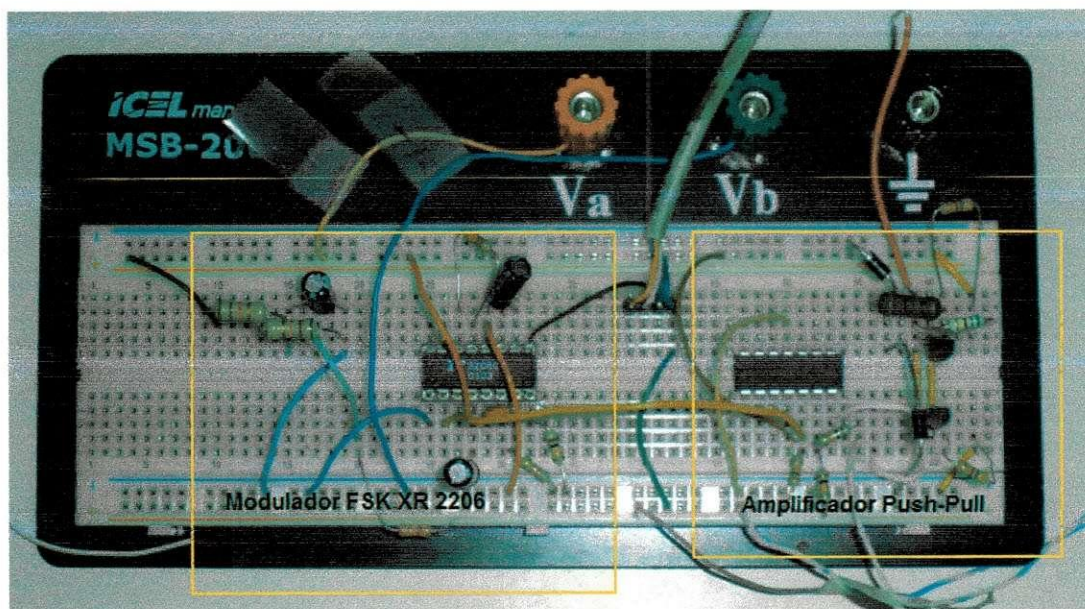


Figura 19: Circuito Modulador montador em *Protoboard*.

4.2.2 Demodulador FSK

A demodulação FSK é realizada através da aplicação de um loop de fase fechado PLL (*Phase-Locked Loop*). O PLL é um dispositivo muito usado em telecomunicação e outros campos, com as mais diversas finalidades, como recuperação de portadora em PSK e QAM, recuperação de relógio (sincronismo) em transmissões digitais, demodulação de sinais FM ou FSK e muitas outras.

Usado com um divisor de frequência após o VCO e um oscilador a cristal, o dispositivo atua como sintetizador de frequência para geração de portadoras e sinais de sincronismo. O PLL é um caso particular de servo mecanismo ou sistema retroalimentado. De acordo com a aplicação, pode ser implementado de forma analógica, digital ou por software em DSP. Basicamente, o PLL é um elo fechado com três componentes: detector de fase, filtro passa-baixa e VCO

O PLL tenta manter bloqueada sua frequência de entrada. Quando a forma de onda de entrada muda de frequência, um sinal de erro ocorre, tentando igualar-se a frequência de entrada. Variando-se cuidadosamente o PLL entre os níveis de frequências referentes ao '0' e '1', podemos usar o seu sinal de erro na demodulação FSK.

A utilização de portadoras bem separadas para a sinalização FSK permitiu que o circuito de detecção fosse composto por dois ressonadores, cada um sintonizado em uma portadora, dispensando decodificadores complexos.

O detector recebe o sinal do desacoplador, o filtra e amplifica com o uso de um ressonador sintonizado na frequência da portadora, assim, a amplitude do sinal não carrega informação, apenas a presença ou não de cada portadora é informação suficiente para a detecção.

Adicionalmente, como pelo protocolo de codificação definido, o nível lógico "0" corresponde à geração exclusiva da portadora de 125kHz e o nível "1" corresponde à

geração exclusiva da portadora de 100kHz, as duas nunca estarão presentes simultaneamente. Essa característica garante uma maior robustez em relação a ruídos, pois mesmo que o sinal chegue distorcido, a diferença entre zeros e uns é bem definida.

O gráfico abaixo é uma simulação teórica do nível de tensão das duas portadoras em uma seqüência de zeros e uns alternados:

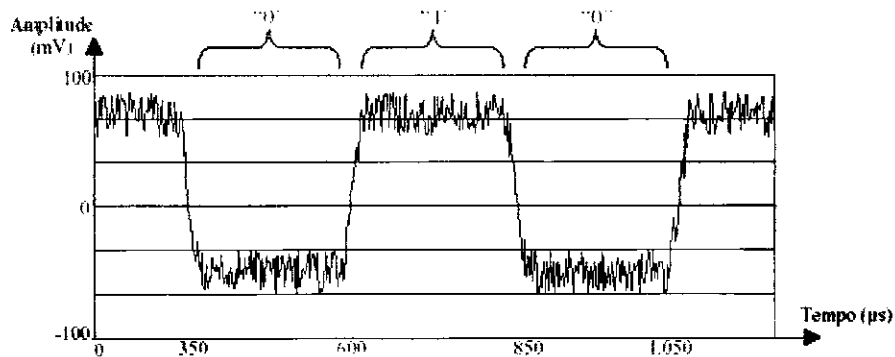


Figura 20: Sinal das portadoras com ruído

Este nível de tensão corresponde à saída dos ressonadores, e estes recebem o sinal da mesma fonte, o que faz com que a maior parte do ruído se apresente igualmente em ambos.

