

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

# **Internet via Rede Elétrica: Modelagem de Canal baseada em Interferômetro**

por:

**Ulysses Roberto Chaves Vitor**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco como Parte dos requisitos para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador: Marcos Tavares de Melo, Ph.D**

**Recife, Maio de 2008**

**©ULYSSES VITOR, 2008.**



**V845i**

**Vitor, Ulysses Roberto Chaves.**

Internet via rede elétrica: modelagem de canal baseada em Interferômetro / Ulysses Roberto Chaves Vitor. - Recife: O Autor, 2008. x, 78 folhas, il : figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2008.

Orientador: Dr. Marcos Tavares de Melo.  
Inclui Bibliografia.

1. Engenharia Elétrica. 2. Modelagem do Canal. 3. Comunicação – Banda Larga. 4. Transmissão em Linhas de Potência. I. Título.

**UFPE**

**621.3**

**CDD (22. ed.)**

**BCTG/2010-164**

Dedico a Cristiano Chaves Fidelis, *in memoria*.

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer ao professor Marcos Tavares de Melo pela oportunidade e apoio oferecido.

Aos professores Belfort e Mauro Rodrigues pelas inúmeras contribuições nesses dois anos.

Ao professor Marcelo Eduardo Vieira Segatto e seu aluno, Jair, pela cooperação e discussões sobre o tema.

Aos alunos Marinaldo, Edson, Lucas, Eduardo e Rafael pela ajuda e oportunidade de trabalho em equipe.

Gostaria de agradecer principalmente a Eduardo que contribuiu fortemente na confecção desse trabalho.

Aos colegas de Mestrado: Bruno, Fabio, Marcio, Lauro, Kleyton, Sergio e Saulo pelo ambiente agradável de trabalho que foi proporcionado por todos nós, nesses dois anos.

Ao ex-aluno da pós-graduação e agora professor Helder pelas sugestões e ajuda na escrita desse documento.

A minha namorada, Cynthia Pimentel, pelo companheirismo nos momentos finais.

A minha mãe por ter me apoiado em todos os momentos da minha vida.

Por fim, a Capes pelo suporte financeiro e ao programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPE.

**ULYSSES ROBERTO CHAVES VITOR**

*Universidade Federal de Pernambuco*

*26 de Maio de 2008*

Resumo da dissertação submetida à UFPE como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em engenharia elétrica.

## **Internet Via Rede Elétrica: Modelagem do Canal baseado no Interferômetro**

**Ulysses Roberto Chaves Vitor**

Maio/2008

Orientador: MARCOS TAVARES DE MELO, Ph.D

Área: FOTÔNICA

Palavras-chaves: Modelagem do Canal, Comunicação em Banda Larga e Transmissão de dados em linhas de Potência

Número de Páginas: 78.

**Resumo:** Nesta dissertação é feita uma discussão sobre o uso da rede elétrica como meio de comunicação. Essa tecnologia é conhecida como PLC, *Power Line Communication*, ou comunicação através da rede de potência. É descrito o seu uso em banda estreita e banda larga, contudo a maior ênfase está na utilização para altas taxas de transmissão. Quando usado em banda larga, também pode ser chamada BPLC, *Broadband Power Line Communication*. Esse trabalho possui cinco capítulos, no primeiro é feita uma breve introdução, descrevendo a motivação e objetivos do trabalho. No segundo, há uma breve história da tecnologia, seguida da descrição das tentativas de padronização e tipos de PLC. O terceiro capítulo descreve a tecnologia, equipamentos e por fim possui uma breve discussão sobre uma rede PLC instalada. Finalmente, no capítulo 4 é descrito o modelo do canal, parâmetros de rede e a contribuição do autor. É usado um modelo de ecos ou multipercursos para descrever o comportamento do sinal. O autor faz uma analogia com um Interferômetro e encontra os parâmetros necessários ao modelo de multipercursos, desconsiderando a atenuação. Assim, descobre as faixas de frequências que podem ser usadas. O último capítulo aborda as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **Internet through Electrical Grid: Channel Modeling based on Interferometer**

**Ulysses Roberto Chaves Vitor**

May/2008

Supervisor(s): MARCOS TAVARES DE MELO, Ph.D

Concentration Area: PHOTONICS

Keywords: Channel Modeling, Broadband Communication, Power Line Communication.

Number of Pages: 78

**Abstract:** A discussion about transmission of data through electrical grid is presented. This technology is called PLC, Power Line Communication. It is described in the both narrow band and broadband, but the emphasis is been focused on high transmission rates. In broadband, it is possible to called BPLC, Broadband Power Line Communication. This dissertation has five chapters; in the first one is done a introduction, with motivation and goals of work. In the second one, there is a technology history, followed by a description of standardizations attempts, and PLC kinds. The third chapter describes the technology, equipment and a discussion about a PLC network. Finally, in the chapter 4 is described a channel model, network parameters and an author contribution. It is using the echo model or multipath model for describing the signal behavior. The Author makes an analogy with interferometry technique to find the parameters for multipath model, neglecting the attenuation. Thus, it is found the frequency band that is possible to use. The last one chapter has conclusions and future works.

## Lista de Figuras

Figura 2-1: Aplicações de Banda Estreita.....	xxii
Figura 2-2: Equipamentos de medições em Narrowband PLC.....	xxiii
Figura 3-3: Instalação de um Master no Paraná feita pela Copel.....	xxvi
Figura 3-4: Rede PLC Instalada em Barrerinhas-MA.....	xxvii
Figura 3-5: Topologia de uma rede Indoor.....	xxix
Figura 3-6: Topologia de Rede PLC – Solução Mitsubishi.....	xxxii
Figura 3-7: Alocação errada de Links.....	xxxiii
Figura 3-8: Alocação correta de links.....	xxxiii
Figura 3-9: Comunicação do Master com seus Escravos (Placas CPE).....	xxxv
Figura 3-10: Exemplo de Alocação de links.....	xxxv
Figura 3-11: Rede de Média Tensão.....	xxxvi
Figura 3-12: Nó de Média Tensão na Rede.....	xxxvii
Figura 3-13: Nó de Média Tensão.....	xxxviii
Figura 3-14: Repetidor – Vista de baixo.....	xxxix
Figura 3-15: Master - Vista de baixo.....	xxxix
Figura 3-16: Equipamento PLC.....	xl
Figura 3-17: Acopladores de Baixa (a) e Média Tensão (b).....	xli
Figura 3-18: Ligação dos Acopladores no Repetidor.....	xli
Figura 3-19: Modem PLC.....	xlii
Figura 3-20: Filtro de Ruído.....	xlii
Figura 3-21: Esquemático da Escola Prof. Leal de Barros.....	xliv
Figura 3-22: Enlace de Rádio para backbone.....	xlv
Figura 3-23: Enlace de Rádio entre UFPE e Escola.....	xlv
Figura 3-24: Quadro de Energia da sala de Informática Escola Prof. Leal de Barros.....	xlviii
Figura 3-25: Topologia Final.....	xliv
Figura 3-26: Velocidade de downlink na Sala de Informática.....	l
Figura 4-27: Elemento infinitesimal de uma linha de transmissão.....	liii
Figura 4-28: Topologia com uma derivação simples.....	liv
Figura 4-29: Topologia com duas derivações.....	liv
Figura 4-30: Estrutura básica do modelo de Ecos.....	lv



Figura 4-31: Representação de quadripolo por parâmetros S.....	lvii
Figura 4-32: Representação de um quadripolo pelos parâmetros ABCD.....	lviii
Figura 4-33: Rede de duas Portas Conectada pela fonte de Tensão e Carga.....	lx
Figura 4-34: Interferômetro com dois Percursos.....	lxii
Figura 4-35: Variação com a Frequência de um Interferômetro.....	lxiii
Figura 4-36: Rede Avaliada por Dostert e Zimemrman.....	lxiv
Figura 4-37: Comportamento do Canal no domínio da frequência.....	lxv
Figura 4-38: Comportamento do Canal no domínio da frequência com atenuação nula....	lxvi
Figura 4-39: Percursos no Caminho com uma derivação.....	lxvii
Figura 4-40: Percursos no Caminho com uma derivação.....	lxvii
Figura 4-41: Superposição das Topologias.....	lxviii
Figura 4-42: Topologia 1.1.....	70
Figura 4-43: Topologia 1.2.....	70
Figura 4-44: Topologia 2.1.....	70
Figura 4-45: Topologia 2.2.....	70
Figura 4-46: Topologia 2.3.....	70
Figura 4-47: Medição Realizada com Analisador de Redes.....	71
Figura 4-48: Métodos para encontrar pesos.....	72
Figura 4-49: Localização do Primeiro e Segundo Nulo .....	73
Figura 4-50: Comparação entre Teórico e Medido (Topologia 1.1).....	74
Figura 4-51: Comparação entre resultados teóricos e experimentais (Topologia 1.2).....	76
Figura 4-52: Resposta em Frequência das Topologias 2.1, 2.2 e 2.3.....	77
Figura 4-53: Resposta em Frequência da Topologia 2.1, com derivações casadas.....	78
Figura 4-54: Avaliação de Técnicas para encontrar pesos.....	79
Figura 4-55: Resultado experimental e Modelo da Topologia 2.1.....	80
Figura 4-56: Frequências dos Nulos da rede avaliada por Dostert e Zimmerman.....	81
Figura 4-57: Comparação da Técnica do Dostert e Zimmerman e Analogia com Interferômetro.....	83

## Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Metas do Projeto Opera.....	xix
Tabela 2-2: Faixas de Freqüências usadas em banda estreita.....	xxi
Tabela 3-3: Freqüência de upstream e downstream dos links.....	xxxiv
Tabela 3-4: Alcance Máximo dos links PLC.....	xxxiv
Tabela 3-5: Testes no Trecho Outdoor.....	xlvii
Tabela 3-6: Testes no Trecho Indoor.....	xlvii
Tabela 3-7: Taxa de Transmissão em cada fase na Sala de Informática.....	li
Tabela 4-8: Parâmetros da Rede encontrados por Dostert e Zimmerman.....	lxiv

## Índice de Siglas

<i>ANEEL</i>	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
<i>Aptel</i>	<i>Associação de Empresas Proprietárias de Infra-estrutura e</i> <i>de Sistemas Privados de Telecomunicações</i>
<i>BPLC</i>	<i>Broadband Power Line Communication</i>
<i>Celg</i>	<i>Centrais Elétricas de Goiás</i>
<i>CENELEC</i>	<i>Comité Européen de Normalisation Electrotechnique</i>
<i>DS2</i>	<i>Design of Systems on Silicon S.A.</i>
<i>EMC</i>	<i>Compatibilidade Eletromagnética</i>
<i>ETSI</i>	<i>Instituto Europeu de Tecnologia e Padronização</i>
<i>GCOI</i>	<i>Grupo Coordenador da Operação Interligada da</i> <i>ELETROBRAS</i>
<i>IBGE</i>	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
<i>IDU</i>	<i>Indoor Device Unit</i>
<i>MAC</i>	<i>Medium Access Control</i>
<i>ODU</i>	<i>Outdoor Device Unit</i>
<i>OFDM</i>	<a href="#"><u><i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i></u></a>
<i>Opera</i>	<i>Open PLC European Research Alliance</i>
<i>OPLAT</i>	<i>Onda Portadora em Linhas de Alta Tensão</i>
<i>PLTF</i>	<i>Power Line Telecommunications Forum</i>
<i>RWE</i>	<i>Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk</i>
<i>TEM</i>	<i>Transversal Eletromagnético</i>
<i>UIT</i>	<i>União Internacional de Telecomunicações</i>
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus</i>
<i>UTC</i>	<i>Utilities Telecom Council</i>
<i>UTP</i>	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
<i>VoIP</i>	<i>Voz sobre IP</i>

<u>1</u>	<u>Introdução.....</u>	<u>16</u>
1.1	<u>Motivação.....</u>	<u>16</u>
1.2	<u>Objetivo da Dissertação.....</u>	<u>17</u>
1.3	<u>Organização da Dissertação.....</u>	<u>17</u>
<u>2</u>	<u>Tecnologia PLC.....</u>	<u>18</u>
2.1	<u>Breve História e Padronização.....</u>	<u>18</u>
2.2	<u>Modalidades de PLC.....</u>	<u>21</u>
2.2.1	<u>Banda Estreita.....</u>	<u>21</u>
2.2.2	<u>Banda Larga.....</u>	<u>22</u>
<u>3</u>	<u>Internet Via Rede Elétrica.....</u>	<u>24</u>
3.1	<u>Redes Acesso ou Rede de Outdoor.....</u>	<u>24</u>
3.2	<u>Redes Indoor ou Rede do Usuário.....</u>	<u>25</u>
3.3	<u>Equipamentos PLC para Banda Larga .....</u>	<u>26</u>
3.3.1	<u>Chip DS2.....</u>	<u>27</u>
3.3.2	<u>Linha Mitsubishi.....</u>	<u>27</u>
3.4	<u>Discussão sobre uma Rede PLC.....</u>	<u>33</u>
3.4.1	<u>Técnica de Alocação de Links.....</u>	<u>34</u>
<u>4</u>	<u>Modelagem do Canal PLC .....</u>	<u>39</u>
4.1	<u>Modelagem do Canal.....</u>	<u>39</u>
4.2	<u>Parâmetros de Espalhamento.....</u>	<u>42</u>
4.3	<u>Parâmetros ABCD.....</u>	<u>43</u>
4.4	<u>Relação entre os Parâmetros S e os Parâmetros ABCD.....</u>	<u>44</u>
4.5	<u>Função Transferência de uma Rede em função dos Parâmetros ABCD.....</u>	<u>44</u>
4.6	<u>Analogia com Interferômetro e Princípio de Superposição.....</u>	<u>46</u>
4.7	<u>Testes com Cabos Coaxiais.....</u>	<u>51</u>
4.7.1	<u>Resultados e Análise.....</u>	<u>53</u>
4.8	<u>Aplicação a Rede Avaliada por Dostert e Zimmerman.....</u>	<u>58</u>
<u>5</u>	<u>Conclusão.....</u>	<u>61</u>
5.1	<u>Sugestões para Trabalhos futuros.....</u>	<u>62</u>
<u>6</u>	<u>Referências.....</u>	<u>63</u>

# CAPÍTULO 1

## Introdução

Comunicação de dados através de linhas de potência (PLC - *Power Line Communication*), é uma tecnologia que utiliza a grade de potência, ou rede de distribuição elétrica, para comunicação de dados, sem afetar a transmissão de energia. Nessa tecnologia um sinal de informação de baixa potência é superposto à energia elétrica transmitida na rede [1].

A faixa de frequência desse sinal é escolhida de tal modo que não haja problemas com a coexistência dos dois sistemas. Enquanto a rede elétrica trabalha com 60Hz, no Brasil, o sinal de dados atuará na faixa partir de kHz até 30MHz. Frequências a partir de MHz são usadas em aplicações de banda larga e kHz em aplicações de controle, pois possui menor taxa de transmissão de bits [2].

A grande vantagem dessa tecnologia é a sua praticidade. O usuário pode, a partir da rede elétrica residencial, ter acesso à Internet, fazendo uso dos serviços de voz, dados e vídeo. Outro fator importante é a economia com gastos na implantação e manutenção do cabeamento, onde o sinal de dados irá passar. Devido a essa economia, a tecnologia PLC pode tornar-se competitiva em relação as suas concorrentes, tais como Wimax e DSL.

Assim, será uma opção para inclusão dos serviços de natureza digital, principalmente para as classes mais carentes, pois mesmo em comunidades extremamente pobres existe energia elétrica.

No Brasil, por exemplo, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a capilaridade da rede de distribuição de energia elétrica já ultrapassa o valor de 95%, devendo atingir sua totalidade em 2015 [3].

O principal objetivo dessa tecnologia é reduzir o custo na implantação de uma nova rede de comunicação. Dessa maneira, projetos envolvendo órgãos do governo em conjunto com empresas do setor elétrico, além das empresas desenvolvedoras dessa tecnologia poderão viabilizar inclusão social em comunidades carentes a baixo custo. Um exemplo de parceria é a rede PLC implantada em Restinga, Rio Grande do Sul [4], na qual, um dos bairros mais carentes de Porto Alegre recebe sinal de Internet através do cabeamento elétrico. Outro exemplo que pode ser citado é a inclusão digital da Escola Prof. Leal de Barros, em Recife, que será detalhado nesse trabalho. Essa rede será descrita no capítulo 3.

Nesse trabalho é apresentada a tecnologia PLC (modalidades, equipamentos) e é mostrado um exemplo de rede PLC para melhor compreensão do leitor sobre a tecnologia.

São feitas duas contribuições: a primeira na implantação da tecnologia em sistemas trifásicos; a segunda, mais importante, na modelagem do canal PLC. É apresentado o modelo consagrado do canal, e proposto uma nova técnica para encontrar seus parâmetros.

## **1.1 Motivação**

O uso da rede elétrica na transmissão de dados traz benefícios significativos, tais como: ausência da necessidade de novos cabos, reduções nos custos de instalação de novo cabeamento e na manutenção desses, proporcionando, também, comodidade de se utilizar equipamentos de comunicação em qualquer ambiente. Novos cabos em residências e escritórios proporcionam incômodos na mudança da infra-estrutura já existente, só há custos relativos à aquisição de equipamentos para transmissão de dados.

Avanços nas técnicas de modulação e na codificação de sinais de comunicação proporcionam altas taxas de transmissão, apesar da hostilidade da rede elétrica ao envio de dados.

Sabendo-se que a rede de energia possui enorme penetração [3], essa tecnologia possibilita a oportunidade de acesso à informação em locais extremamente distantes, como também carentes.

Logo, avanços tecnológicos nessa área representam a chance de inclusão tecnológica para comunidades ainda não beneficiadas.

## **1.2 Objetivo da Dissertação**

Esse trabalho propõe um novo método de encontrar os parâmetros necessários ao modelo proposto por Klaus Dostert e Zimermam [5] para a rede elétrica quando utilizada na transmissão de dados em banda larga.

Esse novo método proposto baseia-se em uma técnica simples e eficiente para através da resposta em frequência do canal retirar-se os parâmetros necessários e exprimir o comportamento do canal com uma expressão matemática. Isso é importante na avaliação de novos modens PLC e

topologias de implantação da rede de dados, pois evitam testes em campo. Dessa maneira, será possível avaliar o funcionamento dos equipamentos em redes das mais distantes localidades e diferentes condições, sem a necessidade de locomoção e de implementação, realizando apenas testes em bancada.

Para isso, foram feitos testes com cabos coaxiais na tentativa de aplicar o modelo. Com dispositivos bem conhecidos, tornou-se mais fácil à análise dos resultados e a aplicação de novos métodos para encontrar as variáveis do modelo [5].

Esses cabos foram dispostos em diferentes topologias, de forma a simular os descasamentos existentes nas redes elétricas. Assim, a resposta em frequência dessas topologias, na faixa de frequência de 1MHz até 30MHz, será similar ao canal PLC. Com isso, pode-se montar uma rede PLC fictícia em laboratório e avaliá-la.

Por fim, a técnica desenvolvida com cabos coaxiais foi comparada ao trabalho realizado por Dostert e Zimmerman [5].

Além dessa contribuição, também será discutida uma implementação de rede PLC, sendo descrita as características da fiação elétrica existente, os problemas encontrados e técnicas utilizadas para implantação da tecnologia. Logo, outra contribuição dessa dissertação é propor uma nova técnica de implementação da rede PLC em um sistema trifásico.

### **1.3 Organização da Dissertação**

O capítulo 2 é iniciado com um breve levantamento histórico da tecnologia PLC, seguida da descrição do Projeto Opera – *Open PLC European Research Alliance*, projeto que uniu várias empresas e países com o objetivo de disseminar a tecnologia PLC, os processos de padronização também são descritos. Por fim, são comentadas as aplicações de PLC em banda estreita e banda larga.

No capítulo 3, há uma descrição mais completa do uso da rede elétrica como meio de transmissão em banda larga. São descritas as divisões da topologia da rede, tais como rede de acesso e rede do usuário. A primeira pertencente à companhia de fornecimento de energia elétrica e a segunda de propriedade do usuário doméstico. Além disso, os equipamentos utilizados para fornecimento de Internet através da rede de energia elétrica são aqui descritos. Para que se tenha uma visão completa da tecnologia, é comentada a implantação de uma rede PLC.

No capítulo 4, o modelo utilizado para o canal PLC é abordado. O modelo consagrado para o canal é descrito, sendo dada uma contribuição na determinação dos parâmetros variáveis desse.

A conclusão da dissertação se encontra no capítulo 5, onde são salientados os aspectos mais importantes relatados nesse trabalho. Propostas de trabalhos futuros são feitas também nesse capítulo.



## CAPÍTULO 2

### Tecnologia PLC

Nesse capítulo será feita uma introdução sobre o uso de redes de energia elétrica para transmissão de informação.

O primeiro ítem descreverá como surgiu a tecnologia, os caminhos que seguiu no decorrer do tempo, além de aplicações que se popularizaram, como o equipamento de monitoração de crianças (*babyphone*) [6].

Em seguida, um comentário sobre o Projeto Opera, de origem européia, o qual tem como meta popularizar a tecnologia. Será salientado também sobre a participação do Brasil nesse empreendimento através da Aptel, Associação de Empresas Proprietárias de Infra-estrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações, e Celg, Centrais Elétricas de Goiás.

Finalmente, uma descrição sucinta dos dois tipos de implementações PLC: PLC de banda estreita e de banda larga é apresentada. Exemplos serão dados sobre algumas aplicações em banda estreita e será feita uma breve introdução sobre banda larga.

#### **1.4 Breve História e Padronização**

Transmissão de dados através de cabos de eletricidade iniciou-se em 1894 nos Estados Unidos com a patente de transmissão da informação utilizando a rede elétrica. Essa patente pode ser considerada um marco inicial, pois o meio físico onde passa informação são fios de cobre e estão presos a postes [6].

Na década de 50, o primeiro sistema comercial de PLC foi introduzido. A utilização foi em sistemas de potência fechados, não sendo oferecido ao público. Nas geradoras de energia elétrica a comunicação entre subestações era realizada por meio de sistemas “carrier”, utilizando a própria linha de transmissão elétrica. Na década de 70 foi comercializado o primeiro sistema PLC. Esse sistema monitorava crianças através da rede de energia elétrica doméstica (*Babyphone*). O sistema funciona da seguinte forma: um adaptador é conectado na tomada do ambiente, onde se encontra o bebê, e um no ambiente onde se encontra o adulto. Caso o bebê venha a chorar, o responsável pode escutá-lo através do adaptador próximo a ele [6].

