



UNICEUB – CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA
FAET – FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

**ACOPLADORES EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DE
DADOS PELA REDE ELÉTRICA**



BRASÍLIA – DF

2004

UNICEUB – CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA
FAET – FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

**ACOPLADORES EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DE
DADOS PELA REDE ELÉTRICA**

por

ALEXANDRE DOURADO
9965511 – FAET – UNICEUB

Trabalho Final de Graduação

Prof. M.C. Wladimir Da Silva Meyer
Orientador

Agradecimentos

Aos meus pais, Almiro Dourado e Rosângela do Valle, pela compreensão, pelo apoio fraterno, e dedicação.

Ao meu irmão, Diogo Dourado, por sua amizade, paciência, e por proporcionar momentos de descontração na minha vida.

A minha amada namorada, Cristine Vargas de Souza, pela sua paciência, pelo apoio dado durante os momentos difíceis e principalmente pela tranquilidade passada durante todo o tempo junto.

Ao meu professor orientador, Wladimir da Silva Meyer, pelo conhecimento técnico concebido, pela paciência e principalmente por sua orientação, me direcionando sempre para o caminho correto.

A toda minha família, incluindo primos, tios, avós, etc, por constituírem um clima familiar de união, respeito e paz.

A todos meus amigos que acompanharam minha jornada acadêmica, vivendo os momentos de alegria e tristeza, mas acima de tudo, vivendo estes momentos unidos.

Resumo

Este trabalho visa o estudo sobre o a tecnologia de comunicação de dados pela rede elétrica, enfocando a etapa de acoplamento desta comunicação.

O estudo consiste em um levantamento e análise de requisitos para que possa ser projetado um par de acopladores que atenda às necessidades da tecnologia.

Dentre vários requisitos mencionados, enquadram-se as normas que regulamentam o sinal de comunicação de dados pela rede elétrica, análise das características da rede elétrica, a busca de soluções de acoplamento e o levantamento das características ideais.

Após o estudo aprofundado dos requisitos necessários, foi proposto o projeto de um par de acopladores capazes de inserir e remover o sinal da rede elétrica da melhor forma possível, buscando atender ao máximo as características ideais.

Como forma de validação do projeto sugerido, foram realizadas diversas simulações e, ao final, foi realizada uma comparação com a solução padrão utilizada atualmente.

Sumário

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
SUMÁRIO	III
LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABELAS	4
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	5
1.1 CENÁRIO ATUAL	5
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	6
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	6
1.2.2 <i>Objetivo específico</i>	6
1.3 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	7
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	7
1.5 LIMITES DO TRABALHO	8
CAPÍTULO 2 - TECNOLOGIA PLC	9
2.1 O QUE É PLC?.....	9
2.2 FUNCIONAMENTO BÁSICO DO PLC	13
2.2.1 <i>In-house PLC</i>	13
2.2.2 <i>Last Mile PLC</i>	14
2.3 REDE ELÉTRICA COMO CANAL DE COMUNICAÇÃO.....	16
2.4 SÍNTESE	19
CAPÍTULO 3 - CARACTERÍSTICAS DOS ACOPLADORES	20
3.1 O ACOPLADOR E SUAS CARACTERÍSTICAS	20
3.1.1 <i>Acoplamento capacitivo</i>	20
3.1.2 <i>Acoplamento indutivo</i>	21
3.2 SOLUÇÕES DE ACOPLADORES.....	21
3.2.1 <i>Acoplador padrão</i>	21
3.2.2 <i>Acoplador de Roy e Abraham</i>	22
3.2.3 <i>Acoplador Glenn Platt</i>	22
3.3 CARACTERÍSTICAS DO CANAL DE COMUNICAÇÃO PLC	24
3.3.1 <i>Atenuações e impedâncias do canal PLC</i>	24
3.3.2 <i>Modelos propostos para o canal</i>	26
3.3.3 <i>Padronizações do canal</i>	27
3.4 CARACTERÍSTICAS DESEJADAS DOS PROTÓTIPOS	29
3.4.1 <i>Uma resposta em frequência apropriada dos módulos utilizados no acoplador</i>	29
3.4.2 <i>Fator segurança</i>	31
3.4.3 <i>Uma transferência de potência adequada</i>	32
3.4.4 <i>Projeto de um filtro eficiente</i>	35
3.5 SÍNTESE	37
CAPÍTULO 4 - PROJETO DOS ACOPLADORES	38
4.1 SUGESTÃO DO PAR DE ACOPLADORES	38
4.1.1 <i>Topologia do receptor</i>	38
4.1.2 <i>Topologia do transmissor</i>	39
4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO AMBIENTE PARA SIMULAÇÃO	40

4.2.1 Características de projeto do transformador.....	40
4.2.2 Características do projeto de acoplamento no transmissor.....	41
4.2.3 Características do projeto de acoplamento no receptor.....	43
4.3 SÍNTESE	49
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	50
5.1 ANÁLISE DO TRANSFORMADOR (TRANSMISSOR/RECEPTOR).....	50
5.2 ANÁLISE DO FILTRO PASSIVO PASSA ALTA (RECEPTOR)	52
5.3 ANÁLISE DO FILTRO ATIVO PASSA BANDA.....	54
5.4 ANÁLISE DO CONJUNTO DE FILTROS.....	56
5.5 ANÁLISE DO AMPLIFICADOR.....	57
5.6 ANÁLISE DO ACOPLADOR UTILIZADO NA RECEPÇÃO DOS DADOS	58
5.7 ANÁLISE DO ACOPLADOR UTILIZADO NA TRANSMISSÃO DOS DADOS.....	60
5.8 ANÁLISE DE UM ENLACE GLOBAL	64
5.9 ANÁLISE DOS RESULTADOS EM RELAÇÃO AO ACOPLADOR PADRÃO	70
5.10 SÍNTESE	73
CONCLUSÃO.....	74
ANEXO A - TIPOS DE TRANSFORMADORES	76
ANEXO B – BLOCO DE PROTEÇÃO	79
ANEXO C – COMPARAÇÃO ENTRE FSK E PSK.....	80
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

Lista de figuras

FIGURA 1.1 – DISPOSITIVO DE ACOPLAMENTO.....	6
FIGURA 2.1 - IN-HOUSE PLC	13
FIGURA 2.2 - LAST MILE PLC	14
FIGURA 2.3 - TOPOLOGIA GENÉRICA DA REDE ELÉTRICA.....	15
FIGURA 2.4 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA PLC	15
FIGURA 2.5 - FUNCIONAMENTO DA MODULAÇÃO OFDM.....	18
FIGURA 2.6 - COMPARAÇÃO ENTRE A ACESSIBILIDADE DAS TECNOLOGIAS	19
FIGURA 3.1 - TOPOLOGIA PADRÃO DE ACOPLADORES PARA PLC	21
FIGURA 3.2 - TOPOLOGIA PROPOSTA POR ROY E ABRAHAM	22
FIGURA 3.4 - RESPOSTA DA SOLUÇÃO PADRÃO E A DE GLENN PLATT	23
FIGURA 3.5 - REPRESENTAÇÃO DOS DISPOSITIVOS NA REDE ELÉTRICA	25
FIGURA 3.6 - SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DO PLC	25
FIGURA 3.7 - MODELO APRESENTADO POR DOSTERT	26
FIGURA 3.8 - MODELO DO CANAL PROPOSTO POR ONUNGA	26
FIGURA 3.9 - MODELO DE UM TRANSFORMADOR REAL	29
FIGURA 3.10 – IMPEDÂNCIA REFLETIDA NO PRIMÁRIO.....	30
FIGURA 3.11 - MODELO SIMPLIFICADO DO TRANSFORMADOR.....	31
FIGURA 3.12 - EQUIVALENTE DE THEVENIN.....	32
FIGURA 3.13 - RELAÇÃO POTÊNCIA POR RESISTÊNCIA DA CARGA	33
FIGURA 3.14 - ABSTRAÇÃO PARA O MODELO REAL	34
FIGURA 3.15 – CIRCUITO EQUIVALENTE VISTO PELA CARGA	34
FIGURA 3.16 - FILTRO PASSIVO PASSA-FAIXA	35
FIGURA 3.17 - FILTRO IGMF	36
FIGURA 4.1 - TOPOLOGIA PROPOSTA NA RECEPÇÃO DOS DADOS	38
FIGURA 4.2 - TOPOLOGIA PROPOSTA NA TRANSMISSÃO DOS DADOS.....	39
FIGURA 4.3 - DIAGRAMA DE BODE DO TRANSFORMADOR	41
FIGURA 4.4 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO ACOPLADOR DE TRANSMISSÃO	42
FIGURA 4.5 - REPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO PASSIVO PASSA ALTA.....	44
FIGURA 4.6 - FILTRO ATIVO PASSA-FAIXA.....	45
FIGURA 4.7 - FREQUÊNCIA CENTRAL DO FILTRO PASSA-FAIXA	46
FIGURA 4.8 - FREQUÊNCIA DE CORTE SUPERIOR DO FILTRO PASSA-FAIXA	46
FIGURA 4.9 - FREQUÊNCIA DE CORTE SUPERIOR DO FILTRO PASSA-FAIXA	47
FIGURA 4.10 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO ACOPLADOR DE RECEPÇÃO	47
FIGURA 4.11 - FREQUÊNCIA CENTRAL DO ACOPLADOR DE RECEPÇÃO.....	48

FIGURA 4.12 - FREQUÊNCIA DE CORTE INFERIOR DA RECEPÇÃO	48
FIGURA 4.13 - FREQUÊNCIA DE CORTE SUPERIOR DA RECEPÇÃO.....	48
FIGURA 5.1 - DIAGRAMA DE BODE DO TRANSFORMADOR	50
FIGURA 5.2 - TELA DE CONFIGURAÇÃO DO TRANSFORMADOR.....	51
FIGURA 5.3 - FREQUÊNCIA DE CORTE DO FILTRO PASSIVO PASSA ALTA	52
FIGURA 5.4 – ATENUAÇÃO SOFRIDA EM 60HZ	52
FIGURA 5.5 - ATENUAÇÃO DA FREQUÊNCIA DO SINAL DE COMUNICAÇÃO	53
FIGURA 5.6 - SINAL DA REDE ELÉTRICA ATENUADO	53
FIGURA 5.7 - FILTRO ATIVO PASSA FAIXA	54
FIGURA 5.8 - GANHO EM DB NA FREQUÊNCIA CENTRAL	54
FIGURA 5.9 - FREQUÊNCIA DE CORTE INFERIOR DO FILTRO PASSA-FAIXA.....	55
FIGURA 5.10 - FREQUÊNCIA DE CORTE SUPERIOR DO FILTRO PASSA-FAIXA	55
FIGURA 5.11 - CONJUNTO DE FILTROS.....	56
FIGURA 5.12 - PERDA NA FREQUÊNCIA DE COMUNICAÇÃO	56
FIGURA 5.13 - PROJETO DO AMPLIFICADOR	57
FIGURA 5.14 - GANHO DO AMPLIFICADOR.....	57
FIGURA 5.15 - ACOPLADOR DE RECEPÇÃO DOS DADOS.....	58
FIGURA 5.16 - FREQUÊNCIA CENTRAL DO ACOPLADOR.....	58
FIGURA 5.17 - FREQUÊNCIA DE CORTE INFERIOR	59
FIGURA 5.18 - FREQUÊNCIA DE CORTE SUPERIOR.....	59
FIGURA 5.19 - ACOPLADOR UTILIZADO PARA INSERIR OS DADOS.....	60
FIGURA 5.20 - FREQUÊNCIA DE CORTE SUPERIOR (150Ω)	60
FIGURA 5.21 - FREQUÊNCIA DE CENTRAL (150Ω).....	61
FIGURA 5.22 - FREQUÊNCIA DE CORTE INFERIOR (150Ω).....	61
FIGURA 5.23 – SINAL RECEBIDO (AZUL) E SINAL ENVIADO (LARANJA) (150Ω).....	61
FIGURA 5.24 - FREQUÊNCIA DE CENTRAL DO ACOPLADOR (2Ω)	62
FIGURA 5.25 - FREQUÊNCIA DE CORTE INFERIOR (2Ω)	62
FIGURA 5.26 - FREQUÊNCIA DE CORTE SUPERIOR (2Ω).....	62
FIGURA 5.27 - SINAL DE ENTRADA (AZUL) E SINAL DE SAÍDA (LARANJA) (2Ω)	63
FIGURA 5.28 - INSERÇÃO DE COMPONENTES NO MEIO.....	63
FIGURA 5.29 - SIMULAÇÃO DA COMUNICAÇÃO PELA REDE ELÉTRICA.....	64
FIGURA 5.30 - TENSÃO DO SINAL DE SAÍDA (2Ω)	65
FIGURA 5.31 - TENSÃO DO SINAL DE SAÍDA (150Ω).....	65
FIGURA 5.32 - COMPARAÇÃO DOS SINAIS MODULADOS (2Ω)	66
FIGURA 5.33 - COMPARAÇÃO DOS SINAIS MODULADOS (150Ω).....	66

FIGURA 5.34 – FUNCIONAMENTO DO SCHMITT TRIGGER	67
FIGURA 5.35 - ONDA DE SAÍDA DO SCHMITT TRIGGER	67
FIGURA 5.36 - ESPECTRO DO SINAL MODULADO DE ENTRADA	68
FIGURA 5.37 - ESPECTRO DO SINAL MODULADO DE SAÍDA (150 Ω)	68
FIGURA 5.38 - ESPECTRO DO SINAL MODULADO DE SAÍDA (2 Ω).....	68
FIGURA 5.39 – SINAL VISTO PELO ANALISADOR DE ESPECTRO	69
FIGURA 5.40 - ACOPLADOR SINTONIZADO.....	70
FIGURA 5.41 - FREQUÊNCIA CENTRAL DO ACOPLADOR SINTONIZADO	70
FIGURA 5.42 - COMUNICAÇÃO UTILIZANDO O ACOPLADOR PADRÃO	71
FIGURA 5.43 - COMPARAÇÃO DOS SINAIS (2 Ω).....	72
FIGURA 5.44 - COMPARAÇÃO DOS SINAIS (150 Ω)	72

Lista de tabelas

TABELA 2.1 - SERVIÇOS DE BANDA LARGA EM ALGUNS PAÍSES	10
TABELA 3.1 - MODELO DE IMPEDÂNCIA DE DISPOSITIVOS ELÉTRICOS.....	24
TABELA 3.2 - NORMALIZAÇÃO DO CANAL ELÉTRICO PROPOSTO PELA CENELEC	28
TABELA 4.1 - PROJETO DE FILTRO PASSA-FAIXA COM REALIMENTAÇÃO MÚLTIPLA DE SEGUNDA ORDEM (Q=5)	44

Capítulo1 - Introdução

1.1 Cenário atual

Os meios de comunicação necessitam de tecnologias cada vez mais velozes e eficientes de transferência de informação, e o custo de tais tecnologias assume um papel importante na disseminação de tais meios.

Buscando as necessidades das novas tecnologias de comunicação de dados, este projeto buscou o conhecimento em transmissão de dados via rede elétrica de baixa tensão. Consistindo em uma tecnologia recente e promissora, pois visa utilizar a extensa rede instalada para o tráfego de dados.

A transmissão de dados via rede elétrica encontra-se bem difundida em alguns países desenvolvidos (EUA, Canadá, França, etc), porém no Brasil esta tecnologia é tão nova que atualmente é difícil encontrar uma literatura técnica a respeito.

Os equipamentos utilizados para prover este tipo de comunicação são caros e complexos de montar.

1.2 Objetivos do trabalho

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral mostrar a viabilidade de se utilizar as linhas da rede elétrica como um canal de comunicação, bem como relatar um estudo teórico do funcionamento da tecnologia PLC, apresentando suas principais características tais como, frequência de trabalho, desempenho obtido, soluções atuais, possíveis problemas de transmissão.

1.2.2 Objetivo específico

O objetivo específico deste trabalho consiste em analisar o estágio de acoplamento, etapa importante na comunicação dos sistemas PLC. A análise incluirá o levantamento de características ideais e pontos críticos de um acoplador. Como forma de validar os conceitos estudados, serão realizadas diversas simulações, com o intuito de verificar o comportamento de um acoplador durante uma transmissão.



Figura 1.1 – Dispositivo de acoplamento

1.3 Importância e justificativa do trabalho

Este projeto tem uma importância fundamental no incentivo à pesquisa acadêmica na área de comunicação via rede elétrica dentro da universidade do Uniceub. O tema, devido à sua complexidade e importância, pode inspirar muitos outros projetos acadêmicos.

O trabalho sobre acopladores foi uma escolha que visou atender aos seguintes quesitos exigidos:

Requisições técnicas – um trabalho que envolvesse um projeto, e recursos de engenharia;

Criatividade e inovação - O tema abordado é tão novo no Brasil quanto no mundo, sendo uma tecnologia muito pouco estudada;

Viabilidade técnica – O tema abordado foi desenvolvido levando em consideração a viabilidade técnica do projeto, utilizando o conhecimento das matérias abordadas durante o curso.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho foi estruturado em 5 capítulos, uma visão conceitual sobre PLC, conceitos sobre acoplamento e projeto.

A visão conceitual sobre PLC, apresentado no capítulo 2, visa explicar de maneira sucinta o que é *Power Line Communication*, o seu funcionamento básico, as tecnologias empregadas atualmente e os investimentos realizados no Brasil.

Em relação aos conceitos sobre acoplamento, o capítulo 3 apresenta os principais tipos de acoplamentos utilizados para a tecnologia PLC e suas características de funcionamento.

O capítulo 4 do projeto visa a elaboração de um acoplador que atenda às requisições exigidas pelo projeto. No capítulo 5 o projeto apresenta uma análise das simulações realizadas sobre o projeto.

1.5 Limites do trabalho

Por abordar um tema relativamente novo, o trabalho se depara com diversas restrições para a elaboração de um projeto acadêmico.

Fatores como a falta de disponibilidade de recursos físicos e financeiros interferem na elaboração de um projeto utilizando tecnologias de ponta, normalmente com preços elevados.

Outro obstáculo é o pequeno acervo de livros e artigos sobre esta tecnologia. Muitas das informações técnicas citadas no trabalho foram obtidas de poucos artigos e teses encontradas na internet.

A segurança do sistema, uma vez que envolve contato com linhas energizadas, constitui outro fator limitante na elaboração do projeto.

Capítulo 2 - Tecnologia PLC

2.1 O que é PLC?

PLC é a sigla para *Power Line Communications*, ou seja, comunicações pela rede de energia elétrica. A ideia do PLC é utilizar a rede de distribuição de energia elétrica como meio de transporte dos sinais de telecomunicações, aproveitando o extenso cabeamento desta rede.

Sabendo que o sistema de distribuição de energia elétrica em baixa e média tensão constitui a maior rede instalada no planeta, sendo acessível em praticamente qualquer lugar e possuindo um grande número de usuários conectados, a utilização unilateral desta rede é um desperdício de recursos de comunicação.

A tecnologia PLC (*Powerline Communications*) surge exatamente com o intuito de mudar este desperdício, fazendo com que esta imensa rede possa ser utilizada de forma bi-direcional para prover serviços de telecomunicações em geral.

O aumento acentuado do uso de softwares compartilhados e recursos multimídia na internet, obriga os sistemas de comunicações a proporcionarem altas taxas de transmissão e conexões permanentes para os usuários.

O alto interesse na utilização das redes de distribuição de energia elétrica para fornecimento de serviços de telecomunicações diversos, voz e dados em alta velocidade, têm motivado a pesquisa e o desenvolvimento de sistemas capazes de superar as características hostis deste ambiente como canal de comunicação.

Diversos aspectos motivam o uso da rede de distribuição de energia elétrica para prover o acesso a serviços de telecomunicações, de acordo com a empresa de distribuição de energia *Light* [12]:

- A principal vantagem oferecida pela rede elétrica é o fato da mesma já está instalada, desonerando os usuários de qualquer custo relativo ao cabeamento.
- Grande mobilidade na conexão, ao alcance de qualquer tomada de energia na rede PLC.
- Transmissão eficaz de dados, vídeo e voz simultaneamente e em alta velocidade.
- Com relação aos serviços de banda larga citados acima, notemos que mesmo em países desenvolvidos a penetração destes serviços é ainda, na maioria dos casos, bem modesta - conforme apresentado na tabela 2.1. Isto faz com que a tecnologia PLC possa

competir com as tecnologias de banda larga mais difundidas atualmente: as variações do xDSL, o Cable-Modem ou mesmo com as recentes soluções wireless, principalmente se o PLC puder representar uma diminuição do investimento por parte do usuário.

Tabela 2.1 - Serviços de banda larga em alguns países

País	Penetração Serviços de Banda Larga (%)
Coréia do Sul	49
Estados Unidos	10
Suécia	9
Dinamarca	6
Alemanha	4
França	3
Inglaterra	1

Nos últimos anos em vários países os mercados de energia e de telecomunicações passaram por um processo de desregulamentação e este fenômeno tem forçado as empresas destes setores a buscarem novas oportunidades de negócio. O impacto tecnológico, bem como as possibilidades comerciais que poderão ser criadas pela tecnologia PLC fazem com que estas empresas se interessem em ampliar suas áreas de atuação.

A tecnologia permitirá, por exemplo, que as concessionárias de energia elétrica possam fornecer serviços de telecomunicações, incorporando estes a sua carta de produtos, além de criar novos serviços úteis às necessidades das próprias concessionárias, os quais seriam de difícil implementação utilizando-se outras tecnologias. Este é o caso de algumas atividades como a leitura à distância do consumo de energia ou a automação de algumas partes do processo de operação do sistema elétrico. Por outro lado, através de contratos de locação, as empresas de telecomunicações poderiam utilizar as redes de distribuição de energia para explorar os serviços acima mencionados. O fato é que a tecnologia PLC pode proporcionar o surgimento de diferentes modelos de negócios.

Além das aplicações citadas acima - serviços de telecomunicações e facilidades relacionadas com as atividades das empresas de energia elétrica - a tecnologia PLC encontra ainda algumas aplicações relevantes:

- **Automação Predial:** Tanto nos lares como nos prédios comerciais, existe a necessidade de controlar e gerenciar utilidades tais como sistemas de aquecimento, ventilação, ar condicionado, iluminação, etc. Sistemas de automação predial capazes de executar estas tarefas de forma automática poderão ter um mercado bastante atrativo. Contudo, os custos deste tipo de solução é ainda bastante alto devido ao fato de que um meio dedicado é necessário para efetuar a comunicação entre os componentes dos sistemas, como um par trançado ou mesmo um link de fibra óptica. Entretanto, todo prédio conta com uma rede elétrica já instalada, chegando a todos os recintos do mesmo. Novamente, com a tecnologia PLC, podem ser desenvolvidas soluções para este tipo de aplicação, conhecida também como smart homes.
- **Redes Locais:** Uma rede local - LAN (*Local Area Network*) - pode ser implementada em qualquer edificação através do acesso PLC, onde vislumbramos duas aplicações. Na primeira, um edifício novo poderia contar desde as etapas iniciais do projeto de sua rede lógica com o emprego de equipamentos PLC, possibilitando que qualquer tomada de energia elétrica seja também um ponto de acesso a rede interna de dados. Neste tipo de aplicação, a conexão com o mundo externo poderia, ou não, ser efetuado com a tecnologia PLC. Uma segunda aplicação interessante seria na instalação de redes de dados em edifícios mais velhos, sem redes lógicas dedicadas, ou mesmo em prédios históricos onde através do PLC nenhuma mudança estrutural para a instalação de cabeamento seria necessária.

A comparação entre a tecnologia PLC e as demais tecnologias citadas mostra que as maiores vantagens da primeira são o fato desta oferecer conexão permanente - não incorrendo nos custos de utilização das linhas discadas - com boa performance e excelente cobertura geográfica.

Porém, como qualquer outra tecnologia, o sistema PLC enfrenta uma série de obstáculos e alguns fatores ainda limitam a utilização da tecnologia:

- **Tecnologia recente ainda em desenvolvimento:** A tecnologia PLC ainda é muito recente. Embora o interesse pela utilização das redes elétricas para transmissão de sinais

não seja algo novo e alguns sistemas já tenham sido desenvolvidos para aplicações mais simples, as técnicas avançadas de comunicações necessárias para superar as características hostis do canal PLC são relativamente recentes.

- **Falta de padronização e interoperabilidade:** Os comitês e órgãos responsáveis pela padronização de sistemas e atribuições de frequências ainda não disponibilizam faixas dedicadas para a tecnologia PLC nem definiram alguns aspectos básicos para garantir a interoperabilidade de sistemas produzidos por diferentes fabricantes. Estes fatores reduzem as iniciativas em investigar as potencialidades do sistema PLC para oferecer serviços de comunicação.

2.2 Funcionamento básico do PLC

Atualmente o funcionamento do PLC (*Powerline Communication*) é estudado em duas categorias diferentes conforme a apresentado na referencia da Ascom [14], a **In-house** e a **Last mile**.

2.2.1 In-house PLC

Esta categoria estuda a comunicação de dados pela rede elétrica sendo transmitida exclusivamente dentro de uma construção. Sistemas In-house utilizam o cabeamento elétrico para transportar os sinais entre os diferentes equipamentos PLC. A grande mobilidade que o cabeamento da rede elétrica proporciona ao usuário dentro de uma casa pode ser visto pela figura 2.1.

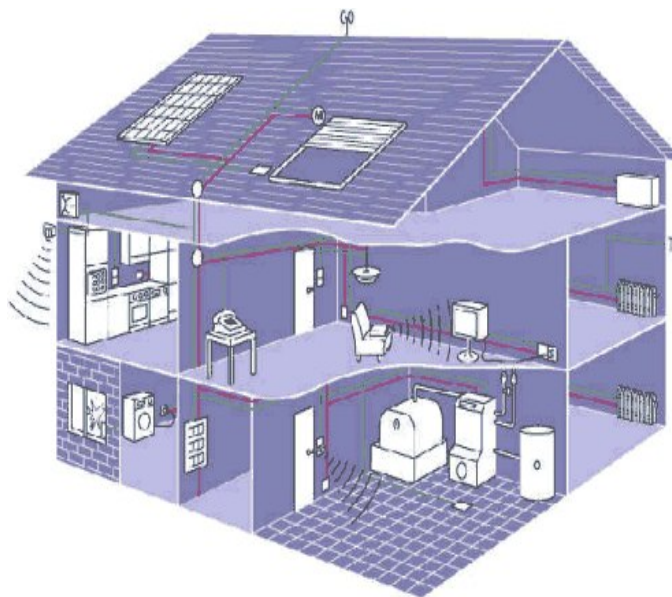


Figura 2.1 - In-house PLC

Atualmente existe uma regulamentação norte americana sobre este tipo de tecnologia chamada *Homeplug* [16].