O circuito integrado empregado para esse fim é o EXAR XR-2211, que é um sistema monolítico *Phase-locked loop* (PLL) especialmente concebido para aplicações de comunicações de dados. O sistema funciona através de uma vasta gama de frequências de 0.01 Hz a 300 kHz.

Os testes de funcionamento do demodulador FSK basearam-se em aplicar um sinal de entrada e calibrar seu PLL até uma saída binária estável ser obtida. Nesta condição estável, o PLL está sincronizado ou travado, à custa de uma diferença de fase entre as tensões de entrada e de saída, mantendo a frequência do VCO exatamente igual à frequência do sinal de entrada. Se a frequência de entrada variar dentro da faixa de sincronismo, a frequência do VCO tende a acompanhá-la.

Especificamente, foi aplicada uma onda quadrada através do modulador, produzindo um sinal FSK na saída. Esta saída foi transmitida diretamente para o demodulador, e comparada com o total do sinal de entrada. Inicialmente, demodulada, a saída não representou bem o sinal de entrada do sistema. Descobrimos assim, que para um desempenho confiável do circuito demodulador, um tempo considerável seria exigido para a calibração de vários parâmetros PLL, tais como frequência central e coeficientes de amortecimento.

Eventualmente, um desempenho confiável foi obtido, e fomos capazes de inserir uma onda quadrada no sistema de comunicações, e observar como saída também uma onda quadrada estável e de idêntica frequência. Uma amostra impressa do da tela do osciloscópio mostrando as formas de ondas foi fornecida.

O diagrama de circuito XR-2211 é mostrado na Figura 11. Os componentes de seleção, equações e valores utilizados são mostrados posteriormente.

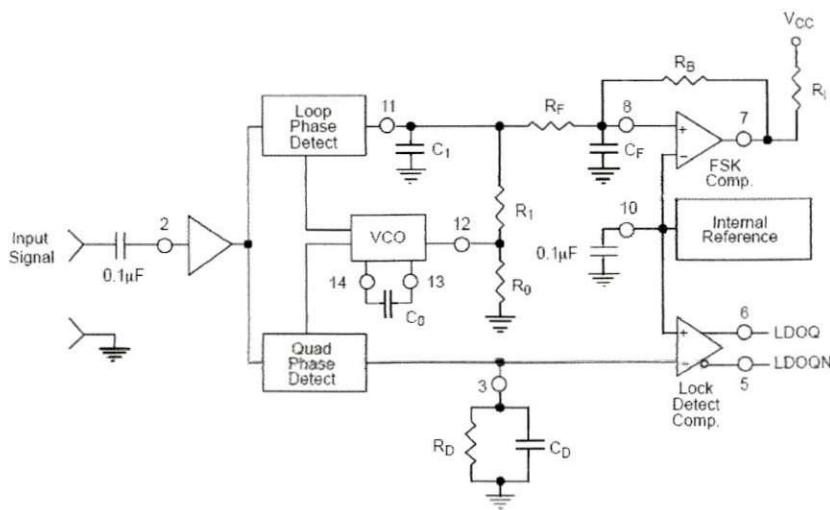


Figura 21: Diagrama Funcional do Demodulador FSK

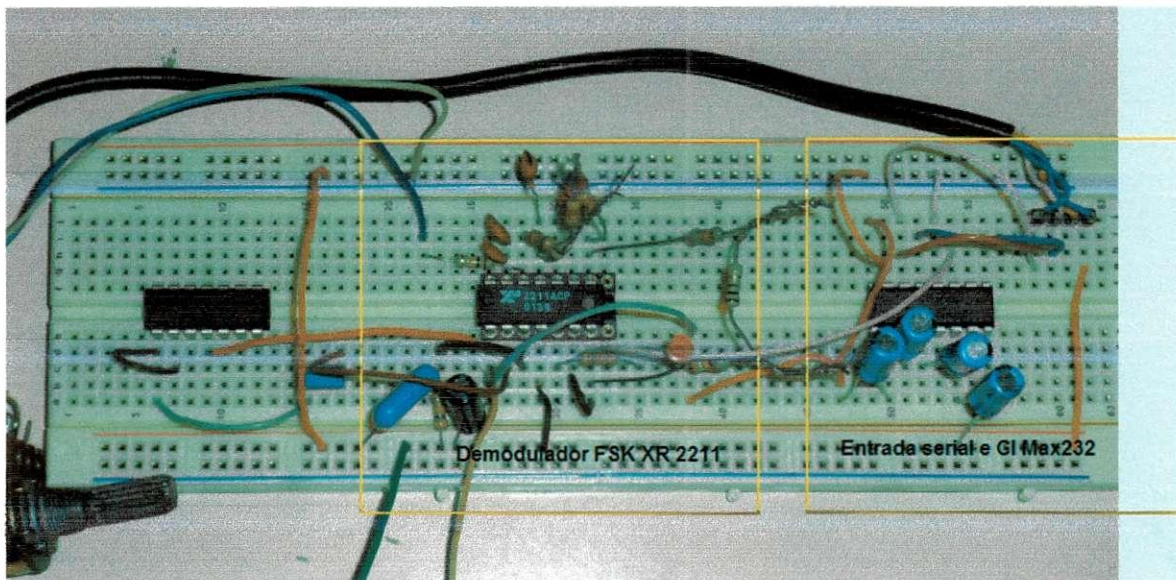


Figura 22: Circuito Demodulador montado em ProtoBoard.