Além disso, o uso das redes de distribuição de energia como meio de transmissão de sinais de comunicação é bastante difundido entre as empresas de energia elétrica [1]. Circuitos de baixa e

de alta tensão vêm sendo utilizados desde a década de 60 para o transporte de informações operacionais de voz, comando e controle dessas empresas. São bastante conhecidos e utilizados pelas empresas os Sistemas *Power Line Carrier* (Onda Portadora em Linhas de Alta Tensão – OPLAT), de acoplamento capacitivo às Linhas de Alta Tensão. São, também, exemplos da aplicação dessa tecnologia em sistemas de baixa velocidade para o controle/comando de reatores na rede de baixa tensão que, por exigirem baixas taxas de transmissão, permitem a utilização de canais de transmissão com portadoras de baixas frequências [1].

Em 1996, a empresa alemã RWE, *Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk*, constituiu um grupo de pesquisa na área de linhas de potência em baixa tensão, visando transmissão em Banda Larga. O objetivo era obter uma capacidade de transmissão de dados de 2Mbps. Em 1999, essa mesma equipe apresentou, com sucesso, um Demonstrador PLC (“*PLC Demonstrator*”). Tratava-se de um transformador conectado a um modem *PLC Master* e cinco unidades em um apartamento a 380 m, do transformador e com uma taxa de transmissão de 2 Mbps. Este sistema demonstrou que a tecnologia PLC era comercialmente viável [6].

Vale também lembrar que na Europa, em 1997, foi criado o PLC Fórum e em 1998 a UTC, *Utilities Telecom Council* [7], lançou nos USA o Power Line Telecommunications Forum (PLTF) [1].

No Brasil, o acompanhamento dos desenvolvimentos e progressos da tecnologia PLC era feito na época pelo Sub-comitê de Comunicações do Grupo Coordenador da Operação Interligada da ELETROBRAS - ELETROBRAS-GCOI e a APTEL.

Este grupo sub-comitê realizou o seu primeiro Seminário em setembro de 1999, com o único tema: Tecnologia *Powerline Communications* (PLC) [1].

Após este primeiro sucesso, a RWE iniciou uma segunda fase, apresentando na CeBit, a maior exposição comercial do mundo no domínio dos serviços de telecomunicações digitais e tecnologia da informação, de 2000, uma rede PLC com 450 usuários utilizando uma conexão Banda Larga de Internet [6].

Embora a União Internacional de Telecomunicações (UIT) tenha formulado uma recomendação para a banda larga PLC para operar numa faixa de frequência entre 1 MHz a 30 MHz, só no fim de 2000 o Instituto Europeu de Tecnologia e Padronização (ETSI) definiu a regulamentação do PLC [6].

Atualmente, existe um projeto de pesquisa e desenvolvimento na Europa que visa difundir a tecnologia PLC como alternativa a transmissão de dados em banda larga, chamado de Projeto Opera, esse encontrasse na segunda fase. Foi iniciado em 2004 com 35

participantes. O Brasil começou sua participação, na primeira fase, através da Aptel, sendo representada na fase 2 do projeto pela Celg. Atualmente possui 26 participantes.

A Aptel organiza um seminário nacional que ocorre anualmente. Nesse são trocadas experiências de projetos pilotos que ocorrem em todo o país [8].

A seguir será feita uma breve descrição desse Projeto:

### **Projeto Opera Fase 1**

Com o avanço do uso de redes elétricas para transmissão de dados em banda larga, foi formada uma aliança para realização de um projeto. Esse foi chamado de Opera. O projeto Opera foi iniciado em Janeiro de 2004, sendo prevista uma duração de 48 meses [9].

Ainda em 2004, uma pesquisa de satisfação do usuário comprovou que essa tecnologia suporta transmissão de dados, voz e vídeo [9].

Os objetivos iniciais eram de melhorar os sistemas PLC tanto em redes de baixa tensão quanto em redes de média tensão. Essa fase do projeto foi finalizada em dezembro de 2005. É possível sumarizar os desafios do projeto Opera fase 1 através dos seguintes itens:

- Melhoria dos sistemas PLC, abrangendo baixa tensão e média tensão, considerando largura de banda, facilidade de operação, compatibilidade eletromagnética(EMC), modelagem do canal, filtros e acopladores;
- Desenvolvimento de soluções ótimas para *backbone* da rede PLC. A meta é alcançar o usuário final, independentemente de onde ele estiver;
- Padronização de sistemas PLC;
- Definição do plano de negócios e serviços de manutenção;
- Divulgação dos resultados do projeto, respeitando o direito de propriedade intelectual [9]

A primeira fase desse projeto teve a participação de 35 entidades Europeias, uma israelense e uma brasileira. Representando Israel, a Mainnet, empresa fornecedora de soluções PLC, e o Brasil através da Aptel [10].

Atualmente o projeto Opera encontra-se na sua segunda fase, sendo coordenado pelo grupo Iberdrola [10].

Na sua fase 2, o projeto manteve os mesmos objetivos, focando no seu aperfeiçoamento. Houve acréscimos, tais como a meta de desenvolver ferramentas de implantação PLC, como testadores de *links*. Nesse trabalho, serão abordados dois objetivos desse projeto. O primeiro a ser

comentado, no capítulo 3, é o procedimento para implantação da tecnologia em campo. O segundo, e principal contribuição desse trabalho, é a modelagem do canal PLC.

A fase 2 do projeto teve objetivos similares ao inicial. Aproveitando aquilo que já foi desenvolvido, as metas das duas fases podem ser sumarizadas na Tabela 2 -1 [10]:

**Tabela 2-1: Metas do Projeto Opera**

<b>Objetivos</b>	<b>Fase 1</b>	<b>Fase 2</b>
Acopladores/filtros e dispositivos condicionadores	Protótipos certificados e testados	Dispositivos de acoplamento e condicionamento para novas aplicações e conceitos de implantação
Modelagem do canal PLC	Simulação do canal PLC	Emulador de canal PLC
Interação EMC no canal PLC	Base de dados e conclusões da medida EMC	Guias de ondas EMC Verificação de mecanismos atenuadores
Ferramentas de implantação PLC		Desenvolvimento de um testador de link PLC
Interconexão PLC com o backbone da rede	Otimização	Otimização conexão com tecnologias emergentes (UMTS, Wi-Fi, etc)
Integração de acessos locais	Especificação da coexistência do PLC local	Padrões para implementação de PLC e integração entre redes locais e tecnologias de acesso (Wi-Fi, ADSL, etc)
Instalação no campo em média e baixa tensão	Procedimentos	Otimização
Sistema PLC e usuários finais	Protótipos testados	Equipamento apto para fabricação de CI para diversas aplicações
Serviços sob PLC	Tutorial	Serviço testado
Conformidade e padrão EMC	Padrão em nível experimental europeu	Padrão de em nível teórico europeu
Padrão PLC	Versão 1 da especificação OPERA	Especificação Padrão Final

No capítulo 3 é descrita uma implantação de uma dada rede PLC. Para tal, um procedimento de instalação é desenvolvido. A rede elétrica utilizada é de baixa tensão, porém a metodologia pode ser ampliada para uma rede de média tensão.

No capítulo 4, o modelo usado em redes PLC será descrito. Além disso, uma contribuição a esse modelo será detalhada. Resultados experimentais e simulados serão mostrados.

Com o objetivo de definir um padrão, que leve à compatibilidade dos equipamentos de diferentes fabricantes, foi criado um grupo de trabalho; **IEEE P1901**, criado em junho de 2005. Os pontos que estão sendo definidos são: Controle de Acesso ao meio e Especificações para Camada Física. O grupo aprovou 400 requerimentos técnicos e funcionais em fevereiro de 2007, formando três blocos [10]:

- Rede de Acesso;
- Rede do Usuário;
- Coexistência/Compatibilidade.

Segundo informações obtidas no *site* <http://www.ist-opera.org/>, em 2008 deve ser lançado um padrão para a tecnologia determinando protocolo de acesso ao meio, níveis de potência e faixas de frequências. Um problema relativo à determinação das faixas de frequência se deve ao fato de cada rede possuir características únicas, tais como: atenuação, topologia, cargas ligadas à rede etc. Assim, a alocação das frequências das portadoras, baixa frequência ou mais alta, sempre variando de 1 a 30MHz, dependerá do local onde será instalada a rede PLC. Portanto, restringir o uso de frequências pode ser mais um obstáculo à implantação de redes PLC.

## **1.5 Modalidades de PLC**

### **1.5.1 Banda Estreita**

Aplicações de PLC em banda estreita ou *Narrowband PLC* opera dentro das frequências especificadas pelo Comitê Europeu de Padronização (CENELEC - *European Committee for Electrotechnical Standardization Comité Européen de Normalisation Électrotechnique*). Essas frequências são definidas em quatro bandas: Banda A deve ser usada para aplicações domésticas, as bandas B, C e D são para uso privado, principalmente em residências ou automação.

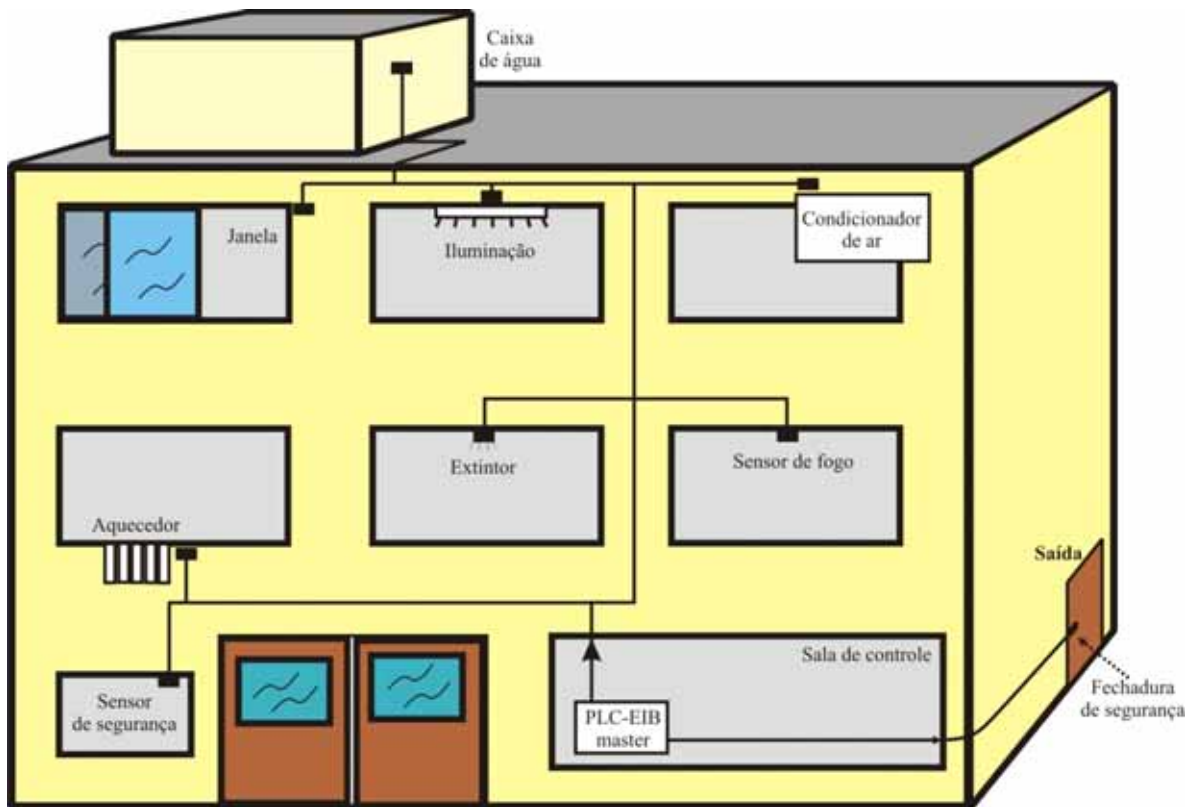
O máximo nível de sinal permitido para as Bandas B, C e D é de 1,2 volts de tensão, enquanto que para banda A, o máximo permitido é de 10 volts de tensão. Na Tabela 2 -2 são mostradas as bandas de frequência e seus valores de potência [11][12]:

Tabela 2-2: Faixas de Frequências usadas em banda estreita.

<i>Banda</i>	<i>Faixa de Frequência(kHz )</i>	<i>Tensão Máxima de Transmissão(Volts)</i>
<i>A</i>	<i>9-95</i>	<i>10</i>
<i>B</i>	<i>95-125</i>	<i>1,2</i>
<i>C</i>	<i>125-140</i>	<i>1,2</i>
<i>D</i>	<i>140-185</i>	<i>1,2</i>

Como exemplo, a automação residencial utilizando a rede elétrica como meio físico de transmissão de dados, provenientes de sensores ou instrumentos de controle, representa uma das aplicações comerciais da tecnologia, tornando possível construção de casas com o conceito de “inteligentes”. Esses sistemas são implementados sem a necessidade de se colocar novos cabos. Dessa maneira, o custo da implantação de um novo cabeamento pode ser evitado com uso da rede elétrica para transmissão de dados. São exemplos de sistemas de automação [11]:

- Controle de equipamentos que são ligados à rede elétrica, como: lâmpadas de iluminação, ar condicionados, elevadores e etc;
- Controle de portas, portões e janelas;
- Equipamentos de segurança, como sensores.



**Figura 2-1: Aplicações de Banda Estreita.**

Aplicações de automação são utilizadas, principalmente, em redes pertencentes ao usuário final, *Indoor*(interiores). Contudo, aplicações como leitura automática de medidores e controle de fraudes no consumo de energia elétrica [13] estão sendo utilizados.

Um exemplo desse tipo de aplicação foi implementado na cidade de São Paulo – SP, no bairro da Mooca. Nesse bairro foi instalado um sistema de medição de energia elétrica, gás e água com ações de corte e religamentos de energia remotos; além disso, foram implementados controle de fraude e violação de caixa de instalação de medidores [13].



**Figura 2-2: Equipamentos de medições em *Narrowband* PLC.**

Na Figura 2 -2, são mostradas aplicações de banda estreita realizadas pela Eletropaulo. Através da transmissão de dados utilizando a rede elétrica da companhia, são medidos o consumo de água, luz e gás. Isso provoca redução nos custos com funcionários destinados apenas a realizar a leitura dos contadores desses serviços.

## 1.5.2 Banda Larga

Sistemas PLC em banda larga (BPLC - *Broadband Power Line Communication*), proporcionam taxa de dados bem maior que o de banda estreita, *narrowband*. Enquanto que esse pode oferecer alguns canais de voz e pequena taxa de transmissão de bits. BPLC pode oferecer sofisticados serviços de comunicação, como múltiplas conexões de voz, vídeos sob demanda e alta taxas de dados, os quais PLC em banda estreita não oferece [11].

A rede elétrica não foi projetada para transmissão de dados. Assim, fatores como atenuação, descasamento e ruído afetam a qualidade da informação que trafega na rede [11].

Quando usado em aplicações em banda larga é preciso aumentar a frequência. Segundo a CENELEC, o intervalo de frequência utilizado para esse fim é de 1MHz até 30MHz [11].

A rede elétrica apresenta um comportamento hostil para transmissão de dados, tais como ruído, multi-percurso, descasamento de impedância e seletividade de frequência. Para combater tais problemas foi adotada a modulação OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), Multiplexação por divisão de frequências ortogonais, que utiliza várias sub-portadoras ortogonais [11].



Este tipo de modulação oferece grande adaptabilidade ao sistema, pois é possível suprimir portadoras interferentes ou interferidas ou variar o carregamento (número de bits) de cada portadora de acordo com a Relação Sinal Ruído ou Atenuação do Enlace [1].

No Brasil, segundo dados do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, cerca de 94% dos domicílios possuem energia elétrica, enquanto que residências com acesso a telefonia não ultrapassam 40%. Dessa forma, sistemas BPLC são excelentes alternativas para a realidade brasileira [13].

No capítulo 3 será feita uma descrição mais completa do uso da rede elétrica para transmissão em banda larga. Abordando, topologias de rede, equipamentos e um exemplo de implantação.

## CAPÍTULO 3

### Internet Via Rede Elétrica

Esse capítulo tem o objetivo de introduzir os conceitos básicos do uso da rede potência na transmissão de informação em banda larga. São descritas as redes de acesso e do usuário, seguidos da descrição dos principais equipamentos PLC usados no país. Por fim, é feita uma discussão sobre a instalação de uma rede PLC em uma escola pública de Recife-PE, descrevendo o método usado para alocação de frequências.

#### **1.6 Redes Acesso ou Rede de Outdoor**

A rede de acesso é iniciada por um equipamento chamado *Master*, Mestre da rede, esse se comporta como um conversor de mídia, converte o sinal Ethernet em sinal PLC. A sua localização é próxima ao transformador de baixa ou média tensão. Quando utilizado em média tensão, também pode ser chamado de Nó de média Tensão, com essa função ele poderá receber o sinal Ethernet ou sinal PLC da rede de média, proveniente de outro Nó de Média Tensão.

Por conveniência, quando se estiver tratando de baixa tensão, será chamado de *Master* de baixa tensão, e quando falar-se de Média Tensão, Nó de Média Tensão.

Caso a rede seja iniciada na média tensão, o Nó de Média Tensão marcará o início da rede PLC. Caso contrário, o *Master* marcará o início da rede de acesso PLC ou rede *outdoor*.

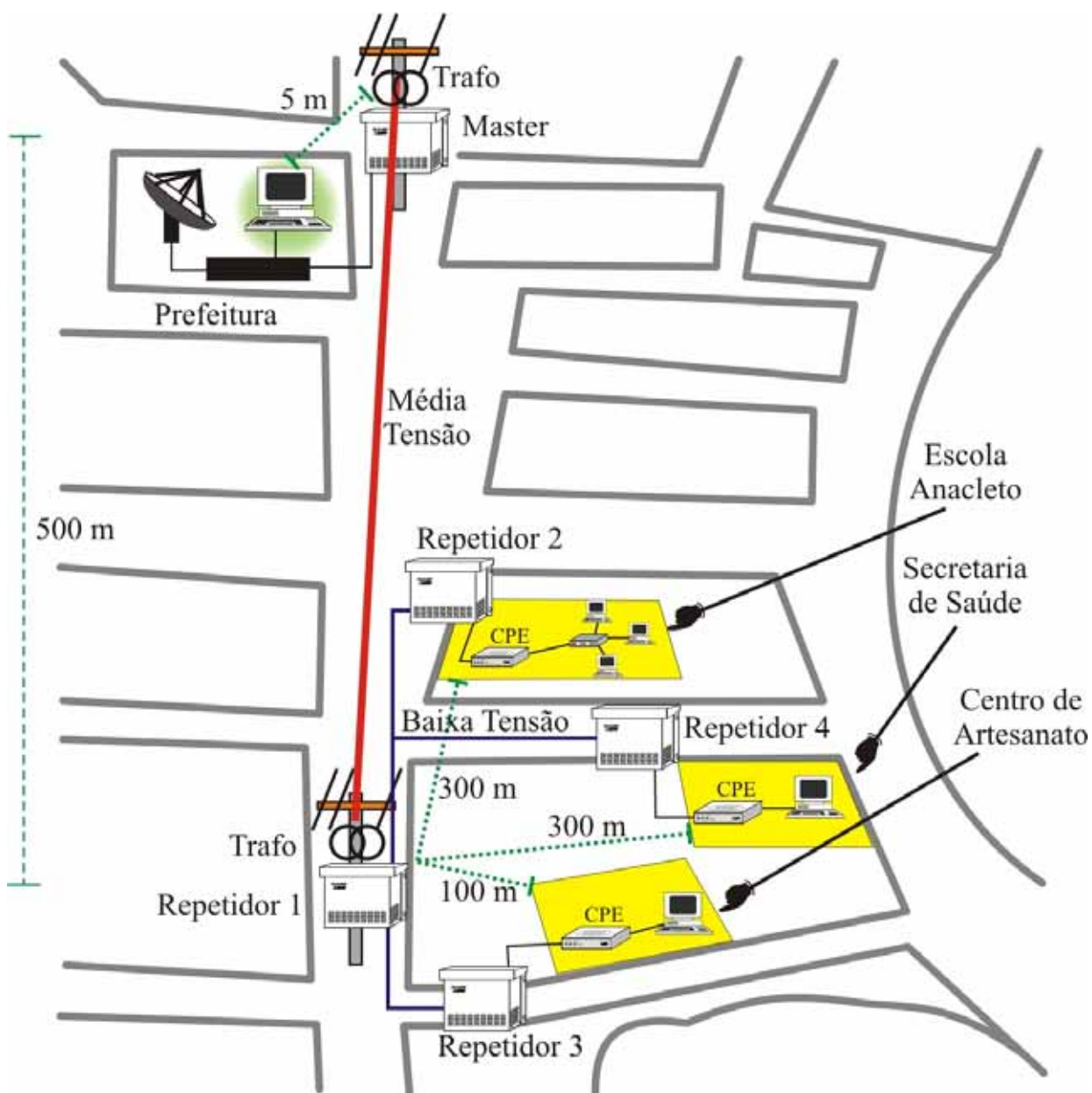
Na Figura 3 -3 é mostrada a implementação de um *Master* PLC no Paraná, realizada pela Companhia de Eletricidade do Paraná [14].



**Figura 3-3: Instalação de um *Master* no Paraná feita pela Copel.**

Para injeção de sinal PLC na rede elétrica são utilizados acopladores, que podem ser de baixa tensão ou de média tensão. A sua função é bloquear o sinal de alta potência para não danificar os equipamentos de comunicação. Por outro lado, deve permitir a passagem do sinal de dados. Na seção 3.3 serão descritos esses equipamentos, e os demais equipamentos PLC.

O Nó de Média Tensão quando colocado no transformador de média para baixa tensão possui a tarefa de executar o caminho paralelo do transformador (*by-pass*). Por fim, a rede de acesso ou *outdoor* termina no medidor de energia elétrica. É colocado outro equipamento PLC, chamado de Repetidor. Tanto o medidor quanto o transformador proporciona grande atenuação ao sinal de alta frequência, assim faz-se necessário à introdução de mais um caminho paralelo. Além disso, caso as distancias sejam grandes ou haja muito ruído na rede, deve-se colocar um repetidor para regenerar o sinal, entre o *Master* e o Repetidor localizado próximo ao medidor de energia elétrica, ou o Nó de média tensão e o *Master*. Na Figura 3 -4, é mostrada a topologia de uma rede de acesso ou Outdoor na cidade de Barreirinhas, Maranhão [15]:



**Figura 3-4: Rede PLC Instalada em Barrerinhas-MA.**

O *backbone* chega via satélite na Ilha de Barrerinhas, onde existe um *Master* de média tensão. Foi utilizada a denominação de *master* ao equipamento que se está chamando de Nó de Média Tensão. Após 500 metros é iniciada a rede de baixa tensão, sendo necessário um Nó de Média tensão, chamado de R1, para realizar o *by-pass*. Vale lembrar que para injeção e recepção do sinal PLC é preciso acopladores, os quais serão bem descritos na seção 3.3.