Esta regulamentação determina as características que a tecnologia oferece:

- A distância é de 300m para que sua rede apresente uma ótima funcionalidade e performance. Em condições ideais é possível alcançar distâncias muito maiores.
- Utiliza modulação OFDM (Modulação por Divisão de Frequência Ortogonal).
- Frequência de 4,5MHz a 21MHz.

- Velocidade de transferência de até 14Mbps
- Para garantir o mínimo de privacidade aos usuários, o padrão utiliza o algoritmo de encriptação DES (Data Encryption Standard), que emprega chaves de 56 bits, razoavelmente seguras para os padrões atuais.

Esta tecnologia oferece bons preços, sendo que cada interface HomePlug custa em média 100 dólares, apesar de haver perspectiva de queda para os próximos meses, já que o padrão ainda é muito novo. A tendência é que o sistema se mantenha mais barato que o 802.11b (wireless), já que não é necessário utilizar pontos de acesso, os transmissores são mais baratos e não é necessário usar a antena que responde por boa parte dos custos das placas 802.11b.

Além do bom preço, ela oferece uma boa perspectiva de crescimento, tendo em vista o desenvolvimento do padrão 2.0, que aumentará a velocidade de transmissão para 100 megabits.

2.2.2 Last Mile PLC

Esta tecnologia abrange a transmissão de dados da casa do usuário até o transformador redutor de média tensão para baixa tensão.



Figura 2.2 - Last Mile PLC

A partir de um ponto de terminação na rua disponibilizada por uma empresa operadora de telecomunicações, um aparelho chamado Master PLC é instalado próximo a um transformador de energia. Ele fará o intermédio entre a central que controla o sistema e as residências. É esse equipamento que coloca os sinais nos circuitos elétricos e, dessa

forma, todos os usuários ligados ao transformador (em média, entre 40 e 60 casas estão ligadas no mesmo) começam a receber os sinais. Em alguns casos críticos será necessário instalar um repetidor no medidor de energia para reforçar o sinal.

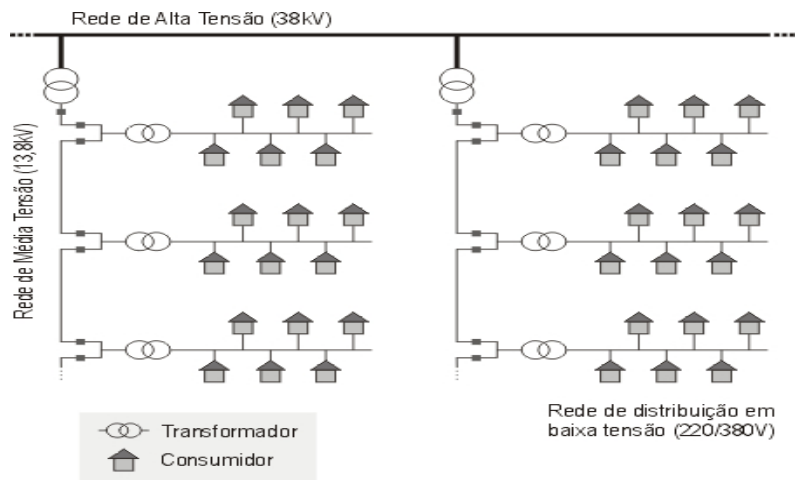


Figura 2.3 - Topologia genérica da rede elétrica

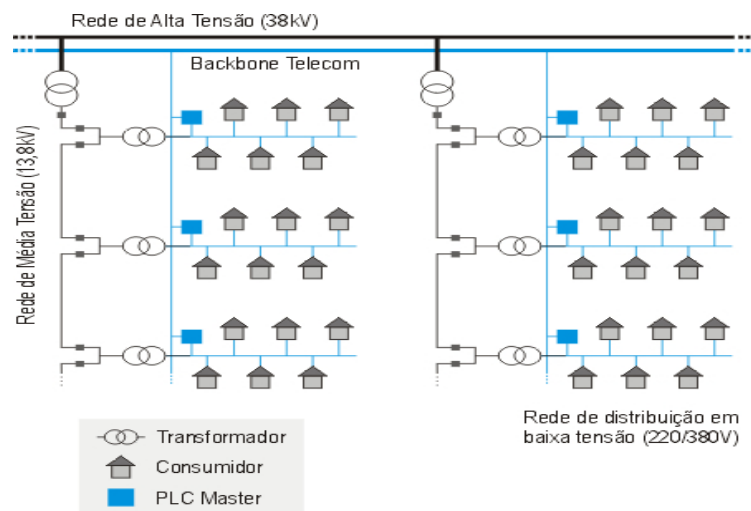


Figura 2.4 - Exemplo de aplicação da tecnologia PLC

No caso de ligar-se na Internet, será preciso um receptor. Neste caso entra o Modem PLC, que funciona da mesma maneira que os modems convencionais que são usados para a ligação à rede hoje. A única diferença é que eles são ligados apenas na tomada, sem necessidade de linha telefônica ou outro tipo de conexão.

É apresentado na Figura 2.4 um exemplo de aplicação de uma rede PLC em contraste com uma topologia da rede elétrica sem a utilização da tecnologia, a partir do transformador que interliga os níveis de média e baixa tensão, o equipamento referenciado

como PLC Master injeta o sinal, proveniente de um backbone genérico de telecomunicações, na rede elétrica de baixa tensão.

2.3 Rede elétrica como canal de comunicação

A rede de distribuição de energia elétrica é um meio extremamente hostil como canal de comunicações. Mesmo a simples conexão entre dois equipamentos em uma mesma instalação apresenta uma função de transferência bastante complicada devido, principalmente, ao comportamento inconstante da impedância do meio. Desta forma as respostas em amplitude e fase variam, numa faixa bem extensa, com a frequência. Em algumas frequências o sinal transmitido pode chegar ao receptor com poucas perdas, enquanto em outras frequências o sinal pode ser recebido com um nível de potência abaixo daquele apresentado pelo ruído, sendo completamente corrompido pelo canal.

O fato da qualidade do sinal recebido variar bastante com a frequência já não é um problema simples, contudo este não é o único aspecto. Os parâmetros da função de transferência do canal PLC variam também com o tempo. Isto ocorre devido a natureza dinâmica com que as cargas são inseridas ou removidas da rede elétrica ou mesmo devido a alguns dispositivos que apresentam impedâncias que variam com tempo, como as fontes chaveadas ou ainda alguns tipos de motores.

Como resultado o canal pode apresentar, em algumas faixas de frequências, uma boa qualidade para a transmissão, enquanto em outras o canal pode ter uma capacidade bastante limitada.

Devido às propriedades de variância com a frequência e com o tempo, uma utilização eficiente da rede elétrica como meio de comunicações requer técnicas que inibam, de alguma forma, as variações dos parâmetros da função de transferência do canal PLC.

Típicas fontes de ruído, presentes na rede elétrica, são: motores com escovas, fontes chaveadas, reatores para iluminação e os dimmers, dentre outras. Estes equipamentos introduzem componentes de alta frequência na rede caracterizando as ‘emissões conduzidas’. Constituinte outra forma de inserção de ruído, as ‘emissões irradiadas’ são aquelas provenientes de emissoras de rádio em geral, ou mesmo de alguns equipamentos como aqueles citados anteriormente.

O impacto destas diferentes fontes de interferência no sistema é que num pacote de dados recebido, o número de erros pode ser considerável, necessitando de alguma forma de correção.

Além dos problemas envolvendo frequências, outros contratempos desafiam os pesquisadores na tentativa de conduzir dados em alta velocidade por cabos de eletricidade. O principal deles, sem dúvida, é o ruído, muito comum na rede elétrica.

Outro empecilho para a popularização da tecnologia é a padronização do sistema elétrico. Os esquemas de distribuição elétrica são muito diferentes entre os países, o que dificulta as pesquisas.

Outros problemas comuns às redes de energia são as descargas atmosféricas e a vulnerabilidade dos cabos e postes elétricos a temporais. Todos eles comprometendo a viabilidade da tecnologia e sua aplicação efetiva. Por fim, no Brasil, a transferência de dados por cabos de eletricidade ainda terá de ser homologada pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel).

Para superar estes obstáculos, hoje a atual tecnologia utiliza uma modulação chamada OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) = Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência. Esta técnica já vem sendo usada na telefonia celular 3G, na TV digital (padrão japonês) e em rádio FM digital. Em termos práticos, a OFDM é implementada por um chip, que possui 86 modems embutidos que, em conjunto, acabam com os ruídos analógicos.

Este tipo de modulação é muito utilizado também em outros sistemas de comunicação já consolidados como ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), VDSL (Very high bit-rate Digital Subscriber Line), DAB (Digital Áudio Broadcasting) e DVB (Digital Video Broadcast).

Assim, a modulação em OFDM garante a estas tecnologias, altas taxas de transmissão, excelente performance e confiabilidade.

Este padrão de modulação garante uma melhor adequação à rede elétrica, pois de acordo com o nível de ruído e frequência em que estes ruídos se encontram, estes equipamentos alternam o carregamento dos dados automaticamente entre várias portadoras, garantindo assim estabilidade de comunicação mesmo sob condições de rede desfavoráveis.

Na figura abaixo, está um exemplo de como a modulação em OFDM pode se adequar às diversas condições da rede em tempo real.

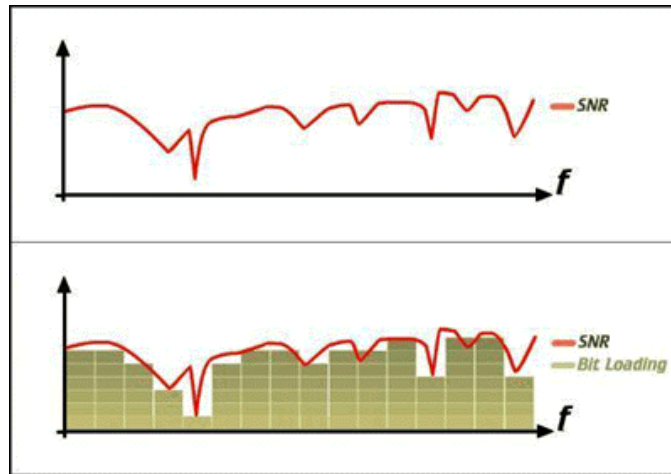


Figura 2.5 - Funcionamento da modulação OFDM

Conforme o ruído se propaga por diversas frequências (SNR - Signal-to-Noise Ratio), os sinais são carregados e transmitidos (Modulados) em várias frequências simultâneas, e em níveis de carregamento diferentes, aproveitando desta forma a melhor condição possível do link escolhido.

2.4 Síntese

A comunicação PLC é uma promessa para um futuro próspero. Suas técnicas de transmissão e recepção se desenvolveram muito nos últimos anos, tornando sua utilização uma prática viável e barata.

No Brasil, grandes empresas como a Cemig, Eletropaulo, Copel e outras possuem a tecnologia PLC bastante desenvolvidas.

O PLC é uma tecnologia que tende a crescer, pois possui uma vantagem fundamental sobre as demais, conforme apresenta a figura 2.6.

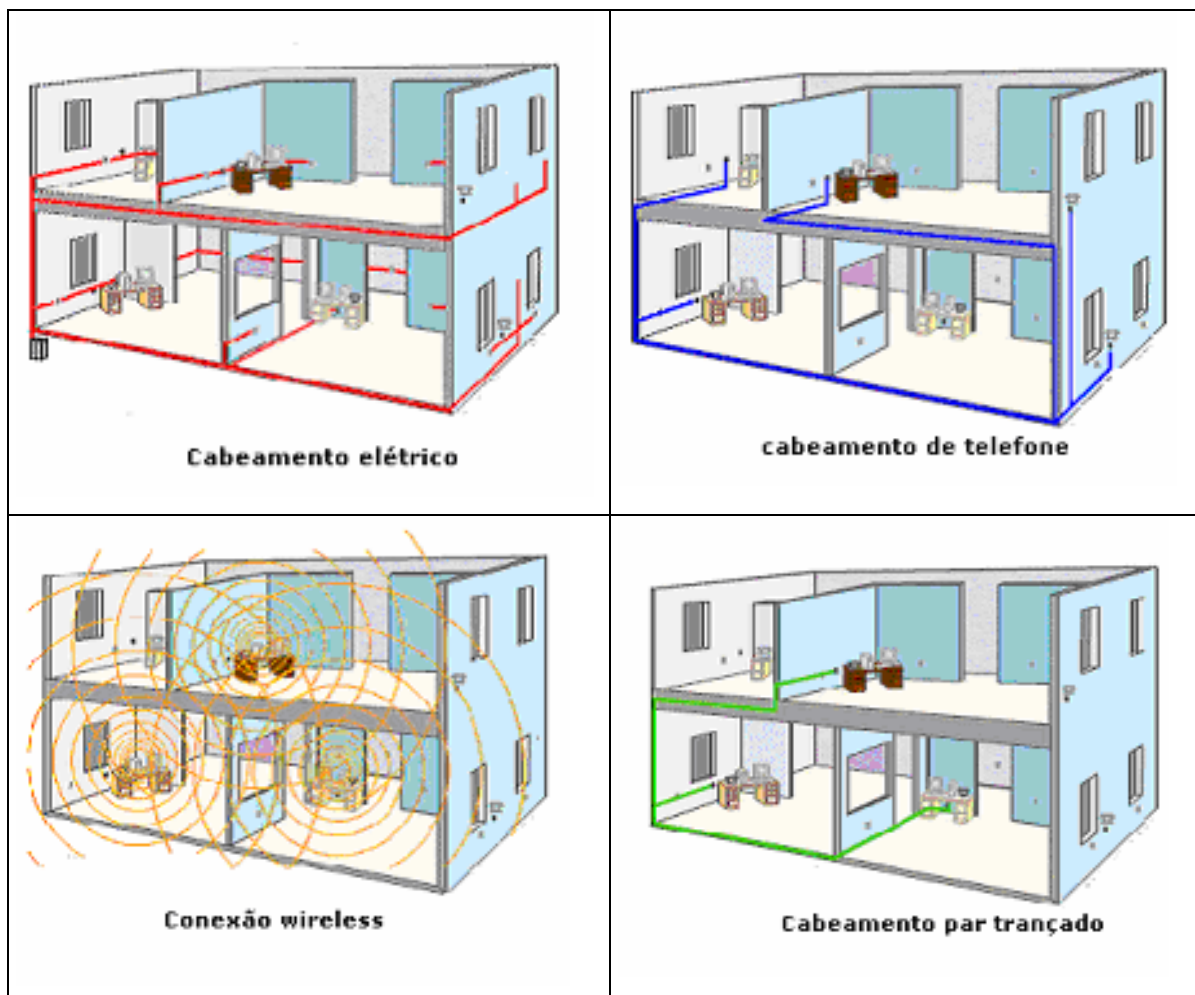


Figura 2.6 - Comparação entre a acessibilidade das tecnologias

Esta tecnologia não requer instalação de um novo cabeamento, aproveitando o cabeamento elétrico, possui um número maior de pontos acessíveis para a rede e alcança

velocidades consideráveis. Atualmente a tecnologia wireless é a grande rival da PLC, porém, o fator ‘custo’ vem pesando e dando espaço para a comunicação via rede elétrica.

Capítulo 3 - Características dos acopladores

O enfoque dado no projeto envolve um estudo sobre a etapa de acoplamento na comunicação de dados pela rede elétrica. Porém antes de elaborar qualquer projeto que envolva comunicação pela rede elétrica é necessário levantar o comportamento deste meio e as normatizações que padronizam a utilização deste cabeamento para o tráfego de dados.

3.1 O acoplador e suas características

Os acopladores são dispositivos que interligam duas redes de diferentes características. Neste projeto, estes dispositivos são responsáveis pela inserção/remoção adequada do sinal transmitido na rede elétrica.

Existem diversos modos de acoplar sinais de comunicações na rede elétrica. Os dois principais são:

O modo **diferenciado de acoplamento**, onde o fio ativo (fase) é usado como um terminal, e o fio do neutro como o segundo terminal. Nos casos onde não existem linhas neutras (redes de alta tensão), o fio terra age como o segundo terminal.

No modo **comum de acoplamento**, o fio ativo (fase) e fio neutro são usados juntos, servindo como um terminal, e o fio terra serve como o segundo terminal. Esta modalidade de acoplamento pode trazer problemas na presença de dispositivos de proteção de fuga ao terra (dispositivo DR). Em determinados países não é permitido o acoplamento desta modalidade por causa dos perigos concebidos aos clientes.

Considerando a implementação física do acoplamento, dois métodos são possíveis: o capacitivo e o indutivo.

3.1.1 Acoplamento capacitivo

Um capacitor é responsável pelo acoplamento real das duas redes. Uma das vantagens deste método de acoplamento é poder trabalhar com frequências relativamente altas. Possui um baixo custo e fácil manuseio, porém tem como desvantagem o fato de que não existe isolamento elétrico entre as etapas. Neste método a eficiência do acoplador é

normalmente determinada pelo ganho do estágio amplificador, que é dependente da frequência.

3.1.2 Acoplamento indutivo

Um indutor é usado para acoplar o sinal de comunicação na rede elétrica. O acoplamento magnético proporcionado por essa solução fornece uma separação física entre a rede elétrica e a rede de comunicações, pois os dispositivos usados são os transformadores.

O transformador pode ser utilizado para isolamento, multiplicação de tensão ou corrente e casamento de impedâncias. A principal desvantagem do uso do transformador é seu volume e custo, juntamente com o fato de que a resposta de frequência é mais pobre do que a do acoplamento capacitivo.

3.2 Soluções de acopladores

Por razões de segurança no acoplamento, todos os exemplos de acopladores utilizados por autores de outros trabalhos focaram o método de acoplamento indutivo.

3.2.1 Acoplador padrão

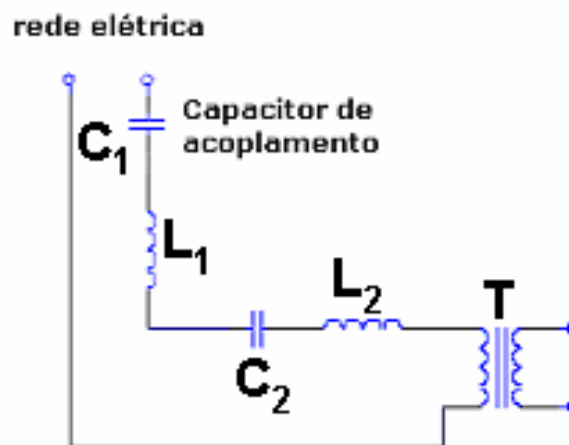


Figura 3.1 - Topologia padrão de acopladores para PLC

Esta topologia apresentada na figura 3.1 é a mais comum utilizada atualmente, [13]. Este método é baseado em dois princípios:

- Um valor de capacitância C_1 gera uma impedância suficiente para filtrar a frequência de 50/60 hertz.
- A impedância de toda a estrutura do primário do transformador deve ser baixa o suficiente para casar com a impedância da rede elétrica.

3.2.2 Acoplador de Roy e Abraham

Roy e Abraham [4] projetaram uma topologia diferente do padrão, dada na figura 3.2. Neste acoplador uma alta capacitância ($C_{eq}=0.5\mu F$) é usada para acoplar o sinal na linha da transmissão. A principal desvantagem desta técnica é que resulta na perda significativa de intensidade da portadora (citada pelo autor como até 20dB).

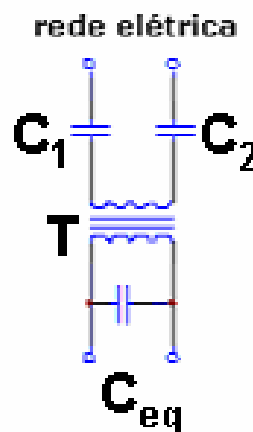


Figura 3.2 - Topologia proposta por Roy e Abraham

3.2.3 Acoplador Glenn Platt

Levando em consideração as perdas significativas geradas na topologia criada por Roy e Abraham, Glenn Platt [13] desenvolveu uma nova estrutura baseada na topologia padrão. Esta nova topologia, apresentada na figura 3.3, acrescenta um transformador de duplo enrolamento no secundário, isto causa uma menor dependência da indutância do transformador. O desempenho não será tão afetado pela mudança de indutância.

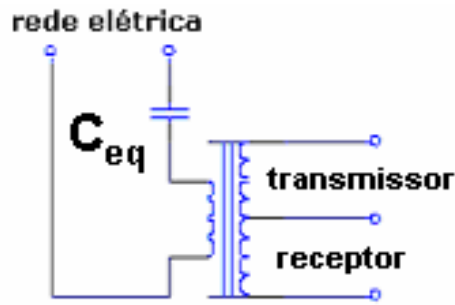


Figura 3.3 - Topologia proposta por Glenn Platt

É apresentada na figura 3.4 uma comparação realizada por Glenn Platt entre a topologia padrão e a topologia re-projetada por ele. Nota-se que o novo circuito apresenta uma redução da frequência de corte e uma maior linearidade na resposta em frequência, embora não tenha sido feito um estudo sobre o comportamento da fase.

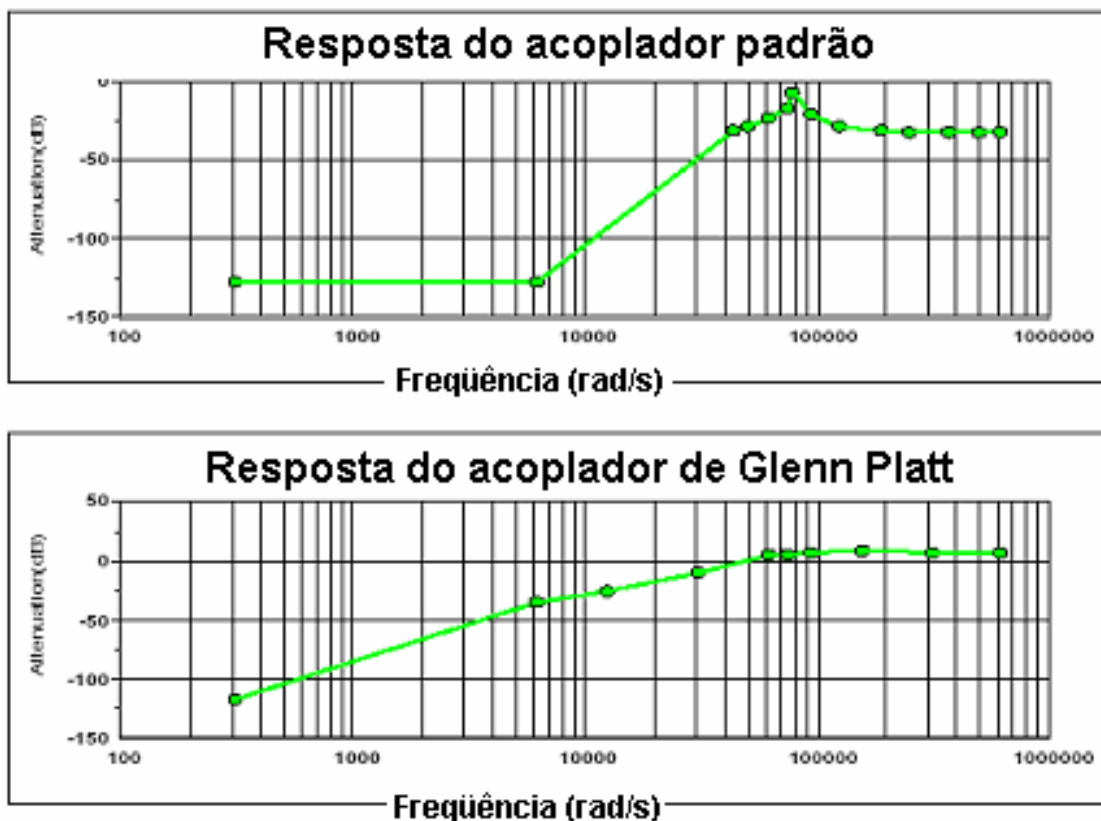


Figura 3.4 - Resposta da solução padrão e a de Glenn Platt

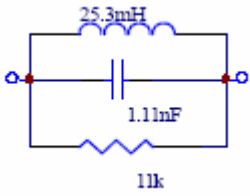


3.3 Características do canal de comunicação PLC

3.3.1 Atenuações e impedâncias do canal PLC

Malack e Engstrom [5] publicaram que a impedância característica dos cabos usados para a transmissão de energia elétrica varia de 70-100 ohms. Porém as comunicações da tecnologia PLC não podem ser analisadas de forma uniforme, pois o número de cargas interligadas à rede elétrica é variável no tempo. Com isso, torna-se bastante difícil afirmar o valor exato da impedância da rede num determinado tempo.

Os modelos de impedância de alguns equipamentos elétricos comuns na rede de baixa tensão são apresentados pela tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Modelo de impedância de dispositivos elétricos

Dispositivo	Modelo de impedância
Refrigerador	
Lâmpada incandescente	
Aquecedor de pé	

Baseada nos dados fornecidos por G. Marubayashi and S. Tachikawa, "Spread Spectrum Transmission on Residential Power Line", IEEE Conference on Spread-Spectrum Techniques, January 1996, pp1082-1086. [6]

Ou seja, a impedância total da rede da baixa tensão resulta de uma conexão paralela das cargas de toda a rede, assim as pequenas impedâncias terão um papel dominante na determinação da impedância total. A impedância total da rede é obviamente muito difícil de modelar, pois é inviável definir quando um dispositivo será ligado.