- 1) $f_0 = \sqrt{f_1 \times f_2} = \sqrt{(100 \times 10^3 \times 125 \times 10^3)} = 111,80 \text{ kHz}$
- 2) $R_T = R_0 + \frac{R_x}{2} = 15k\Omega$, Admitindo $R_0 = 10k\Omega$
- 3) $C_0 = \frac{1}{R_0 \cdot f_0} = \frac{1}{10k \times 111,80k} \cong 910pF$
- 4) $R_1 = \frac{R_0 \cdot f_0}{f_2 - f_1} \times 2 = \frac{10k \times 111,80k}{125k - 100k} \times 2 = 89,44k\Omega$
- 5) $C_1 = \frac{1250 \cdot C_0}{R_1 \cdot \zeta^2} = \frac{1250 \cdot 910p}{89,44k \cdot 0,5^2} \cong 50pF$, recomenda-se $\zeta = 0,5$

6) $RF = 5 \times R1 = 447,2k\Omega$ e $RB = 5 \times RF = 2,23M\Omega$

7) $R_{sum} = \frac{(RF+R1) \cdot RB}{RF+R1+RB} = 432,649 \cdot 10^3 \Omega$

8) $CF = \frac{0,25}{R_{sum} \cdot \text{Baud Rate}} = \frac{0,25}{432,65k \cdot 1k} = 577,83pF$

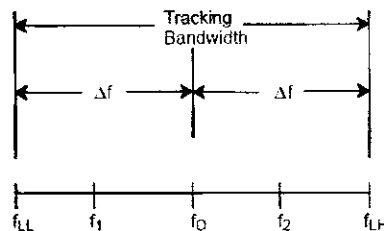


Figura 23: Faixa de tolerância na variação das frequências

9) $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{R_0}{R_1} \leftrightarrow \Delta f = \frac{10k \cdot 111,8k}{89,44k} = 12,5kHz$

4.3 Rede de Acoplamento

Transformadores de ferrite toroidais foram utilizados para isolar as elevadas tensões da rede dos circuitos de geração e detecção de sinal, assim como filtrar uma faixa de frequências. O esquemático abaixo exhibe esses circuitos de acoplamento:

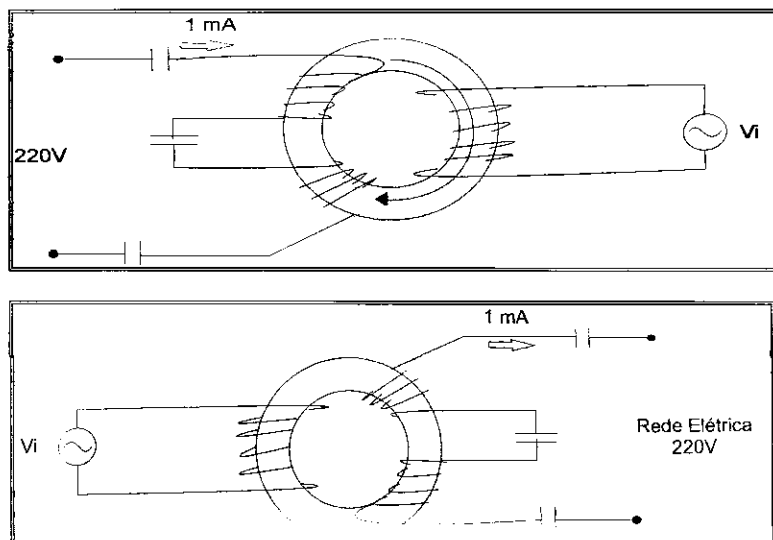


Figura 24: Diagramas de acoplamento

O baixo acoplamento magnético do transformador de ferrite praticamente bloqueia frequências abaixo de 5 kHz, e sua indutância (10 mH) barra frequências acima de 500

kHz. O capacitor impede que a componente de 60 Hz da rede danifique o toróide. O circuito possui uma impedância alta para frequências de 60 Hz, porém pequena em relação à frequências de 100 kHz. Assim será possível realizar testes de transmissão, atenuação de sinal e verificar que o propósito desejado neste projeto é factível.

4.3.1 Construção dos Transformadores

Foram usados pequenos transformadores toroidais de ferrite com um mesmo número de voltas tanto no primário como no secundário, onde dois pedaços de fios suficientemente longos são enrolados através do comprimento dos núcleos. Um capacitor com impedância suficiente para bloquear a frequência de 60 Hz da rede é conectado ao circuito como ilustrado na figura acima. A ressonância entre o capacitor de acoplamento e a indutância do lado primário do transformador, concede bem a baixa impedância característica do sistema.

A topologia de rede de acoplamento utilizada neste projeto é o modo diferencial indutivo, pois o mesmo provê um isolamento físico entre a rede elétrica e o sistema de transmissão, fornecendo assim uma maior segurança.

Este tipo de construção nos fornece um transformador 1:1, onde qualquer par de fios irá agir como primário e o outro par como secundário.

Se quisermos 5 V pico-a-pico de sinal sobre a rede elétrica, precisamos obter 5 V no sinal de saída do secundário do toroide. O núcleo de ferrite e o capacitor de acoplamento encarregam-se de proteger o sistema de sobre tensões e picos de corrente provenientes da rede elétrica.