Nos três *sites*: Escola Anacleto, Secretaria de saúde e Centro de Artesanato são dispostos mais três Repetidores, para realizar um caminho paralelo ao medidor. Os equipamentos usados nessa Implementação em Barrerinhas eram de fabricação da EBA PLC, empresa que decretou falência em 2006 [15].

Toda a rede de acesso ou rede elétrica usada como meio de transmissão na rede PLC *outdoor* é de propriedade da empresa local de fornecimento de energia elétrica. Dessa maneira, na comercialização dessa tecnologia utilizando o trecho *outdoor*, deve-se envolver essas empresas. Elas receberiam aluguel pelo uso da rede. Além disso, somente profissionais autorizados por essas companhias podem instalar equipamentos na rede externa ao usuário final, assim também estariam envolvidas na instalação e manutenção do sistema.

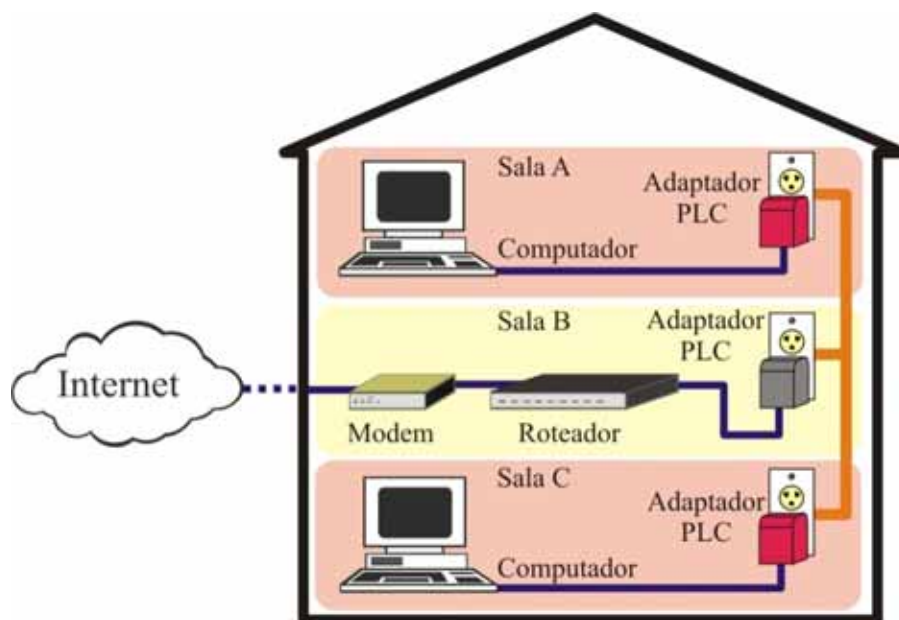
## 1.7 Redes Indoor ou Rede do Usuário

A rede PLC *Indoor* ou do usuário utiliza a rede elétrica doméstica como infra-estrutura do meio de comunicação. Podem ser implantadas redes locais PLC de dados, em residências ou escritórios com conexão de dispositivos típicos como computadores, telefones, impressoras etc. Os modems PLC são conectados às tomadas de energia elétrica disponíveis na instalação do usuário.

Essas redes permitem serviços de automação nas áreas comercial, industrial e residencial com aplicação no controle de temperatura, luminosidade, segurança, entre outras. No caso de banda larga, permite acesso à internet, transmissão de vídeo e voz.

Como alternativa, o usuário final pode conectar o seu modem PLC a um access point 802.11 e distribuir de forma *wireless* a comunicação em banda larga. Os modems PLC normalmente têm interface RJ45 para o padrão Ethernet, interface USB e uma interface RJ11 para se conectar diretamente a um telefone comum, para proporcionar serviço de Voz sobre IP – VoIP [16][17].

A Figura 3 -5 ilustra a topologia de uma rede *indoor* com acesso a internet. Um modem recebe o sinal proveniente de um *backbone* qualquer como fibra óptica ou DSL, esse sinal já em protocolo Ethernet, segue para um roteador que em seguida encaminha para um adaptador PLC ou modem PLC. O adaptador converte o sinal Ethernet em sinal PLC, injetando os dados na rede elétrica domiciliar. A rede funciona como um barramento único. Fabricantes afirmam que é possível enviar dados a taxas de até 100Mbps ou 190Mbps [17][18]. Para isso usa-se novamente outro adaptador PLC, que dessa vez, recebe sinal PLC e transforma a informação em sinal Ethernet, podendo ser recebido por outro computador. Com esse tipo de topologia é possível distribuir um ponto de rede em uma residência ou escritório sem a necessidade de se passar novos cabos.



**Figura 3-5: Topologia de uma rede Indoor**

Os equipamentos utilizados na construção de redes locais, usando a rede elétrica doméstica, podem ser comprados com facilidade na Internet [17][18]. Esses equipamentos seguem o padrão *HomePlug Powerline Alliance* [16][19], aliança formada por varias empresas com a meta de gerar um padrão, no qual adaptadores PLC de fabricantes diferentes, se comunicassem entre si. Em março de 2000 foi iniciada essa aliança. O padrão especificado por eles em junho de 2001 foi o *Homeplug 1.0* [19]. Essa organização trabalha em paralelo ao projeto Opera. A facilidade dos equipamentos ligados a essa aliança é a compatibilidade de adaptadores de fabricantes diferentes, além da praticidade na instalação.

A atuação desses equipamentos ocorre na rede interna ao usuário. Essa rede é de propriedade do cidadão, logo companhias de energia elétrica não participam desse modelo de negócio. Qualquer pessoa pode comprar tais produtos e construir uma rede local de dados sem ajuda técnica, distribuindo Internet pelo cabeamento elétrico residencial.

## 1.8 Equipamentos PLC para Banda Larga

Desde o início dos anos 90, devido principalmente ao crescimento explosivo das telecomunicações, celular e Internet, observou-se um forte crescimento no número de empresas que comercializam solução comercial para Internet via rede elétrica.

Para soluções estritamente *Indoor*, varias empresas vendem equipamentos especificados no padrão *Homeplug*, como mencionado.

Além dessas, ainda existem empresas ligadas ao projeto Opera ou de maneira independente, que estão comercializando equipamentos com soluções completas, Indoor e Outdoor. A grande diferença dessas empresas em relação as que seguem o padrão *Homeplug* é a ausência de compatibilidade entre os seus produtos. Ou melhor, um *Master* de uma companhia *A* não pode se comunicar com um repetidor de uma companhia *B*. O modelo de negócio que é proposto trata-se de uma parceria entre os fabricantes de equipamentos e companhias fornecedoras de energia elétrica, além de universidades ou centros de pesquisas interessados em estudar a tecnologia. Será feita nas seções seguintes uma descrição da solução da empresa *Mitsubishi*, para que seja entendido como se dá a implantação de Internet via rede elétrica. Esse fabricante é o escolhido, pois as soluções das empresas fornecedoras são similares, além de serem usados na rede PLC que será descrita na seção 3.4. Vale salientar também que são os únicos equipamentos PLCs do Brasil homologados pela Anatel, Agência Nacional de Telecomunicações [20]. Apesar de não existir um padrão nacional para essa tecnologia, esse padrão está em processo de construção. Essa especificação somente garante a ausência de perigo de acidentes, como incêndios, provocados por esses equipamentos.

Para concluir, será realizada uma discussão técnica de uma implementação do sistema. Além da descrição das características da rede elétrica e o processo de implantação da solução mais adequada. O procedimento utilizado para implantação em campo é uma das contribuições desse trabalho.

### 1.8.1 Chip DS2

Fundada em 1998, *Design of Systems on Silicon S.A. (DS2)* vem desenvolvendo chips e softwares para transmissão de dados através da rede de energia. A sua geração atual de chips pode fornecer taxas de até 200Mbps. Dois grupos fortes adotaram a DS2 como chips para implementação dos seus equipamentos, a UPA (*Universal Powerline Association*) e as afiliadas do Projeto Opera. Os equipamentos da *Mitsubishi* também utilizam esse dispositivo como base para o seu funcionamento [21].

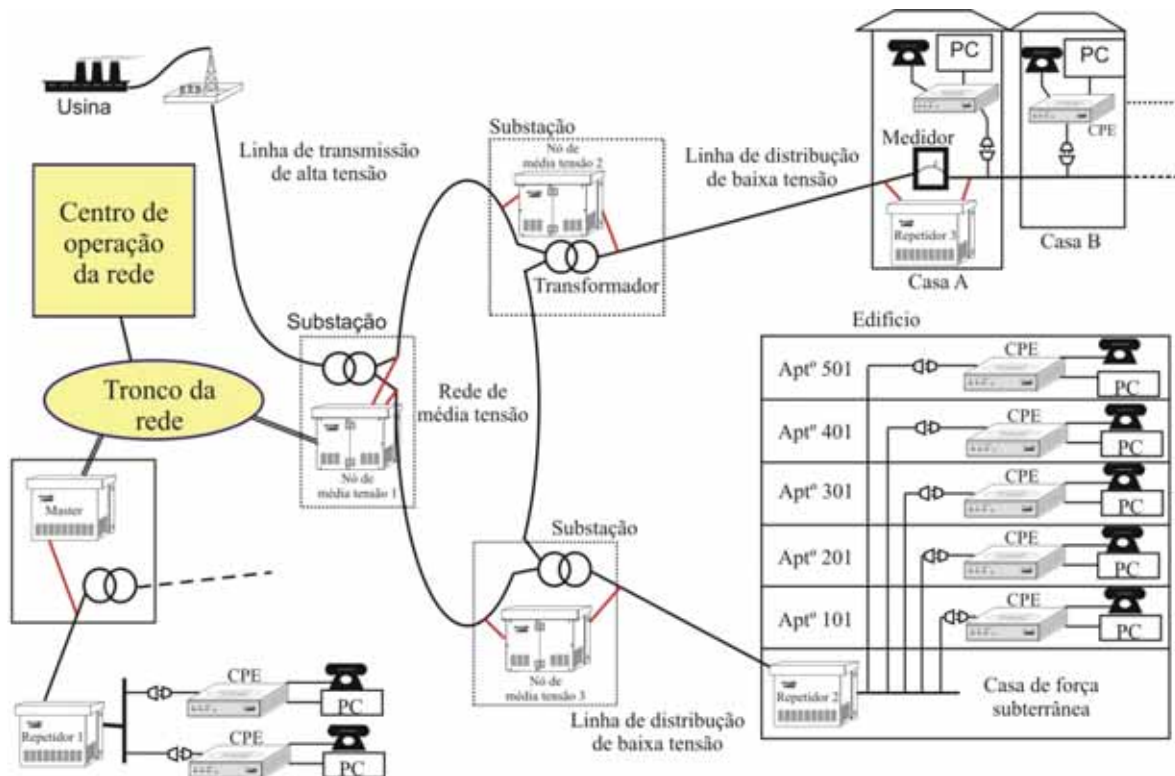
Os equipamentos que serão descritos na seção seguinte são de uma geração anterior a atual. Eles oferecem banda de até 45Mbps. Entretanto, está sendo desenvolvido um novo chip com taxa de até 400Mbps [10][21].

### 1.8.2 Linha *Mitsubishi*

A *Mitsubishi* desenvolveu uma solução PLC em banda larga. A faixa de frequência utilizada para essa aplicação, 1,7MHz até 30MHz, foi dividida em *links* ou modos de propagação, com faixas de *download* e *upload* diferentes [22].

Os equipamentos da *Mitsubishi* utilizam o chip DS2 na primeira geração, o qual suportam taxas de 45Mbps, 28Mbps de *downlink* e 17Mbps de *uplink*. Os equipamentos utilizados são chamados de: Nó de Média Tensão, Master de baixa tensão ou Master, Repetidores, Acopladores, Isolador de Ruído e Modems ou CPEs (*customer premises equipment*) [22]. Serão descritos todos os equipamentos de maneira sucinta. Na Figura 3 -6 é mostrada uma topologia típica da solução da empresa:





**Figura 3-6: Topologia de Rede PLC – Solução Mitsubishi.**

Como mostrado na Figura 3-6, a rede PLC possui os seguintes equipamentos: Nó de média tensão, *Master*, Repetidor e Modem. Além desses, há os acopladores, os quais ligam os Nós de média tensão, Repetidores e *Masters* à rede de energia.

Um nó de média tensão recebe o sinal de dados em protocolo Ethernet, do tronco de rede, converte para sinal PLC e injeta no anel de média. Outros equipamentos similares, os outros dois Nós de Média tensão recebem o sinal na média tensão e injeta na rede de baixa tensão. Em seguida, Repetidores regeneram e encaminham o sinal para os modems ou CPEs.

Em outra rede, na mesma figura, o *Master* recebe o sinal de Internet e injeta diretamente na rede elétrica, através do acoplador. O Repetidor é responsável por regenerar o sinal após grandes distâncias ou ser o caminho paralelo ao medidor de energia elétrica, de maneira similar ao descrito antes.

A transmissão entre os equipamentos é *full-duplex*, utilizando frequências diferentes para *uplink* e *downlink*. O par de *downstream* e *upstream* é definido como *link*.

### Interferência e Planejamento do *Link*

Quando o sinal PLC trafega na rede elétrica, parte dele é irradiado [23][11]. Para evitar interferência eletromagnética entre os equipamentos PLC é preciso planejar os *links* de cada trecho da rede. Na Figura 3 -7, a topologia está sujeita a interferências eletromagnéticas. Sinais trocados entre o *Master* e Repetidor 1 irão ser induzidos, em parte, para o trecho de rede que liga o Repetidor 1 com o Repetidor 2 e vice-versa.



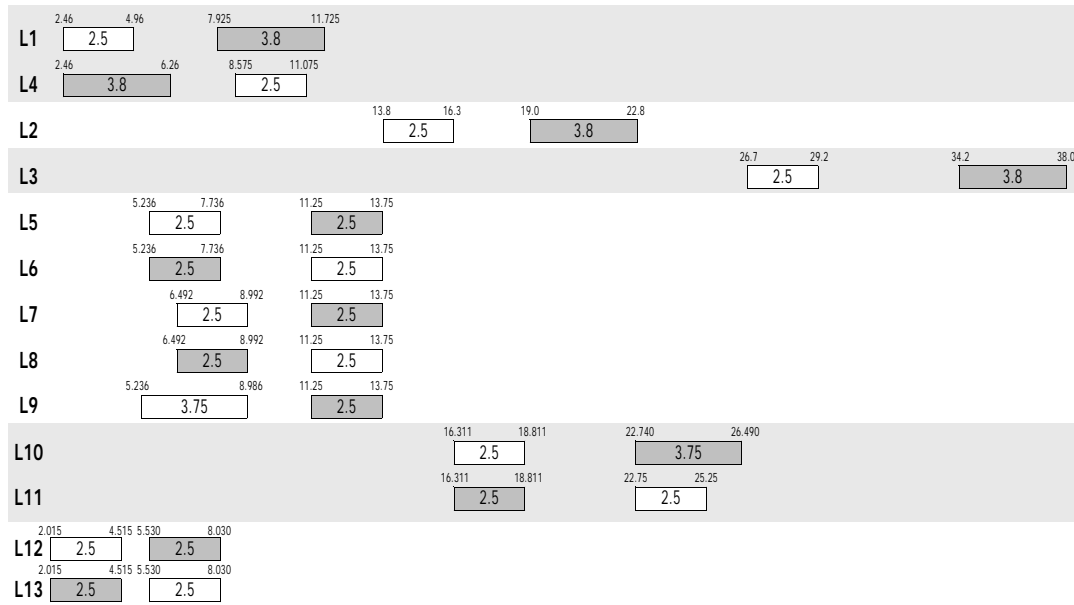
**Figura 3-7: Alocação errada de *Links*.**

Para evitar esse problema, a faixa de frequência usada em PLC para aplicações em banda larga, 1,7MHz até 30MHz, foi dividida em vários *links*. Cada *link* possui banda de frequência de *upstream* e *downstream* diferentes. Assim, não haverá interferências se utilizarmos *links* diferentes em trechos próximos da rede.



**Figura 3-8: Alocação correta de *links*.**

Na Figura 3 -8, não existe interferência eletromagnética, pois as faixas de frequência de downlink e uplink dos links 1 e 2 são diferentes. Na Erro: Origem da referência não encontrada estão as frequência usadas em cada link, para downlink e uplink [22]:



**Tabela 3-3: Frequência de *upstream* e *downstream* dos links.**

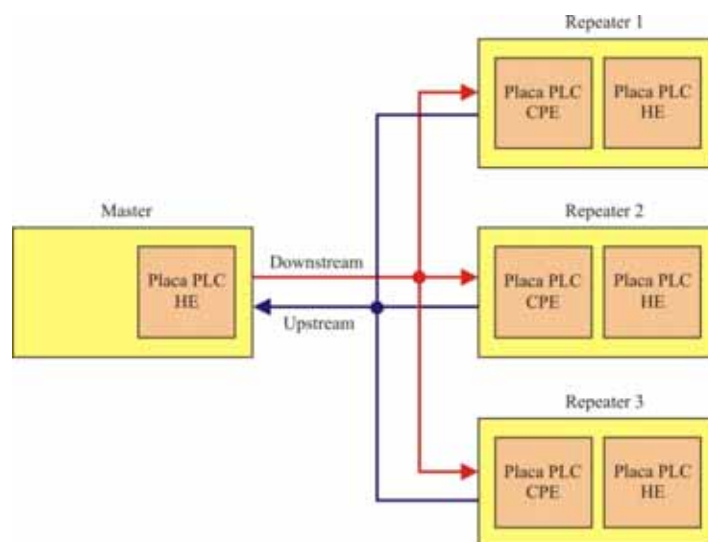
Em cinza, as faixas de frequência de *downlink* e em branco as de *uplink*.

Na Tabela 3 -4 é mostrado o alcance dos *links*. Nessa tabela, o *link x/y* representa os *links* *x* e *y*. Dependendo do *link* utilizado, o alcance é diferente. Esses alcances foram encontrados realizando-se medidas em média tensão, como redes ponto a ponto. Tais dados são de responsabilidade da Mitsubishi. Além disso, a potência mínima em que o sinal ainda pode ser regenerado é de -50dbm, segundo especificações do fabricante [22].

**Tabela 3-4: Alcance Máximo dos links PLC.**

<i>Link</i>	Alcance Máximo (metros)
<i>Link 1/4</i>	600 m
<i>Link 5/9</i>	440 m
<i>Link 2</i>	200 m
<i>Link 10/11</i>	170 m
<i>Link 12/13</i>	1200 m
<i>Link 3</i>	60 m

É importante salientar que o modem PLC se comunica apenas com o *link 2*, trata-se de uma limitação dessa geração de equipamentos. Assim, em qualquer topologia implementada deve-se usar esse enlace como o último, antes do modem. Caso uma Placa HE troque informações com duas placas CPE, poderia existir interferência pois, elas trabalhariam no mesmo *link*. Para evitar isso, a Placa HE utiliza multiplexação no domínio do tempo para trocar dados com as Placas CPE que ela comanda. Na Figura 3 -9, o *Master* utiliza *slots* de tempo para realizar a transmissão e recepção de informação com as placas CPE.



**Figura 3-9: Comunicação do *Master* com seus Escravos (Placas CPE).**

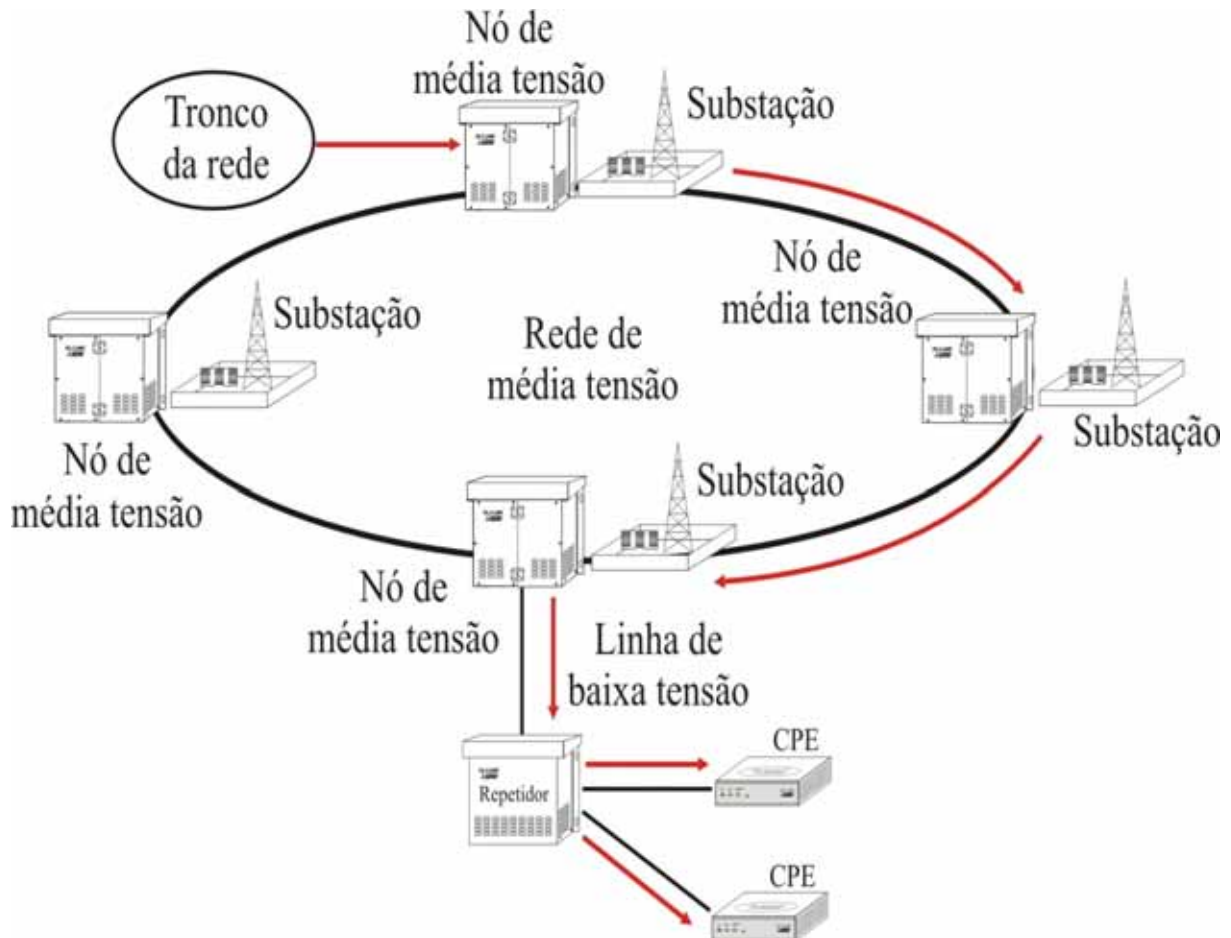
Na Figura 3 -10, é ilustrado um exemplo de projeto de alocação de *links*. Existe um tronco de rede no link de maior alcance. Quando o sinal chega ao site, onde se deseja disponibilizar Internet, um repetidor é responsável por realizar o *bypass* do medidor e converter a frequência para o *link 2*, com o qual o Modem PLC é capaz se comunicar.