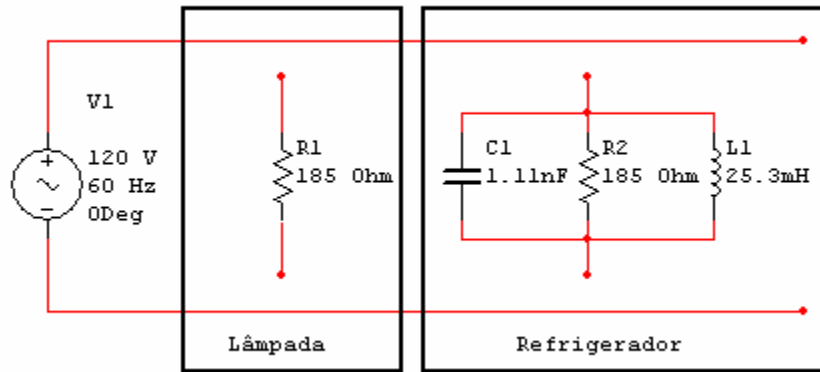


Figura 3.5 - Representação dos dispositivos na rede elétrica

Schaap [7] cita valores de 0.1-2Ω para redes da baixa tensão. Dostert [8] reivindica dizendo que a impedância varia de 2-150Ω, Whilst Malack e Engstrom [5] encontraram resultados de 0-80Ω. Claramente, na maioria dos casos a impedância no canal é muito baixa. Isto apresenta desafios significativos ao projetar um dispositivo de acoplamento para comunicações do PLC.

Todas as impedâncias encontradas foram adquiridas a partir de coletas em áreas residenciais, podendo apresentar comportamentos diferentes em áreas industriais.

A teoria de máxima transferência de potência indica que as impedâncias do transmissor e da rede elétrica devem ser combinadas para que a potência recebida pela carga seja realmente máxima. Porém com a impedância do meio variando fortemente, esta transferência máxima de potência torna-se complexa de se alcançar.

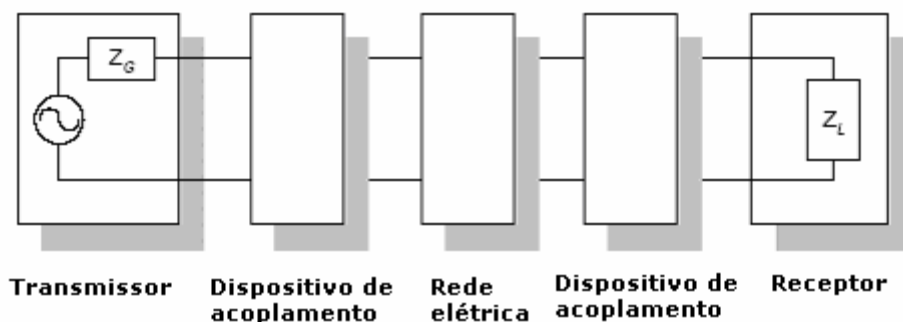


Figura 3.6 - Sistema de comunicação do PLC

A atenuação do sinal de comunicação na rede elétrica é bastante elevada, de acordo com Schaap [7], podendo chegar, na rede de baixa tensão, à 100dB/km.

Obviamente, as distâncias superiores a centenas de metros necessitam de repetidores, mas permanecem desnecessários para o uso local.

3.3.2 Modelos propostos para o canal

Como as características da rede elétrica variam com tempo, um modelo exato do canal de comunicações powerline é muito difícil de determinar. A imprecisão inerente a tais modelos faz sua aplicabilidade limitada, contudo duas topologias distintas são aceitas geralmente como sendo representações razoáveis do canal de PLC. Dostert [8] propõe o circuito modelo mostrado em figura 3.7. Deve-se notar que em ambos os modelos, todos os elementos são dependentes do tempo.

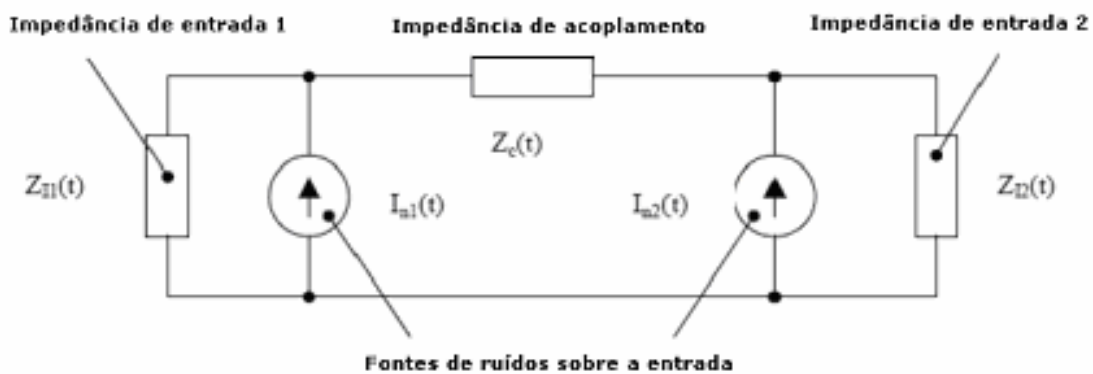


Figura 3.7 - Modelo apresentado por Dostert

Onunga [9] propõe o modelo de canal da figura 3.8.

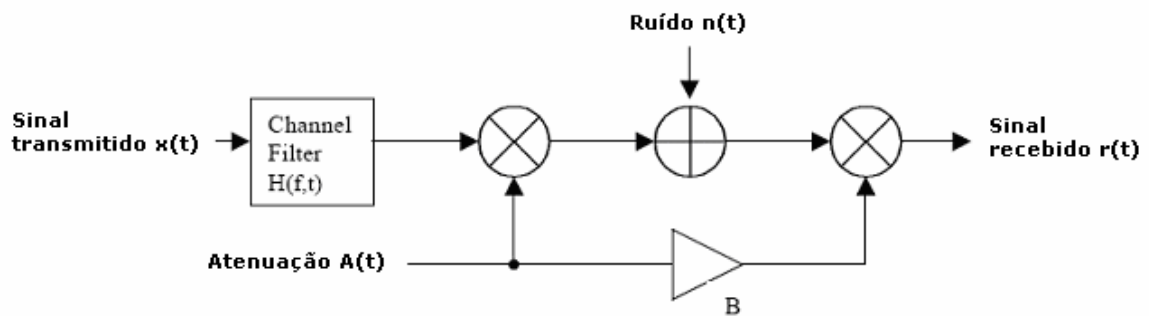


Figura 3.8 - Modelo do canal proposto por Onunga

3.3.3 Padronizações do canal

A padronização desta tecnologia no Brasil ainda se encontra em estado de desenvolvimento. A ANATEL formou uma equipe de engenheiros de diversas empresas (COPEL, Eletropaulo, Light e professores de diversas universidades) a fim de desenvolver um projeto de regulamentação do canal elétrico para uso com comunicações de dados. Os trabalhos estão sendo realizados há dois anos.

Porém, em diversos países, existem regulamentações que especificam as operações dos sistemas PLC. Estes padrões foram projetados nestes continentes levando em consideração fatores como o acesso multi-usuários, o controle de sistema de água e os outros dispositivos PLC. CENELEC(European Committee for Electrotechnical Standardization), o órgão de padronização elétrico da CEE, fornece o mais rigoroso padrão entre todos os outros divulgados no mundo para comunicações PLC, além de estabelecer especificações da maioria dos dispositivos empregados atualmente [15].

O padrão EN50065 da CENELEC regula parâmetros importantes tais como a faixa de frequência, potência do sinal e assim por diante. O padrão permite que sistemas de comunicação PLC operem na faixa de frequência 3kHz a 148.5kHz, evitando a interferência com sistemas de controle do ripple no limite mais baixo e interferência com sinais de onda longa (LW) e de onda média (MW). A CENELEC divide esta faixa (3-148.5kHz) em subcategorias, conforme mostrado na tabela 3.

Banda	Descrição
A	A faixa de 3-95kHz é alocada para o uso de serviços públicos, como a leitura de medidores, controles automatizados da carga do cliente, etc.
B	A faixa de B, de 95-125kHz não requer nenhum uso do protocolo de acesso para estabelecer comunicação. Assim, é possível que dois sistemas possam transmitir simultaneamente nesta faixa, porém a probabilidade de suas mensagens colidirem se torna maior. Esta faixa é projetada para o uso de aplicações como monitores de bebês, intercoms, etc.
C	A faixa de C, de 125-140kHz requer um protocolo de acesso para ser utilizada pelos dispositivos que transmitem nesta escala. Este protocolo visa impedir a transmissão simultânea das mensagens. Assim, sistemas diferentes podem funcionar na mesma instalação, mas somente um transmissor pode operar da cada vez. As especificações das frequências são dadas pelo protocolo do acesso. As aplicações para os dispositivos que operam nesta faixa podem ser: a comunicação entre computadores de um edifício, automação predial e residencial, etc.
D	A faixa de D (140-148.5kHz) é similar à faixa A, mas não requer protocolo do acesso, sendo assim é possível colisões de mensagens.

Tabela 3.2 - Normalização do canal elétrico proposto pela CENELEC

A CENELEC EN50065 especifica também exigências de imunidade contra interferências para sistemas de comunicação do PLC, além de abordar também os métodos de teste para determinar tal imunidade. Por último, EN50065 especifica parâmetros como protocolos de comunicação (de acordo com as camadas OSI, 1-camada física e 2-camada de ligação de dados), impedância dos equipamentos (que evitam a atenuação excessiva do sinal devido aos dispositivos múltiplos de PLC), e especificações do filtro para a remoção de portadoras, etc. A CENELEC especifica que a potência máxima transmitida por um dispositivo PLC não deve exceder 500 mW.

3.4 Características desejadas dos protótipos

Para projetar um acoplador voltado à rede elétrica (Coupling network for PLC) é aconselhável levar em consideração os seguintes fatores básicos que minimizam a hostilidade da comunicação pelo canal elétrico e aumentam a eficiência da comunicação.

3.4.1 Uma resposta em frequência apropriada dos módulos utilizados no acoplador

Esta característica referente a frequência é muito importante pelo fato de que, em comunicações pela rede elétrica, é comum a utilização de médias e altas frequências. Seguindo as orientações do órgão internacional chamado CENELEC (Comité Europeo para la Normalización Electrotécnica), o acoplador para comunicações PLC deve funcionar corretamente dentro do intervalo desejado. Estas frequências variam de **3kHz a 148,5kHz**, de acordo com a utilização desejada.

Nos casos de acoplamento indutivos (mais utilizados), é necessário um estudo sobre as respostas em frequência de determinados transformadores, estas respostas em frequência estão intimamente relacionadas à confecção do núcleo do transformador. Apesar da complexidade de se calcular a resposta em frequência de um transformador, a escolha deste deve estar associada às características práticas descritas no anexo A. Cada tipo de transformador possui características próprias que devem ser levadas em consideração para cada tipo de projeto.

A análise matemática abordada para o transformador utilizado foi realizada considerando um circuito equivalente do transformador de núcleo de ferro real [1] apresentada na figura 3.9:

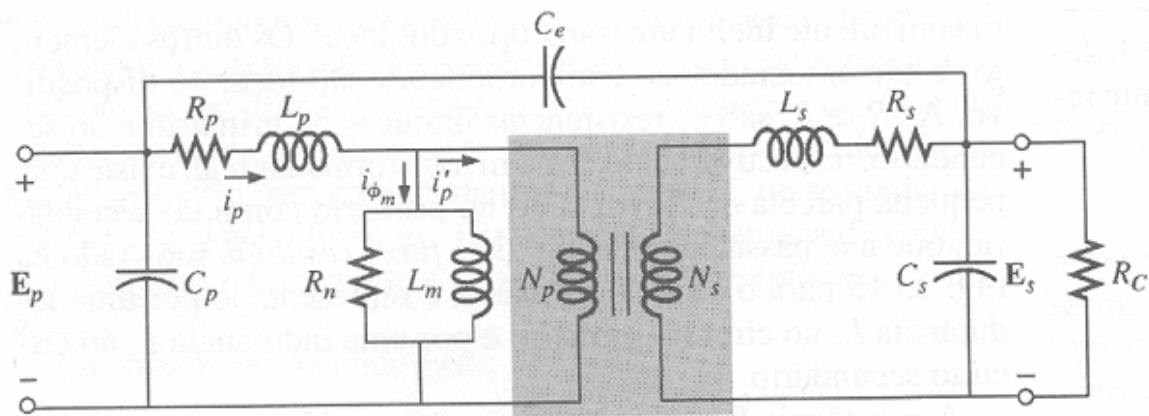


Figura 3.9 - Modelo de um transformador real

Para modelar um transformador real, vários elementos são associados ao comportamento ideal do dispositivo. As R_p e R_s são resistências ôhmicas do primário e do secundário, respectivamente. Em um transformador real, existe uma pequena parcela do fluxo, tanto no primário como no secundário, que não passa pelo núcleo. Este fluxo residual é representado por uma indutância L_p no circuito primário e por uma indutância L_s no circuito secundário. A resistência R_n representa as perdas por histerese e correntes parasitas no núcleo do transformador. A indutância L_m é a indutância associada à magnetização do núcleo (ϕ_m). As capacitâncias C_p e C_s são as capacitâncias dos circuitos primário e secundário, e C_e representa a capacitância entre o circuito primário e o circuito secundário.

Simplificando a utilização do transformador [1] podemos considerar as seguintes condições:

- I_p é normalmente muito maior do que $I\phi_m$, podendo assim ignorar $I\phi_m$, omitindo R_n e L_m .
- As capacitâncias C_p , C_e e C_s desaparecem porque suas reatâncias nas médias frequências escolhidas para operação não afetam consideravelmente as características do transformador.

Refletindo a impedância do circuito secundário para o circuito primário, como mostra a figura 3.10 [1], teremos a carga e o gerador no mesmo circuito. A resistência total e a reatância total do circuito equivalente são dadas por:

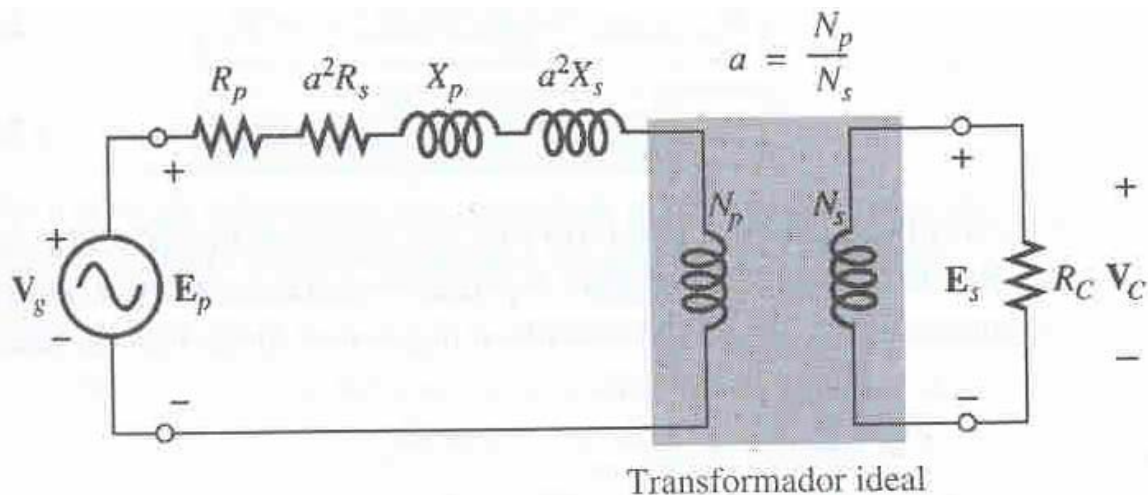


Figura 3.10 – Impedância refletida no primário

$$R_{equivalente} = R_e = R_p + a^2 R_s$$

$$X_{equivalente} = X_e = X_p + a^2 X_s \quad \text{Eq. 1}$$

Aplicando as impedâncias equivalentes, obtemos um modelo simplificado do transformador, conforme a figura 3.11.

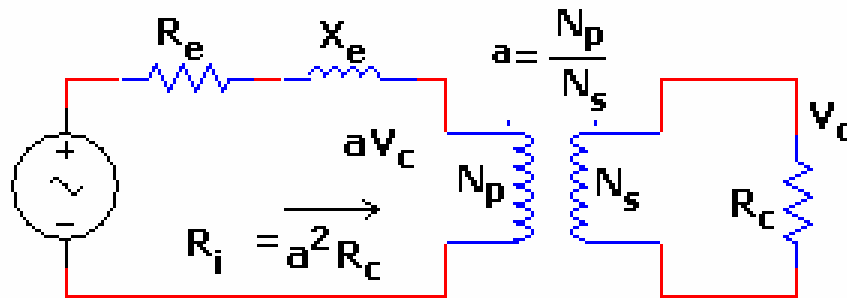


Figura 3.11 - Modelo simplificado do transformador

$$V_c = \frac{a^2 R_c V_g}{(R_e + a^2 R_c) + jX_e}$$

$$\frac{V_c}{V_g} = \frac{a^2 R_c}{(R_e + a^2 R_c) + jX_e} \quad \text{Eq. 2}$$

No geral, a resposta em frequência de todo o acoplador deve responder adequadamente à frequência desejada, ou seja, transformadores, filtros ativos, e qualquer outro componente utilizado não poderão trabalhar na sua área de saturação.

3.4.2 Fator segurança

Uma outra característica que um acoplador deve apresentar é a segurança. Deve-se promover uma separação física entre as redes acopladas.

O transformador é uma solução que satisfaz à exigência de segurança, para nível AC, pois os enrolamentos de um transformador não mantêm contato elétrico entre si já que a transferência de energia se faz através de um campo magnético, sendo utilizado como um dispositivo isolador. Quando o propósito do transformador é fornecer apenas isolamento, a

sua razão a é mantida unitária. Portanto, um transformador de isolamento possui $a=1$. As grandes desvantagens encontradas no uso de um transformador são:

- Difícil acesso às especificações de resposta em frequência de um transformador comercial
- Grande volume ocupado no projeto físico
- Alto preço, pois normalmente tem que ser feito sob encomenda.

Outro dispositivo que proporciona uma separação física é o acoplador óptico. Os acopladores ópticos são compostos por dispositivos opto-eletrônicos formados por um emissor de luz e um foto sensor num mesmo invólucro. O tipo mais comum é o que emprega um LED emissor de luz e um fototransistor. Quando o LED é excitado, ele emite uma luz que atua sobre o fototransistor. Isso significa que, aplicando um sinal ao LED podemos transferi-lo para o fototransistor através da luz. Como não existe um contato elétrico entre o emissor e o receptor (LED e fototransistor), o isolamento entre os dois circuitos é enorme.

3.4.3 Uma transferência de potência adequada

Em varias situações práticas, um circuito é projetado para fornecer potência a uma carga. Na área de equipamentos elétricos, a minimização das perdas de potência no processo de transmissão e distribuição é crítica por questões econômicas e de eficiência, porém em áreas como a de comunicação, a máxima potência pode se tornar um elemento primordial na transmissão.

O teorema de Thèvenin é bastante útil para se determinar a máxima potência que um circuito linear pode entregar a uma carga.

Adotando Z_{th} como a impedância de Thèvenin e Z_{ca} , a impedância da carga, poderá ser ajustada.

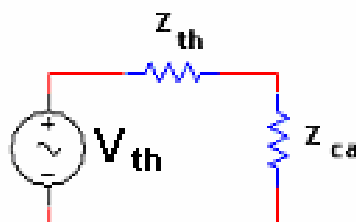


Figura 3.12 - Equivalente de Thevenin

Podemos concluir que a potência entregue para a carga será:

$$p = i^2 * Z_{ca}$$

$$p = \left(\frac{V_{th}}{Z_{th} + Z_{ca}} \right)^2 * Z_{ca} \quad \text{Eq. 3}$$

Para dado apresentado na figura 3.12, V_{th} e Z_{th} são fixos, podendo variar apenas a Z_{ca} . No gráfico abaixo mostra o comportamento da potencia na carga Z_{ca} .

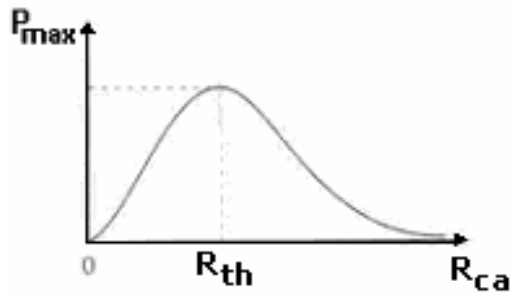


Figura 3.13 - Relação potência por resistência da carga

A máxima potência é transferida para a carga quando a impedância da mesma é igual ao conjugado da impedância de Thèvenin vista pela carga ($Z_{ca}=Z_{th}$).

Substituindo a condição de máxima potência na equação encontrada, obteremos a seguinte expressão:

$$P_{max} = \frac{V_{th}^2}{4 \text{Re}[Z_{th}]} \quad \text{Eq. 4}$$

, onde $\text{Re}[Z_{th}]$ é a parte real de Z_{th} .

Abstraindo esta teoria para utilização prática do projeto, podemos considerar V_{th} a tensão do sinal modulado, Z_{th} a impedância interna do gerador mais a impedância do acoplador e Z_{ca} será a impedância representada pelo canal elétrico. O desenho abaixo mostra um circuito equivalente para calcular a potência utilizada.

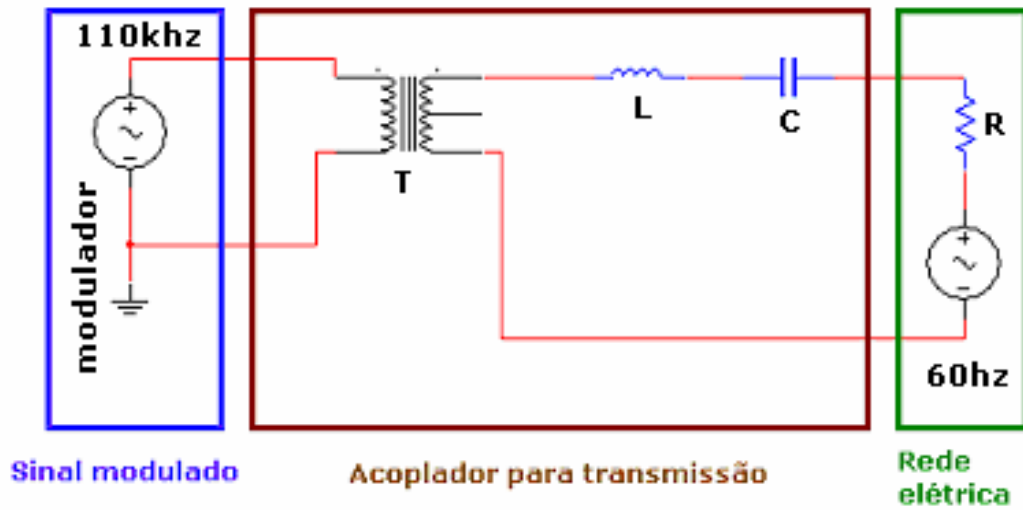


Figura 3.14 - Abstração para o modelo real

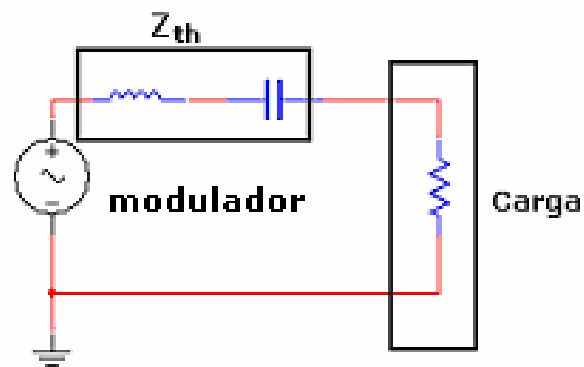


Figura 3.15 – Circuito equivalente visto pela carga

Pela natureza do canal elétrico, sua impedância varia muito, não sendo possível manter continuamente um acoplamento ideal para máxima transferência de potência.

3.4.4 Projeto de um filtro eficiente

Os acopladores projetados para sistemas PLC devem levar em consideração que o canal utilizado para transmissão possui sinais em diversas frequências, incluindo os sinais gerados a partir de ruídos de motores e outros equipamentos, além do sinal de 60Hz com tensões elevadas 110/220Volts.

Para eliminar estas frequências indesejadas, o acoplador deverá ser capaz de rejeitar os sinais que não possuam a sua frequência na faixa utilizada na comunicação. Assim sendo, a utilização de filtros é recomendável.

a) Filtro Passivo Passa-Faixa

O filtro passivo passa-faixa pode ser constituído por um circuito ressonante RLC quando a saída é retirada no resistor, como mostrado na figura 3.16.

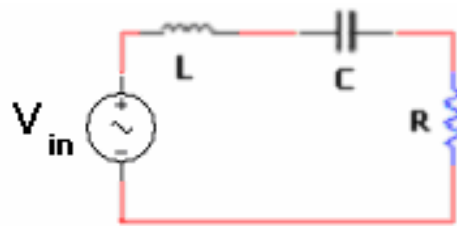


Figura 3.16 - Filtro passivo passa-faixa

Com base no circuito apresentado, podemos obter a função de transferência:

$$H(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{R + j(\omega L - 1/\omega C)} \text{ Eq. 5}$$

Observe que $H(0)=0$ e $H(\infty)=0$. O filtro passa-faixa permite a passagem de uma banda de frequências ($\omega_1 < \omega < \omega_2$) centrada em ω_0 , a frequência central, dada por:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ Eq. 6}$$

b) Filtro Ativo Passa-Faixa

Existem duas grandes limitações na utilização dos filtros passivos, que tornam os filtros ativos uma boa opção para projetos.

Primeiro, os filtros passivos não podem gerar ganho maior do que um, sendo inadequados para pequenos sinais. Segundo, necessitam de grandes e caros indutores, em frequências médias e baixas de operação.

A configuração que foi utilizada para a construção do filtro passa-faixas é chamado de projeto de realimentação múltipla com ganho infinito (IGMF – infinite-gain multiple feedback). A figura 3.17 mostra o arranjo dos componentes usados para se obter um filtro passa-faixas de segunda ordem. Uma vantagem do projeto IGMF é a utilização de poucos componentes em relação às demais soluções de filtro, porém ele também apresenta boa estabilidade de baixa impedância de saída. O filtro IGMF inverte os sinais na sua banda passante.