Este transformador tem as seguintes funções:

- Isolar o restante da interface da rede elétrica;
- Colocar o sinal para transmissão na rede elétrica;
- Extrair o sinal recebido da rede elétrica;
- Filtrar o sinal de 60 Hz que vem da rede elétrica;
- Filtrar os harmônicos do sinal transmitido.

Os enrolamentos primários são usados para criar um filtro passa-faixa. A frequência de ressonância é ajustada para a frequência de transmissão com um capacitor em paralelo. Para filtrar o sinal de 60 Hz da rede elétrica, um capacitor C1 é usado. O capacitor filtra baixas frequências e permite a passagem de altas frequências (transmissão). (SGT-THOMSON, 1995b).

Os testes de funcionamento do sistema de acoplamento, consiste em injetar um sinal senoidal com amplitude de 5V na enrolamento primário do transformador, conectar seu enrolamento secundário na rede, e em outro ponto receptor (tomada) inverter o processo com outro circuito acoplador conectado ao receptor. O sinal obtido pode ser observado com o auxílio de um osciloscópio, que deverá acusar a forma de onda do sinal de origem. Abaixo são mostrados os circuito acopladores construídos.

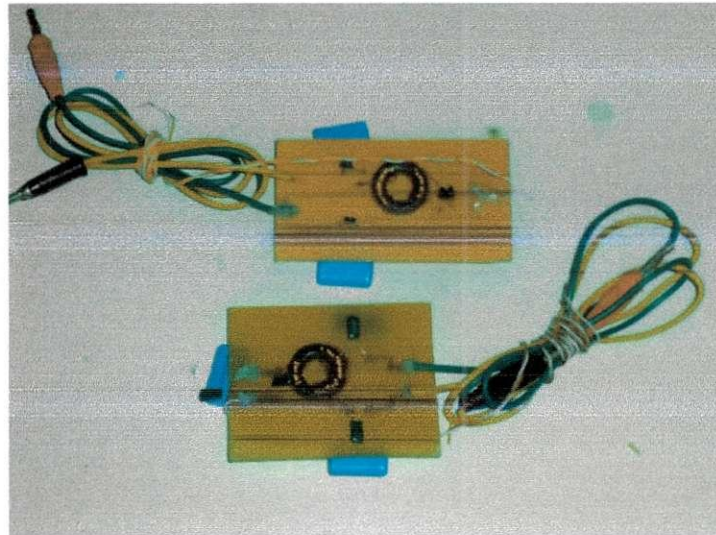


Figura 25: Circuitos Acopladores.

4.3.2 Amplificador de Acoplamento

A Figura 23 ilustra o circuito amplificador utilizado para efetuar casamento entre a saída do gerador de tom e a entrada da rede de acoplamento; e fornecer potência suficiente ao tom senoidal para transpor a rede de acoplamento. O amplificador projetado foi um *push-pull* de classe B e seu ganho é de aproximadamente 12 dB.

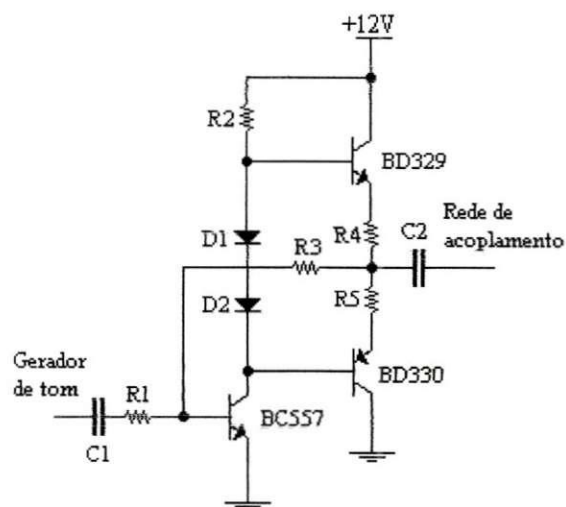


Figura 26: Circuito Amplificador

5 Análise Experimental do Sistema PLC

5.1 Introdução

Neste capítulo serão descritos os experimentos a serem realizados com o protótipo do sistema de transmissão e recepção de dados PLC, anteriormente detalhado no capítulo 4. O objetivo dos experimentos é verificar a funcionalidade e a eficiência do sistema em redes elétricas reais, considerando algumas variáveis inerentes ao ambiente.

Considerando o propósito deste trabalho como puramente acadêmico, não deverão ser feitas exaustivas análises e testes, pois um estudo completo para tornar o protótipo em um produto final envolve exaustivos cálculos e testes de campo. No entanto os testes apresentados deverão ser suficientes para comprovar a funcionalidade e a eficiência do protótipo do sistema.

5.2 Planejamento dos experimentos

A avaliação experimental visa à análise do funcionamento e eficiência do sistema de transmissão PLC em operação real para observar a influência dos seguintes parâmetros:

- a) Ruído presente na rede elétrica;
- b) Distância entre as unidades do sistema;
- c) Conectividade em redes elétricas com fases diferentes;
- d) Características da comunicação de dados.

Assim, algumas considerações serão feitas de forma que os experimentos a serem realizados possam levar a resultados que retratassem claramente o comportamento do sistema nas condições citadas acima.