**Figura 3-10: Exemplo de Alocação de *links*.**

## Nó de Média Tensão

O nó de média tensão é responsável por transmitir o sinal PLC tanto na baixa quanto na média tensão. Na Figura 3 -11 é mostrado a atuação de alguns nós.

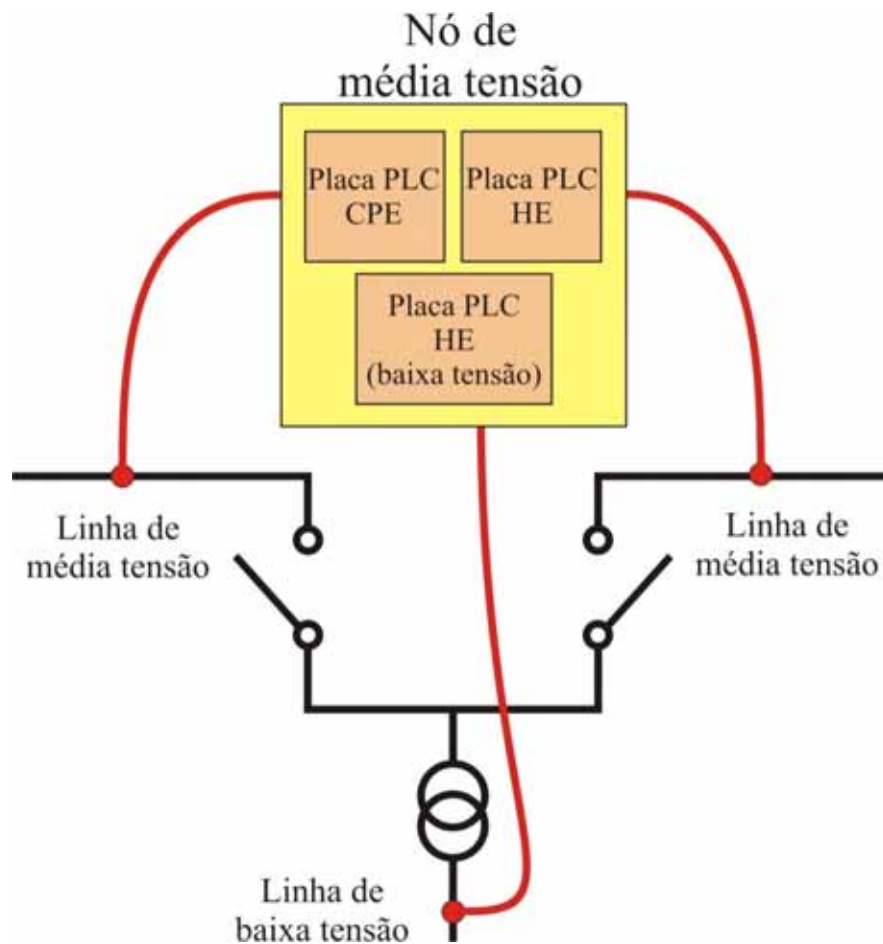


**Figura 3-11: Rede de Média Tensão**

Serão descritos os equipamentos da linha, salientando como podem trabalhar em dois *links* diferentes e qual a hierarquia entre eles.

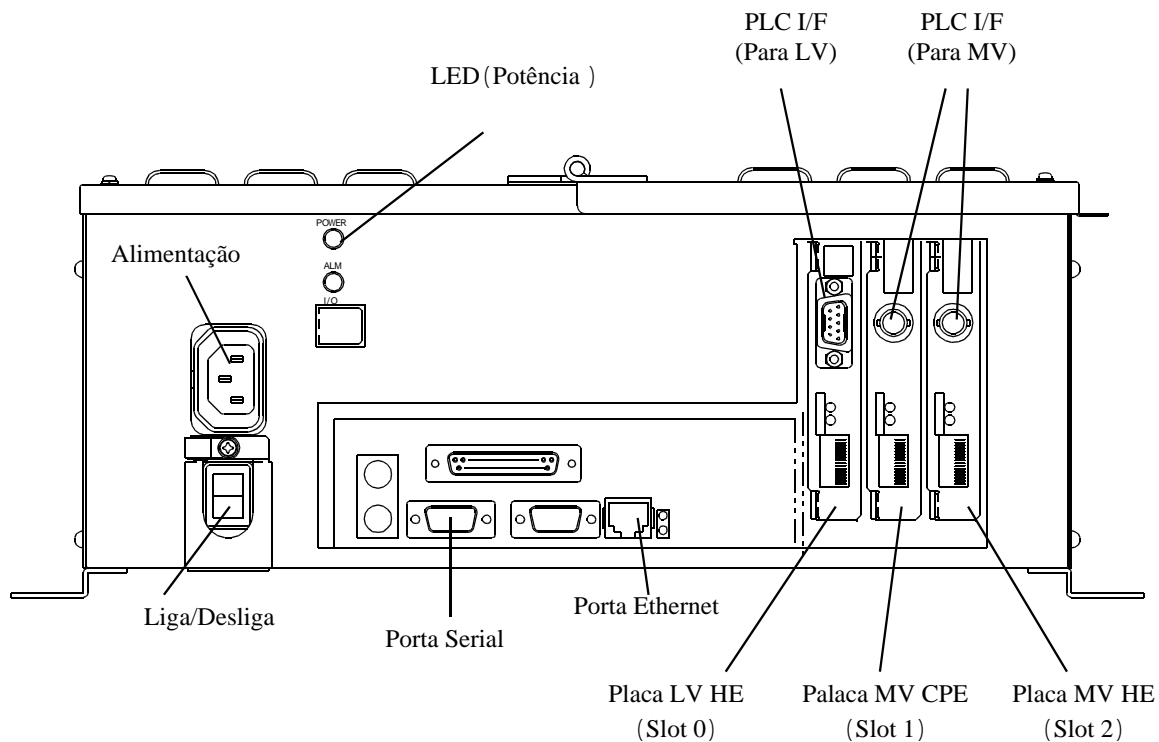
A topologia completa de uma rede PLC, utilizando equipamentos da *Mitsubishi*, é mostrada na Figura 3 -11. O nó de media tensão recebe o sinal de Internet e injeta na rede de média, outro nó de média recebe o sinal, já na rede elétrica, e realiza o *by-pass* para baixa. Vale lembrar que na média tensão o sinal PLC é transmitido e recebido em um *link* de frequência diferente do de baixa tensão.

Na Figura 3-12 pode ser visto um nó de média tensão por dentro. Ele possui placas de Transmissão que serão chamadas de Placas HE e as placas de Recepção que serão chamadas de placas CPE. As placas HE representam o *Master*. Elas possuem todas as configurações, banda permitida, qualidade de serviço etc, que caracterizam o perfil dos CPE, que são escravos, *slaves*, nessa comunicação. Uma Placa HE e uma Placa CPE devem se comunicar no mesmo *link*.



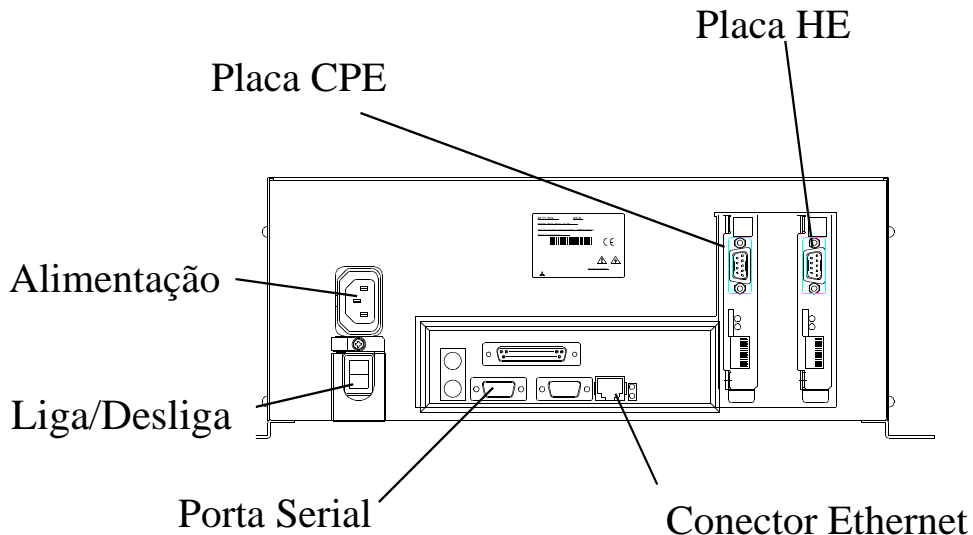
**Figura 3-12: Nó de Média Tensão na Rede.**

A comunicação é full-duplex, tendo frequências de *downlink* e *uplink* diferentes. Um nó de média tensão possui três placas como essas. Uma placa CPE de média tensão que se comunica com uma HE também de média tensão, pertencente a outro nó, duas placas HE, uma de média tensão e outra de baixa tensão. A placa HE de média tensão se comunicará diretamente com uma Placa CPE de um nó de media tensão, passando o sinal pela rede de média, enquanto a placa HE de baixa tensão injeta o sinal na rede de baixa. Na Figura 3-13 é mostrada a vista inferior de um nó de média tensão. A saída das placas de média tensão utiliza conector BNC, enquanto a de baixa DB-9.



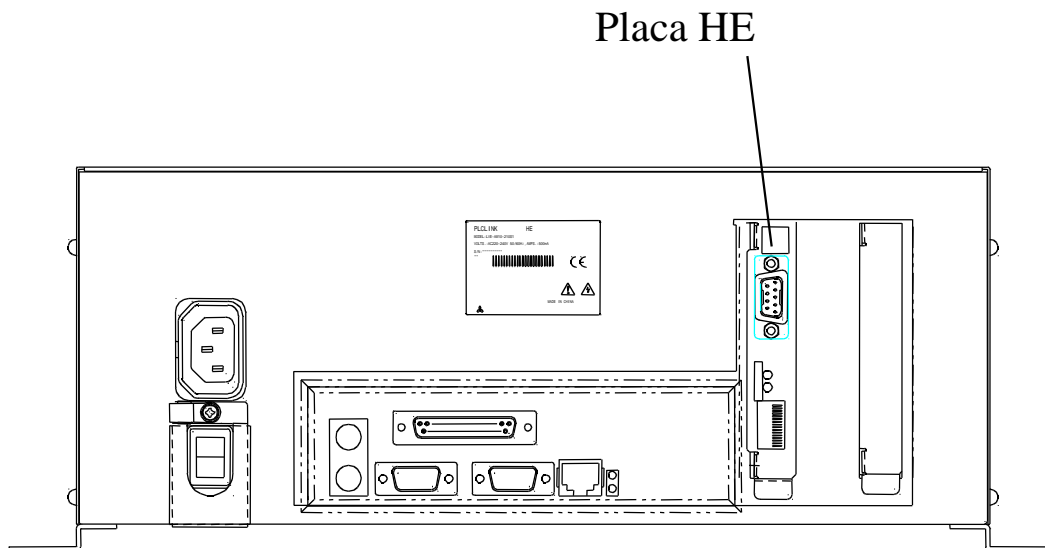
**Figura 3-13: Nó de Média Tensão**

Logo após o nó de média tensão, existe o *Repetidor*, esse atuando na baixa tensão. Esse equipamento deve possuir duas Placas, uma de transmissão, HE, e outra de recepção, CPE. É importante lembrar que essas devem trabalhar em *links* diferentes. A quantidade de repetidores dependerá das distâncias e características da rede e quantidade de *sites*, onde serão implantadas. Isso se deve a atenuação e a necessidade de se realizar o *by-pass* nos medidores. Na Figura 3 -14, pode ser visto o repetidor PLC. O equipamento deve ser alimentado com tensão entre 110 e 220 Volts. Possui conector liga/desliga e entrada para dados RJ-45. Além disso, à direita estão as placas de transmissão e recepção, HE e CPE [22].



**Figura 3-14: Repetidor – Vista de baixo.**

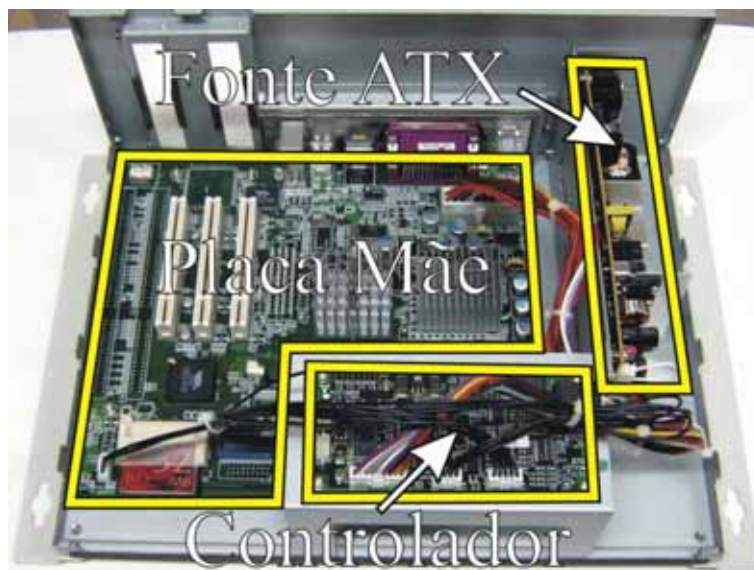
Caso não exista rede de Média tensão, o equipamento principal da rede deixará de ser o nó de média tensão e passará a ser o *Master*. Esse equipamento recebe sinal Ethernet através de uma entrada RJ-45 e possui apenas uma placa de transmissão em um *slot* PCI, Placa HE, para injeção na rede. Abaixo dele irão existir os repetidores que funcionam da mesma forma quando o seu Mestre é um nó de média tensão. Na Figura 3 -15, é mostrado o equipamento *Master*, sendo idêntico ao Repetidor. A única diferença é que se usa apenas uma Placa HE para injeção, pois o sinal de dados é proveniente da porta RJ-45 e não da rede elétrica.



**Figura 3-15: Master - Vista de baixo.**

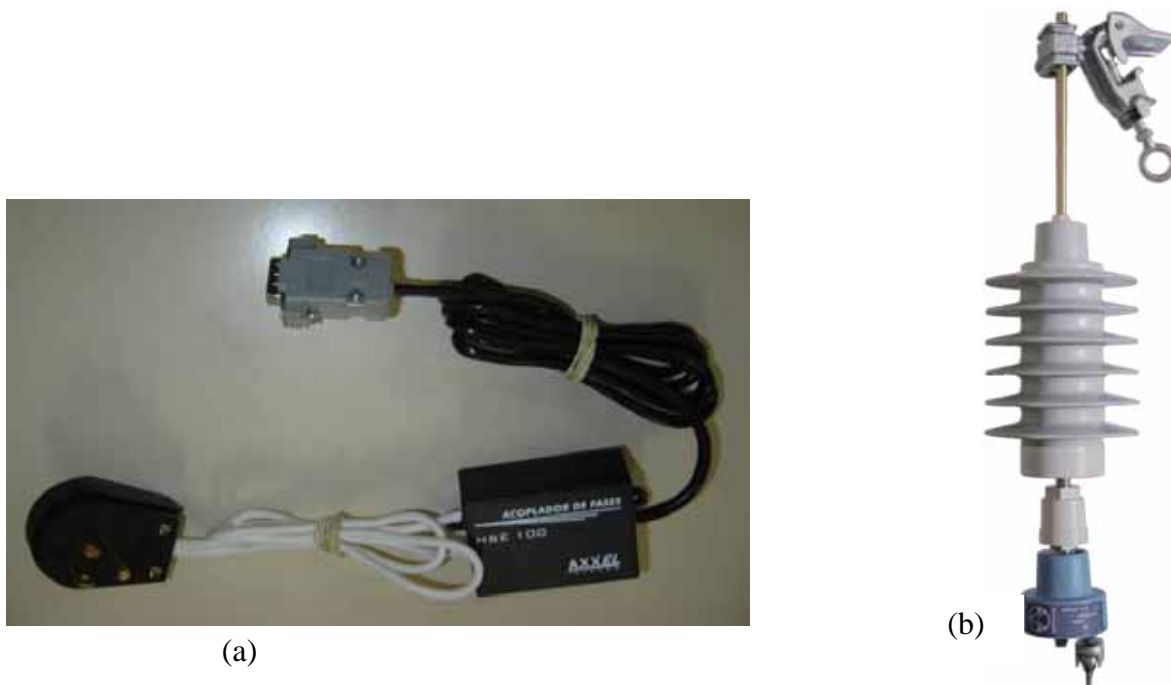


Na Figura 3 -16 é visto um equipamento PLC por dentro. Este equipamento pode funcionar tanto como *Master* ou Repetidor de baixa tensão. O equipamento PLC possui uma fonte ATX para alimentação, um controlador, o qual tem a função de reiniciar a maquina caso algum sensor detecte problemas como temperatura elevada, travamento do sistema, falha na conexão e etc. Alem disso, possui uma placa mãe, onde estão uma placa de rede Ethernet e dois barramentos PCI. Perceba que não há a saída do barramento central como no nó de média tensão. Nos barramentos PCI são colocados as Placas HE e CPE. O sinal de dados proveniente da rede elétrica é recebido pela placa CPE, essa converte para Ethernet. O sinal Ethernet é novamente convertido para sinal PLC, pela placa HE. A diferença é que as placas HE e CPE trabalham em *links* diferentes. Os equipamentos PLC trabalham como *switchs*, ou seja, realizam o roteamento dos pacotes através do endereço MAC (*Medium Access Control*) [22].



**Figura 3-16: Equipamento PLC.**

Para injetar e receber sinal da rede elétrica esses equipamentos precisam de acopladores, os quais devem permitir a passagem do sinal PLC e proteger o equipamento do sinal de potência da rede elétrica. Esses dispositivos funcionam como um filtro passa-alta, em que sinais a partir de 1MHz devem passar. Devem ser ligados às placas HE e CPE. Na Figura 3 -17 podem ser vistos acopladores PLC de baixa (a) e média tensão (b). Para se conectar as Placas HE e CPE, os acopladores de baixa tensão utilizam conectores DB9, enquanto os de média tensão conectores BNC [22].

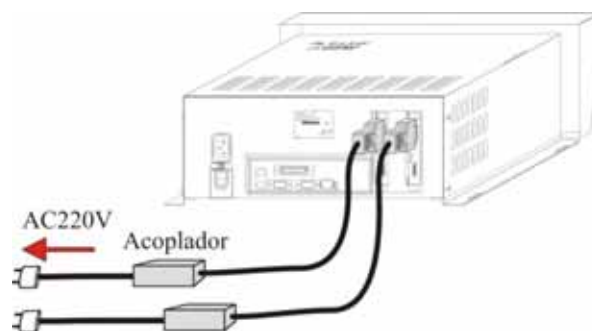


(a)

(b)

**Figura 3-17: Acopladores de Baixa (a) e Média Tensão (b).**

O sinal deve ser injetado na fase e no neutro. Quando a rede elétrica é de 110 volts, também é usado, visto que todos os equipamentos PLCs são bi-volt, a injeção do sinal em duas fases, ao invés de uma fase e um neutro. Para recepção é preciso ser feita uma tomada exclusiva para PLC. Na Figura 3 -18 pode ser visto a ligação dos acopladores no repetidor. Os acopladores são ligados à saída DB-9 da placa de transmissão e de recepção ou placas HE e CPE.



**Figura 3-18: Ligação dos Acopladores no Repetidor.**

Ao fim desses equipamentos, finalmente no interior de uma residência ou escritório, é preciso um equipamento para extrair o sinal da tomada elétrica. Esse é o modem PLC, visto na

Figura 3 -19. Ele possui saída RJ-11, para telefone, saída USB e Ethernet para a CPU, além da entrada de alimentação por onde recebe também o sinal PLC. Vale lembrar que esse equipamento trabalha somente no *link 2* [22].



**Figura 3-19: Modem PLC**

O Modem PLC pode ser ligado diretamente na tomada elétrica residencial para extrair tanto a alimentação como o sinal Internet. Entretanto, equipamentos como CPU e estabilizador enviam muitos harmônicos com frequência na faixa de MHz na rede. Com isso, a relação sinal ruído da rede elétrica diminui, aumentando a probabilidade de erro e diminuindo a banda de transmissão. Para solucionar esse problema é utilizado um filtro de ruído, visto na Figura 3 -20. As tomadas pretas possuem um filtro passa baixa, com frequência de corte na faixa de 1MHz. Assim, são bloqueados os ruídos enviados pela CPU e/ou estabilizador [22].



**Figura 3-20: Filtro de Ruído**

A tomada branca, do filtro de ruído, não possui filtro passa baixa, logo é destinada para o modem PLC.

## **1.9 Discussão sobre uma Rede PLC**

Com o objetivo de mostrar uma rede PLC em funcionamento mais a fundo, para se ter o conhecimento mais completo da tecnologia, é exemplificado nessa seção a rede PLC implantada na Escola Professor Leal de Barros. Essa rede foi construída através de um projeto de pesquisa e desenvolvimento entre a Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, e a Companhia Energética de Pernambuco, Celpe. Nesse projeto foram instaladas duas redes PLCs, uma em um laboratório no campus universitário, a segunda, mais complexa, em uma escola pública. Será descrita, apenas, a rede implantada na escola, que já é suficiente para se ter uma boa visão da tecnologia.