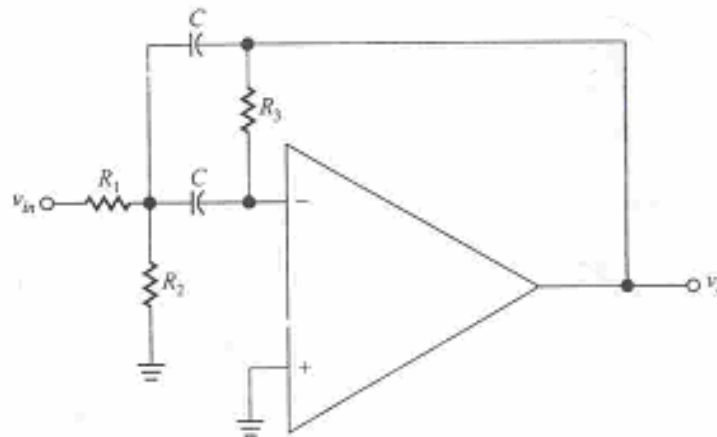


Figura 3.17 - Filtro IGMF

O procedimento para o projeto de um filtro IGMF consiste no cálculo de uma constante K [10]. Para isso escolhemos primeiro um valor de capacitância C e depois calculamos:

$$K = \frac{10^{-4}}{f_0 C} \text{ Eq. 7}$$

Onde f_0 é a frequência de centro desejada do filtro passa-faixas. Uma tabela correspondendo a um valor desejado de Q (fator de qualidade) é então consultada [10] para

encontrar os fatores que multiplicam K e determinam os valores de R_1 , R_2 e R_3 em quilohms, conforme mostra a figura 3.17.

A função de transferência deste filtro pode ser obtida pela equação[11]:

$$H(s) = \frac{sR_3C}{s^2R_1R_3 + s2R_1C + (1 + R_1/R_2)} \text{ Eq. 8}$$

onde o fator qualidade pode ser calculado por:

$$B = w_2 - w_1 \qquad Q = \frac{w_0}{B}$$

3.5 Síntese

Conforme visto, os acopladores representam uma etapa muito importante na comunicação de dados pela rede elétrica, definindo a qualidade do sinal enviado e recebido do meio.

Este capítulo mostrou algumas considerações que devem ser adotadas para projetar um acoplador para a comunicação na rede elétrica. Questões como características do meio, soluções em funcionamento, características ideais, são de extrema importância para o funcionamento correto, seguro e eficiente da etapa de inserção e remoção do sinal de comunicação do meio.

Capítulo 4 - Projeto dos acopladores

Neste capítulo será proposto um par de acopladores utilizados na transmissão e recepção dos dados trafegados na rede elétrica. O foco visa em melhorar o desempenho do acoplador ligado no receptor. A modulação prevista para o melhor funcionamento dos acopladores é a Frequency Shift Keying (FSK), por apresentar uma fácil implementação e bom desempenho em condições de atraso na fase, conforme apresenta o anexo C.

4.1 Sugestão do par de acopladores

Baseado nas características citadas sobre acopladores ideais, foi proposto um par de acopladores unidirecionais capazes de inserir e retirar informações moduladas em frequência da rede elétrica buscando máximo desempenho.

Por apresentar características de funcionamento diferentes, foram propostas duas topologias diferentes, uma para o transmissor e outra para o receptor.

4.1.1 Topologia do receptor

A topologia apresentada na figura 4.1 é constituída por um filtro passivo passa-alta, um filtro ativo passa-faixa e um amplificador inversor. O filtro passivo passa-alta foi inserido no início do desacoplamento para atenuar ao máximo a frequência de 60Hz, com tensão elevada, possibilitando a utilização de filtros ativos.

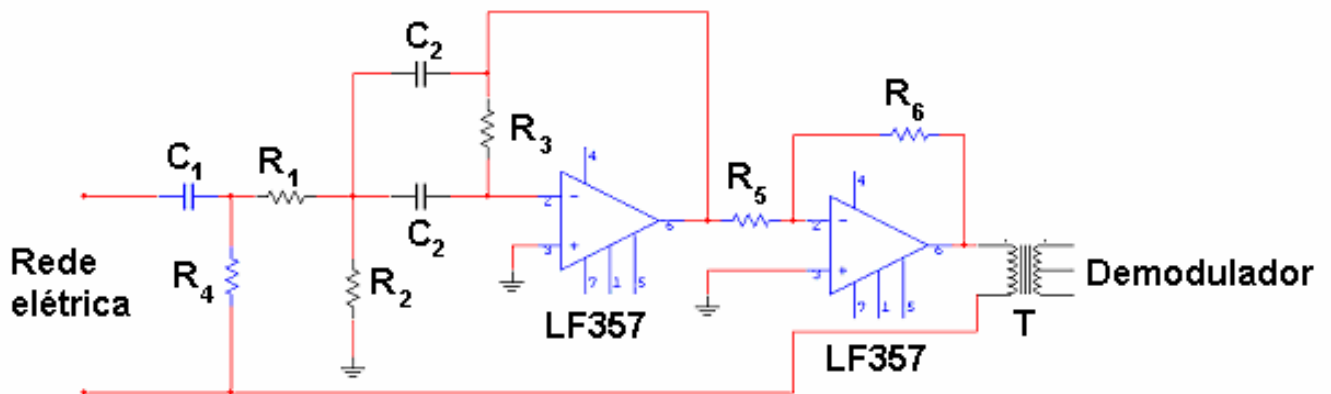


Figura 4.1 - Topologia proposta na recepção dos dados

Após a retirada da frequência de 60hz, o filtro ativo passa-faixa localizado no acoplador acima tem como objetivo selecionar melhor a banda de frequência utilizada para a comunicação, atenuando os ruídos de frequências elevadas.

A utilização de filtros ativos em acopladores é uma experiência nova, estes tipos de filtros descartam a necessidade de indutores, além de proporcionarem um ganho no sinal desejado.

Os amplificadores empregados no filtro ativo utilizam FET (Field Effect Transistors) em sua constituição, o que garante uma grande impedância de entrada e, conseqüentemente, maior facilidade de associação de blocos em cascata. AmpOps a FET também são ideais para sinais de pequena amplitude e possuem banda de operação bem maior que os equivalentes bipolares. O modelo empregado no projeto é o LF357 e é capaz de operar com frequências de 0 até 9,6 Mhz.

A utilização do transformador possui a função de apenas manter o isolamento das duas redes distintas, sem proporcionar ganhos, oferecendo uma segurança maior para o restante dos módulos do receptor.

4.1.2 Topologia do transmissor

A topologia de acoplador utilizada para inserir o sinal de comunicação na rede elétrica, conforme a figura 24, foi a padrão utilizada em soluções comerciais citadas anteriormente.

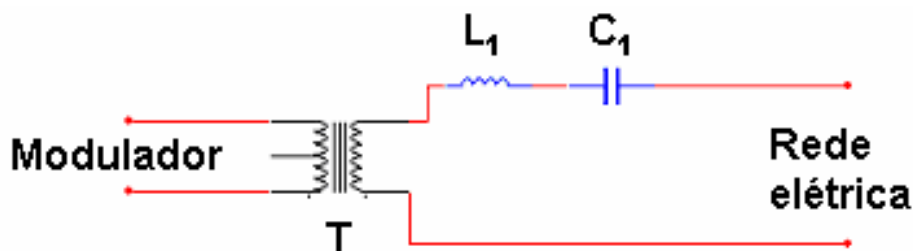


Figura 4.2 - Topologia proposta na transmissão dos dados

Esta topologia consiste na combinação de um transformador com um filtro passivo, caracterizando sua curva de resposta como a de um filtro passa-banda, selecionando a possível banda passante e desprezando as demais portadoras indesejadas.

Este tipo de acoplador permite uma comunicação bidirecional, pois não existe polarização dos componentes utilizados.

4.2 Considerações sobre o desenvolvimento do ambiente para simulação

O projeto dos acopladores foi desenvolvido para trabalhar na banda B das normas estabelecidas pela CENELEC, isto por causa de suas especificações, esta banda corresponde a faixa de frequência de 95kHz à 125kHz. A faixa de frequência utilizada pela CENELEC não permite oferecer serviços de banda larga por apresentar frequências relativamente baixas. Os serviços oferecidos por esta faixa de frequência consistem em aplicações simples como leitura de medidores, intercons e aplicações de baixa velocidade.

Neste projeto estabeleceu-se uma frequência central de 110kHz, uma banda passante de 22kHz e foi utilizado o circuito equivalente do transformador de núcleo de ferro configurado para trabalhar em altas frequências.

4.2.1 Características de projeto do transformador

O transformador implementado utilizou o modelo simplificado de um transformador real, apresentado na figura 3.11. Foi adotada uma carga média de 100Ohms baseado nos estudos realizados sobre impedância da rede. Com isso foi possível traçar a função de transferência do transformador utilizado.

Foi adotada uma relação de espiras igual a um ($a=1$), por ser apenas um dispositivo de isolamento. Foram adotados valores baixos para a indutância (L_p e L_s) e para as resistências ôhmicas (R_p e R_s) tanto no primário quanto no secundário, a fim de reduzir as perdas em altas frequências. Por meio de simulações e testes realizados no capítulo 5, foram adotados os seguintes valores, L_p e L_s igual a $3,5\mu\text{H}$, e R_p e R_s igual a $1\text{m}\Omega$.

$$\frac{V_c}{V_g} = \frac{a^2 R_c}{(R_e + a^2 R_c) + jX_e}$$
$$V_c = \frac{1^2 \cdot 100 \cdot V_g}{(1 \cdot 10^{-3} + 1^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} + 1^2 \cdot 100) + jw(3,5 \cdot 10^{-6} + 1^2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6})} \quad \text{Eq. 9}$$
$$\frac{V_c}{V_g} = \frac{100}{(2 \cdot 10^{-3} + 100 + jw \cdot 7 \cdot 10^{-6})}$$
$$H(w) = \frac{1}{2 \cdot 10^{-5} + 1 + jw \cdot 7 \cdot 10^{-8}}$$

Foi observado que o transformador possui característica semelhante à de um filtro passa-baixas.

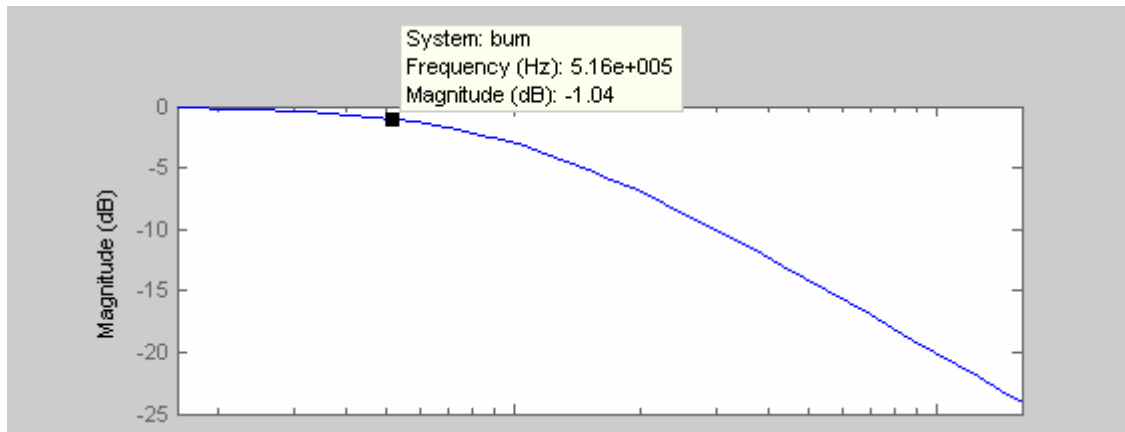


Figura 4.3 - Diagrama de bode do transformador

Observa-se que o transformador projetado possui sua curva de resposta estável até a frequência de 520kHz, onde o transformador satura. Esta característica torna o transformador bastante caro e difícil de produzir.

4.2.2 Características do projeto de acoplamento no transmissor

A implementação do acoplamento do sinal na rede elétrica utilizou-se de uma técnica simples de filtro passivo passa banda em conjunto com o isolamento elétrico proporcionado pelo transformador, conforme visto na topologia proposta no acoplamento do transmissor. O filtro passivo foi projetado para obter sua frequência central com 110kHz, utilizando um circuito de ressonância em série representado pela Eq.6.

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad \text{Eq. 10}$$

$$2\pi \cdot f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$(2\pi \cdot 110 \cdot 10^3)^2 = \frac{1}{L_1 \cdot C_1}$$

$$L_1 = \frac{1}{39,43.12100 \cdot 10^6 \cdot C_1} \quad \text{Eq. 11}$$

$$L_1 = \frac{2,09555}{C_1}$$

Adotando o valor de capacitância (C_1) igual a $0,03\mu\text{F}$:

$$L_1 = \frac{2,09555}{3 \cdot 10^{-8}} \quad \text{Eq. 12}$$

$$L_1 = 66,666\mu\text{H}$$

Com estes valores foi possível obter a função de transferência do filtro projetado, onde a impedância do meio pode variar. Assim, substituindo na Eq.5, temos:

$$H(\omega) = \frac{Z_{meio}}{Z_{meio} + j \cdot \left(\omega \cdot 66,7 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{\omega \cdot 30 \cdot 10^{-9}} \right)} \quad \text{Eq. 13}$$

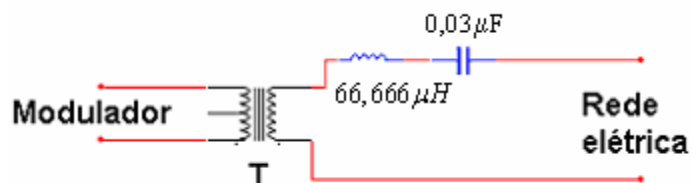
Com os valores obtidos foi possível traçar o diagrama de blocos e a função de transferência do acoplador no transmissor, o bloco referente à proteção encontra-se no anexo B.



Figura 4.4 - Diagrama de blocos do acoplador de transmissão

Função de transferência do acoplador constituída do transformador junto ao filtro:

$$H(\omega) = \left(\frac{1}{2 \cdot 10^{-5} + 1 + j\omega \cdot 7 \cdot 10^{-8}} \right) \cdot \left(\frac{Z_{meio}}{Z_{meio} + j \cdot \left(\omega \cdot 66,7 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{\omega \cdot 30 \cdot 10^{-9}} \right)} \right) \quad \text{Eq. 14}$$



4.2.3 Características do projeto de acoplamento no receptor

No início o desacoplamento foi utilizado um filtro passivo passa-alta para atenuar a portadora de 60hz de alta tensão 110V/220V, podendo assim, interligar tal sinal vinda da rede nos Amplificadores operacionais LF357 que possuem seu funcionamento em torno de 15V. Por questões de segurança a frequência (hz) de corte do filtro passivo foi especificada bem acima da portadora de alta tensão e abaixo da portadora de comunicação, esta precaução garante o completo desaparecimento da portadora indesejada sem afetar significativamente o sinal de dados, além de atenuar possíveis ruídos vindo de diversas frequências.

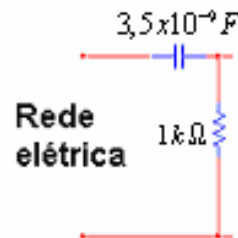
A frequência de corte proposta para o filtro passivo passa-alta foi de 45kHz adotando um resistor (R_4) de $1K\Omega$.

$$f_{corte1} = \frac{1}{2\pi C_1 R_4}$$

$$45 \times 10^3 = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 \cdot 10^3} \quad \text{Eq. 15}$$

$$C_1 = \frac{1}{6,28 \times 45 \times 10^6}$$

$$C_1 = 3,53857 \times 10^{-9} F$$



Deste modo podemos obter a função de transferência do filtro:

$$H(w) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{R}{R + 1/jwC}$$

$$H(w) = \frac{jwRC}{1 + jwRC} \quad \text{Eq. 162}$$

$$H(w) = \frac{jw \cdot 3,5 \cdot 10^{-6}}{1 + jw \cdot 3,5 \cdot 10^{-6}}$$

Realizando a simulação desta função de transferência no software Matlab Release 6, obtemos o seguinte diagrama de bode, conforme a figura 4.5:

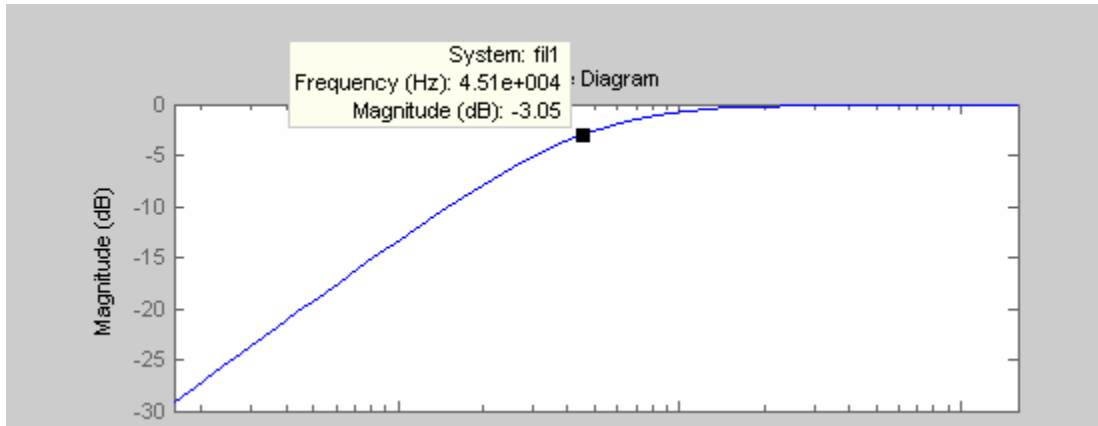


Figura 4.5 - Resposta em frequência do filtro passivo passa alta

Após este primeiro filtro, o sinal deverá obter uma seletividade ainda melhor, por isso foi projetado um filtro ativo passa-banda com a banda passante de 22kHz.

Com a informação da frequência central e a banda passante, podemos calcular o fator de qualidade do filtro:

$$Q = \frac{\omega_0}{B}$$

$$Q = \frac{110 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3} \text{ Eq. 17}$$

$$Q = 5$$

Adotando o $C_2=10\text{nF}$ para simplificar os cálculos, podemos calcular o K (Eq.7):

$$K = \frac{10^{-4}}{f_0 \cdot C_2}$$

$$K = \frac{10^{-4}}{110 \cdot 10^3 \cdot 10^{-8}} \text{ Eq. 18}$$

$$K = \frac{1}{11} = 0,0909$$

Tabela 4.1 - Projeto de filtro passa-faixa com realimentação múltipla de segunda ordem (Q=5)

Ganho	Valores dos elementos do circuito					
	1	2	4	6	8	10
R ₁	7,958	3,979	1,989	1,326	0,995	0,796
R ₂	0,162	0,166	0,173	0,181	0,189	0,199
R ₃	15,915	15,915	15,915	15,915	15,915	15,915

Fonte: Rapid Practical Designs of Active Filters, D. Johnson e J. Hilburn [10]

Com o valor de Q definido é possível consultar a tabela 4 com os valores que multiplicaram o valor da constante K, de acordo com o ganho escolhido. O ganho proposto para o filtro foi de um, cabendo ao estágio amplificador recuperar o sinal atenuado.

Com isso é possível calcular os valores das resistências em quilohms ($R_n \times K$ para o ganho igual a 1):

$$R_1 = 7,958.K$$

$$R_1 = 7,958.0,0909$$

$$R_1 = 0,723k\Omega$$

$$R_2 = 0,162.K$$

$$R_2 = 0,162.0,0909$$

$$R_2 = 0,0147k\Omega$$

$$R_3 = 15,915.K$$

$$R_3 = 15,915.0,0909$$

$$R_3 = 1,446k\Omega$$

Os valores encontrados não são valores comerciais, ou seja, seria necessária a utilização de resistores ajustáveis no momento do projeto físico. Colocando os valores na estrutura do filtro, figura 4.6, obteremos a seguinte configuração:

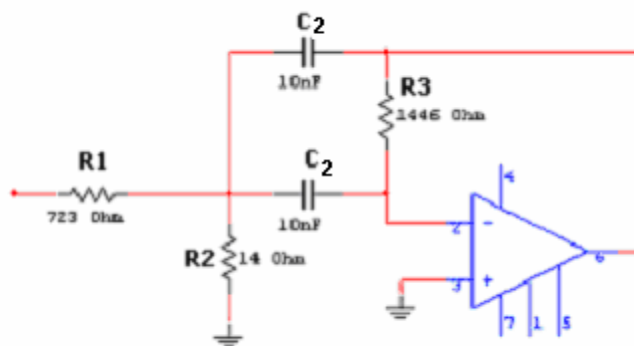


Figura 4.6 - Filtro ativo passa-faixa

Com estes valores podemos encontrar as funções de transferência deste filtro IGMF, conforme a equação abaixo:

$$H(s) = -\frac{sR_3C}{s^2R_1R_3C^2 + s2R_1C + (1 + R_1/R_2)}$$

$$H(s) = -\frac{s1,446.10^3.10^{-8}}{s^2.723.1,446.10^3.(10^{-8})^2 + s.2.723.10^{-8} + (1 + 723/14)} \text{ Eq. 19}$$

$$H(s) = -\frac{s1,446.10^{-5}}{s^2.1,045.10^{-10} + s.1,446.10^{-5} + 52,64}$$

Com os parâmetros da função de transferência definidos foi traçada a curva do diagrama de bode do filtro ativo passa banda:

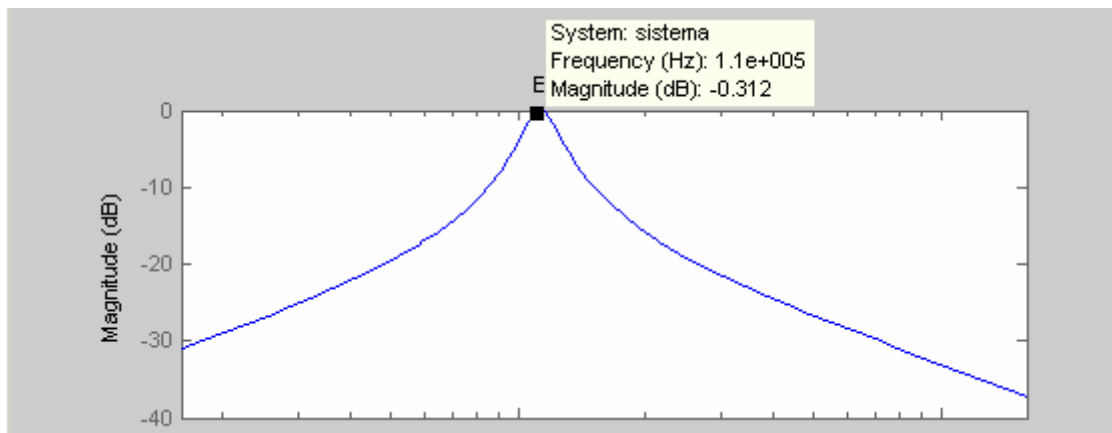


Figura 4.7 - Frequência central do filtro passa-faixa

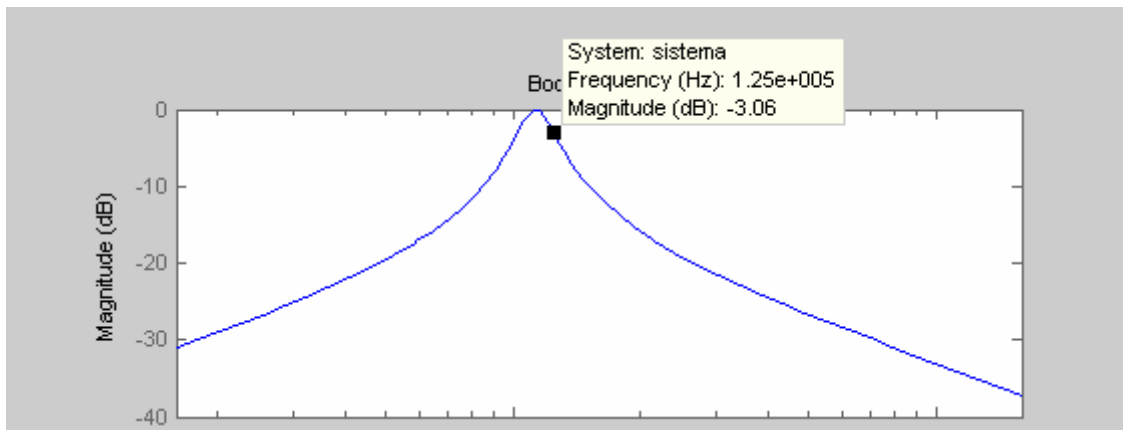


Figura 4.8 - Frequência de corte superior do filtro passa-faixa

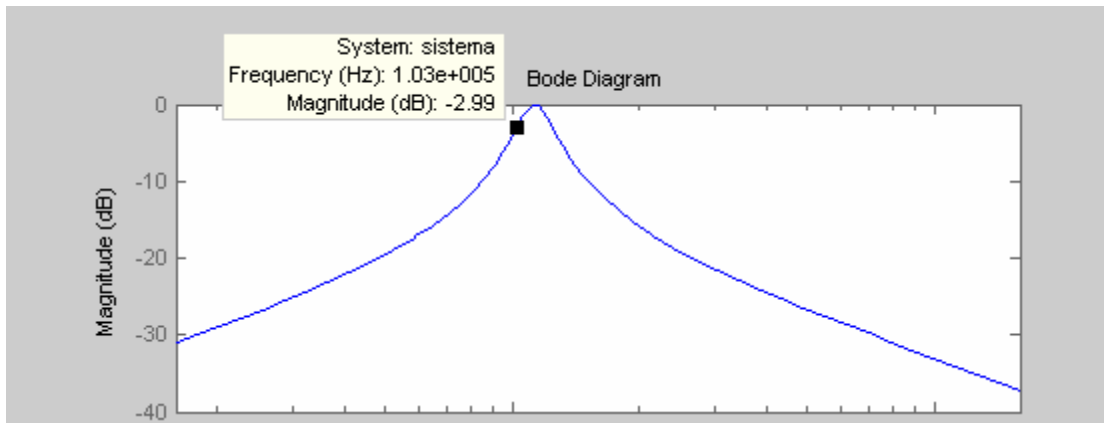


Figura 4.9 - Frequência de corte superior do filtro passa-faixa

O módulo amplificador será responsável por ajustar qualquer atenuação sofrida pelo sinal no decorrer da transmissão, o ganho escolhido nesta simulação foi de 1.4, mas este pode ser facilmente ajustado para outras situações (em casos como indústrias onde a atenuação pode ser maior).

$$H(s) = -\frac{R_6}{R_5}$$

$$\frac{R_6}{R_5} = \frac{1,4 \cdot 10^3}{10^3}$$

$$\frac{R_6}{R_5} = 1,4$$

Após todos os blocos calculados separadamente, foi realizada uma junção destes dispositivos gerando o seguinte diagrama de blocos:

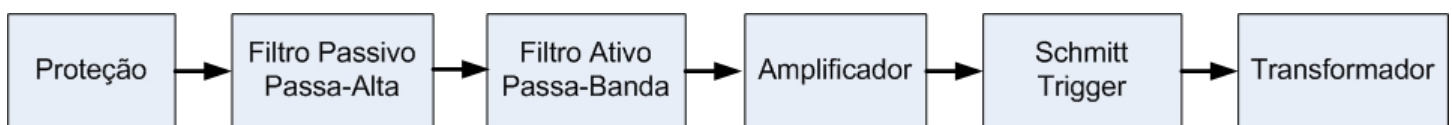


Figura 4.10 - Diagrama de blocos do acoplador de recepção

O bloco de proteção foi descrito no anexo B, enquanto o bloco de Schmitt Trigger foi utilizado no acoplador para quadrar a onda e eliminar os ruídos.