5.2.1 Considerações sobre os experimentos

Uma vez que o objetivo dos experimentos é a avaliação do sistema de transmissão PLC para aplicações em automação predial e residencial, cuja comunicação de dados se dá através de troca de mensagens curtas, os testes a serem realizados focam em mensagens de até 2 *Megabytes*, transmitidos e recebidos repetidamente. As seguintes considerações foram feitas segundo os parâmetros da seção anterior:

- a) Ruído presente na rede elétrica:

Conforme abordado várias vezes ao longo desse trabalho, a maior preocupação da transmissão de dados pela rede elétrica vem sendo a imunidade ao ruído presente na rede elétrica. Nesse sentido, os experimentos foram realizados em um ambiente sujeito a diferentes níveis de ruído. O ambiente utilizado para os testes foi o Laboratório de

Mesmo sabendo da imprevisibilidade dos níveis de ruído, visto que no mesmo prédio existem outros ambientes como salas de aula (onde estão presentes inúmeras tomadas elétricas) e laboratórios de diversas disciplinas (onde se tem, por exemplo, máquinas elétricas como motores que são fontes de ruído em potencial) que compartilham a mesma rede elétrica, pretendeu-se medir a influência deste ruído no funcionamento global do sistema.

b) Distância entre as unidades do sistema:

Um fator importante na avaliação de um sistema de comunicação de dados é a distância máxima em que se garante a qualidade da comunicação do sistema. No caso deste trabalho, o mais importante era verificar em primeiro lugar se as unidades do sistema de controle PLC conseguiriam se comunicar em um ambiente cujas tomadas elétricas fossem distantes umas das outras.

O problema encontrado foi a incerteza quanto à correspondência das distâncias entre as tomadas elétricas e as distâncias reais dos circuitos elétricos internos. Isso se deve ao fato de as plantas elétricas do local não serem facilmente acessíveis, e também ao fato de tais circuitos já terem sido alterados sem atualização da documentação.

No entanto considerou-se uma distância crescente partindo de cabos condutores de 10 e 15 metros.

c) Conectividade em redes elétricas com fases diferentes:

Por se tratar de comunicação pela rede elétrica, não se poderia ignorar a conectividade do sistema em redes elétricas com fases distintas (monofásica, bifásica ou trifásica). É sabido que, no ambiente utilizado, fases distintas alimentam as diversas tomadas elétricas existentes, porém não se pode identificar claramente quais tomadas eram. Entretanto, como os testes efetuados abrangeram praticamente todo o ambiente, os mesmos puderam levar a resultados que retrataram o funcionamento do sistema considerando este ponto.

d) Características da comunicação de dados:

Outro fator importante na avaliação do sistema foi garantir duas características vitais na comunicação de dados: a velocidade de comunicação e a taxa de erro por byte transmitido, para que isso fosse possível considerou-se nos experimentos efetuados que, para um resultado efetivo, a distância entre as unidades do sistema (transmissor e receptor) deveria ser a maior possível (dentro do ambiente de teste proposto), garantindo assim um reflexo fiel do comportamento do sistema em condições reais.

5.2.2 Configurações de teste do sistema de controle PLC

A partir dos parâmetros estabelecidos na seção 5.2 deste capítulo elaboraram-se duas configurações para o teste do protótipo do sistema construído. Classificaram-se estas configurações (ou arranjos) em: experimento A e B. Cada um deles atende os parâmetros (um ou mais deles) já citados anteriormente e, em todos dois, para efeito de análise experimental, adotou-se a unidade principal somente em modo de transmissão e a unidade alvo somente em modo de recepção.

1) Experimento A:

Neste experimento utilizaram-se puramente as unidades do sistema e dois osciloscópios digitais para a captura dos sinais resultantes, onde foi possível obter dados para a validação do parâmetro: ruído presente na rede elétrica.

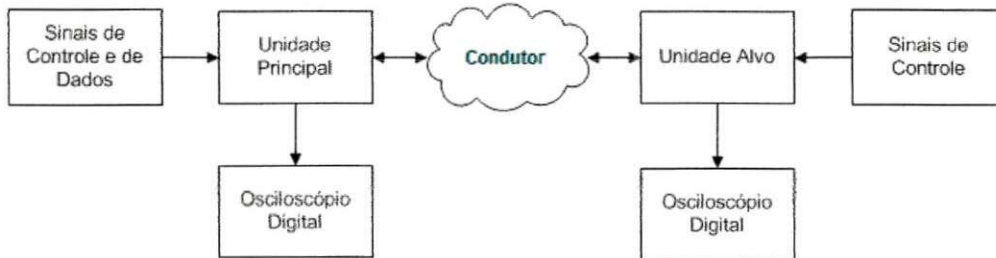


Figura 27: Experimento A.

Como sinal transmitido ora injetaram-se +5V (corresponde a nível lógico "1") ora injetou-se 0V diretamente no pino TxD do XR 2206 (ver capítulo 4). Com auxílio do osciloscópio digital foi medido o sinal no pino de saída do modulador, onde se obtiveram os valores da tensão (em Vrms) e a frequência (em kHz) do sinal transmitido pela rede elétrica. A Tabela 5.1 da seção seguinte apresenta os resultados obtidos com a unidade principal.

Na unidade alvo com auxílio do osciloscópio digital foi medido o sinal no pino de entrada do demodulador XR 2211, onde se obtiveram os valores da tensão (em Vrms) e a frequência (em kHz) do sinal recebido.

2) Experimento B:

Este experimento é semelhante ao anterior, porém utilizou-se o PC para envio de caracteres ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) pelo pino TxD do XR 2206. Utilizaram-se dois osciloscópios digitais Tektronix TDS210 com os quais se obtiveram dados para a validação, neste caso, de dois parâmetros: distância entre as unidades do sistema e as características da comunicação de dados. A Figura 25 ilustra o modelo do experimento.