### **Descrição do Cenário**

A escola Prof. Leal de Barros é localizada no bairro do Engenho do Meio, possui cerca de 300m<sup>2</sup> de área construída e não construída. Na Figura 3-21 pode ser vista um mapa da Escola onde é disponibilizada Internet via rede elétrica. O transformador, local em que ficará o *Master*, está a 70 metros do medidor de energia da escola. Do medidor até a sala de Informática, local onde esta o maior número de PCs, há uma distância de aproximadamente 100 metros. Além disso, existem varias derivações, para alimentação de toda escola. A Escola possui alimentação trifásica e toda a rede elétrica no interior da escola é subterrânea.

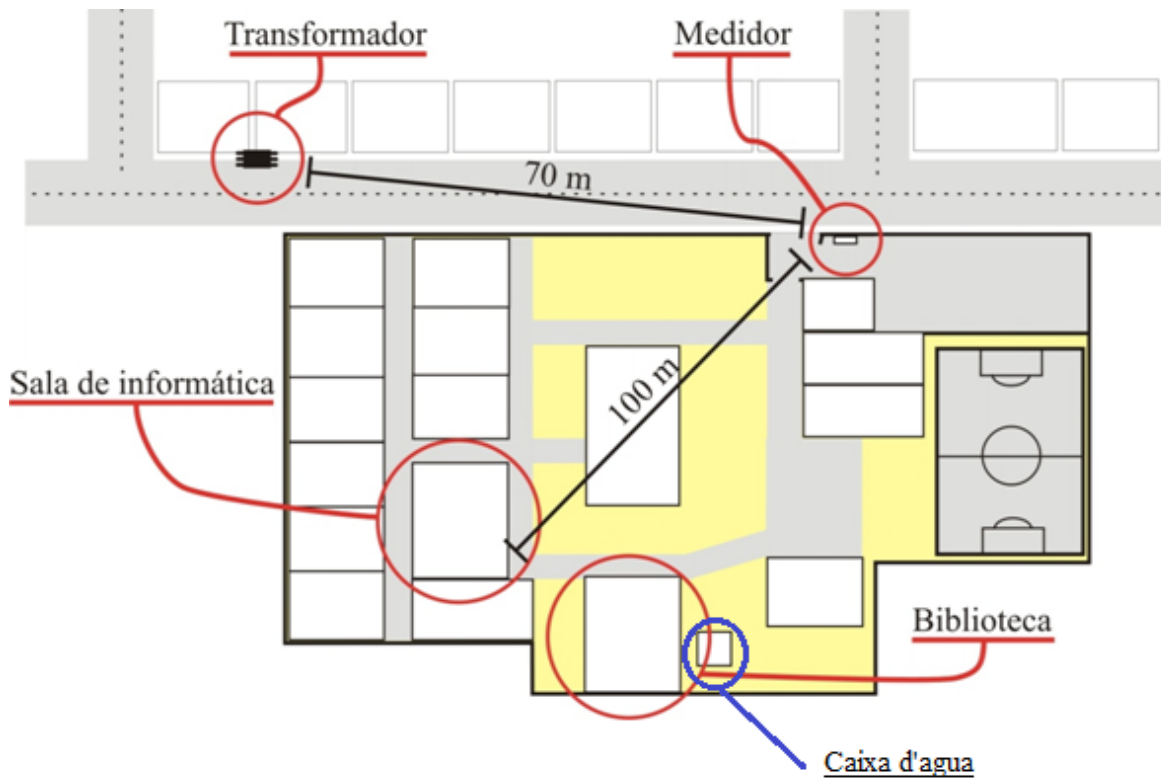
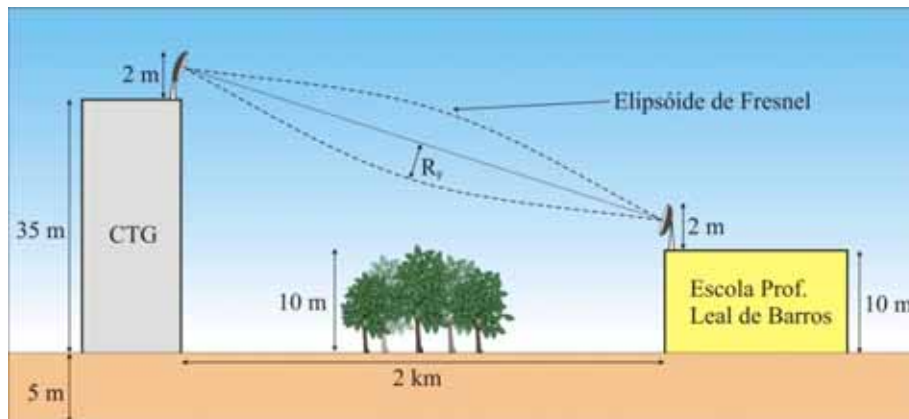


Figura 3-21: Esquemático da Escola Prof. Leal de Barros.

### Implantação do *backbone*:

Para levar o ponto de rede até o *Master*, que deve ser instalado próximo ao transformador, foi montado um enlace de rádio. Esse é composto de duas antenas parabólicas. A primeira situada no topo do prédio do Centro de Tecnologia e Geociências, CTG-UFPE, a qual irradia na frequência de 2,4GHz, com visada direta para a segunda antena, situada no topo da caixa d'água da escola.

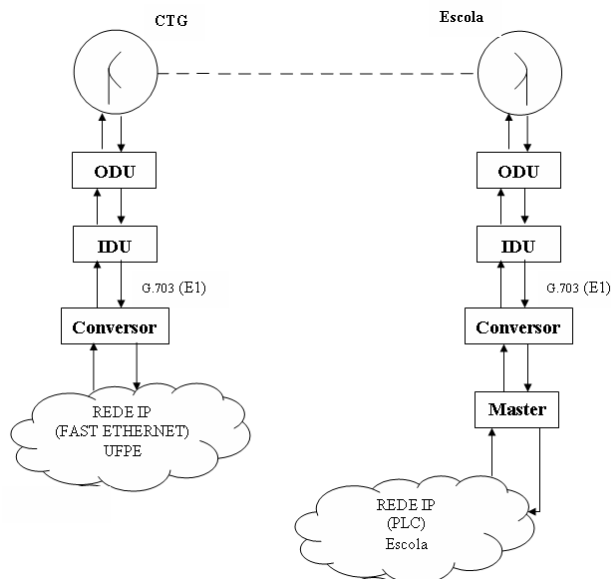
O ponto de rede, o qual é levado através desse enlace de rádio, é proveniente do laboratório de microondas do Departamento de Eletrônica e Sistemas, DES, situado no quarto andar do CTG. Na Figura 3 -22 é visualizado o enlace de rádio que leva o sinal de Internet até a rede PLC a ser instalada na escola Prof. Leal de Barros.



**Figura 3-22: Enlace de Rádio para backbone.**

O sinal Ethernet chega a um conversor de mídia, o qual transforma o sinal de Ethernet para G.703. Desse ponto passa para IDU, *Indoor Device Unit*, o qual envia o sinal numa Frequência Intermediária, F.I, 100MHz, até a ODU, *Outdoor Device Unit*, esse recebe o sinal na F.I., e envia para a antena na frequência de 2,4GHz. Na escola, há um esquema idêntico como mostrado na Figura 3 -23[23].

O sinal quando chega à escola é convertido para sinal Ethernet, sendo levado via cabo UTP, *Unshielded Twisted Pair*, para o *Master*, situado próximo ao transformador. A partir desse ponto é iniciada a rede PLC.



**Figura 3-23: Enlace de Rádio entre UFPE e Escola.**

### 1.9.1 Técnica de Alocação de Links

Quando é injetado sinal na faixa de 1MHz até 30MHz em uma rede elétrica, essa se comportará como uma antena linear [11], parte do sinal será irradiada e parte conduzida [24]. A princípio isso é um grave problema para a tecnologia, pois interfere em outras aplicações, como rádio amador [19].

Por outro lado, é possível usar essa característica em benefício da tecnologia: Considerando um sistema trifásico, caso injeta-se sinal na faixa de 1MHz até 30MHz em uma das fases, essa se comportará como uma antena linear e irradiará parte da potência injetada nela [11]. As outras duas fases podem ser consideradas antenas receptoras, sendo assim a potência irradiada será conduzida por elas. Dessa forma, pode-se usar esse fato para fornecer Internet através da rede elétrica na escola.

Vale ressaltar que se injetar sinal, na banda de frequência PLC, nas três fases juntas, é provável que o sinal irradiado em cada uma delas interfira nas outras. Logo, não haveria o funcionamento adequado do sistema. Assim, o mais recomendado é injetar sinal de dados em uma única fase da rede elétrica.

Adotando isso, resta saber qual a melhor fase de injeção dos dados e quais *links* devem ser usados em cada trecho.

No trecho interno a escola, entre o medidor de energia elétrica e a sala de informática e biblioteca, optou-se por um *link* de baixa frequência. Isso se deve ao fato desse trecho ser bastante extenso e antigo, o que poderia provocar grande atenuação ao sinal. Utilizando uma frequência menor para a portadora, reduz-se a atenuação.

O *link 2* é utilizado para o trecho externo da escola, entre o transformador e o medidor de energia elétrica-

No trecho da rua e no trecho interno não há a necessidade de que o sinal se apresente em boas condições em todas as fases. Dessa forma, basta encontrar um único ponto de injeção e recepção do sinal. Assim, o procedimento para implantação da tecnologia obedece a seguinte regra: ***o sinal é injetado em uma fase por vez e avalia-se a potência em cada uma das três fases, ao fim de cada trecho. Anotam-se os valores transmitidos e induzidos, e com esses dados são feitas tabelas. Na coluna estão as fases de injeção e na linha as fases de recepção, apresentados nas tabelas 3.3 e 3.4. O ponto da tabela de maior potência, em dBm, indicará o ponto ótimo de injeção e recepção de cada trecho.***

No trecho entre o *Master\_Trafo* e Repetidor\_Medidor foi construída a Tabela 3 -5, na primeira coluna estão as fases de injeção e na linha acima, as fases de recepção. Quando injetado e

recebido na fase B, o sinal chega com maior potência ao seu destino, o valor médio de chegada é de -10,5dBm, veja na Tabela 3 -5:

**Tabela 3-5: Testes no Trecho *Outdoor*.**

	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
Fase A	-18,5 dBm	-14,0 dBm	-23,5 dBm
Fase B	-27,5 dBm	<b>-10,5 dBm</b>	-17,5 dBm
Fase C	-19,5 dBm	-16,5 dBm	-19,5 dBm

Utilizando um analisador de espectro portátil, modelo PLC *Spectrum Analyser*, fabricado pela Promax, anotou-se o maior e menor valor da potência do sinal de chegada, tirou-se a média e foi realizada a comparação. Na rua, trecho *outdoor*, o melhor foi injetar e receber o sinal PLC na fase B, pois possui maior potência.

O mesmo procedimento foi feito no interior da escola. Na Tabela 3 -6 é mostrado o resultado dos testes no interior da escola:

**Tabela 3-6: Testes no Trecho *Indoor*.**

	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
Fase A	-35,5 dBm	<b>-22,5 dBm</b>	-36 dBm
Fase B	-27 dBm	-26,5 dBm	-23 dBm
Fase C	-25 dBm	-35 dBm	-34,5 dBm

Nesse trecho, foi obtido um resultado interessante. O melhor ponto de injeção foi a fase A. Entretanto, a fase onde o sinal chegou com maior potência foi a fase B. Através da Tabela 3 -6, quando o sinal é injetado na fase A e recebido na fase C, ele chega ao seu destino com potência de 22,5 dBm. Nessa situação, o sinal induzido da fase A na fase B é mais forte do que o que se propaga na fase A. Com isso, é possível concluir que a fase A provoca grande atenuação ao sinal.

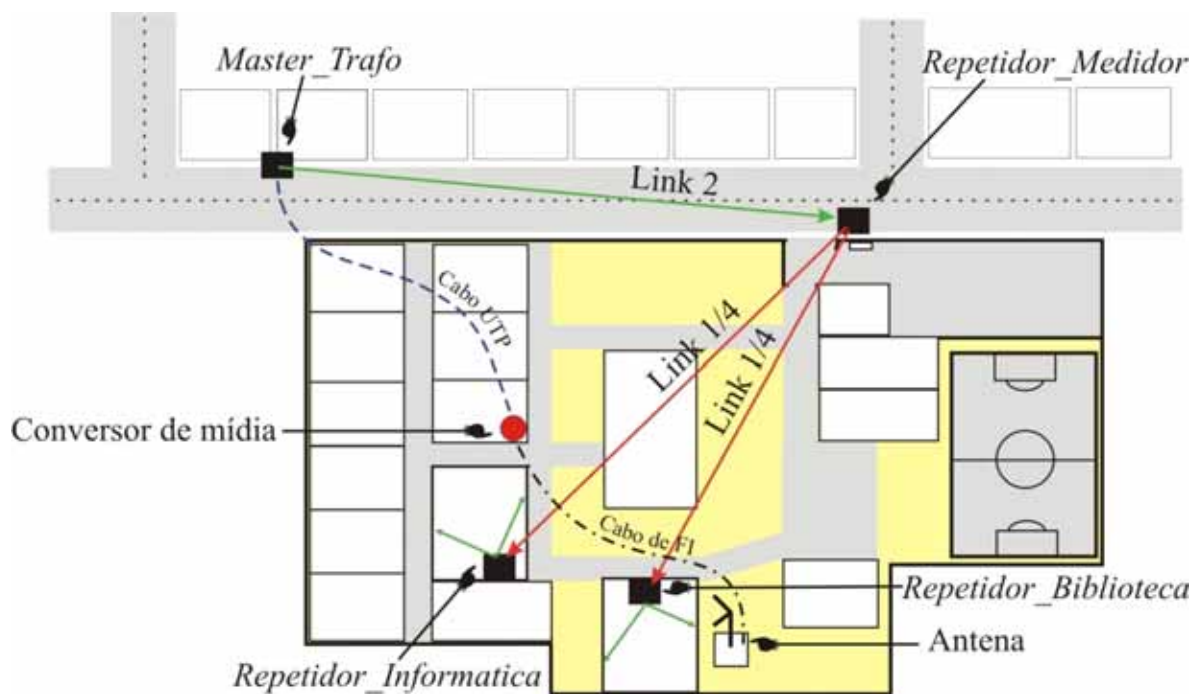
Na sala de informática, a injeção foi feita na fase C, isso porque essa fase foi a que possuiu o melhor comportamento quando a injeção era feita nas três fases. Na Figura 3 -24, é mostrado o quadro de energia da sala de informática da escola. A recepção do sinal PLC é feito na fase B e injetado novamente na fase C.





**Figura 3-24: Quadro de Energia da sala de Informática Escola Prof. Leal de Barros.**

Na Figura 3 -25 é visto a topologia final:



**Figura 3-25: Topologia Final.**

Na topologia final, existe um tronco de baixa frequência que distribui Internet por toda escola. Dois repetidores, Repetidor Informática e Repetidor Biblioteca trabalham como conversores, transforma o sinal modo 4 para sinal modo 2, de forma que possa ser feita a comunicação com os CPEs ou modems PLCs.

Um teste final foi realizado na sala de informática. Através do site <http://www.rjnet.com.br/1velocimetro.php> foi avaliada a banda das fases. Na Figura 3 -26 são mostradas as velocidades de cada fase da sala de Informática, quando foi injetado o sinal na fase C:



(a)



(b)



(c)

**Figura 3-26: Velocidade de *downlink* na Sala de Informática.**

Na item (a) da Figura 3 -26 é mostrado a velocidade na fase A, em (b) a velocidade na fase B e em (c), a velocidade na fase C. Na Tabela 3 -7 é mostrado de as taxas de cada fase em kbps:

**Tabela 3-7: Taxa de Transmissão em cada fase na Sala de Informática**

<b>Taxa de Transmissão(kbps)</b>	
<b>Fase A (Fase de Indução)</b>	759,89
<b>Fase B (Fase de Indução)</b>	668,49
<b>Fase C (Fase de Injeção)</b>	1655,86

Como esperado, a velocidade na fase C é maior, pois o sinal PLC é injetado diretamente nela.

Nesse capítulo foi apresentada a tecnologia PLC. No capítulo seguinte será mostrado o modelo clássico do canal PLC e também a contribuição do autor para encontrar os parâmetros desse modelo.

## Capítulo 4

### Modelagem do Canal PLC

Tendo conhecimento da tecnologia, será iniciada nesse capítulo uma descrição do comportamento do canal PLC no domínio da frequência. Conceitos básicos de linhas de transmissão serão descritos, como também as razões para se utilizar esse modelo aliado ao modelo de multipercursos no canal PLC. Os parâmetros de redes também serão descritos, tais como parâmetros de impedância, espalhamento e a relação entre eles. Serão mostradas duas expressões para a função transferência, a primeira usada no modelo teórico e a segunda para explicitar a característica na frequência da rede avaliada. Finalmente, será feita uma analogia da rede elétrica no tráfego em banda larga com a teoria clássica do interferômetro.

#### 1.10 Modelagem do Canal

De maneira geral, linhas de transmissão diferem de redes elétricas ordinárias por uma característica simples: circuitos elétricos elementares são muito menores que o comprimento de onda, isso não ocorre em linhas de transmissão. Dessa forma, no decorrer da linha o sinal ou onda eletromagnética assume valores de amplitudes diferentes [25]. Vale salientar também que a teoria de linhas de transmissão é usada quando o comprimento da linha é próxima a  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda do sinal [26].

PLC funciona na faixa de frequência de 1MHz até 30MHz, no caso da linha *Mitsubishi* até 38MHz, tendo comprimentos de onda variando de 10m até 300m. O comprimento do cabo e da linha de distribuição varia de poucos metros até alguns quilômetros. Logo, o comprimento da linha e do cabo tornam-se consideráveis em relação ao comprimento de onda do sinal. Dessa maneira, deve-se admitir o modelo de parâmetros distribuídos para descrever o canal PLC [24]. Quando a rede elétrica é usada para transmitir informação em banda larga, ela pode ser tratada como uma linha de transmissão, na qual o modo guiado é o transversal eletromagnético (TEM) [27].

Uma linha de transmissão com comprimento diferencial  $\Delta z$  da linha, conforme a Figura 4-27, é descrita pelos seguintes parâmetros:  $R$  – resistência por unidade de comprimento em

Ohm/m,  $L$  – auto-indutância por unidade de comprimento em  $H/m$ ,  $G$  – condutância por unidade de comprimento em  $S/m$ ,  $C$  – capacitância por unidade de comprimento em  $F/m$ ,  $R$  e  $L$  são elementos em serie e  $G$  e  $C$  são elementos em paralelo [25].

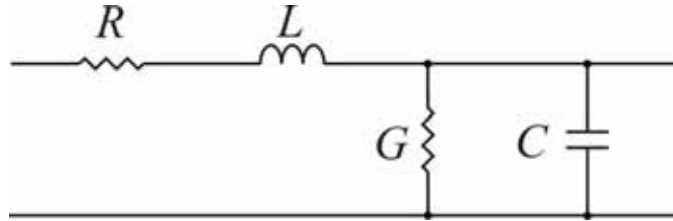


Figura 4-27: Elemento infinitesimal de uma linha de transmissão

Baseado nesse elemento infinitesimal da linha de transmissão, é possível, fazendo lei dos nós e das malhas, encontrar a constante de propagação e a impedância característica da linha de transmissão [25]:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (4.1.0)$$

Onde  $\gamma$  - constante de propagação,  $\alpha$  - constante de atenuação,  $\beta$  - constante de fase,  $\omega$  - frequência angular do sinal.  $Z_0$  - Impedância Característica [25]:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (4.1.2)$$

Pode-se assumir, para uma rede PLC, que  $R \ll \omega L$  e  $G \ll \omega C$ , nas frequências de interesse [12], assim:

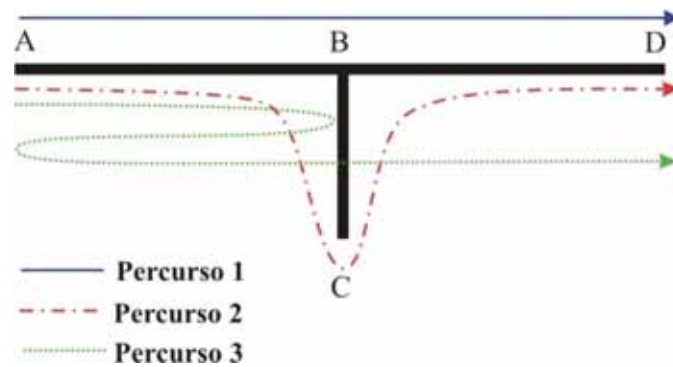
$$\alpha = \frac{1}{2} \left( R \sqrt{\frac{C}{L}} + G \sqrt{\frac{L}{C}} \right) \quad (4.1.3)$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC} \quad (4.1.4)$$

Como qualquer outro canal de comunicação, a rede elétrica introduz atenuação e atraso de fase ao sinal que trafega por ela. Outra característica importante é que a tecnologia PLC foi concebida sobre um meio físico inicialmente desenvolvido apenas para distribuição de energia. Assim, vários tipos de máquinas e aparelhos são ligados a tal meio, em diferentes topologias,

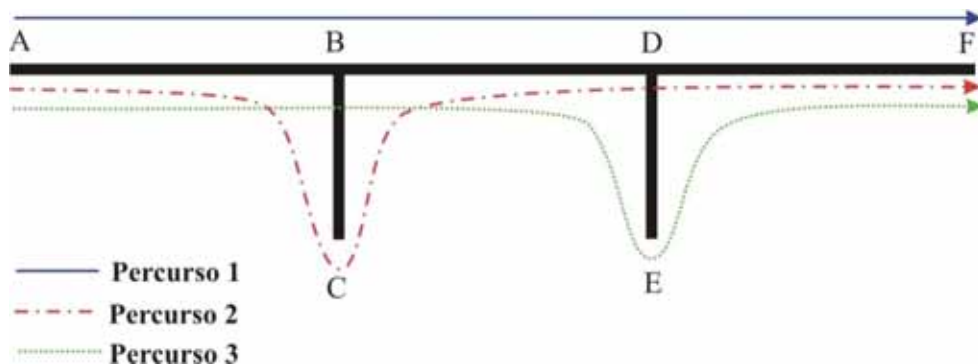
possuindo, assim, em cada seção do caminho de propagação características próprias. Essas condições geram uma contínua variação de impedância na rede, provocando descasamentos, reflexões e ondas estacionárias. Dessa forma, a rede pode ser dividida em multipercursos, ou melhor, varias redes de duas portas. Além disso, como há várias reflexões, o canal PLC pode ser descrito como uma rede de parâmetros distribuídos ao longo de sua extensão [11].