Com isto foi possível encontrar a função de transferência do acoplador utilizado na recepção do sinal.

$$H(s) = \left(\frac{s \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{1 + s \cdot 3 \cdot 10^{-6}} \right) \cdot \left(\frac{s \cdot 1,446 \cdot 10^{-5}}{s^2 \cdot 1,045 \cdot 10^{-10} + s \cdot 1,446 \cdot 10^{-5} + 52,64} \right) \cdot \left(\frac{1,4 \cdot 10^3}{10^3} \right) \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot 10^{-5} + 1 + s \cdot 7 \cdot 10^{-8}} \right)$$

Eq. 20

As figuras 33, 34 e 35 mostram o diagrama de bode do acoplador de recepção:

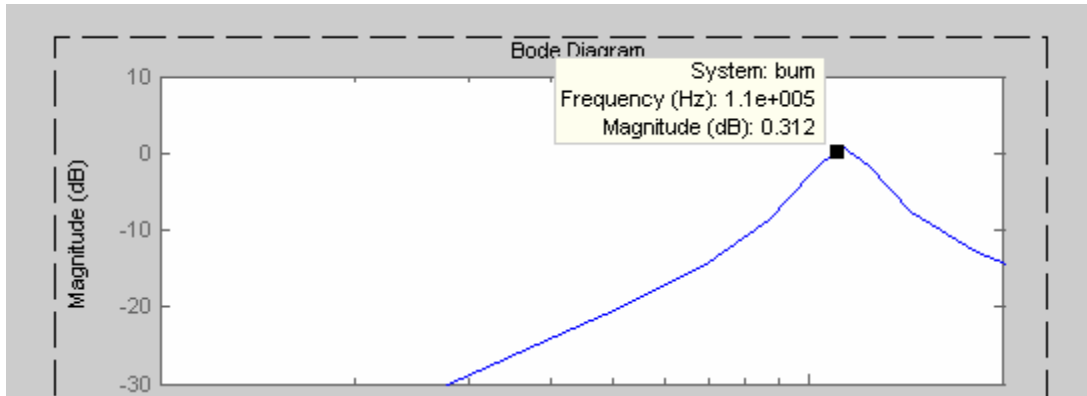


Figura 4.11 - Frequência central do acoplador de recepção

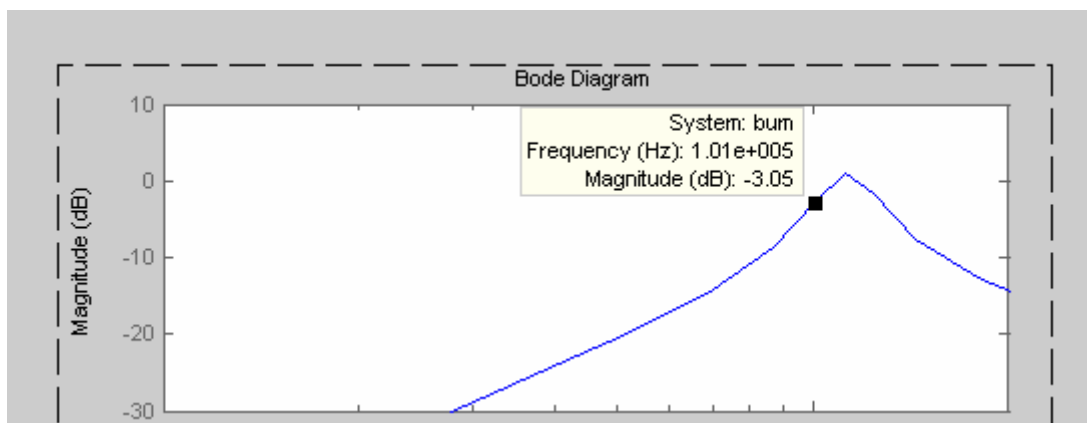


Figura 4.12 - Frequência de corte inferior da recepção

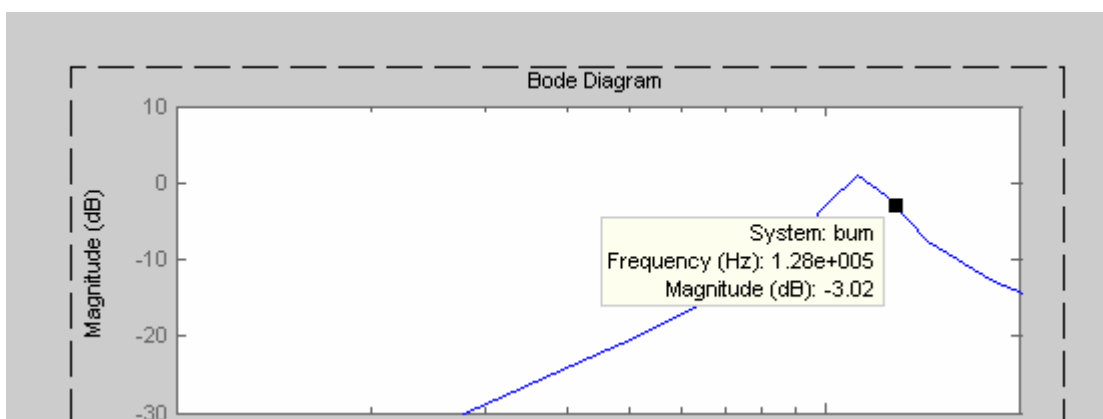


Figura 4.13 - Frequência de corte superior da recepção

4.3 Síntese

Este capítulo abordou as propostas de topologias de acoplamento utilizadas na inserção e na remoção do sinal da rede elétrica. Estas topologias foram sintonizadas numa frequência determinada para que pudesse ser realizada uma bateria de simulações.

Foram levantadas as funções de transferência de cada dispositivo de acoplamento e traçado o diagrama de resposta de ganho(dB) em relação a frequência.

Capítulo 5 - Análise dos resultados das simulações

Após o projeto lógico ter sido construído matematicamente, foi necessária uma análise em simuladores para verificar e confirmar se o resultado obtido, aproxima-se dos resultados reais. O software utilizado foi o Multisim 7 Student version criado pela Electronics Workbench. Para fins de projeto, a variação da impedância do canal elétrico foi baseada em Dostert [8], onde apresentam a maior variação e a pior situação de estudo.

5.1 Análise do transformador (transmissor/receptor)

O transformador analisado foi desenvolvido somente para prover o isolamento entre as duas redes, assim sendo este dispositivo deverá interferir o mínimo possível no rendimento do sinal transitado. Com o projeto calculado anteriormente, podemos verificar na figura 5.1 que não houve perdas na frequência central (110kHz).

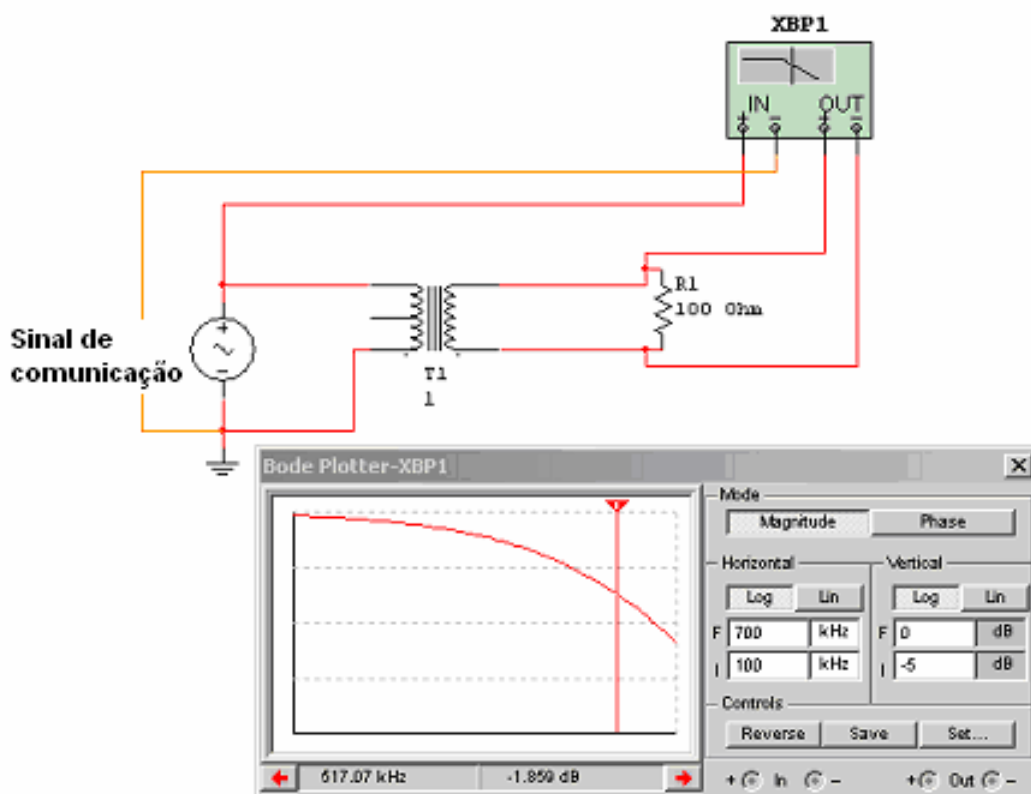


Figura 5.1 - Diagrama de bode do transformador

A configuração do transformador foi realizada na tela de edição do modelo, figura 5.2, disponível no simulador.

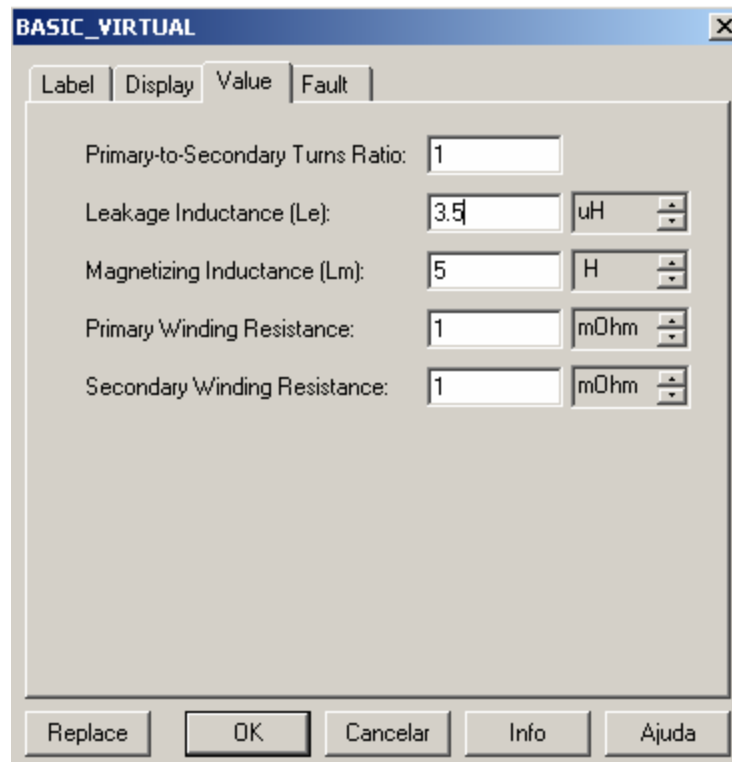


Figura 5.2 - Tela de configuração do transformador

O transformador utilizado no software possui a característica de ser facilmente configurável com os parâmetros de resistência e indutância propostos.

5.2 Análise do filtro passivo passa alta (receptor)

A análise foi realizada sobre o filtro passivo passa alta com sua frequência de corte configurada para 45kHz. De acordo com o diagrama de bode visto na figura 5.3, o sinal possui sua frequência de corte na região escolhida, apresentando apenas uma pequena variação devida à aproximação do valor do capacitor.

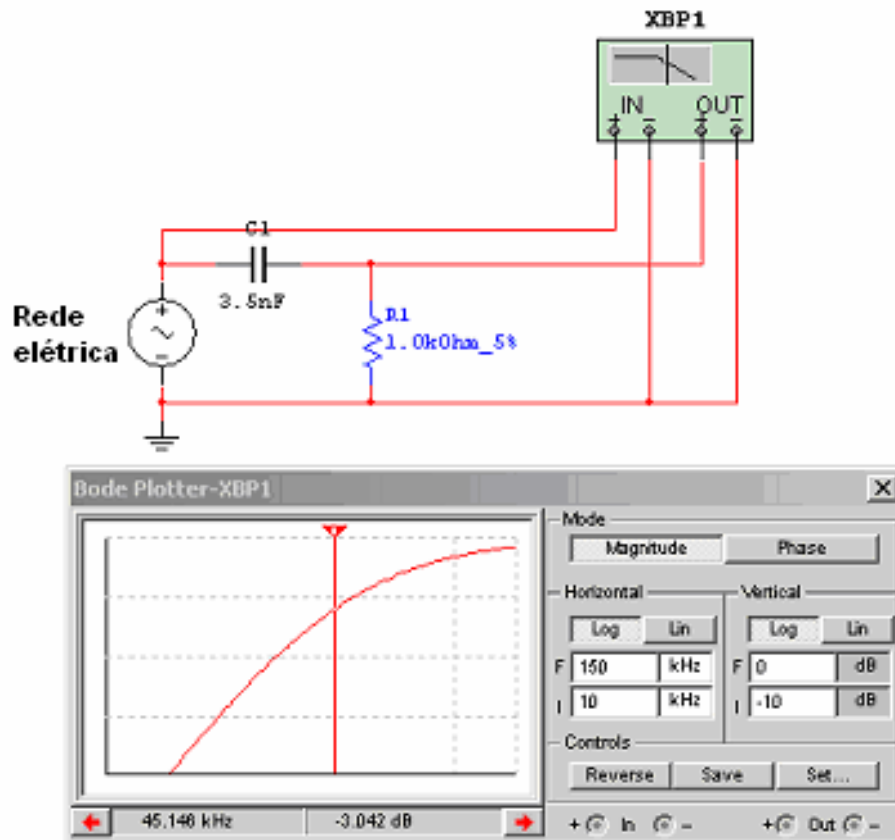


Figura 5.3 - Frequência de corte do filtro passivo passa alta

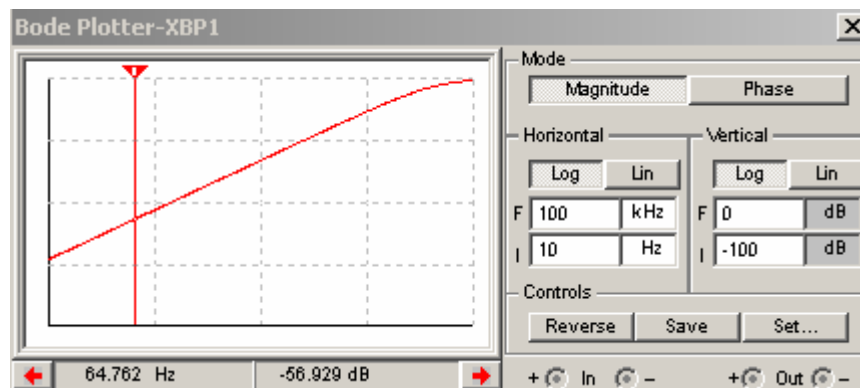


Figura 5.4 – Atenuação sofrida em 60hz

Apesar da frequência de corte estar correta, a frequência central escolhida também sofre uma pequena atenuação quando passada pelo filtro passivo passa alta, proporcionando uma leve queda de tensão no sinal de comunicação, conforme mostra a figura 5.5:

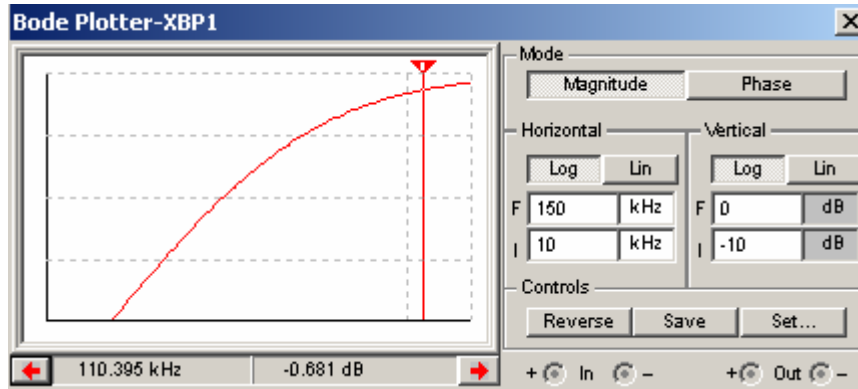


Figura 5.5 - Atenuação da frequência do sinal de comunicação

A figura 5.6 mostra a amplitude do sinal de 220V com frequência de 60Hz após a passagem pelo filtro passivo. A amplitude encontrada (800mv) permite que o filtro ativo seja capaz de atuar sem o risco de queima.

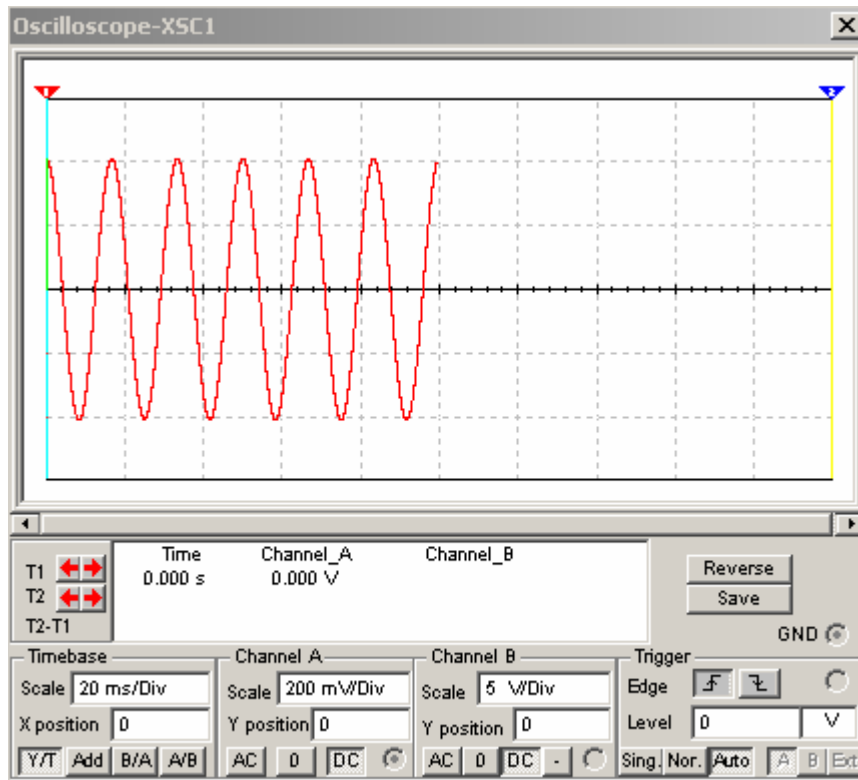


Figura 5.6 - Sinal da rede elétrica atenuado

5.3 Análise do filtro ativo passa banda

A função do filtro mostrado na figura 5.7 é aumentar de forma significativa a atenuação dos sinais fora da faixa de interesse.

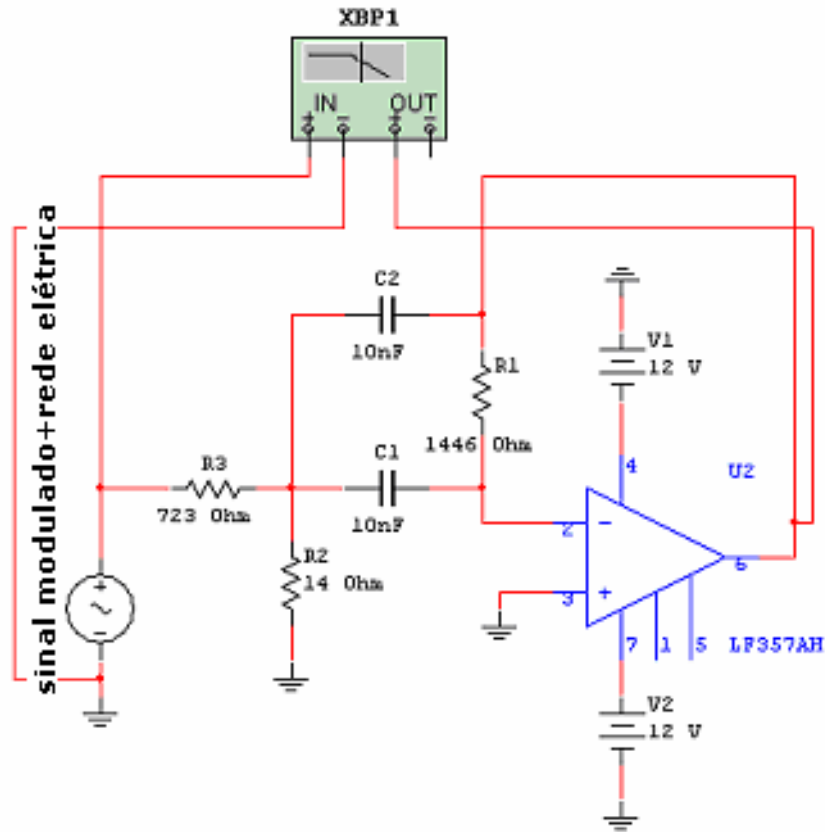


Figura 5.7 - Filtro ativo passa faixa

Conforme a figura 5.8, este filtro proporciona um pequeno ganho (0,635dB) na frequência central.

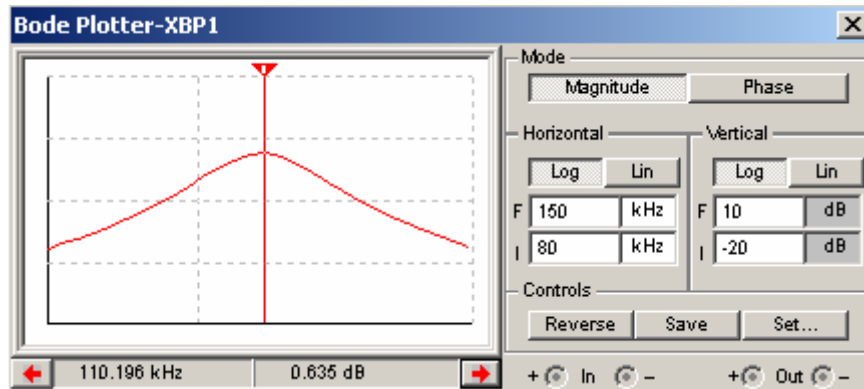


Figura 5.8 - Ganho em dB na frequência central

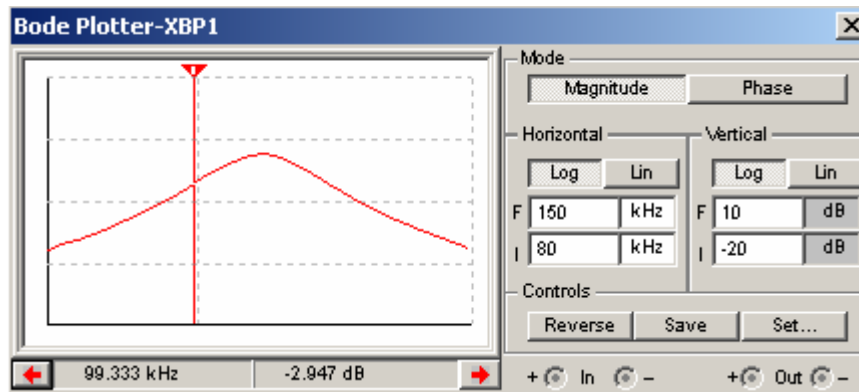


Figura 5.9 - Frequência de corte inferior do filtro passa-faixa

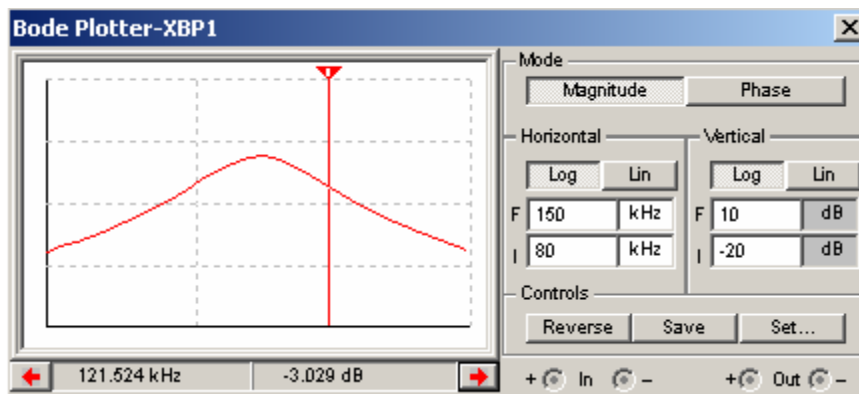


Figura 5.10 - Frequência de corte superior do filtro passa-faixa

De acordo com as figuras 5.9 e 5.10, podemos verificar que a banda passante está de acordo com a projetada anteriormente (banda passante de 22kHz) e uma frequência central de 110kHz. Este filtro promove o desaparecimento de qualquer componente fora da banda passante, garantindo um sinal de qualidade e com a mínima perda possível.