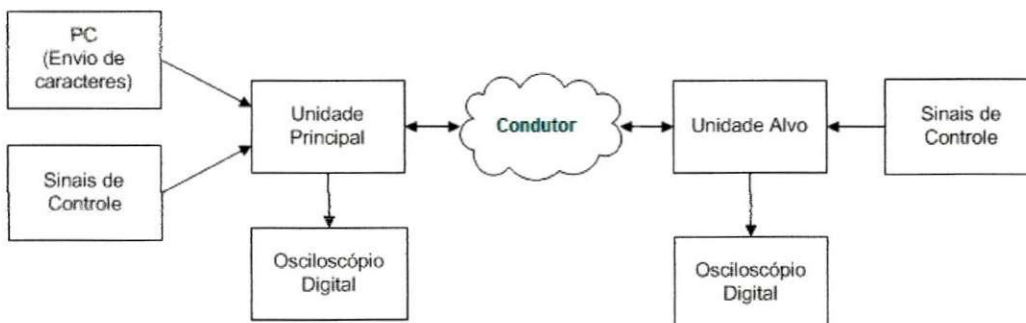


Figura 28: Experimento B.

Como sinal transmitido utilizou-se o PC para envio de caracteres ASCII pelo pino TxD do XR 2206, através da interface RS-232C da unidade. Com auxílio do osciloscópio digital foi observado o sinal no pino TxD que representa o caractere enviado, e medido o sinal no pino ATO onde se obteve o valor da tensão (em Vrms) do sinal transmitido pela rede elétrica simulada.

Na unidade alvo, com o osciloscópio digital, foram capturados os sinais nos pinos RxD do XR 2211, nos quais observaram-se os caracteres recebidos e comportamento do sinal de detecção de portadora, respectivamente.

5.3 Resultados dos experimentos

Nesta seção serão apresentados os resultados das comunicações feitas utilizando-se as unidades do sistema de controle PLC. Os resultados, assim como os experimentos, foram classificados em dois grupos:

1) Resultados do experimento A:

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos com a unidade principal ligada ao condutor de 10 m. No total foram efetuadas vinte medições variando-se o bit transmitido conforme mostra a tabela.

| TxD | V (Vrms) | freq (kHz) |
|-----|----------|------------|
| 0 | 1.30 | 101.89 |
| 0 | 1.31 | 100.78 |
| 0 | 1.33 | 101.98 |
| 0 | 1.31 | 102.12 |
| 0 | 1.29 | 100.45 |
| 0 | 1.30 | 99.65 |
| 0 | 1.32 | 100.32 |
| 0 | 1.31 | 99.87 |
| 0 | 1.30 | 101.98 |
| 0 | 1.29 | 100.76 |
| 1 | 1.29 | 122.43 |
| 1 | 1.30 | 123.32 |
| 1 | 1.31 | 123.88 |
| 1 | 1.31 | 122.40 |
| 1 | 1.33 | 123.98 |
| 1 | 1.32 | 124.04 |
| 1 | 1.32 | 123.34 |
| 1 | 1.31 | 122.66 |
| 1 | 1.31 | 124.12 |

Tabela 1: Resultados do experimento A.

2) Resultados do experimento B:

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no experimento B. No total foram efetuadas vinte medições entre a unidade principal e a unidade alvo variando-se o comprimento do condutor (conseqüentemente as distâncias entre transmissor e receptor, respectivamente). A Tabela 2 mostra a média e o desvio padrão do valor da tensão do sinal de entrada na unidade alvo, onde foram efetuadas dez medições enviando-se o caractere "A" para cada comprimento do condutor.

| Comprimento (m) | Média (Vrms) | Desvio padrão (Vrms) |
|------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 5 | 2.34 | 0.01 |
| 10 | 1.31 | 0.02 |
| 15 | 0.58 | 0.02 |
| 20 | 0.12 | 0.02 |

Tabela 2: Resultados do experimento B.

Para validar os dados da Tabela 2 foi necessário, em paralelo com as medições acima, a captura dos sinais recebidos da unidade alvo para as dez medições, onde para cada uma delas observou-se no osciloscópio digital o sinal correspondente ao caractere enviado (no caso, o caractere "A") pela unidade principal.

A Tabela 3 representa os resultados obtidos no experimento B. A partir do *software* de teste RealTerm, foram obtidos o número de caracteres recebidos e o número de caracteres reconhecidos como o caractere enviado (ambos na base hexadecimal), que no caso do experimento B foi unicamente o caractere "A". A Tabela 3 apresenta os mesmos números mencionados, porém já convertidos para a base decimal. Os resultados foram obtidos variando-se o comprimento do condutor conectado à unidade alvo, primeiramente com 5 m e posteriormente com 20 m de comprimento.

| Comprimento (m) | Nº de caracteres recebidos | Nº de caracteres reconhecidos |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 5 | 150 | 134 |
| 5 | 150 | 138 |
| 5 | 143 | 128 |
| 5 | 181 | 163 |
| 5 | 256 | 232 |
| 5 | 215 | 195 |
| 5 | 165 | 153 |
| 5 | 182 | 162 |
| 5 | 191 | 179 |
| 5 | 198 | 185 |
| 20 | 190 | 176 |
| 20 | 237 | 210 |
| 20 | 192 | 177 |
| 20 | 184 | 168 |
| 20 | 169 | 156 |
| 20 | 211 | 195 |
| 20 | 179 | 163 |
| 20 | 179 | 165 |
| 20 | 197 | 183 |
| 20 | 188 | 163 |