A propagação do sinal pode ser analisada a partir de uma simples rede mostrada na Figura 4 -28 e na Figura 4 -29. As setas indicam o fluxo do sinal.



**Figura 4-28: Topologia com uma derivação simples.**

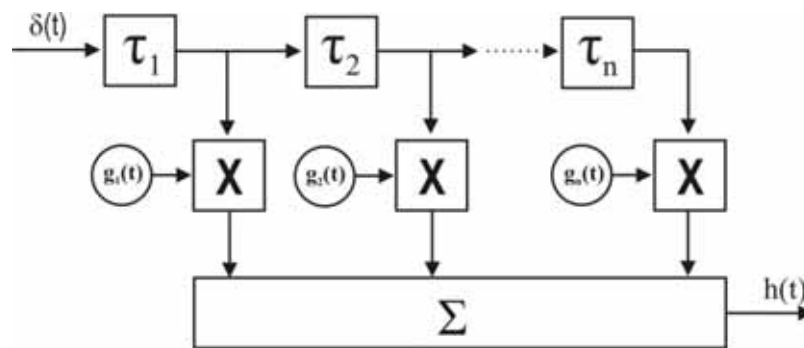
Com uma derivação, destacam-se três caminhos principais, mostrados na Figura 4 -28, Percurso 1, Percurso 2 e Percurso 3. O terceiro percurso sofre duas reflexões, nos pontos B e A, logo a potencia vai ser reduzida. Esse caminho pode ser descartado. Assim, com um única derivação, temos dois percursos possíveis. Na Figura 4 -29, é mostrado uma rede com duas derivações, são destacados também os principais percursos possíveis:



**Figura 4-29: Topologia com duas derivações**

Com a topologia com duas derivações, Figura 4 -29, foram destacadas apenas os caminhos realmente pertinentes, ao contrario daqueles mostrados na Figura 4 -28, perceba que o percurso possui uma reflexão no máximo. Cada percurso considerado, na Figura 4 -28 e Figura 4 -29, proporcionam ao sinal um incremento de fase ou atraso e atenuações diferentes. No ponto final dessa rede, existem sinais com fases e potências diferentes.

Devido a essa característica é possível aplicar o modelo de ecos (multipercurso) ao canal, considerando que o sinal que se propaga por cada percurso possui um atraso  $\tau$ , e um peso associado a ele, que representa a potência do sinal. Na Figura 4 -30, é mostrada a estrutura básica do modelo de ecos (multipercursos) [5]:



**Figura 4-30: Estrutura básica do modelo de Ecos.**

Na Figura 4 -30, o sinal será dividido. Cada parcela sofrerá um atraso de fase,  $\tau_i$ . Os pesos são relativos à atenuação imposta ao sinal pelos diferentes comprimentos de percursos e reflexões e transmissões que cada caminho imposto ao sinal. Eles representam a potência que o sinal chegará ao seu destino final. No fim, esses sinais serão somados [12].

O comportamento do sinal levando em conta os N ecos ou percursos é descrito pela resposta na forma da função impulso [5]:

$$h(t) = \sum_{i=0}^N g_i \cdot \delta(t - \tau_i) \quad (4.1.5)$$

Onde  $\tau_i$  são os atrasos de cada eco ou percurso e os fatores  $g_i$  são os pesos. Os coeficientes  $g_i$  dependem do comprimento do cabo e da frequência do sinal. Esse peso pode ser representado da seguinte forma [12]:



$$g_i(f, l_i) = a_i \cdot e^{-\alpha(f) \cdot l_i} \quad (4.1.6)$$

Onde:  $l_i$  - comprimento do percurso,  $a_i$  - produto dos coeficientes de transmissão e reflexão ao longo do caminho.

Fazendo a transformada de Fourier da resposta impulsiva do canal, encontra-se a resposta em frequência do canal PLC [12]:

$$H_{PLC}(f) = \sum_{i=0}^N a_i \cdot e^{-\alpha(f) \cdot l_i} \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \tau_i} \quad (4.1.7)$$

O termo  $\tau_i$  pode ser representado em função da velocidade de propagação no canal [12].

$$v_p = \frac{l_i}{\tau_i} \Rightarrow \tau_i = \frac{l_i}{v_p} \quad (4.1.8)$$

Assim, a expressão final é:

$$H_{PLC}(f) = \sum_{i=0}^N a_i \cdot e^{-\alpha(f) \cdot l_i} \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{l_i}{v_p}} \quad (4.1.9)$$

A resposta em frequência do canal PLC depende da topologia na qual rede esta disposta, pois isso gera percursos diferentes em que o sinal será dividido. Assim, tanto o comprimento como disposição da rede, número de derivações, são importantes. Outra variável importante é a constante de atenuação. Outro fato que pode ser considerado é que o termo  $a_i$ , que é um produto dos coeficientes de reflexão e transmissão, acrescenta fases ao sinal. Embora o fato de acrescentar fase ao sinal possa ser desconsiderado, segundo alguns autores [5]. Além disso, como os percursos possuem diferentes caminhos, também serão introduzidas contribuições de fase.

Logo, o sinal é dividido em  $n$  percursos, os quais geram  $n$  diferentes atenuações e  $n$  diferentes fases ao sinal. Ao fim, se terá  $n$  sinais, com  $n$  fases e  $n$  potências diferentes, somando-se.

## 1.11 Parâmetros de Espalhamento

Esses parâmetros proporcionam uma completa descrição de uma rede com N portas. A matriz formada por tais parâmetros relaciona as tensões incidentes e refletidas em cada porta do dispositivo. Para alguns dispositivos e circuitos, os parâmetros  $S$  podem ser obtidos utilizando técnicas de análise de circuitos. Também podem ser obtidos utilizando um analisador de redes vetorial [28].

Considere uma rede de duas portas na Figura 4-31, onde  $V_1^+$  representa a onda de tensão incidente na porta 1,  $V_1^-$  representa onda refletida na porta 1,  $V_2^+$  representa onda de tensão incidente na porta 2 e  $V_2^-$  representa a onda de tensão refletida na porta 2.

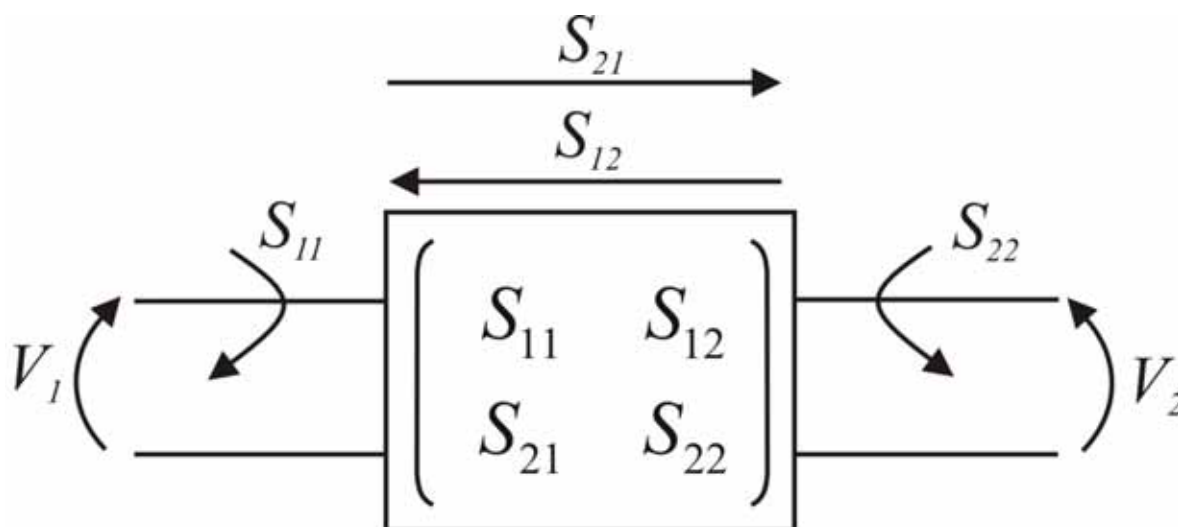


Figura 4-31: Representação de quadripolo por parâmetros S.

A seguir estão as equações que representam o quadripolo da figura anterior:

$$\begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} \quad (4.2.1)$$

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0} \quad (4.2.2)$$

para  $k \neq j$

Os parâmetros  $S$  representam os coeficientes de reflexão e transmissão quando cassasse uma das portas. Ou melhor, o  $S_{11}$  é o coeficiente de reflexão da porta 1, quando a porta 2 está casada. Enquanto que o  $S_{21}$  é o coeficiente de transmissão da porta 2, para a porta 1 casada. Ocorre o mesmo, para os parâmetros de espalhamento  $S_{22}$  e  $S_{12}$  [29].

## 1.12 Parâmetros ABCD

Os parâmetros  $S$  podem ser usados para caracterizar uma rede com um numero arbitrário de portas. Na prática, contudo, muitas redes consistem de conexões em cascata de redes de duas portas. Esse é o caso da rede elétrica quando usada na transmissão de dados em banda larga. Assim, é conveniente definir uma matriz de transmissão 2 x 2, ou matriz ABCD, para cada rede de duas portas [28].

É possível encontrar a matriz ABCD resultante, pela multiplicação de cada parte da rede.

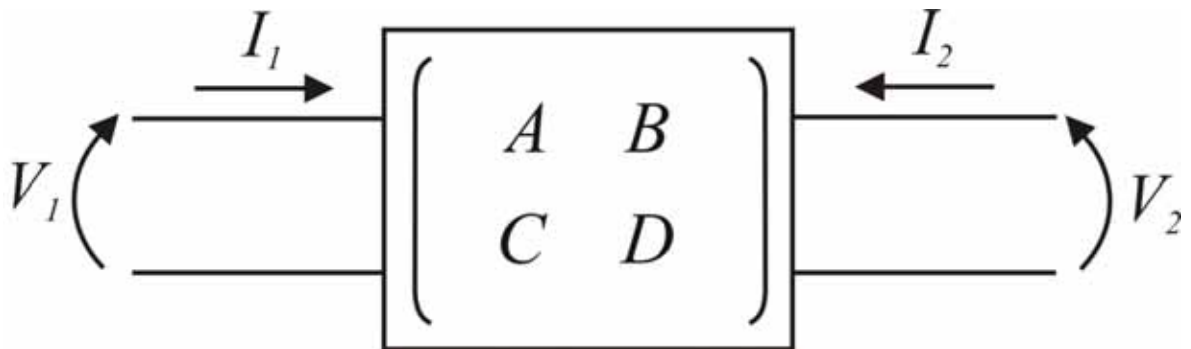


Figura 4-32: Representação de um quadripolo pelos parâmetros ABCD.

A equação 4.3.1 representa a rede de duas portas da Figura 4 -32.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.3.1)$$

Alguns artigos usam esses parâmetros para modelar o canal PLC. São calculados Resistência, Indutância, Condutância e Capacitância da rede, usando equações clássicas de linhas de transmissão [25] para o modo TEM [30]. A rede é dividida em trechos e calculada a matriz ABCD de cada trecho, por fim é feito o produto dessas matrizes e expressa a resposta em frequência do canal em função dos parâmetros finais [30]. Caso os cabos estejam em condições ideais, sem oxidação, e deterioração, esse método é eficaz. Contudo, se a rede elétrica estiver sujeita as condições de intempéries, as características elétricas serão alteradas e esses cálculos não poderão mais corresponder à realidade. Nessa situação é mais aconselhável extrair os parâmetros da expressão (4.1.0), a partir de medidas reais da respostas em frequência da rede. No trabalho descrito foi usado o ultimo método, pois a maior parte da fiação elétrica utilizada nas implementações é antiga e subterrânea, sujeita a lama e outras condições adversas.

Vale ressaltar que é possível explicitar a função transferência da rede através dos parâmetros ABCD. Dessa maneira, é mais conveniente o uso desses para obter a resposta em frequência característica da rede PLC.

### **1.13 Relação entre os Parâmetros S e os Parâmetros ABCD**

Em muitas situações, é útil fazer a conversão de um tipo de parâmetros. O analisador de redes, modelo *ENA Series RF Network Analyzers, Agilent E5071B*, utilizado nesse trabalho, dispõe apenas os parâmetros S; no entanto é mais fácil explicitar a resposta em frequência de uma rede utilizando os parâmetros ABCD. As equações de transformação são dadas a seguir [28]:

$$A = \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad (4.4.1)$$

$$B = Z_0 \frac{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad (4.4.2)$$

$$C = \frac{1}{Z_0} \frac{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad (4.4.3)$$

$$D = \frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad (4.4.4)$$

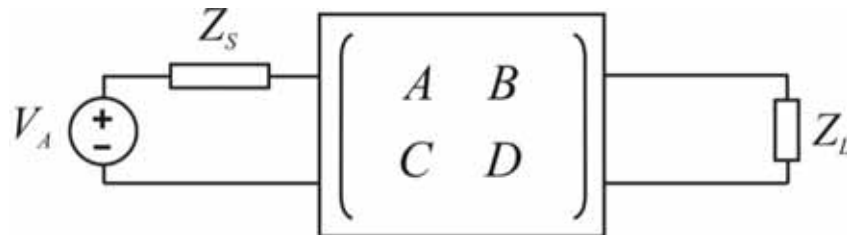
Para testes que envolvem trechos mais complexos do circuito, nos quais existem cargas ativas ou passivas ligadas à rede elétrica, o uso de matriz ABCD é o ideal. Além disso, para encontrar a função transferência da rede de duas portas é mais conveniente o uso desses parâmetros ABCD.

### 1.14 Função Transferência de uma Rede em função dos Parâmetros ABCD

A partir dos parâmetros ABCD, é possível encontrar a função transferência para qualquer rede de duas portas. A seguir será mostrado a resposta em frequência da rede em função desses parâmetros:

Considerando uma rede de duas portas, mostrada na Figura 4 -33, onde [31][32]:

$V_A$  tensão da fonte,  $Z_s$  impedância da fonte,  $Z_L$  impedância da carga.



**Figura 4-33: Rede de duas Portas Conectada pela fonte de Tensão e Carga.**

Deseja-se encontrar:

$$H(f) = \frac{V_L}{V_A} \quad (4.5.1)$$

Lembrando de (4.3.1):

$$V_1 = AV_2 + BI_2, \text{ mas } V_2 = Z_L I_2, \text{ logo:}$$

$$V_1 = AZ_L I_2 + BI_2 \Rightarrow \frac{I_2}{V_1} = \frac{1}{AZ_L + B}. \text{ Finalmente, multiplicando ambos os lados por } Z_L:$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Z_L}{AZ_L + B} \quad (4.5.2)$$

Expressando a tensão da fonte,  $V_A$ , em função da tensão de entrada no quadripolo,  $V_1$ :

$$V_A = V_1 + Z_s I_1 \Rightarrow V_1 = V_A - Z_s I_1 \quad (4.5.3)$$

Explicitando  $I_1$  em função de  $V_2$  e  $Z_L$ , a partir de (4.3.1):

$$I_1 = CV_2 + DI_2, \text{ mas } V_2 = Z_L I_2, \text{ então}$$

$$I_1 = CV_2 + D \frac{V_2}{Z_L} \quad (4.5.4)$$

Substituindo (4.5.4) em (4.5.3), e em seguida em (4.5.2). Chega-se, com algumas manipulações a [31]:

$$H(f) = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_L Z_s + DZ_s} \quad (4.5.5)$$

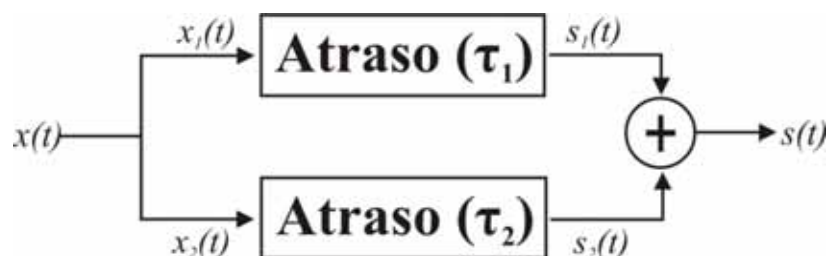
Esta é a equação que expressa o comportamento de uma rede no domínio da frequência.  $H(f)$  é a função transferência da rede em função dos parâmetros de impedância. Essa expressão será

usada para mostrar o comportamento no domínio da frequência da rede elétrica na faixa de 1MHz até 50MHz.

### 1.15 Analogia com Interferômetro e Princípio de Superposição

Pode-se fazer uma analogia do comportamento dessa rede multipercursos com um interferômetro. Em um interferômetro, um sinal é dividido em dois, percorrendo caminhos diferentes. Esses percursos geram um atraso de fase no sinal, semelhante aos atrasos descritos no canal PLC, quando somados novamente proporcionam batimentos, máximos e mínimos de Interferência [29].

Na Figura 4 -34, é mostrada o esquema lógico de um interferômetro. Um sinal  $x(t)$  é dividido em dois, mantendo a mesma frequência e fase. Em seguida, eles percorrem percursos distintos. Assim, são submetidos a atrasos diferentes, isso acarreta em diferentes acréscimos de fases aos sinais. Quando somados, novamente, esses sinais geram um padrão de interferência construtiva e destrutiva, chamado de batimento.

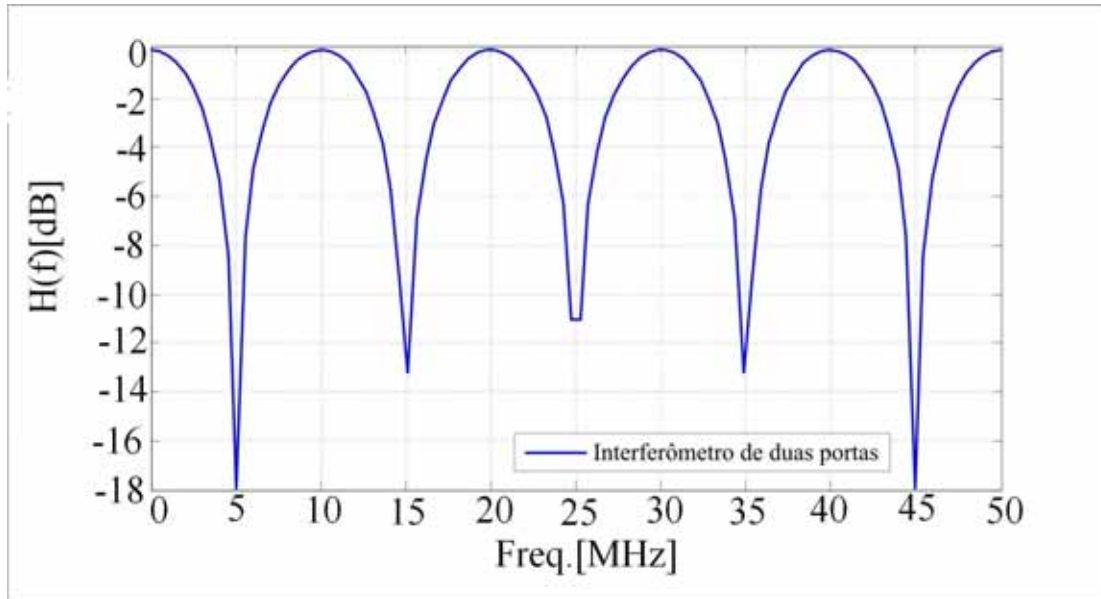


**Figura 4-34: Interferômetro com dois Percursos.**

Supondo  $x(t)$  um sinal senoidal dividido igualmente em  $x_1(t)$  e  $x_2(t)$ . Com algumas manipulações algébricas é possível chegar a seguinte expressão para  $s(t)$  [29]:

$$s(t) = \text{sen}\left(\frac{2\omega t - \omega(\tau_2 + \tau_1)}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega(\tau_2 - \tau_1)}{2}\right) \quad (4.6.1)$$

A dependência com a frequência do sinal de saída do interferômetro é mostrada na Figura 4-35, esse é chamado do batimento do interferômetro:



**Figura 4-35: Variação com a Frequência de um Interferômetro.**

Os máximos correspondem à soma dos sinais, que percorrem caminhos distintos, em fase. Nos nulos, pontos de mínimo, os sinais estão defasados em 180 graus. Logo, eles se subtraem. A partir da expressão (4.6.1) é possível determinar a posição dos máximos e mínimos, antes de plotar o gráfico.

O termo cosseno esta associada ao módulo do sinal, logo os máximos ocorrem sempre que:

$$\frac{\omega(\tau_2 - \tau_1)}{2} = n\pi \therefore f = \left| \frac{n}{\tau_2 - \tau_1} \right| \quad (4.6.2)$$

E os mínimos:

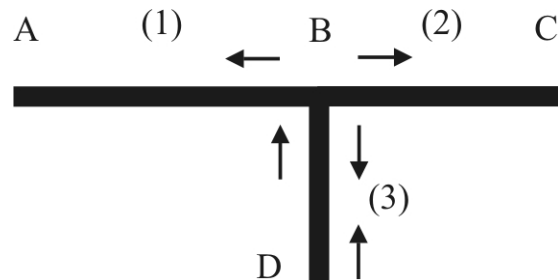
$$\frac{\omega(\tau_2 - \tau_1)}{2} = (n - 1/2)\pi \therefore f = \left| \frac{n - 1/2}{\tau_2 - \tau_1} \right| \quad (4.6.3)$$

A partir da diferença entre os dois atrasos, é encontrada a diferença de frequência entre máximos ou mínimos, ou com a resposta em frequência obtêm-se a diferença de atraso ou fase imposta aos sinais pelo interferômetro [29]:



$$\Delta f = \left| \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \right| \Rightarrow |\Delta \tau| = \frac{1}{\Delta f} \quad (4.6.4)$$

Dostert e Zimmerman caracterizaram uma rede elétrica quando submetida a sinais na faixa de PLC. No seu trabalho a topologia possui uma derivação, como mostrada na Figura 4-36 [5]:



**Figura 4-36: Rede Avaliada por Dostert e Zimmerman.**

O transmissor é localizado na posição A e envia o sinal para o ponto C. A e C são casados com impedâncias características dos cabos. O ponto D está aberto. A parte (1) possui 30 metros, a parte (2) 170 metros, enquanto que a parte (3) 12 metros. As duas primeiras partes dessa rede são cabos tipo NAYY150 com impedância característica aproximadamente de  $45 \Omega$ , a parte (3) é um cabo doméstico tipo NAYY35 com impedância característica de  $70 \Omega$  [5].