5.4 Análise do conjunto de filtros

Esta análise é realizada em cima do conjunto de filtros (filtro passivo + filtro ativo), conforme a figura 5.11, que delimitam a banda passante no acoplador, esta análise visa indicar a dimensão da perda da portadora de comunicação para que possa ser realizada uma amplificação adequada.

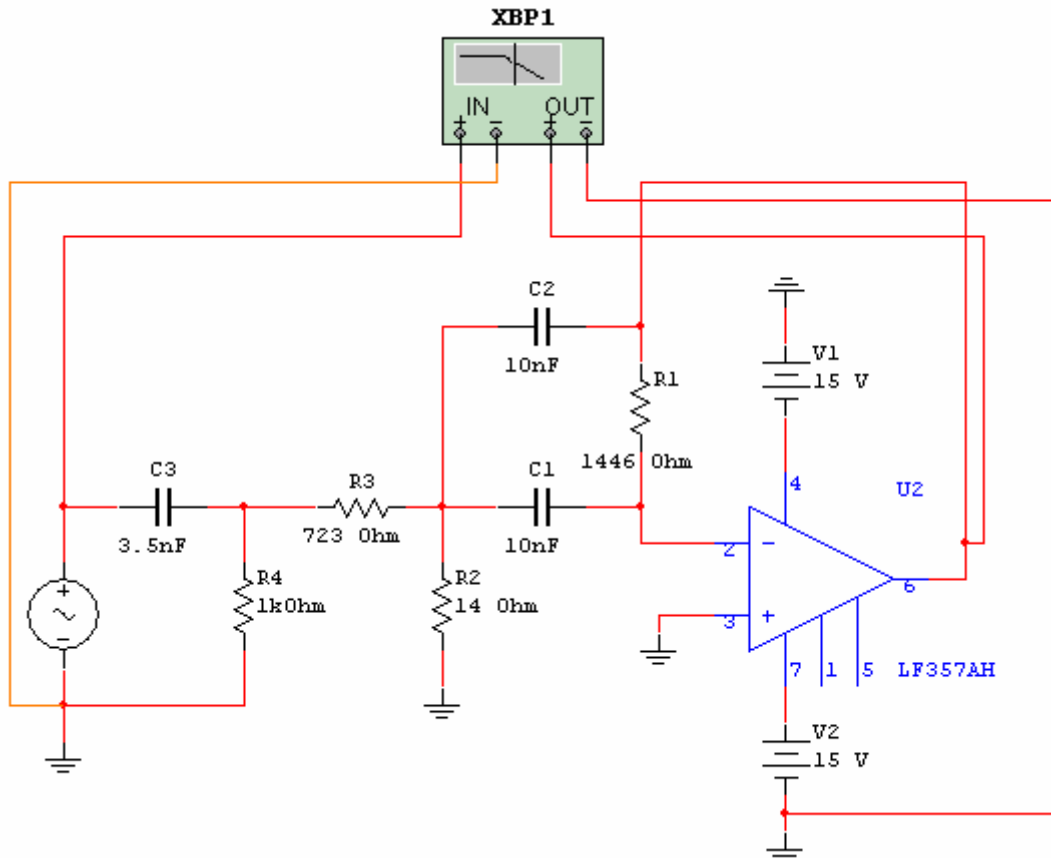


Figura 5.11 - Conjunto de filtros

Conforme a figura 5.12, verifica-se uma perda de **-2.596dB** na frequência desejada.

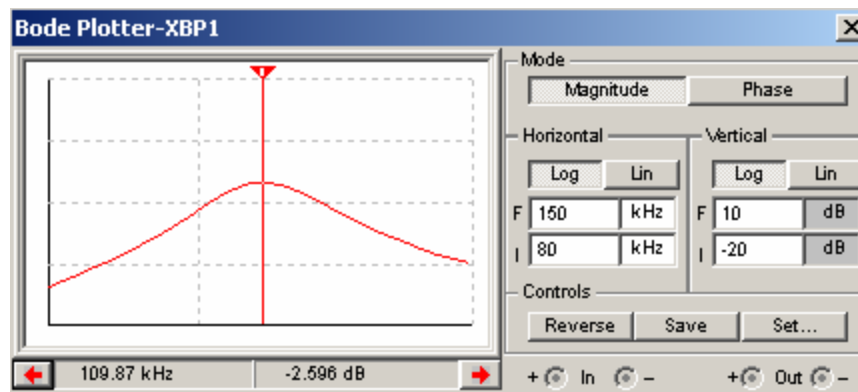


Figura 5.12 - Perda na frequência de comunicação

5.5 Análise do Amplificador

Devido às perdas nos filtros, foi projetado um amplificador com ganho igual a **1.4**, conforme representado na figura 5.13. Este ganho pode ser adquirido pela relação dos resistores utilizados no amplificador operacional ($1,4\text{k}\Omega/1\text{k}\Omega$), com isso podemos calcular o ganho obtido em decibéis **Ganho=20*log(1.4)=2,92dB**. Observando a figura 5.14, obtemos uma amplificação bastante próxima da projetada.

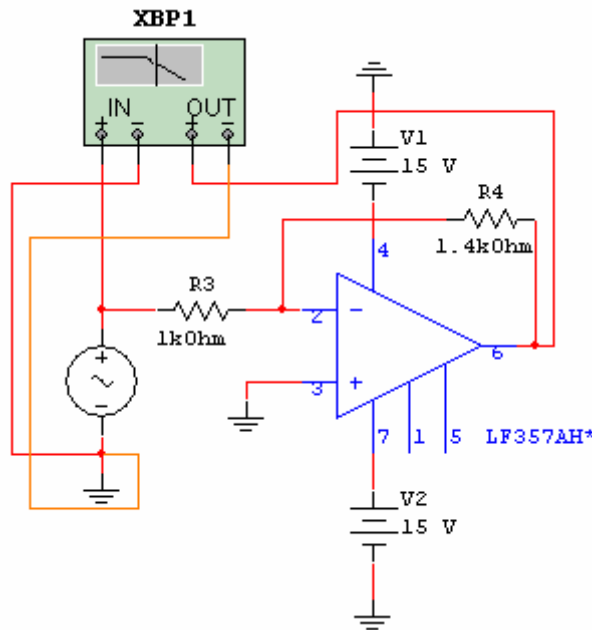


Figura 5.13 - Projeto do amplificador

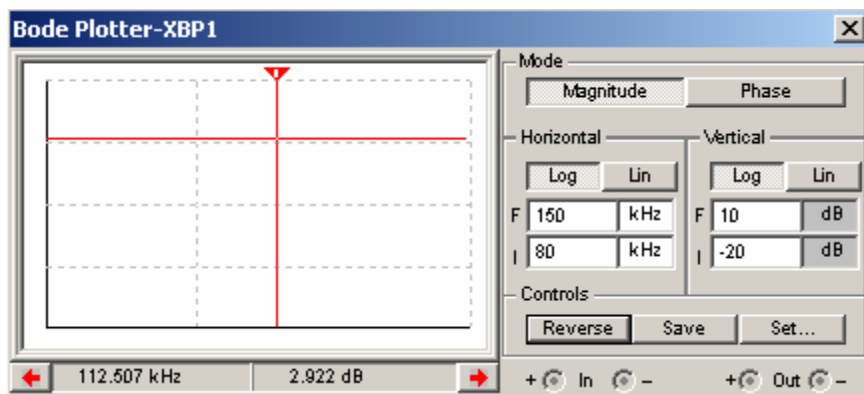


Figura 5.14 - Ganho do amplificador

5.6 Análise do acoplador utilizado na recepção dos dados

A análise foi realizada utilizando o acoplador de recepção e uma entrada senoidal representando o sinal modulado em frequência, conforme a figura 5.15, com esta análise foi possível traçar o diagrama de bode do acoplador utilizado na recepção dos dados.

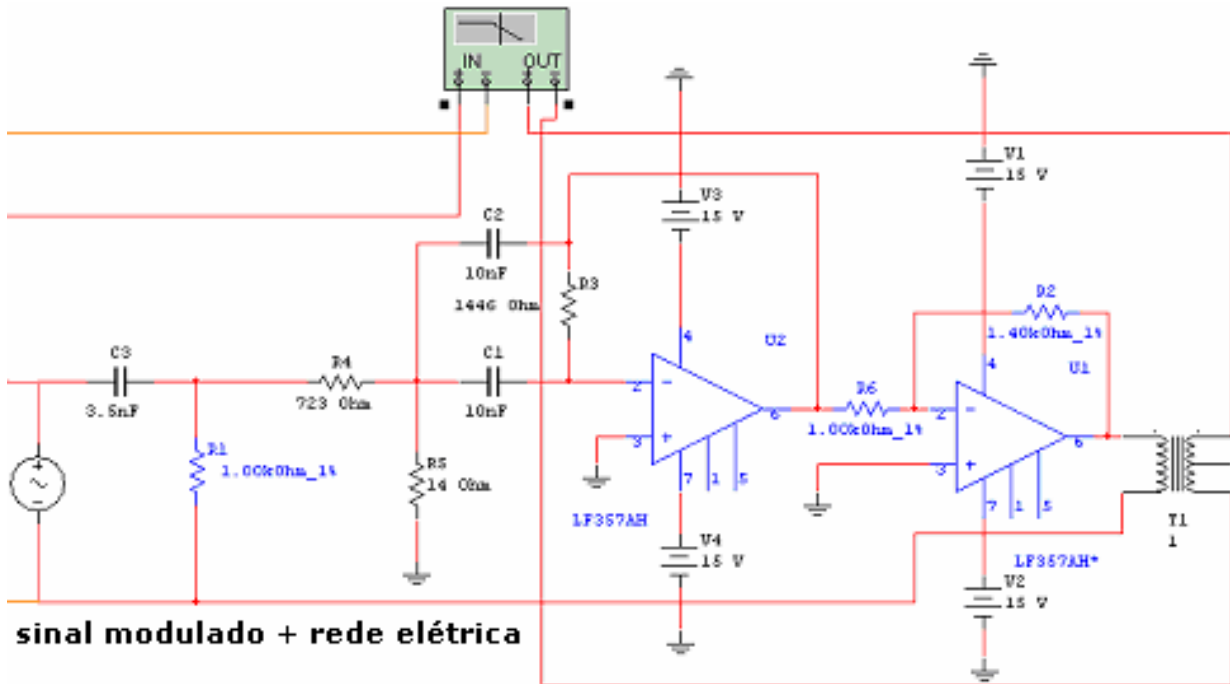


Figura 5.15 - Acoplador de recepção dos dados

O sinal na frequência desejada permanece totalmente recuperado após as perdas ocorridas nos filtros, como visto na figura 5.16, com isso é possível fornecer um sinal de boa qualidade para estágio de demodulação.

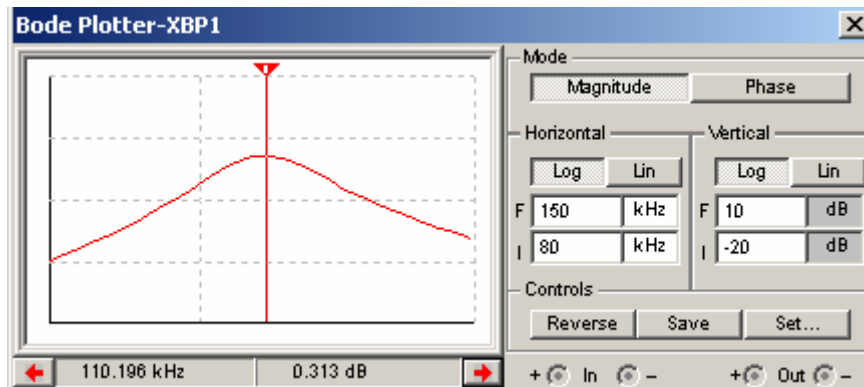


Figura 5.16 - Frequência central do acoplador

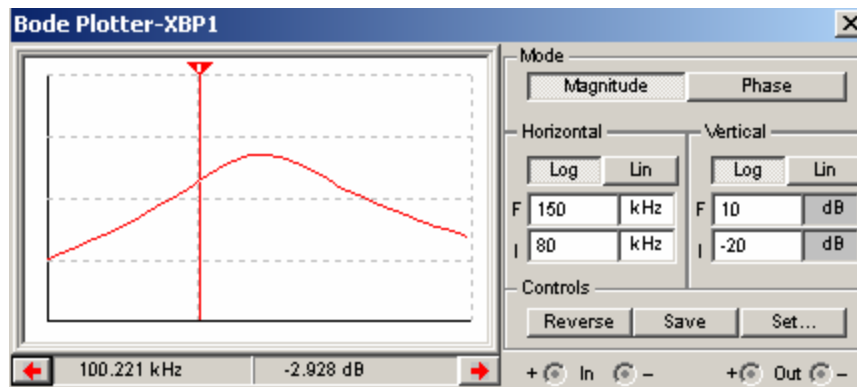


Figura 5.17 - Frequência de corte inferior

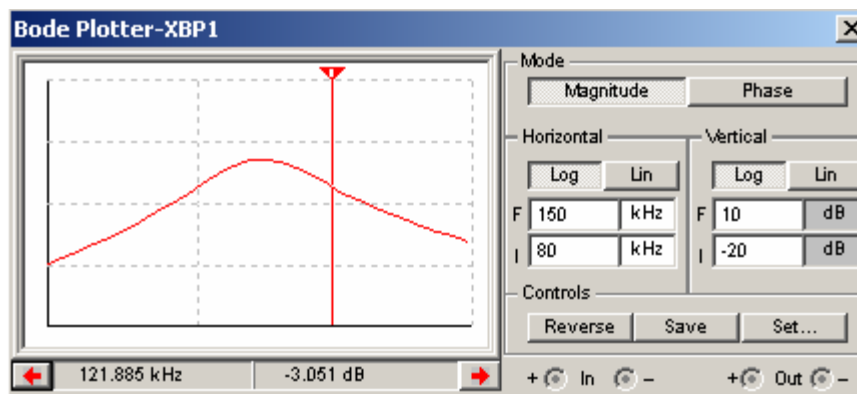


Figura 5.18 - Frequência de corte superior

Verifica-se, a partir das figuras 5.17 e 5.18 que os limites de cortes estão de acordo com o projetado, obtendo uma banda passante de 22kHz.

5.7 Análise do acoplador utilizado na transmissão dos dados

Esta análise do acoplador utilizado na transmissão de dados (figura 5.19) consiste em verificar o diagrama de bode, observando a atenuação ocorrida no sinal nas frequências críticas, variando a impedância de acordo com os limites citados por Dostert [8] (2Ω a 150Ω) e analisar as possíveis componentes inseridas na rede.

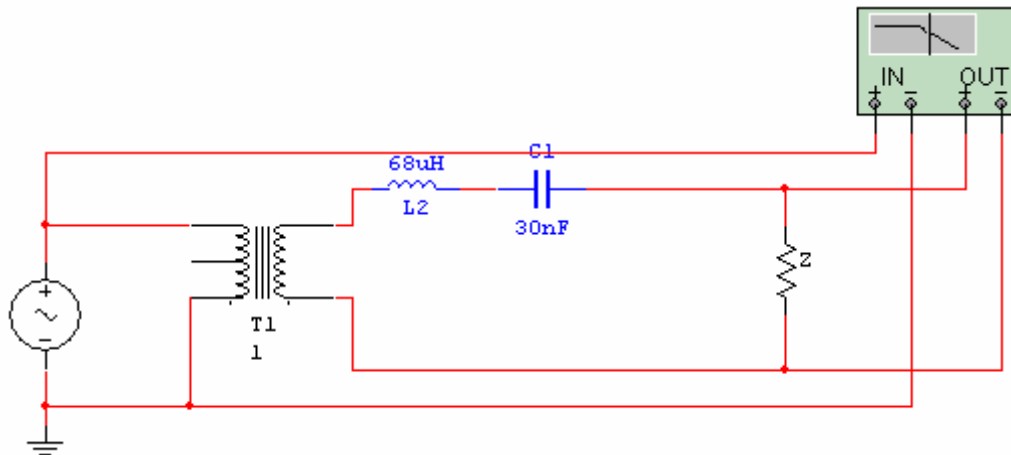


Figura 5.19 - Acoplador utilizado para inserir os dados

Para a impedância na rede elétrica de 150Ω , obtemos uma largura de banda bastante ampla (350kHz), podendo ser o sinal transmitido prejudicado por algum ruído vindo da rede. A frequência de 60Hz sofre uma atenuação de 54dB , garantindo sua atenuação na pior situação da rede elétrica. A resposta pode ser visualizada nas figuras 5.20, 5.21 e 5.22. Na figura 5.23 pode verificar a qualidade do sinal inserido na rede elétrica, sem nenhuma perda.

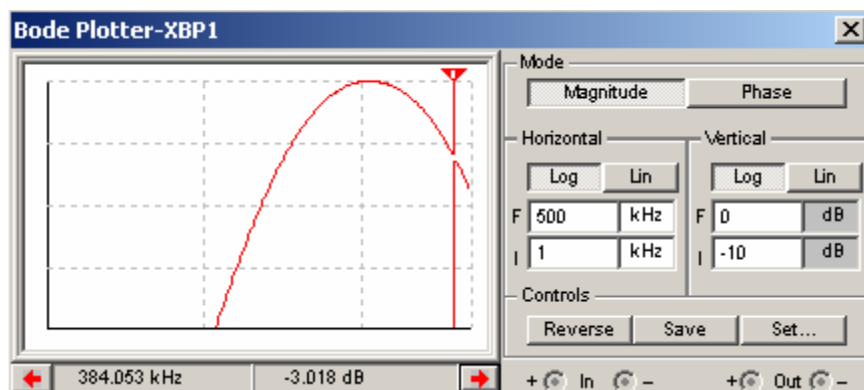


Figura 5.20 - Frequência de corte superior (150Ω)

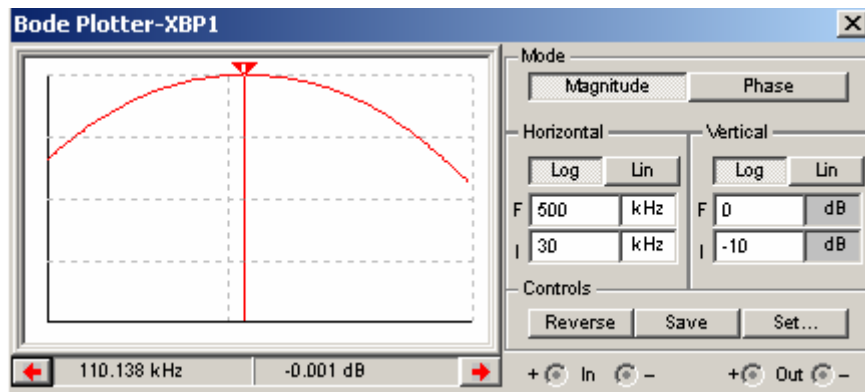


Figura 5.21 - Frequência de central (150Ω)

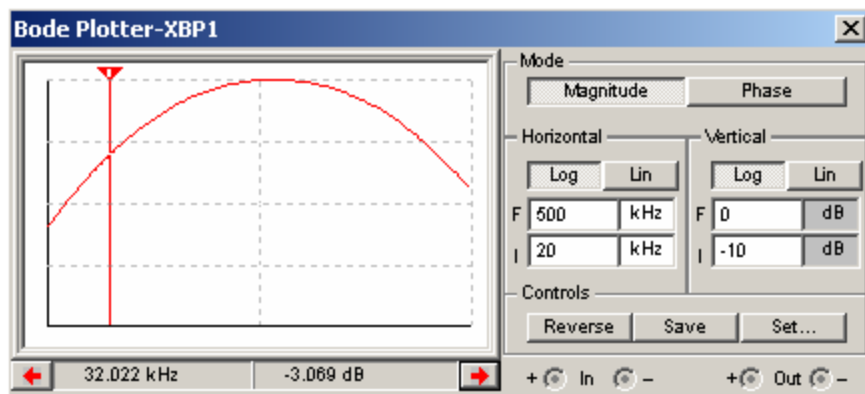


Figura 5.22 - Frequência de corte inferior (150Ω)

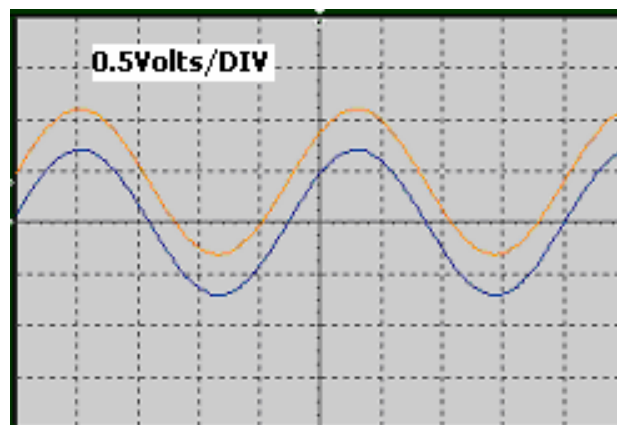


Figura 5.23 – Sinal recebido (azul) e sinal enviado (laranja) (150Ω)

Para a impedância na rede elétrica de 2Ω , obtemos uma largura de banda extremamente fechada (5kHz), podendo prejudicar a transmissão do sinal modulado em FSK. A seguinte resposta em frequência é mostrada nas figuras 5.24, 5.25 e 5.26.

Na figura 5.27 pode verificar a pequena perda obtida no sinal de saída.

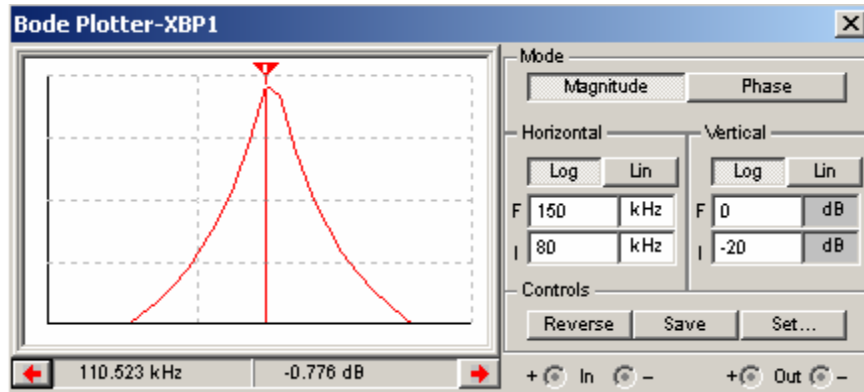


Figura 5.24 - Frequência de central do acoplador (2Ω)

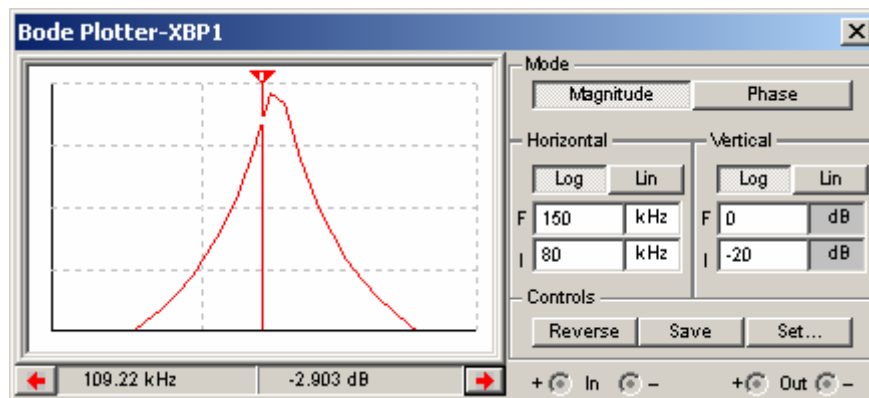


Figura 5.25 - Frequência de corte inferior (2Ω)

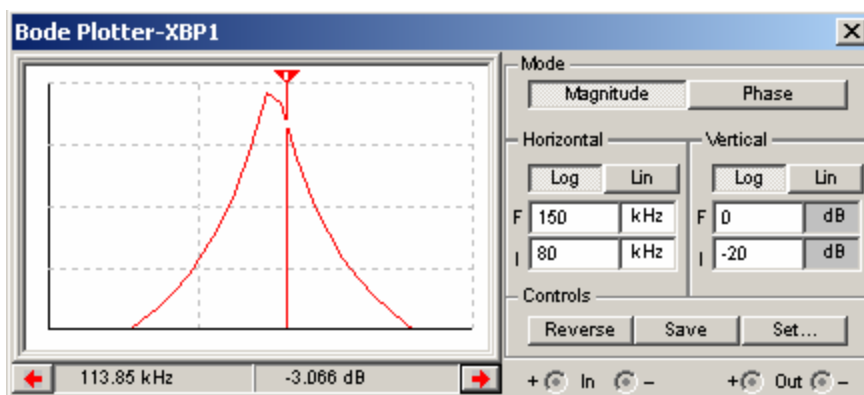


Figura 5.26 - Frequência de corte superior (2Ω)

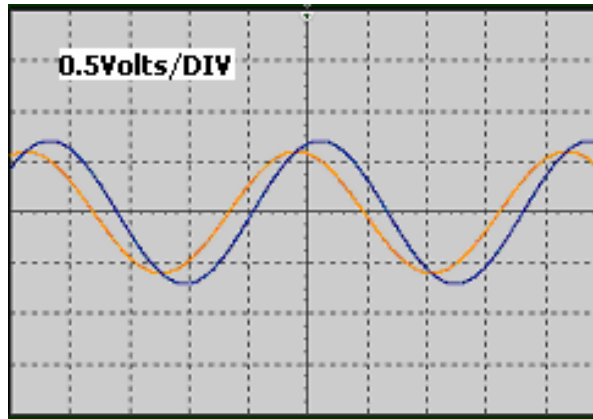


Figura 5.27 - Sinal de entrada (azul) e sinal de saída (laranja) (2Ω)

Durante a inserção do sinal é possível visualizar no analisador de espectro duas portadoras significativas no meio, a da rede elétrica em 60Hz e do sinal de comunicação em 110kHz. Nota-se o aparecimento de pequenas componentes com baixa intensidade, em torno de mV. Esta análise visa esclarecer os possíveis ruídos que poderão ser incluídos no meio, a fim de saber quais as conseqüências que poderiam acarretar.