Tabela 3: Caracteres recebidos e reconhecidos

5.4 Análise dos Resultados

Analisando-se os resultados obtidos na Tabela 1 pôde-se calcular a média, bem como os valores máximos e mínimos, da frequência do sinal transmitido, em kHz. Os valores são exibidos a seguir na Tabela 4.

| TxD | Média (kHz) | Máximo (kHz) | Mínimo (kHz) |
|-----|-------------|--------------|--------------|
| 0 | 100,98 | 102,12 | 99,65 |
| 1 | 123,8 | 126,12 | 122,40 |

Tabela 4: Análise dos resultados da frequência do sinal transmitido.

A partir dos valores máximos e mínimos definem-se as seguintes faixas de tolerância para as frequências nominais (100 kHz e 125kHz, para TxD= 0 e TxD=1, respectivamente) como:

$$\text{a) } 99,65 \text{ kHz} < f(\text{TxD}=0) < 102,12 \text{ kHz} \quad (5.1)$$

$$\text{b) } 122,40 \text{ kHz} < f(\text{TxD}=1) < 126,12 \text{ kHz} \quad (5.2)$$

5.4.1 Influência da distância

Analisando-se os dados da Tabela 5 vê-se que os valores da frequência do sinal recebido atendem as condições das equações 5.1 e 5.2, portanto concluí-se com base nos resultados obtidos que o funcionamento global do sistema de PLC é influenciado de forma perceptível, mas não prejudicial pelo aumento da distância

| Comprimento (m) | Média (kHz) | TxD |
|-----------------|-------------|-----|
| 5 | 100,76 | 0 |
| 10 | 101,14 | 0 |
| 15 | 100,57 | 0 |
| 20 | 101,23 | 0 |
| 5 | 124,78 | 1 |
| 10 | 126,07 | 1 |
| 15 | 125,66 | 1 |
| 20 | 124,76 | 1 |

Tabela 5: Média dos valores da frequência do sinal recebido.

Esta análise é fundamental na avaliação do sistema, pois verifica se as unidades do sistema conseguem se comunicar em um ambiente cujas tomadas elétricas são distantes umas das outras. Estas análises feitas utilizando-se de condutores de tamanhos variados para simular a distância entre tomadas. Analisando-se os resultados obtidos na Tabela 2 pôde-se calcular a atenuação do sinal recebido (em dB), onde estes valores são apresentados na Tabela 6. Posteriormente construiu-se o gráfico da Figura 26 com os valores de atenuação do sinal recebido (unidade alvo) ao longo do aumento do comprimento do condutor.

| Comprimento (m) | Média (Vrms) | Atenuação (dB) |
|-----------------|--------------|----------------|
| 5 | 2.34 | 0 |
| 10 | 1.31 | -5,03 |
| 15 | 0.58 | -7,07 |
| 20 | 0.12 | -13,68 |

Tabela 6: Cálculo da atenuação no sinal recebido.

A equação 5.3 mostrada a seguir define o cálculo da atenuação:

$$A(fi)db = 20 \log\left(\frac{V_o}{V_i}\right) \quad (5.3)$$

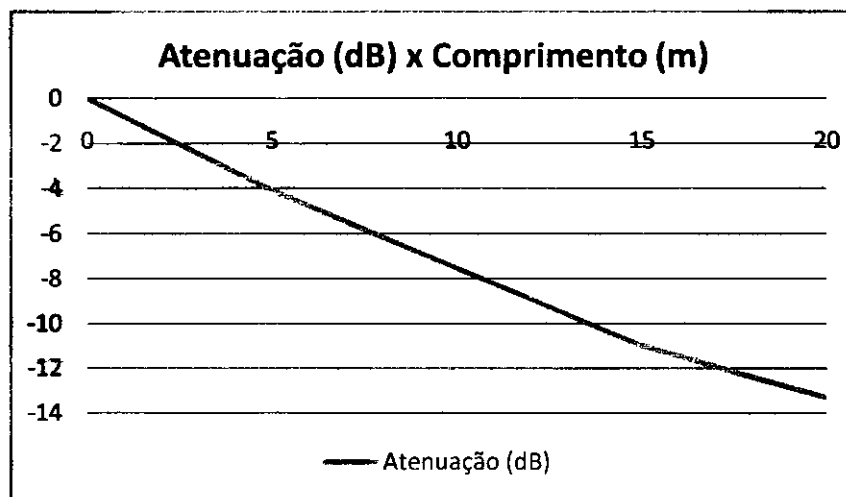


Figura 29: Gráfico da atenuação em dB do sinal recebido.

Percebe-se pelo gráfico da Figura 26 uma atenuação do sinal recebido, na qual foi encontrado sinal recebido de 120 mVrms no maior comprimento medido, sendo este valor maior que o nível mínimo de detecção do sinal pelo XR 2211, que é de 5 mVrms, garante-se o funcionamento do sistema em todo o ambiente de teste escolhido.

Portanto, chega-se à conclusão de que com certeza a distância entre as tomadas elétricas influencia diretamente no funcionamento do sistema. Entretanto, a menos que se tenha o conhecimento preciso sobre a rede elétrica que está sendo usada (plantas elétrica atualizadas, etc.), fica extremamente difícil estipular ou calcular um valor quantitativo de distância máxima onde se possa garantir o funcionamento do sistema.