Os autores encontraram os parâmetros do modelo de Multipercurso, mostrado na Tabela 4-8 [5]:

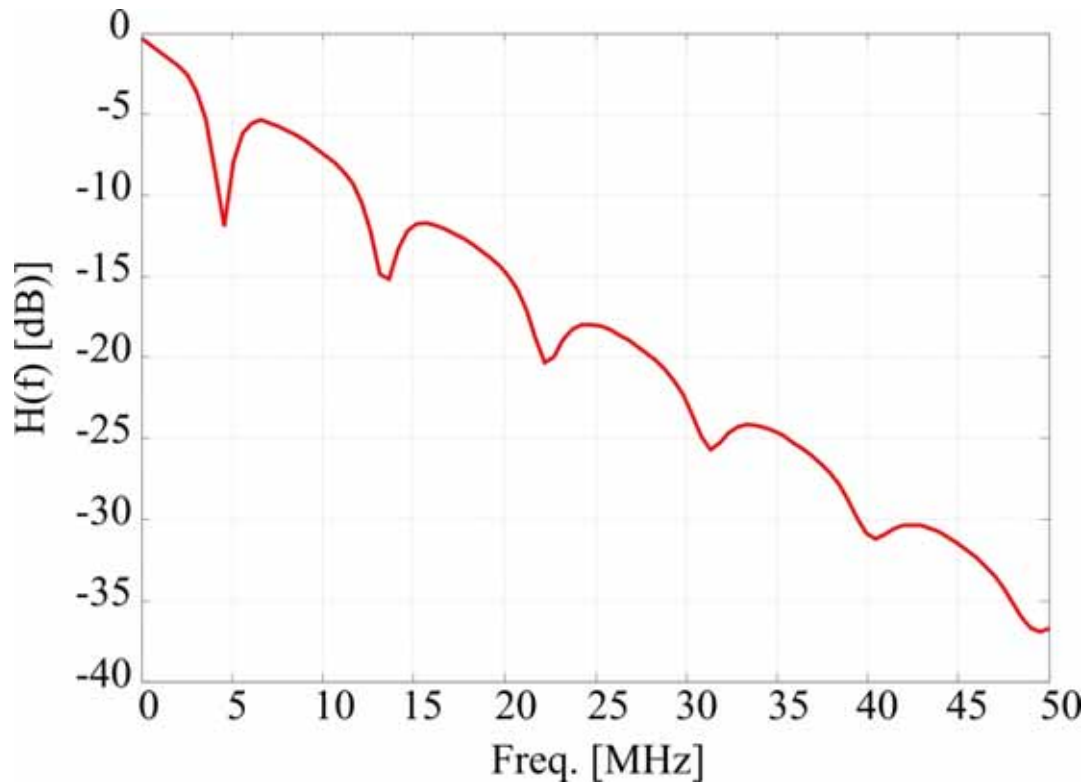
**Tabela 4-8: Parâmetros da Rede encontrados por Dostert e Zimmerman.**

Parâmetros dos caminhos		
i	g <sub>i</sub>	d/m
1	0,64	200
2	0,38	222,4
3	-0,15	244,8
4	0,05	267,5

Os autores encontraram os parâmetros de quatro caminhos distintos para uma rede PLC. A constante de atenuação é dada por [5]:

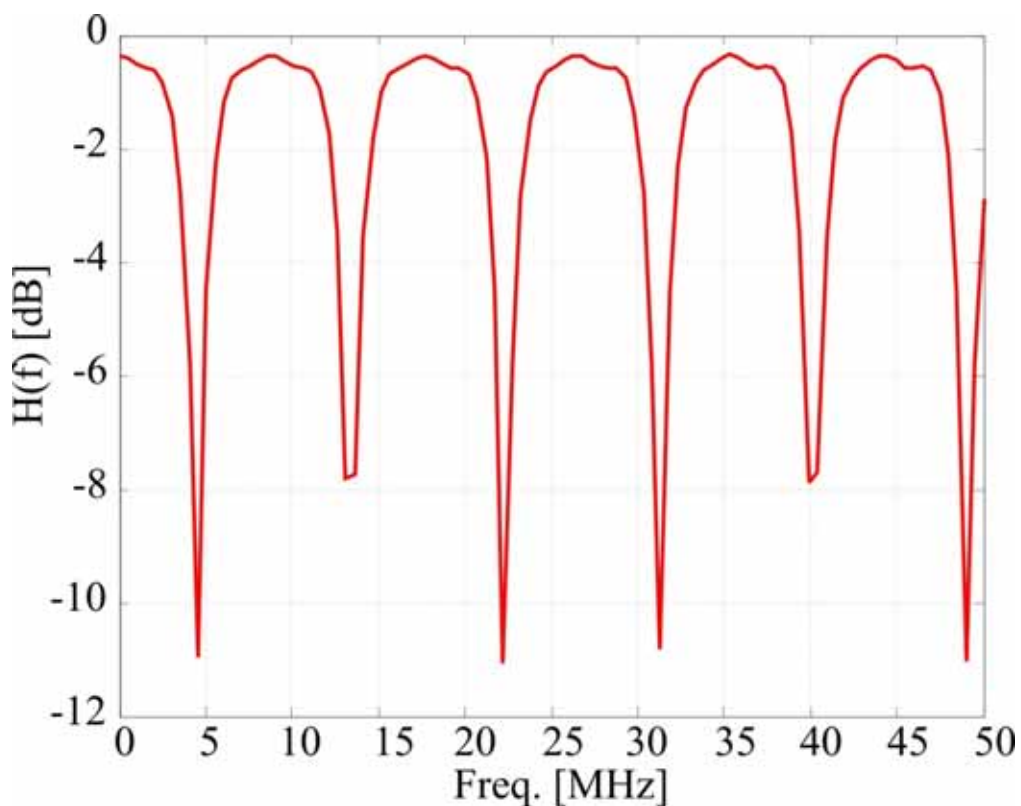
$$\alpha(f) = 7,8 \cdot 10^{-10} \cdot f \quad [\text{m}^{-1}]$$

Utilizando esses valores em (4.1.7) é encontrada a resposta em frequência do canal PLC. A partir dos parâmetros da Tabela 4.1, com a constante de propagação acima, foi plotada a função transferência da rede. Essa mostra o comportamento do canal de maneira real, sendo compatível com o resultado experimental [5], mostrado na Figura 4 -37 pode ser visto:



**Figura 4-37: Comportamento do Canal no domínio da frequência.**

Sendo desconsiderada a atenuação, ou seja,  $\alpha(f) = 0$ , o comportamento do canal é visto na Figura 4 -38:



**Figura 4-38: Comportamento do Canal no domínio da frequência com atenuação nula.**

Nota-se que a Figura 4 -38 é similar a Figura 4 -35, ambas apresentam máximos e mínimos. De forma equivalente ao interferômetro é possível afirmar que nos mínimos os sinais se somam fora de fase e nos máximos em fases. Dessa forma, é possível interpretar o canal PLC como um interferômetro.

Na Figura 4 -39 pode ser visto a comparação entre a resposta em frequência do canal, levando em conta a atenuação e a desconsiderando:

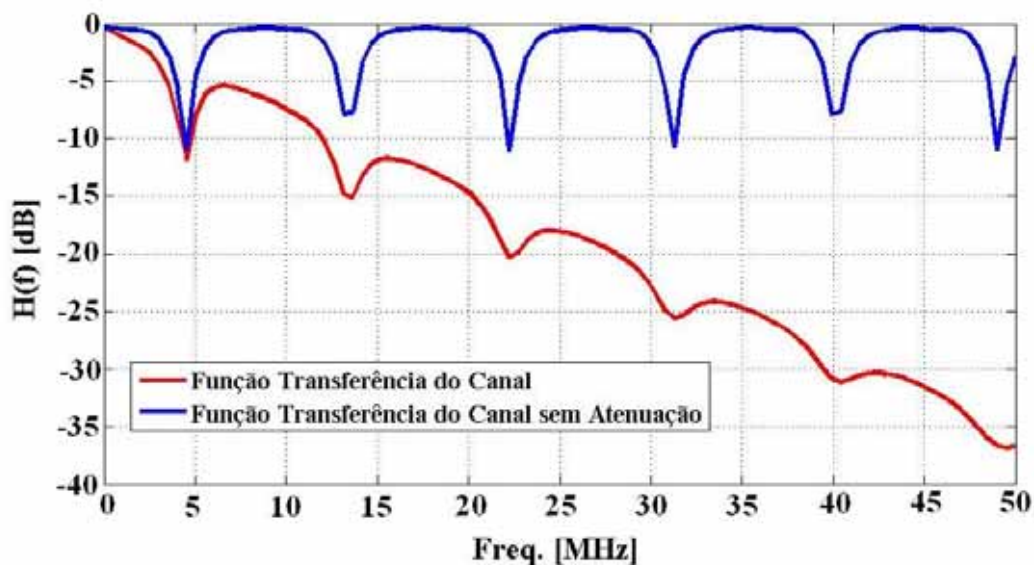


Figura 4-39: Percursos no Caminho com uma derivação.

Note, na figura acima, que os nulos estão nas mesmas frequências, a atenuação é linear em relação à frequência.

Considere o caso mais simples, mostrado na Figura 4-40. Os percursos considerados são Percurso 1: A-B-D e Percurso 2: A-B-A-B-D. Como já discutido, somente são considerados caminhos com até uma reflexão.

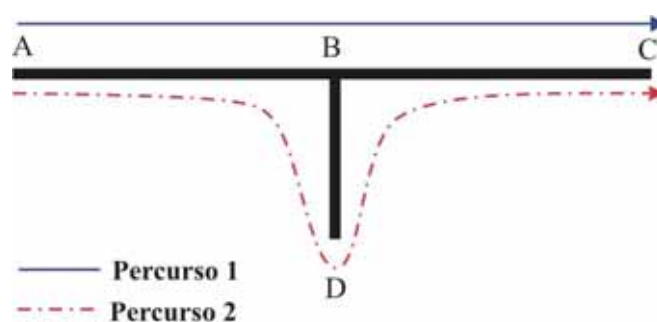


Figura 4-40: Percursos no Caminho com uma derivação.

De maneira similar ao esquema de um interferômetro, Figura 4-34, têm-se dois percursos com dois atrasos diferentes, gerando um batimento similar ao interferômetro, como mostrado na

Figura 4 -38. Entretanto, nesse caso são considerados quatro percursos distintos. Todavia, o comportamento ainda é o mesmo. Dessa maneira, a analogia é válida.

Tomando como base a topologia com apenas uma derivação, Figura 4 -40, aplica-se o modelo de multipercurso fazendo uso da analogia com o interferômetro para se obter os parâmetros necessários ao modelo.

O atraso do percurso mais curto é considerado nulo ( $\tau_0 = 0$ ), sendo considerado como o sinal de referência. Dessa forma, através da equação 4.1.7, a função transferência apresenta o seguinte formato, considerando a atenuação nula:

$$H(f) = a_0 + a_1 \cdot e^{-j2\pi f \tau_1} \quad (4.6.5)$$

O termo  $a_0$  da equação (4.6.5) tem apenas módulo, lembrando que este é o produto dos coeficientes de reflexão e transmissão, há uma fase relacionada a esse fasor. Por comodidade, essa fase é agregada aos atrasos  $\tau_0$  e  $\tau_1$ , ou seja, os incrementos de fase relativos às reflexões, transmissões e percursos percorridos são somados e expressos por  $\tau_0$  e  $\tau_1$ .

O importante não é o valor exato para os atrasos, mas a diferença de tempo entre eles, o atraso do segundo percurso pode ser encontrado utilizando (4.6.4). Caso seja admitido  $\tau_0 = 0$ , assim,  $\tau_1$ , o segundo atraso, é dado pelo inverso da diferença de frequência dos dois primeiros mínimos.

Os pesos podem ser encontrados fazendo um simples sistema de equação dois por dois. Onde, os picos representam a soma dos pesos e os nulos a subtração deles.

Com a topologia com duas derivações, mostrado na Figura 4 -41, foi adotada o seguinte procedimento para encontrar os pesos:

- Cada derivação foi retirada, em separado, de forma que a topologia com duas derivações pode ser vista como a superposição de duas topologias com uma derivação. Assim mostra a Figura 4 -41:



**Figura 4-41: Superposição das Topologias**

- Com a multiplicação das expressões teóricas de cada trecho encontra-se a expressão teórica final.

$$H(f) = (a_0 + a_1 \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_1}) \cdot (a_{20} + a_{21} \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_{21}}) \quad (4.6.6)$$

Em (4.6.6), o primeiro termo entre parênteses corresponde à função transferência para o trecho que contém a segunda derivação casada, o segundo termo é para o que contém a primeira derivação casada.

### **1.16 Testes com Cabos Coaxiais**

Com o objetivo de comprovar que o método descrito é eficaz para encontrar os pesos,  $g_i$ , foram feitos testes utilizando cabos coaxiais com uma e duas derivações. A importância de utilizar os cabos se deve ao fato de se conhecer precisamente os comprimentos e impedância característica desses condutores. Os cabos coaxiais utilizados possuem impedância característica de  $50 \Omega$ . A função transferência foi medida utilizando um Analisador de Redes Vetorial.

Foram avaliadas as topologias descritas nas figuras 4.15 a 4.19:

Topologia 1.1:



Figura 4-42: Topologia 1.1.

Topologia 1.2:

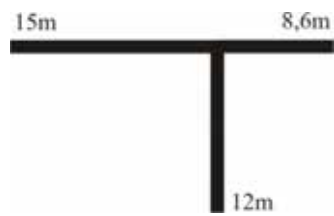


Figura 4-43: Topologia 1.2.

Topologia 2.1:

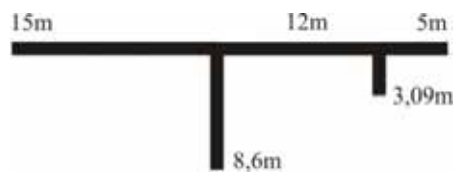


Figura 4-44: Topologia 2.1

Topologia 2.2

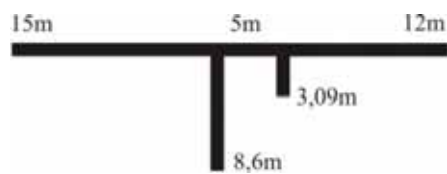


Figura 4-45: Topologia 2.2

Topologia 2.3:

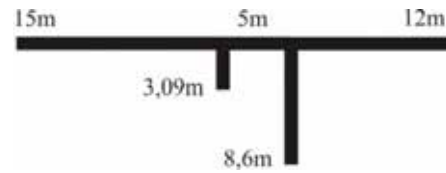
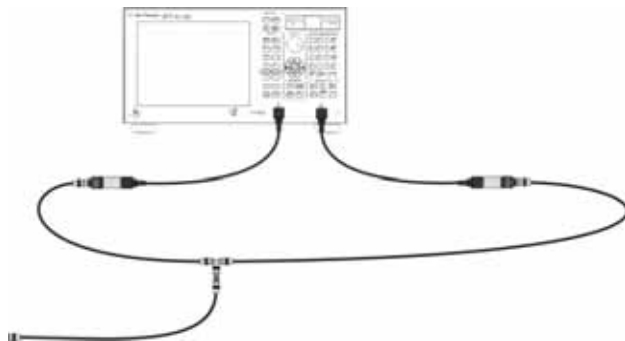


Figura 4-46: Topologia 2.3

Na Figura 4 -47, é mostrado como foi feita a medição com o Analisador de Redes Vetorial, Agilent ENA Series E5071B.



**Figura 4-47: Medição Realizada com Analisador de Redes**

Como a saída do analisador de redes é tipo N macho, foi utilizada uma linha de transmissão N fêmea seguida de um adaptador N macho para BNC. Para inserir a derivação foi introduzido um divisor de potência BNC, no qual foram ligados uma derivação e outro cabo coaxial, em serie. Esse último foi ligado, através de adaptadores, ao cabo que vai para a porta dois do Analisador de Redes.

A princípio, foi avaliada a topologia com apenas uma derivação. Nas topologias com duas derivações, as medidas foram feitas retirando uma das derivações, em seguida com ambas abertas.

Com o analisador de redes foi obtida a função transferência de cada topologia descrita. Esses pontos foram plotados utilizando o *software* MatLab. Com os resultados experimentais, será inferido o atraso de cada percurso, além dos pesos. Na seção seguinte, serão mostrados os resultados e o método proposto para encontrar os pesos  $g_i$ .

### 1.16.1 Resultados e Análise

Sabendo que nos máximos, os sinais, nos diferentes percursos, se somam, pois estão em fase e nos mínimos, os sinais estão em oposição de fase. É possível considerar que nos máximos os pesos se somam e nos mínimos os pesos se subtraem, pois o peso representa a potência do sinal. Considerando-se a atenuação nula, é construído um sistema dois por dois para encontrar os valores dos pesos. Na Figura 4 -48 é indicada como foram retirados do gráfico experimental esses valores para formação do sistema de equações:



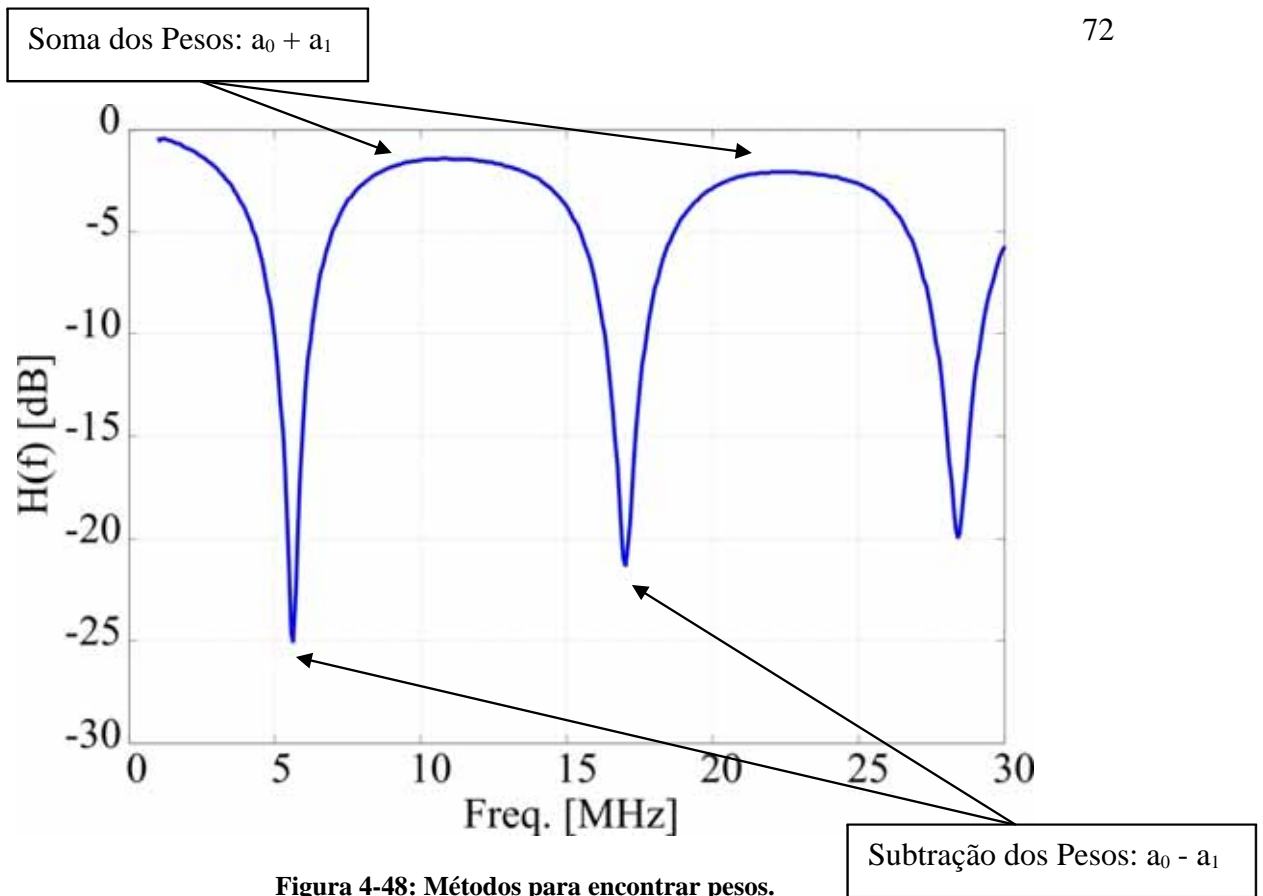


Figura 4-48: Métodos para encontrar pesos.

Através disso formou-se o sistema de equações abaixo, para a topologia 1.1:

$$pico = -10\text{dB}$$

$$nulo = -40\text{dB}$$

$$\max = 10^{\frac{pico}{10}}$$

$$\min = 10^{\frac{nulo}{10}}$$

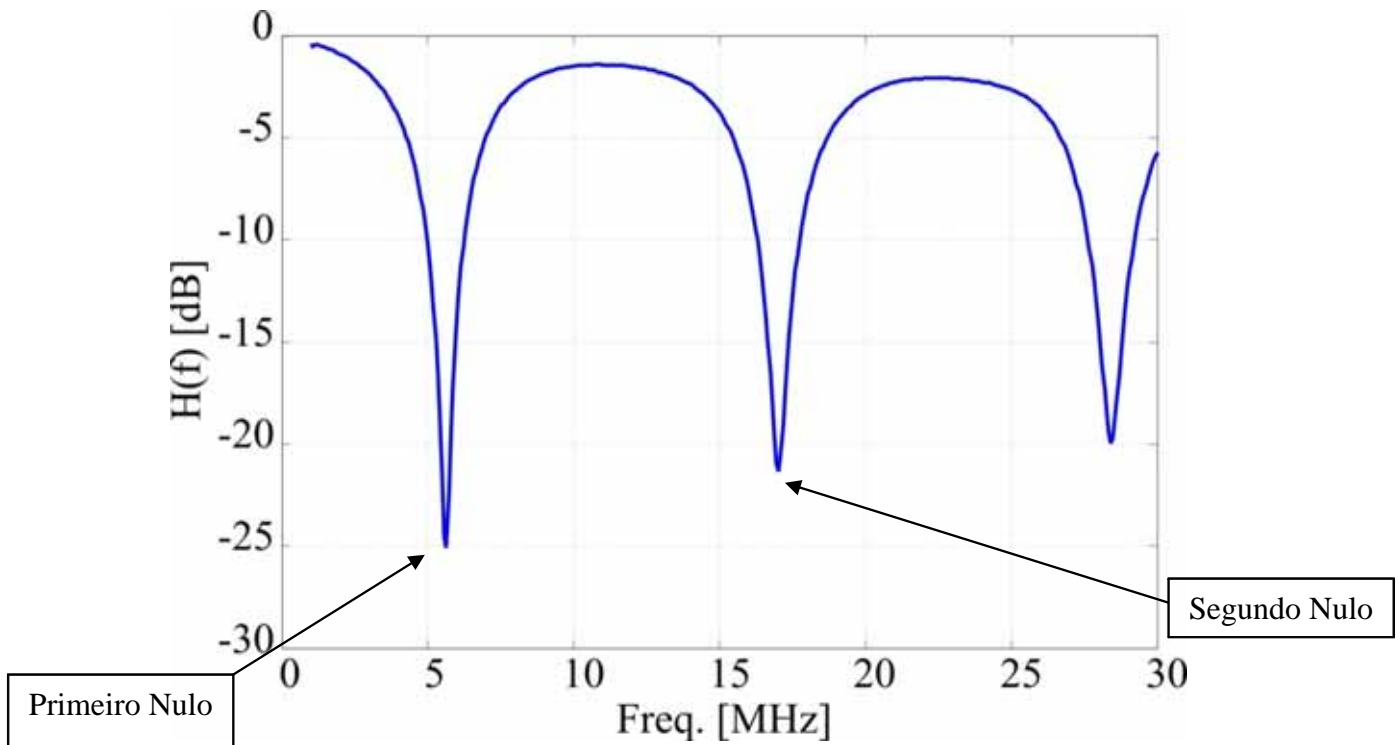
$$\begin{cases} a_0 + a_1 = \max \\ a_0 - a_1 = \min \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_0 = \frac{\max + \min}{2} \\ a_1 = \frac{\max - \min}{2} \end{cases}$$

$$a_0 = 0,05005$$

$$a_1 = 0,04995$$

Para extrair os valores dos pesos, não se trabalha com os valores de picos e nulos em dB. Por isso, realiza-se os dois primeiros passos acima, e é encontrado max e min, para encontrar os valores dos pesos.