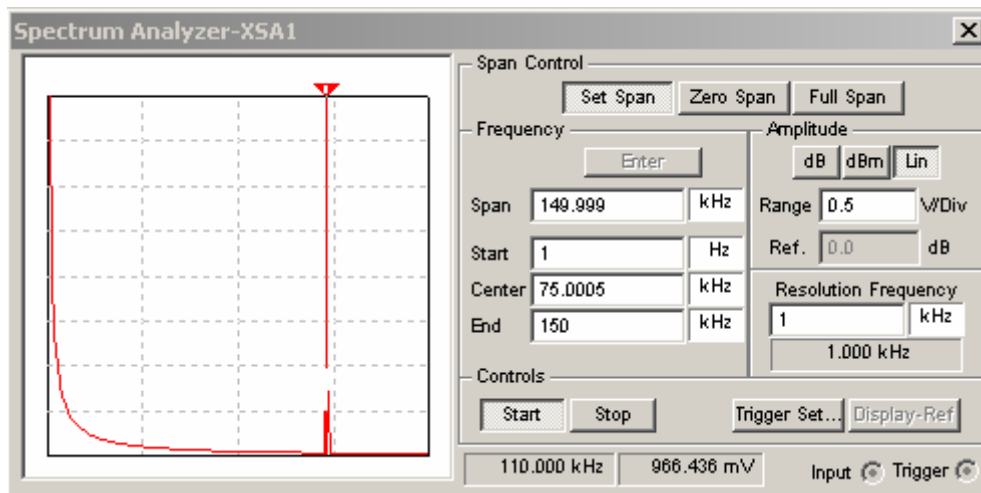


Figura 5.28 - Inserção de componentes no meio

5.8 Análise de um enlace global

Esta simulação consiste na reprodução simples de uma transmissão de um sinal modulado em frequência (FSK), esta modulação foi escolhida pela simplicidade na sua implementação e simulação, e tendo em vista seu melhor comportamento no aparecimento de um atraso na fase, situação muito comum na rede elétrica, representado no anexo C. O enlace consiste na fonte de geração dos dados (representado por uma fonte de onda quadrada), a transformação para um sinal modulado (representado pela fonte de controlada por tensão), o acoplamento deste sinal na rede elétrica (circuito projetado e simulado neste projeto), o desacoplamento do sinal modulado da rede elétrica (circuito projetado e simulado neste projeto) e por fim, sinal modulado será ceifado pelo Schmitt Trigger a análise do sinal modulado. Esta análise visa avaliar a frequência e intensidade do sinal recebido. É inserida uma fonte de ruído branco na rede elétrica a fim de dar maior realismo na experiência. A estrutura desta simulação pode ser visualizada na figura 5.29.

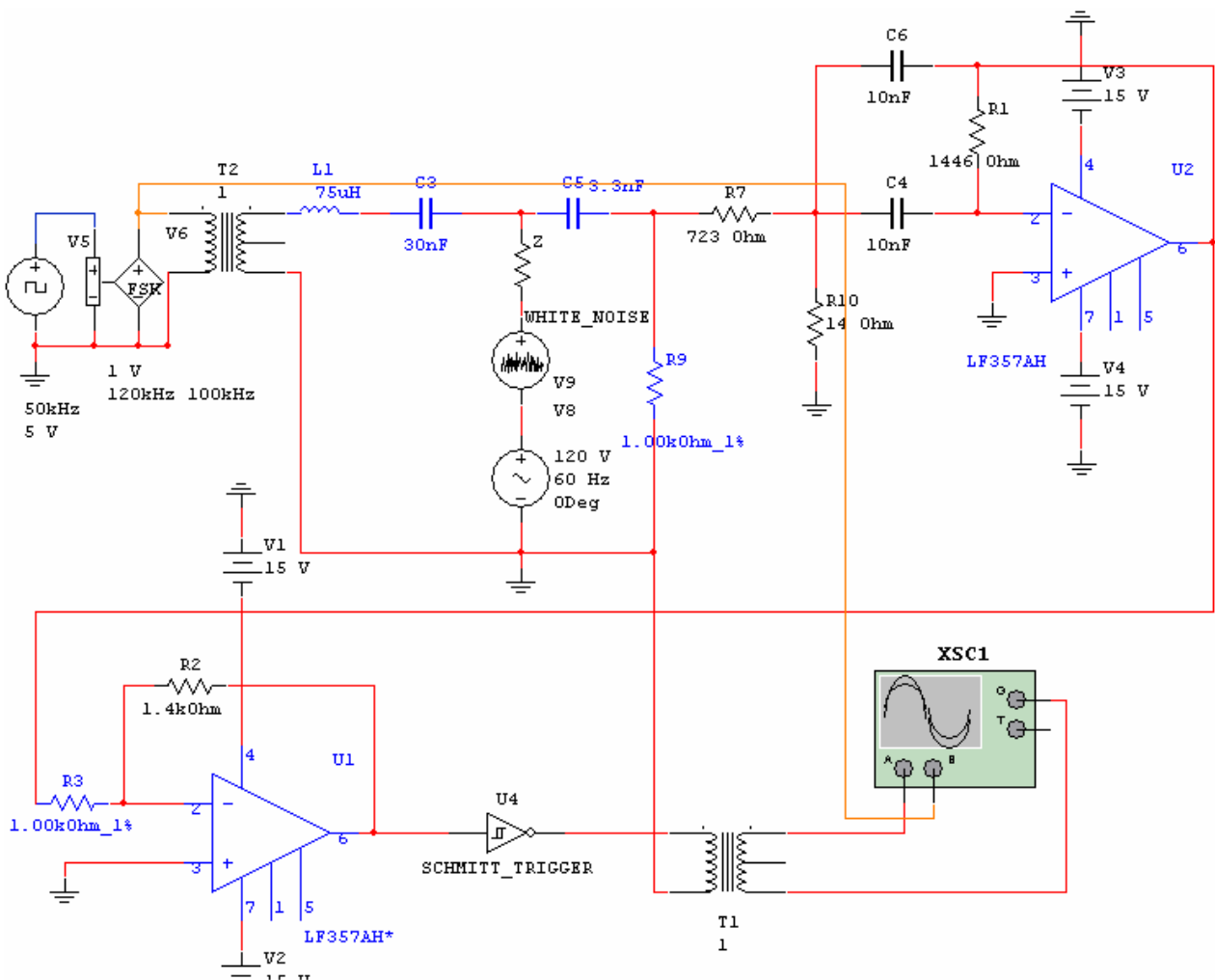


Figura 5.29 - Simulação da comunicação pela rede elétrica

Analisando a comunicação para a impedância igual a 2Ω , obtivemos a amplitude do sinal de saída igual a 230 mVpp (figura 5.30) após ter sido enviado 1Vpp na entrada. Quando a impedância varia para 150Ω , obtém um sinal de 770mVpp (figura 5.31).

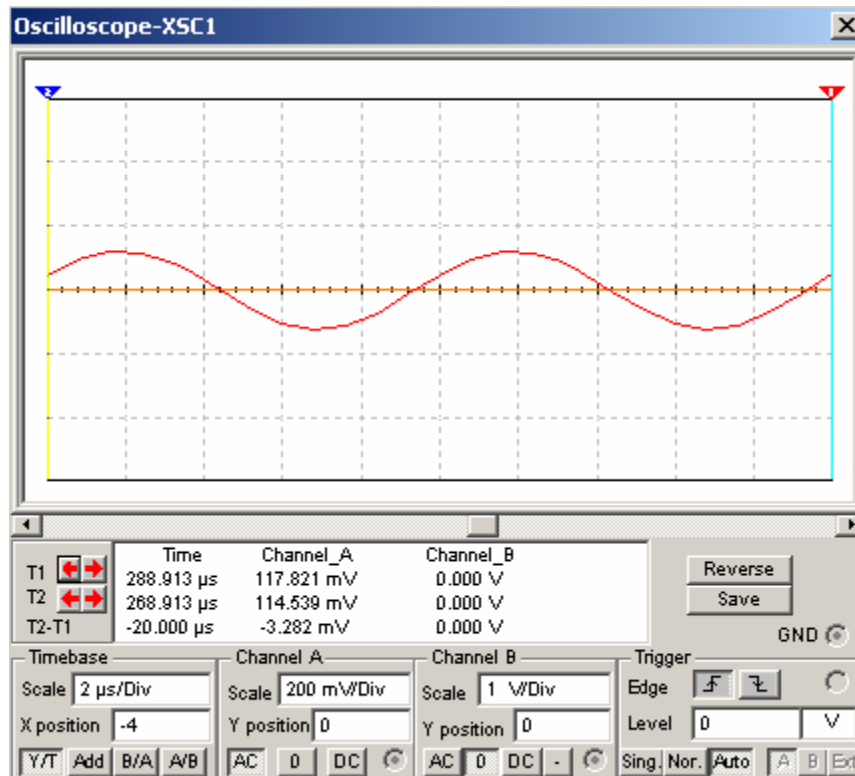


Figura 5.30 - Tensão do sinal de saída (2Ω)

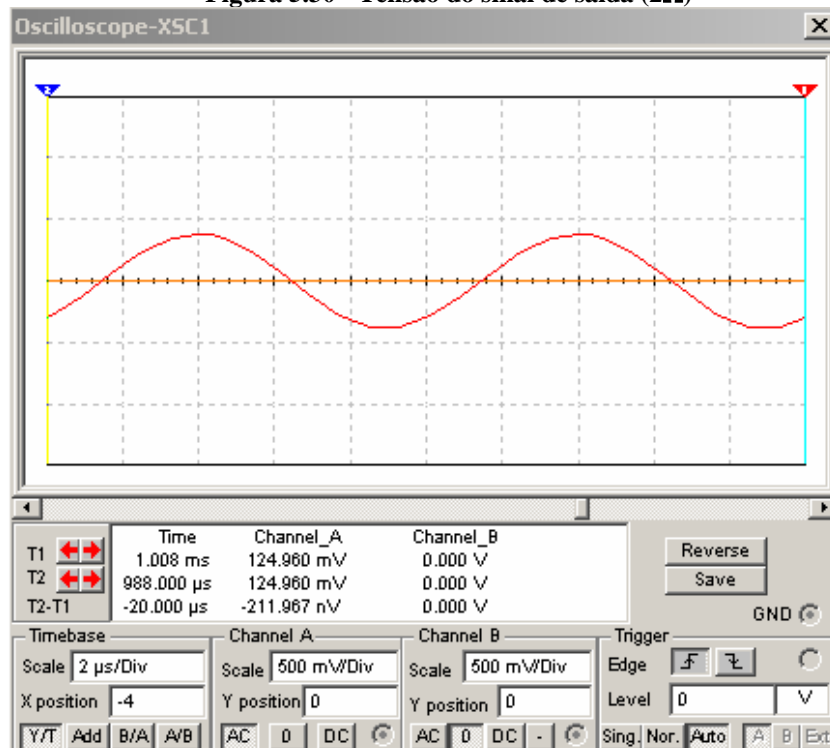


Figura 5.31 - Tensão do sinal de saída (150Ω)

Realizando um ajuste horizontal no osciloscópio antes da passagem pelo Schmitt Trigger, é possível visualizar nas figuras 5.32 e 5.33 a mudança de frequência proporcionada pela modulação FSK, concluindo que o sinal modulado enviado (laranja) possui as mesmas características do sinal recebido (vermelho), os testes foram realizados em ambos os extremos das impedâncias (2Ω e 150Ω).

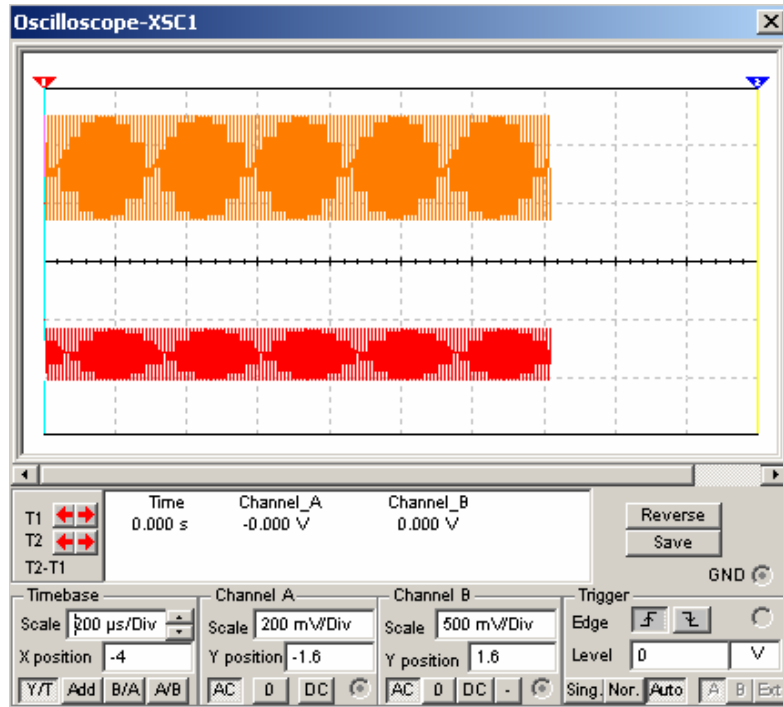


Figura 5.32 - Comparação dos sinais modulados (2Ω)

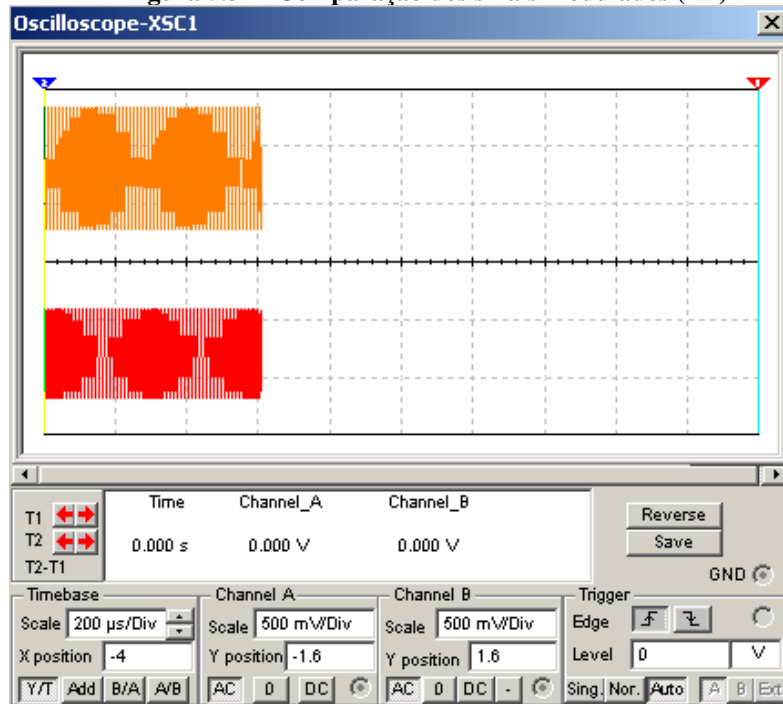


Figura 5.33 - Comparação dos sinais modulados (150Ω)

A informação está na frequência e não na amplitude. Essa variação da amplitude de saída pode ser resolvida ceifando-se o sinal. Isto pode ser feito aumentando muito o ganho ou usando o Schmitt Trigger. O Schmitt Trigger são blocos que possibilitam tornar rápidas as variações lentas dos níveis de tensão de determinados sinais aplicados à sua entrada, causando na saída o aparecimento de uma onda quadrada bem-definida. Em outras palavras, este tipo de bloco, além de realizar sua função lógica, quadra o sinal aplicado à entrada, desde que sejam respeitados os parâmetros mínimos e máximos ($V_{T+}=10\text{mV}$ e $V_{T-}=5\text{mV}$) de tensão especificados para o bloco.

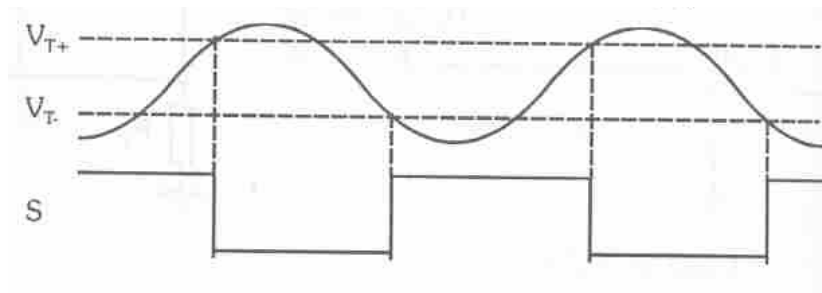


Figura 5.34 – Funcionamento do Schmitt Trigger

Utilizando o Schmitt Trigger, é possível visualizar a variação de frequência com uma amplitude constante.

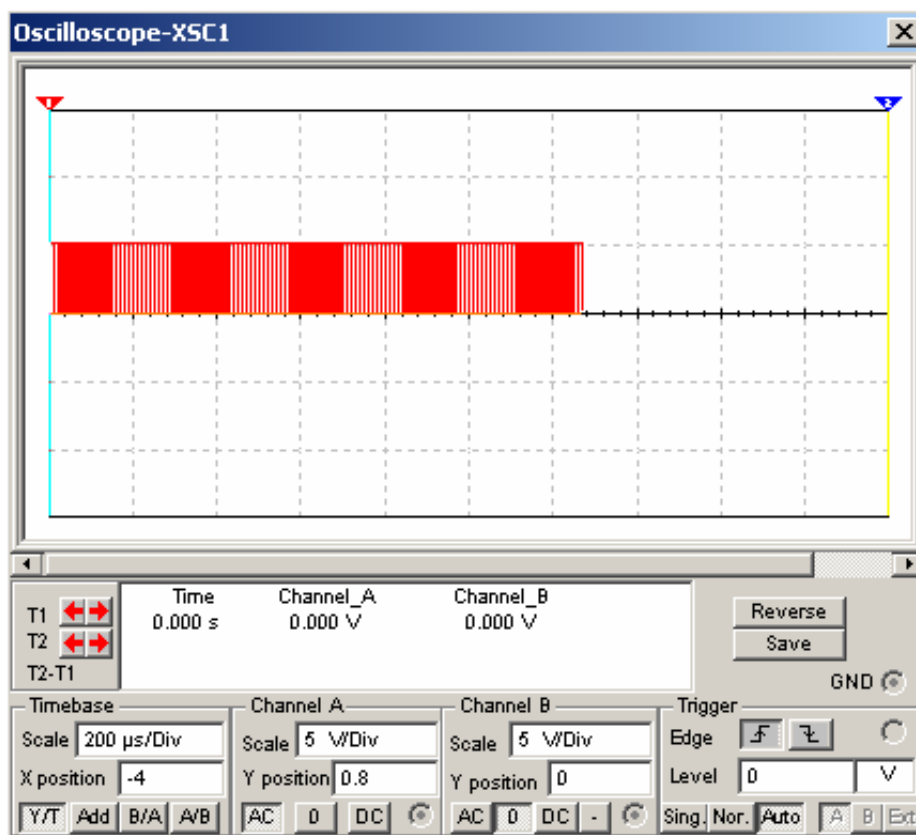


Figura 5.35 - Onda de saída do Schmitt Trigger

Visualizando os espectros de frequência do sinal modulado de entrada e o sinal desacoplado na saída, obtemos uma semelhança entre estes sinais.

O sinal modulado inserido na rede elétrica foi de 1Vpp, conforme a figura 5.36.

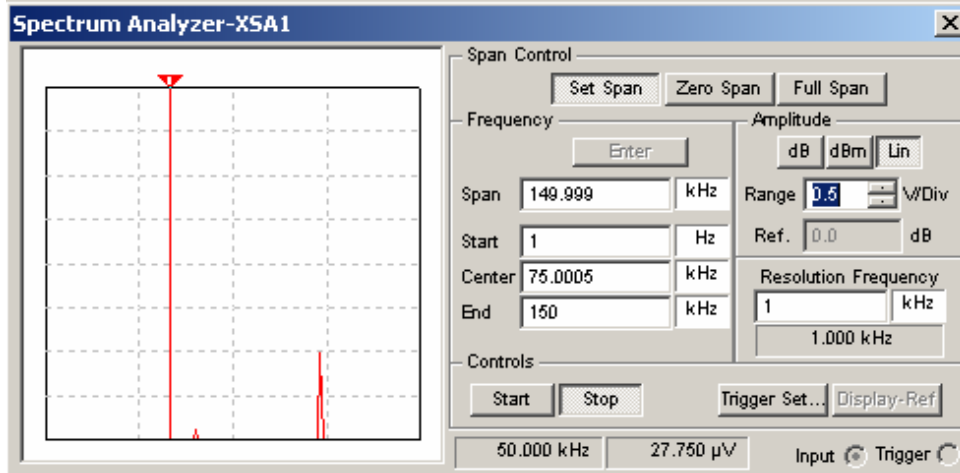


Figura 5.36 - Espectro do sinal modulado de entrada

Nas imagens 5.37 e 5.38 é possível identificar que os sinais recebidos com a variação da impedância de 2Ω e 150Ω possuem a mesma frequência.

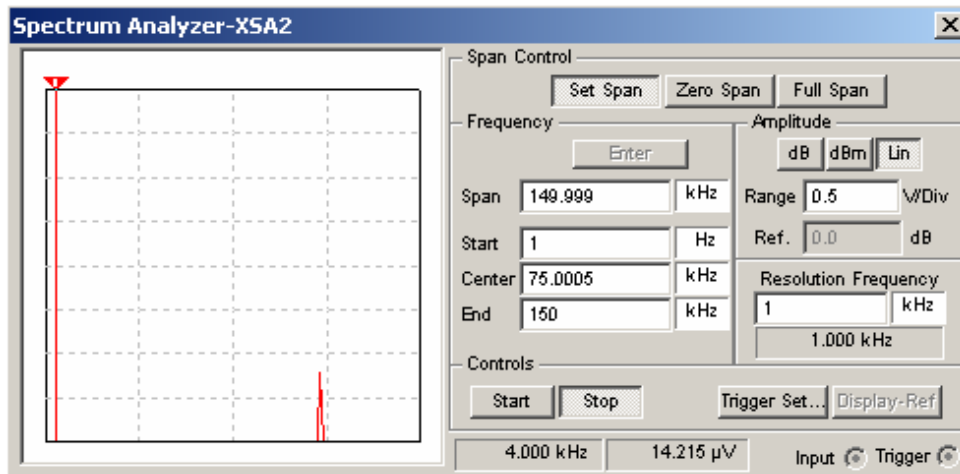


Figura 5.37 - Espectro do sinal modulado de saída (150Ω)

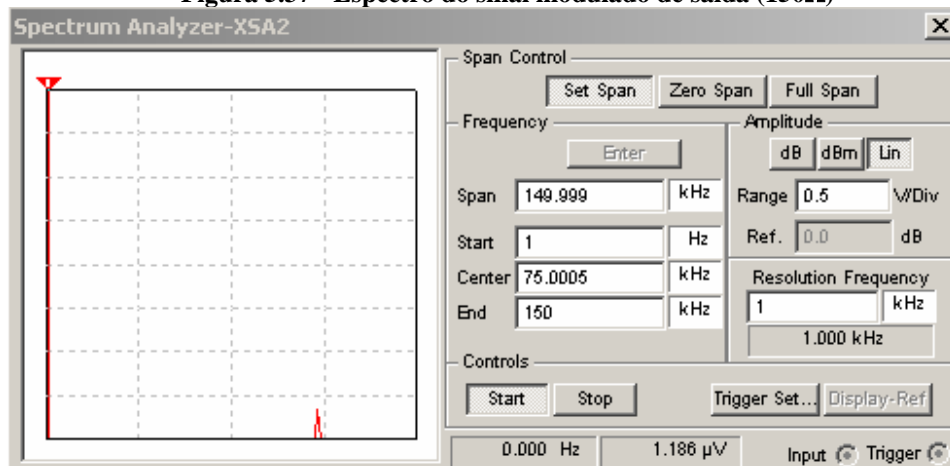


Figura 5.38 - Espectro do sinal modulado de saída (2Ω)

Durante a inserção do sinal modulado em FSK é possível visualizar no analisador de espectro a presença do espectro de 60hz, em alta tensão, e a mudança do espectro causado pela variação da frequência (100kHz a 120kHz), conforme pode ser visualizado na figura 5.39. Depois de determinado tempo o analisador de espectro se estabiliza na frequência da portadora (110kHz). Nota-se o aparecimento de pequenas componentes com baixa intensidade.

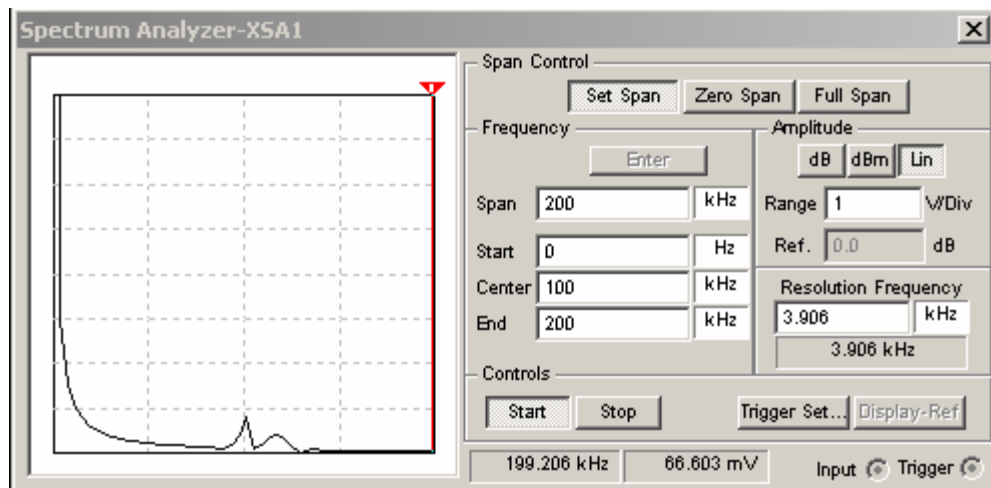


Figura 5.39 – Sinal visto pelo analisador de espectro

5.9 Análise dos resultados em relação ao acoplador padrão

Com a finalidade de comparar os resultados obtidos no projeto proposto, a solução padrão citada anteriormente foi sintonizada na frequência de trabalho na qual a comunicação foi testada neste projeto (110kHz).