5.4.2 Influência da taxa de erro por bit transmitido

Nesta análise é obtido um parâmetro vital para o desempenho de um sistema de comunicação: a taxa de erro por byte transmitido. Analisando-se os resultados da Tabela 3 pôde-se calcular a média de caracteres recebidos e reconhecidos como caractere enviado, previamente definido (no caso, o caractere "A") e, a partir desses valores foi calculado o erro percentual. Os valores são exibidos na Tabela 7.

| Comprimento (m) | Nº de caracteres recebidos | Nº de caracteres reconhecidos | Erro (%) |
|-----------------|----------------------------|-------------------------------|----------|
| 5 | 183,1 | 166,9 | 8,84 |
| 20 | 192,6 | 175,6 | 8,82 |

Tabela 7: Erro por Bit transmitido

Foi encontrada uma taxa de erro médio de 8,8% na comunicação entre as unidades do sistema, menor que a taxa de erro de 10% estipulada nos objetivos deste trabalho, com isso garante-se que o protótipo do sistema construído esta funcionando dentro esperado. Conclui-se ainda que a taxa de erro não afeta de forma significativa o desempenho do sistema, pois mesmo com o erro encontrado foi possível receber o caractere enviado 91,1% das vezes, numa velocidade de 110 bps.

6 Considerações Finais

Este trabalho apresentou como foco principal o estudo sobre tecnologias de transmissão de dados através da rede elétrica realizando experimentos com um par modulador e demodulador FSK, simulando um modem PLC. Por ser uma tecnologia relativamente nova, ainda não existem muitos estudos sobre a utilização do mesmo tipo de modulação nas redes elétricas brasileiras.

Um dos principais problemas da transmissão de informação pela rede elétrica é a variação nas transmissões de dados. Os experimentos mostraram que mesmo utilizando modems ligados juntos em uma mesma tomada, as taxas de transmissão apresentaram uma grande variabilidade. Isso é uma característica que pode atrapalhar o uso da tecnologia em aplicações em tempo real.

Outro problema encontrado, e a principal causa de falhas nos teste de envio de dados, foi à falta de informação e acesso às plantas dos circuitos elétricos dos ambientes de testes, o que dificultava a distinção entre tomadas que estavam em um mesmo circuito. Considera-se que este não é um problema localizado e que a maioria das residências brasileiras está nesta situação (as plantas elétricas em residências com mais de 5 anos de uso, ou não se encontram disponíveis, ou não mais correspondem à instalação elétrica existente). Sendo assim, a grande vantagem da tecnologia PLC - utilização de uma infra-estrutura elétrica já existente – acaba se tornando limitada.

Pôde-se constatar a grande influência negativa que o ruído da rede e a distância entre os pontos de comunicação têm sobre as taxas de transmissão pela rede elétrica. Um interessante trabalho a ser realizado é uma avaliação mais ampla dos parâmetros de comunicação de dados. Relações como número de pacotes (bytes) enviados, perdidos e retransmitidos versus distância podem gerar uma melhor caracterização da comunicação PLC. Além disso, a realização de testes em redes elétricas especiais onde seja possível controlar o nível de ruído presente na comunicação seria fundamental para este tipo de análise.

Uma metodologia de teste que poderia ser utilizada em um trabalho futuro é executar o envio de pacotes por um determinado tempo e contar o número de pacotes transmitidos. Outra questão seria usar protocolos de conexão UDP e TCP para avaliar a entrega de pacotes nas taxas de transmissão.

Bibliografia

PINHO, Roberto Roma de. **Comunicação de dados através da rede elétrica aplicado à automação residencial e predial : hardware.**

Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia de Sorocaba – Curso de Engenharia de Computação, Sorocaba, SP, 2005.

REIS, Dalton José. **Telecomunicações em alta velocidade na rede elétrica secundária:**

2002. 32f. Dissertação (Pós-graduação) – Curso de Pós-graduação “latu sensu” aperfeiçoamento em engenharia de telecomunicações, IETC, Belo Horizonte.

VARGAS, Alessandra Antunes. **Estudo sobre Comunicação de Dados via Rede Elétrica para**

Aplicações de Automação Residencial/Predial. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRGS - Engenharia de Computação, Porto Alegre, 2004.

CORRÊA, Jossias Rodrigues. **PLC - Power Line Communications.** Projeto Final de Curso, Uniminas - Sistemas de Informação, Uberlândia, 2004.

DUQUE, C. A. **Transmissão de Dados em Redes Elétricas.** Juiz de Fora, MG, 2001. Relatório Técnico. UFJF Home Page. Disponível em: <http://www.mestradoeletrica.ufjf.br/professores/duque/PLC.pdf>. Acessado em 07/07/2008.

MARQUES, Gabriel Alan Gehm. **Transmissão de dados via rede elétrica.**

Projeto de Fim de Curso, UFSC – Engenharia de Controle e Automação Industrial, Florianópolis, 2004. Disponível

em:http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/gabriel_marques/dados_via_rede_01.html. Acessado em 10/07/2008.

ANDRADE, R. P; RENATO, K. S. **Uma Visão Geral Sobre a Tecnologia PLC.** 2004. 60 f.

(Graduação em Engenharia Elétrica) – UFG, Goiás.

MARTINS, Filadelfo Dias

Proposta de arquitetura e modelo de negócios em sistema PLC. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2006.