A configuração dos componentes existentes no acoplador para dar a sintonia necessária para efetuar a comunicação é representada na figura 5.40.

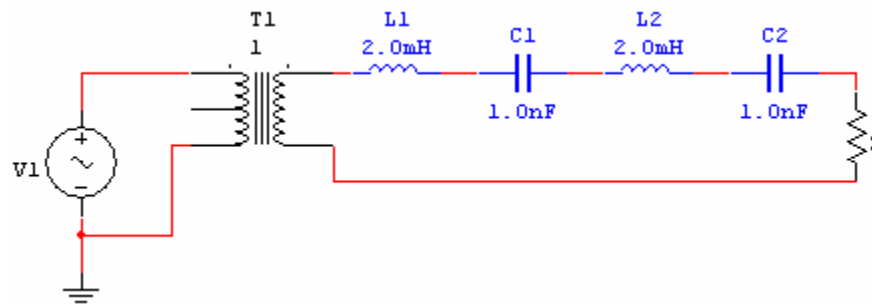


Figura 5.40 - Acoplador sintonizado

Com o acoplador preparado para transmitir e receber dados dentro do enlace proposto neste projeto, a análise consiste em avaliar a frequência, intensidade e a qualidade do sinal recebido.

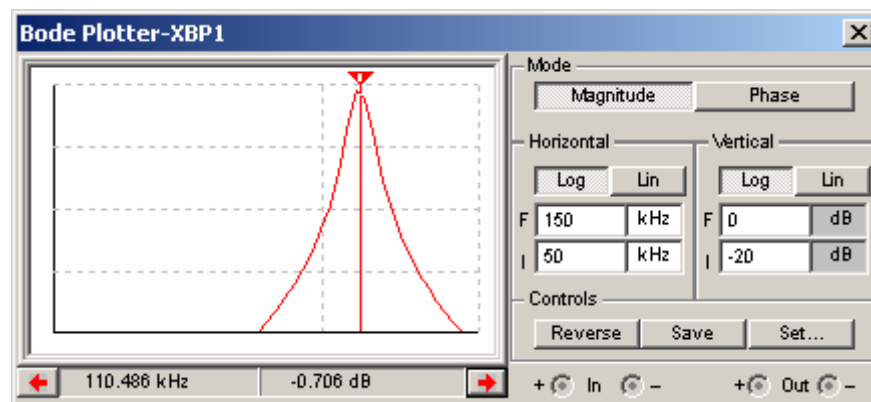


Figura 5.41 - Frequência central do acoplador sintonizado

Como resultado, haverá uma comparação dos resultados obtidos entre a solução proposta neste projeto e a solução padrão de acoplamento, a fim de esclarecer um desenvolvimento dos acopladores.

Não foi possível analisar outras soluções acadêmicas devido à falta de informações técnicas (função de transferência, configurações dos transformadores, etc) sobre o desenvolvimento de tais acopladores, sendo assim impossibilitando sintoniza-los na frequência correta de trabalho.

A impedância da rede elétrica, usada nesta análise baseou-se na variação proposta por Dostert [8], onde o meio varia de 2Ω a 150Ω . O enlace proposto para simular o acoplador padrão é apresentado na figura 5.42.

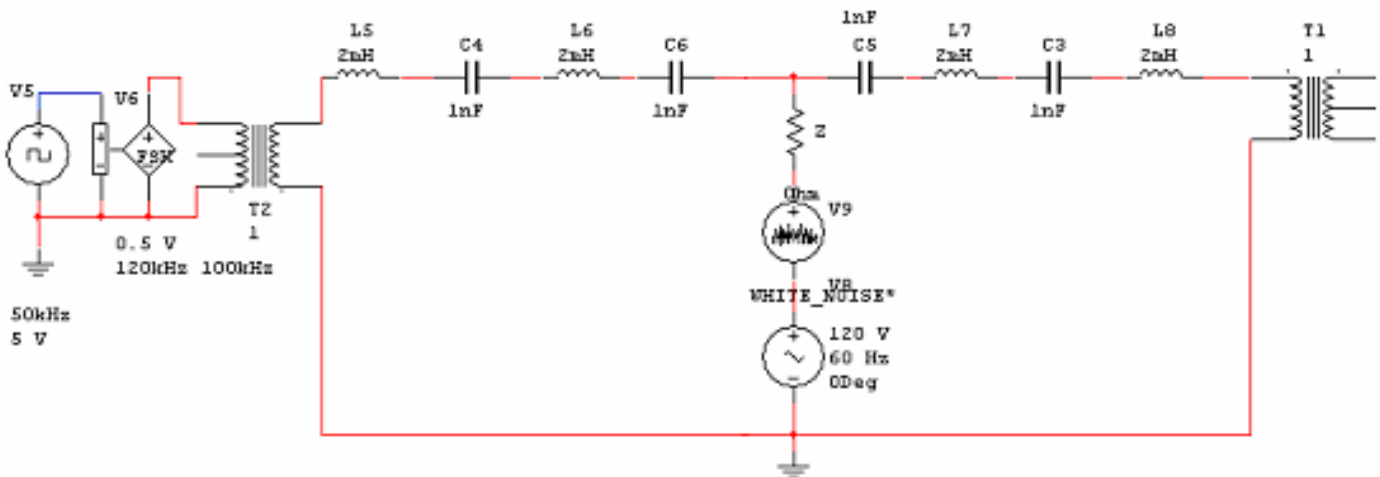


Figura 5.42 - Comunicação utilizando o acoplador padrão

O sinal de saída está bastante atenuado com sua amplitude de 1,2mVpp sendo o sinal de origem era de 1Vpp.

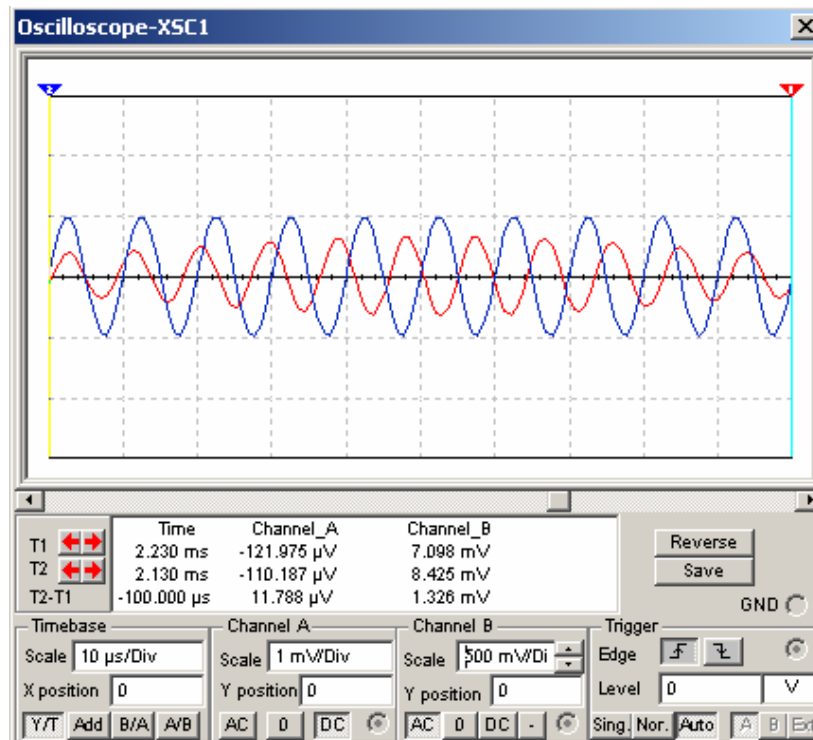


Figura 5.43 - Comparação dos sinais (2Ω)

A qualidade sinal melhora quando a impedância do canal sobe para 150Ω , a atenuação do sinal continua elevada, com sua amplitude de 9mVpp.

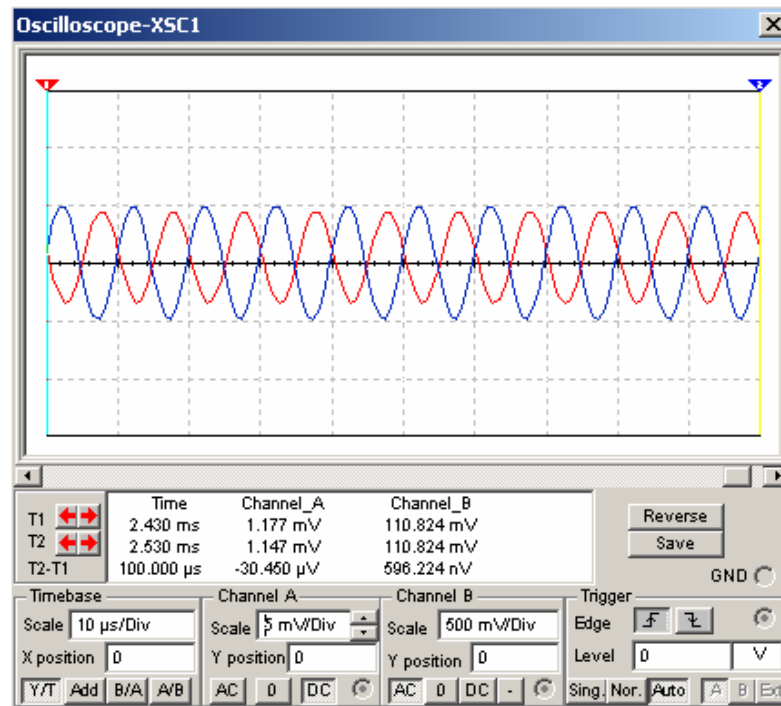


Figura 5.44 - Comparação dos sinais (150Ω)

5.10 Síntese

Com base nas simulações realizadas neste projeto, foi verificado que o projeto matemático condiz com a realidade encontrada nas simulações. Todas as simulações buscaram impor o máximo de realidade possível (fonte de alta tensão, fonte de ruído branco, variação de impedância, etc), porém o modelo utilizado é bastante simples em relação ao modelo real encontrado numa rede elétrica.

Após os resultados obtidos pelo modelo proposto e comparados com os resultados obtidos na solução padrão (bastante utilizada), é possível afirmar que o acoplador proposto neste projeto possui um rendimento excepcional quando tratando da recepção dos dados. Esta topologia atende a boa parte das características ideais, sendo bem superior ao acoplador padrão.

Conclusão

A comunicação de dados em baixa tensão é uma tecnologia que tem sido cobiçada durante muitos anos, porém nesta última década suas técnicas de transmissão e recepção se desenvolveram muito, tornando sua utilização uma prática viável e barata, podendo competir com as outras tecnologias existentes no mercado.

O PLC é uma tecnologia que tende a crescer rapidamente, pois possui uma vantagem fundamental que é o fato desta utilizar um cabeamento já instalado, possuindo grande mobilidade e um grande nº usuários conectados.

O projeto visou estudar uma etapa fundamental na comunicação de dados utilizando a rede elétrica, a etapa de acoplamento do sinal. Os acopladores podem definir a qualidade do sinal enviado e recebido do meio.

Foram realizados diversos levantamentos que devem ser considerados num projeto de acopladores para a comunicação na rede elétrica. Estudos envolvendo sua definição, funcionamento, características do meio (considerado um meio hostil), soluções existentes e outros levantamentos definiram as características ideais que um acoplador deve proporcionar durante a comunicação. Quanto mais próximo estes se encontram das características ideais, melhor será sua eficiência na inserção e remoção do sinal de comunicação.

Foram adotadas duas topologias para o acoplamento do sinal, uma utilizada na transmissão e outra utilizada na recepção dos dados. A estrutura do acoplador transmissor é uma versão simplificada (menor ordem) da solução padrão existente no mercado. A estrutura proposta para a recepção dos dados foi desenvolvida neste projeto buscando atender ao máximo as especificações ideais, componentes como amplificadores operacionais e Schmitt Triggers foram adotados no projeto para prover uma remoção adequada do sinal. Foi utilizado um módulo de proteção para evitar queimas provenientes de descargas elétricas, ou qualquer outro fator que acarrete numa sobre-tensão da linha.

Foram levantadas as funções de transferência, diagramas de blocos, diagramas de Bode, e toda a documentação necessária para uma análise do comportamento do dispositivo. Esta documentação serve de base para que outros autores possam vir a utilizar e testar as soluções desenvolvidas, a fim de melhorar ou comparar os resultados.

As topologias adotadas foram sintonizadas numa faixa de frequência regulamentada pela CENELEC para que pudesse ser realizada uma bateria de simulações.

Após as simulações serem realizadas verificou-se que o projeto matemático dos acopladores estava de acordo com a realidade encontrada nas simulações. A execução das simulações buscou impor o máximo de realidade possível (fonte de alta tensão, fonte de ruído branco, variação de impedância, etc), porém o modelo utilizado é bastante simples em relação ao modelo real encontrado numa rede elétrica.

Feita a análise das simulações foi possível concluir que o projeto do acoplador (na recepção) adotado apresentou grandes melhorias que podem ser utilizadas para o desenvolvimento de um novo acoplador. Esta estrutura atende a boa parte das características ideais e apresentou resultados bem superiores aos resultados apresentados pelo acoplador padrão.

Para o futuro é interessante desenvolver acopladores que trabalhem numa faixa de frequência ainda maior, para isso deverão alterar as topologias dos dispositivos possibilitando maiores velocidades. É possível dar continuidade no desenvolvimento da tecnologia abordando modulações, criptografia, protocolos, dentre outros temas que dizem respeito à comunicação de dados pela rede elétrica.

8. Anexos

Anexo A - Tipos de transformadores

Transformador de alimentação:

É usado em fontes, convertendo a tensão da rede na necessária aos circuitos eletrônicos. Seu núcleo é feito com chapas de aço-silício, que tem baixas perdas, em baixas frequências, por isto é muito eficiente. Às vezes possuem blindagens, invólucros metálicos.

Transformador de áudio:

Usado em aparelhos de som à válvula e certas configurações a transistor, no acoplamento entre etapas amplificadoras e saída ao autofalante. Geralmente é semelhante ao transformador de alimentação em forma e no núcleo de aço-silício, embora também se use o ferrite. Sua *resposta de frequência* dentro da faixa de áudio, 20 a 20000 Hz, não é perfeitamente plana, mesmo usando materiais de alta qualidade no núcleo, o que limita seu uso.

Transformador de distribuição:

Encontrado nos postes e entradas de força em alta tensão (industriais), são de alta potência e projetados para ter alta eficiência (da ordem de 99%), de modo a minimizar o desperdício de energia e o calor gerado. Possui refrigeração a óleo, que circula pelo núcleo dentro de uma carapaça metálica com grande área de contato com o ar exterior. Seu núcleo também é com chapas de aço-silício, e pode ser monofásico ou trifásico (três pares de enrolamentos).



Figura A.1 – Transformadores de distribuição

Transformadores de potencial:

Encontra-se nas cabines de entrada de energia, fornecendo a tensão secundária de 220V, em geral, para alimentar os dispositivos de controle da cabine - *relés de mínima e máxima tensão* (que desarmam o disjuntor fora destes limites), iluminação e medição. A tensão de primário é alta, 13.8kV ou maior. O núcleo é de chapas de aço-silício, envolvido por blindagem metálica, com terminais de alta tensão afastados por cones salientes, adaptados a ligação às cabines. Podem ser mono ou trifásicos.



Figura A.2 – Transformadores de potencial

Transformador de corrente:

Usado na medição de corrente, em cabines e painéis de controle de máquinas e motores. Consiste num anél circular ou quadrado, com núcleo de chapas de aço-silício e enrolamento com poucas espiras, que se instala passando o cabo dentro do furo, este atua como o primário. A corrente é medida por um amperímetro ligado ao secundário (terminais do TC). É especificado pela relação de transformação de corrente, com a do medidor sendo padronizada em 5A, variando apenas a escala de leitura e o número de espiras do TC.

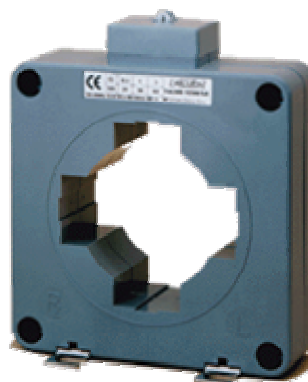


Figura A.3 – Transformadores de corrente

Transformador de RF:

Empregam-se em circuitos de rádio-frequência (RF, acima de 30kHz), no acoplamento entre etapas dos circuitos de rádio e TV. Sua potência em geral é baixa, e os enrolamentos têm poucas espiras. O núcleo é de *ferrite*, material sintético composto de óxidos de ferro, níquel, zinco, cobalto e magnésio em pó, aglutinados por um plastificante. Esta se caracteriza por ter alta permeabilidade, que se mantém em altas frequências (o que não acontece com chapas de aço-silício). Costumam ter blindagem de alumínio, para dispersar interferências, inclusive de outras partes do circuito.

Transformadores de pulso:

São usados no acoplamento, isolando o circuito de controle, de baixa tensão e potência, dos *tiristores*, chaves semicondutoras, além de isolarem um tiristor de outro (vários secundários). Têm núcleo de ferrite e invólucro plástico, em geral.

Anexo B – Bloco de proteção

Para proteger o circuito contra descargas elétricas, ou qualquer outro problema acarretado pela rede elétrica foi proposto um modelo bastante utilizado em soluções comerciais (fax, telefones, etc) [17].

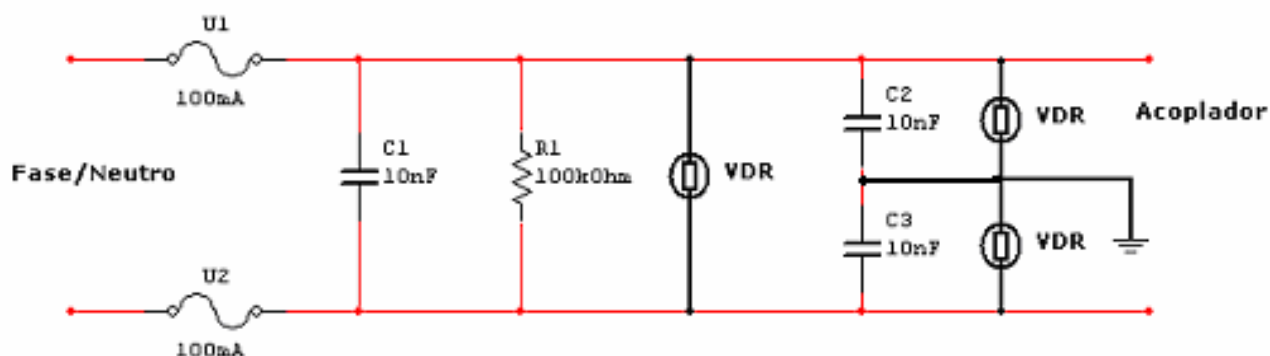


Figura B.1 – Sistema de proteção

O modelo consiste na utilização de um capacitor que contem a variação abrupta de tensão, e um resistor do tipo VDR. Este resistor foi configurado para ter seu funcionamento ativado a partir de 380V, ou seja, enquanto a tensão vinda da rede esta abaixo de 380V, o VDR representa uma resistência muito alta, com uma baixíssima corrente passando pelo dispositivo. No momento em que a tensão ultrapassa o valor máximo (por diversos motivos como descargas elétricas vindas de raios, etc), o VDR sofre uma queda abrupta no valor da resistividade, aumentando assim, a corrente sobre este. No momento em que a corrente aumenta, os fusíveis se rompem, acarretando numa separação física com a rede elétrica.

Anexo C – Comparação entre FSK e PSK

Esta comparação foi realizada por Glenn Platt [13] e utilizada na decisão da modulação escolhida no enlace.

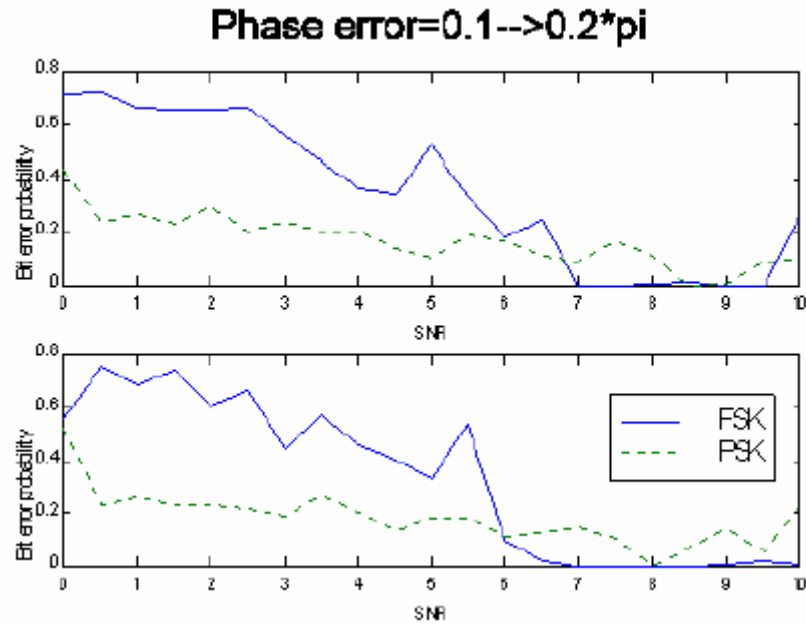


Figura C.1 – Comparação entre as modulações

Resultados da comparação entre FSK e PSK num canal com baixo atraso na fase. Neste caso, o PSK tem uma baixa probabilidade de erro em situações de baixo ruído, enquanto o FSK possui um rendimento melhor com ruídos maiores.

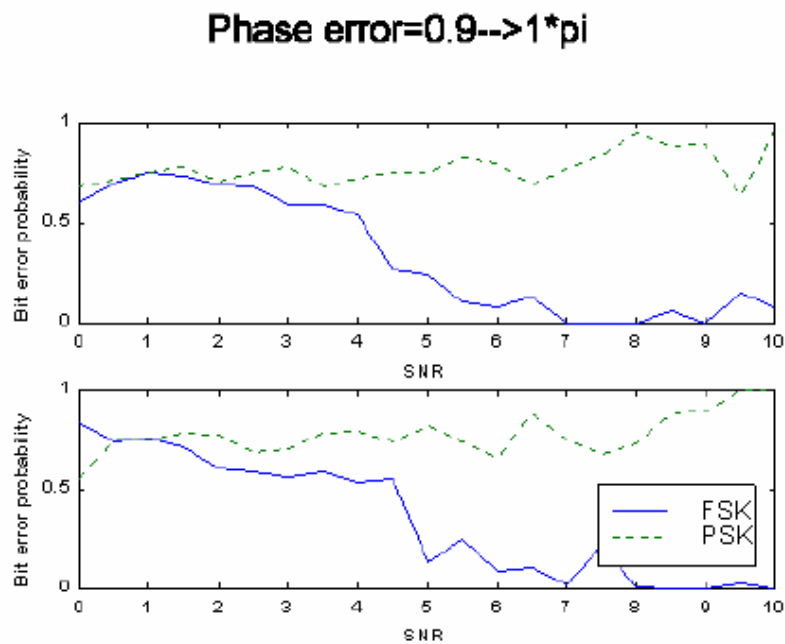


Figura C.2– Comparação entre as modulações

Resultados da comparação entre FSK e PSK num canal com alto atraso na fase. Nesta situação o PSK torna-se inutilizável.

O atraso na fase é algo esperado e imprevisível num canal PLC, por isso a modulação FSK foi escolhida para a utilização.

7. Referências Bibliográficas

- [1] Robert L. Boylestad, “Introdução à Análise de Circuitos”, Ed. LTC, 8º edição.
- [2] Charles K. Alexander e Matthew N. Sadiku, “Fundamentos de circuitos elétricos”, Ed. ARTMED.
- [3] J. David Irwin, “Análise de circuitos em engenharia”, Ed. Makron Book.
- [4] K. C. Abraham and S. Roy, “A Novel High-Speed PLC Communication Modem”, IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, October 1992.
- [5] J. A. Malack and J. R. Engstrom, “RF Impedance of United States and European Power Lines”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-18, no. 1, February 1976, pp. 36-38.
- [6] G. Marubayashi and S. Tachikawa, “Spread Spectrum Transmission on Residential Power Line”, IEEE Conference on Spread-Spectrum Techniques, January 1996, pp1082-1086.
- [7] L Schaap, “The ROBCOM System”, Proceedings of the Workshop on Communications over Power Lines, AJ Han Vinck, O Hooijen, Eds, Essen, ISBN 9074249-05-1, Germany, May 25, 1994, Part V.
- [8] K. M. Dostert, “Frequency-hopping spread-spectrum modulation for digital communications over electrical power lines”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol 9, no 3, May 1990, pp700-710.
- [9] J. Onunga and R. W. Donaldson, “Distribution line communications using CSMA access control with priority acknowledgments”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.4, no. 2, April 1989, pp 878-881.
- [10] D. Johnson e J. Hilburn, “Rapid Practical Designs of Active Filters”
- [11] Arthur Bernard Williams, “Eletronic filter design handbook”
- [12] *Distribuidora de Energia Light*: <http://www.lightplc.com.br>
- [13] Glenn Platt, *Domestic Power Line Carrier Communications*, University of Newcastle, Australia, monografia, 1999.
- [14] *Ascom telecommunication systems*: <http://www.ascom.com>
- [15] *CENELEC Homepage*: <http://www.cenelec.org>
- [16] *HomePlug Homepage*: <http://www.homeplug.org>
- [17] *Proteco Indústria Eletrotécnica Homepage*: <http://www.proteco.com.br>