Em seguida, foi encontrado o atraso utilizando a equação 4.6.4. Na Figura 4-49, são indicados o primeiro e o segundo nulo de frequência:



**Figura 4-49: Localização do Primeiro e Segundo Nulo .**

Para topologia 1.1, os valores das frequências dos nulos e o cálculo dos atrasos através de 4.6.4 é mostrado a seguir:

$$f_2 = 5,655\text{MHz}$$

$$f_1 = 17,05\text{MHz}$$

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Delta f} = 8,775778 \cdot 10^{-8}\text{seg}$$

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_0$$

$$\tau_0 = 0\text{seg}$$

$$\tau_1 = 8,775778 \cdot 10^{-8}\text{seg}$$

Lembrando que o primeiro percurso é tomado como referência.

A função transferência dada por (4.6.5), utilizando os pesos e atrasos encontrados, é comparada com o resultado experimental, como mostrado na Figura 4 -50:

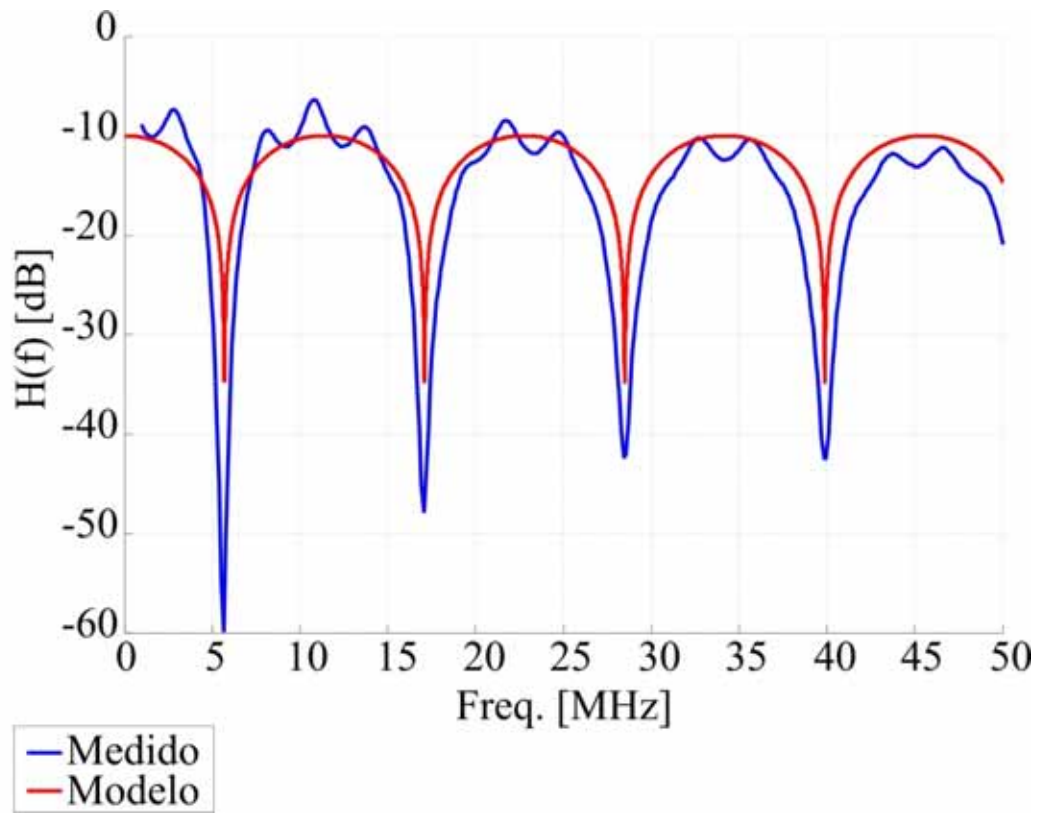


Figura 4-50: Comparação entre Teórico e Medido (Topologia 1.1)

Para a topologia 1.2:

Encontrando os pesos, de maneira análoga a descrita:

$$pico = -8dB$$

$$nulo = -40dB$$

$$max = 10^{\frac{pico}{10}}$$

$$min = 10^{\frac{nulo}{10}}$$

$$\begin{cases} a_0 + a_1 = max \\ a_0 - a_1 = min \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_0 = \frac{max + min}{2} \\ a_1 = \frac{max - min}{2} \end{cases}$$

$$a_0 = 0,079294659623056$$

$$a_1 = 0,079194659623056$$

Encontrando os atrasos:

$$f_2 = 4,185MHz$$

$$f_1 = 12,52MHz$$

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

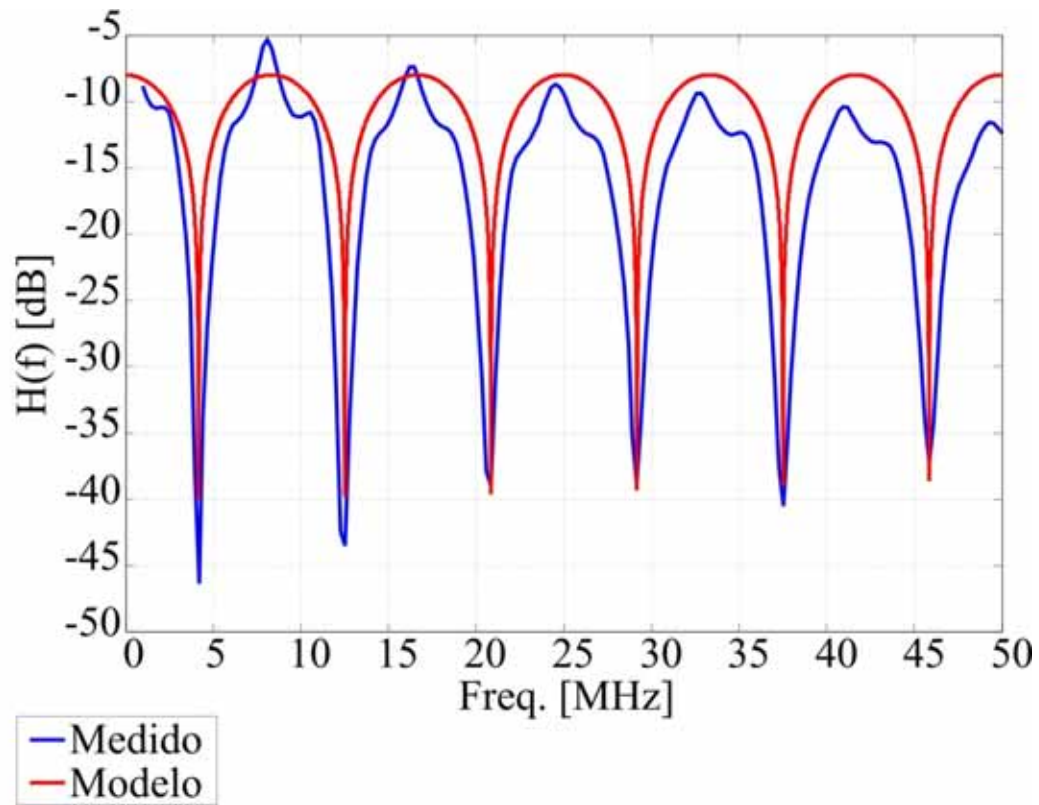
$$\Delta \tau = \frac{1}{\Delta f} = 1,1997600479904 \cdot 10^{-7} \text{ seg}$$

$$\Delta \tau = \tau_1 - \tau_0$$

$$\tau_0 = 0 \text{ seg}$$

$$\tau_1 = 1,1997600479904 \cdot 10^{-7} \text{ seg}$$

Na Figura 4 -51, pode ser visto a comparação:



**Figura 4-51: Comparação entre resultados teóricos e experimentais (Topologia 1.2)**

As topologias com duas derivações apresentaram as respostas em frequência mostradas na Figura 4-52, as três topologias possuem a mesma resposta em frequência. Isso ocorre porque as duas derivações só foram invertidas.

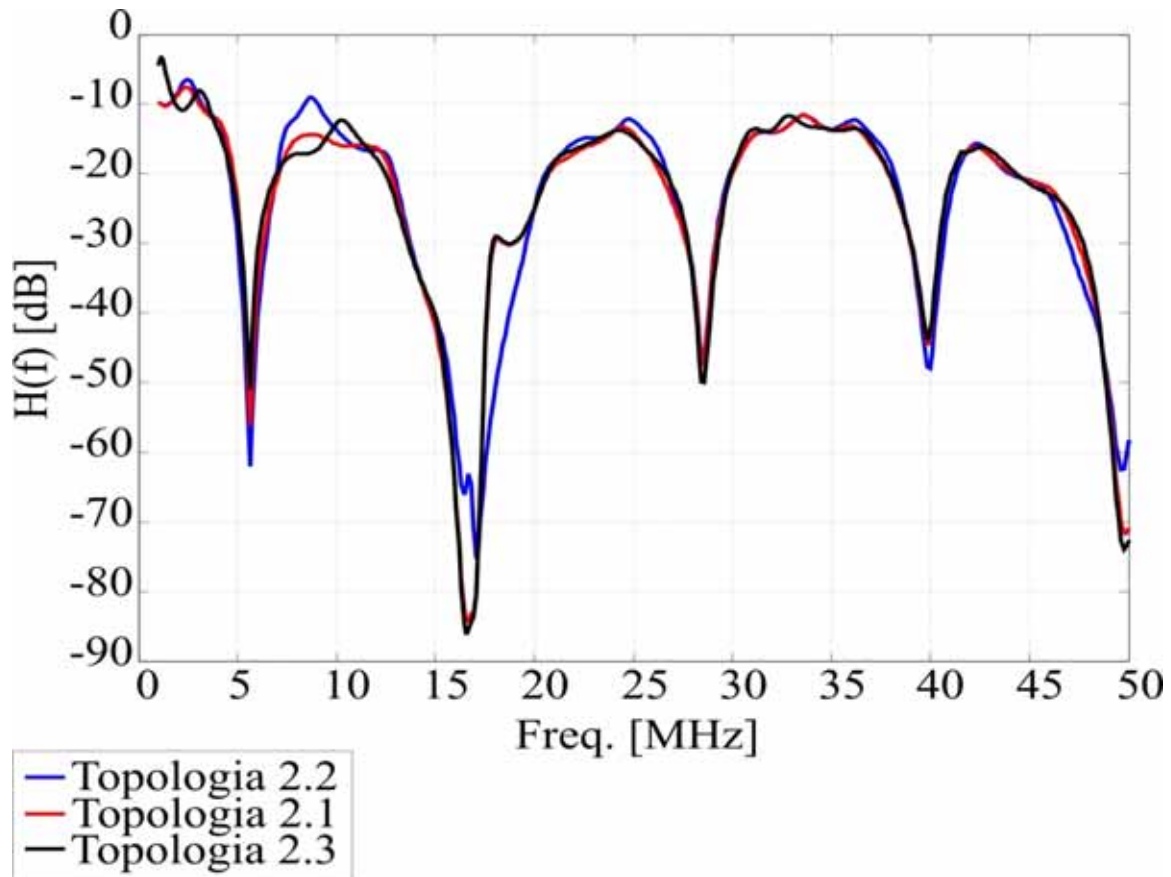
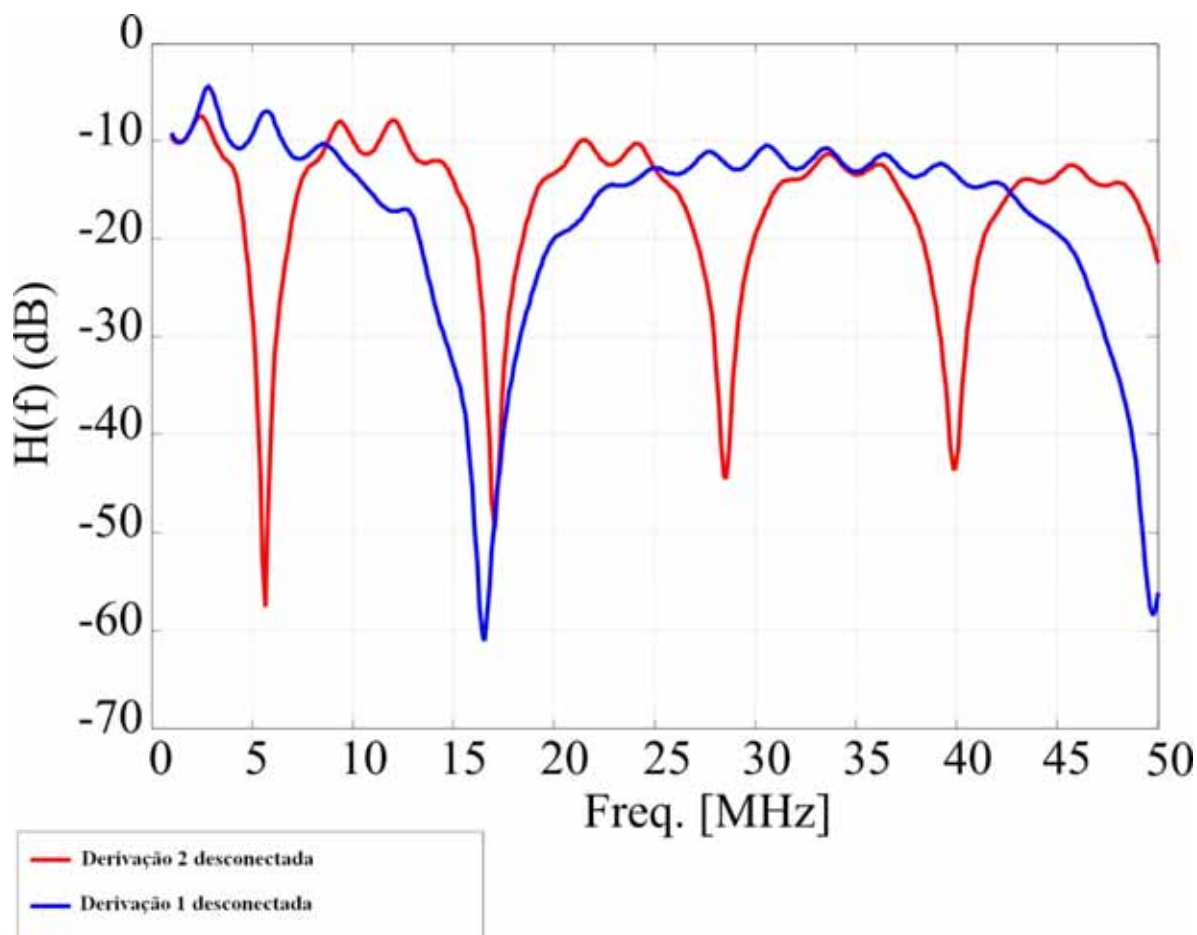


Figura 4-52: Resposta em Frequência das Topologias 2.1, 2.2 e 2.3.

Como ilustrada na Figura 4-41, é possível aplicar o princípio da superposição a topologia com duas derivações, dividindo-a em duas topologias com apenas uma derivação. Para isso, é retirada a primeira derivação e realizada as medições, em seguida retirada a segunda derivação e novamente realizada as medições. A seguir é mostrada a resposta em frequência da topologia 2.1, com a primeira e segunda derivação retirada:



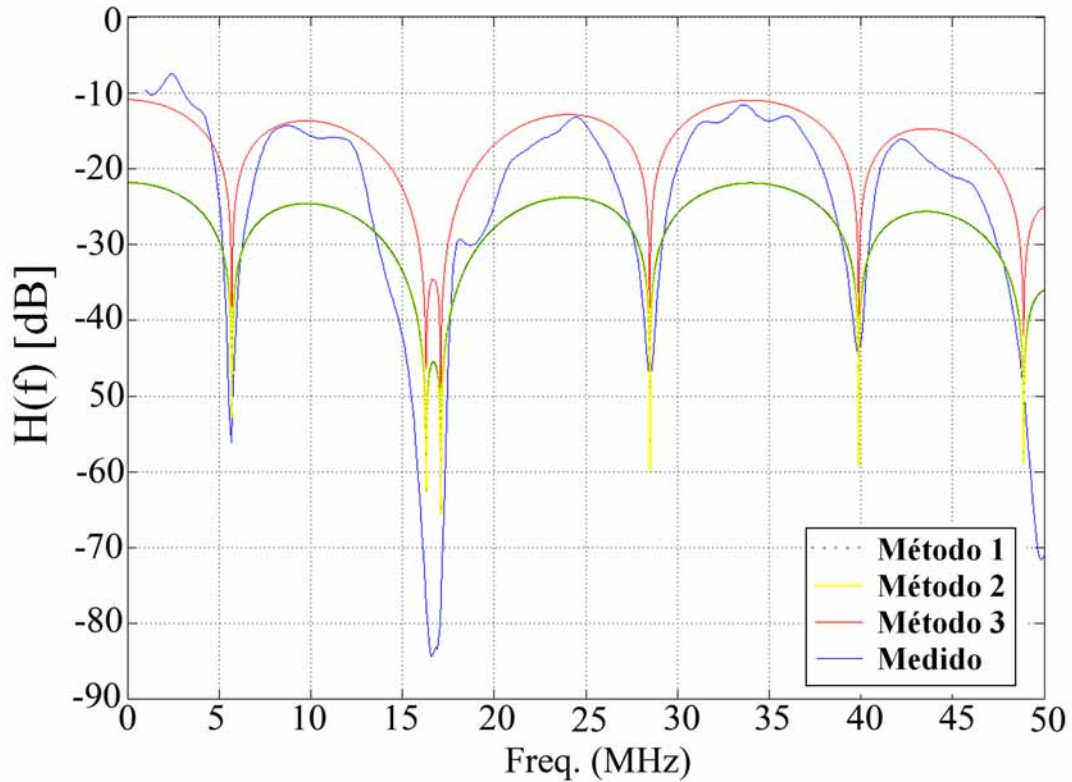
**Figura 4-53: Resposta em Frequência da Topologia 2.1, com derivações casadas.**

Através dos gráficos mostrados na Figura 4 -53, são encontrados duas funções transferências utilizando a técnica da analogia com a função transferência. A forma que se encontra os pesos e atrasos é idêntica a utilizada anteriormente. Entretanto, no caso dos pesos deve-se ter um cuidado maior.

Fazendo uso de (4.6.6) foram encontrados os atrasos das duas expressões em parênteses, com os gráficos da Figura 4 -53. Para os pesos realizaram-se três tentativas:

1. Com cada um dos dois gráficos, derivações 1 e 2 casadas, encontraram-se os pesos fazendo sistemas de equações como descrito para as topologias anteriores. Em seguida foram substituídos, tanto os valores dos pesos e atrasos, na expressão (4.6.6) e plotado o grafico;.
2. O outro método foi encontrar o valor médio deles e substituir em (4.6.6);
3. Finalmente, ao invés de substituir os valores médios ou valores reais, a metade dos valores médios é substituído nas expressões para a função transferência dada por (4.6.6).

Na Figura 4 -54, é mostrada a comparação entre os métodos:



**Figura 4-54: Avaliação de Técnicas para encontrar pesos.**

Analisando a figura acima, a melhor maneira de encontrar os pesos é através do método três. Os métodos 1 e 2 são similares, pois os valores dos pesos são próximos. O aumento no número de derivações provoca o aumento na quantidade de nulos, e não diminui a potência nos máximos. Utilizando (4.6.6), em dB, pode-se explicar porque o método 3 é o melhor:

$$H(f)_{dB} = 10 \cdot \log_{10} (a_0 + a_1 \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot \tau_1}) \cdot (b_0 + b_1 \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot \tau_2})$$

$$H(f)_{dB} = 10 \cdot \log_{10} (a_0 + a_1 \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot \tau_1}) + 10 \cdot \log_{10} (b_0 + b_1 \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot \tau_2})$$



Nos máximos, as expressões ficam da seguinte forma:

$$H(f)_{dB} = 10 \cdot \log_{10}^{(a_0+a_1)} + 10 \cdot \log_{10}^{(b_0+b_1)}$$

$$H(f)_{dB} = pico_1 + pico_2$$

Onde  $pico_1$  e  $pico_2$  são os valores dos máximos em dB.

Como os valores de pico ou máximo não são muito alterados com o aumento no número de derivações, o valor máximo com todas as derivações na rede pode ser considerado aproximadamente igual ao valor com cada derivação isolada.

Portanto, quando se utiliza o método 1 e o método 2, o valor final para a resposta em frequência teórica é reduzido, por isso que existe um erro de aproximadamente 10dB. Por outro lado, no método 3, quando se calcula o valor médio e divide-se por dois, os valores de  $pico_1$  e  $pico_2$  são reduzidos a metade do valor máximo da resposta em frequência da rede. Assim, quando somados é encontrado o valor correto para o pico.

Na Figura 4 -55, é mostrada a comparação entre o modelo e a resposta em frequência da topologia 2.1, utilizando o método 3:

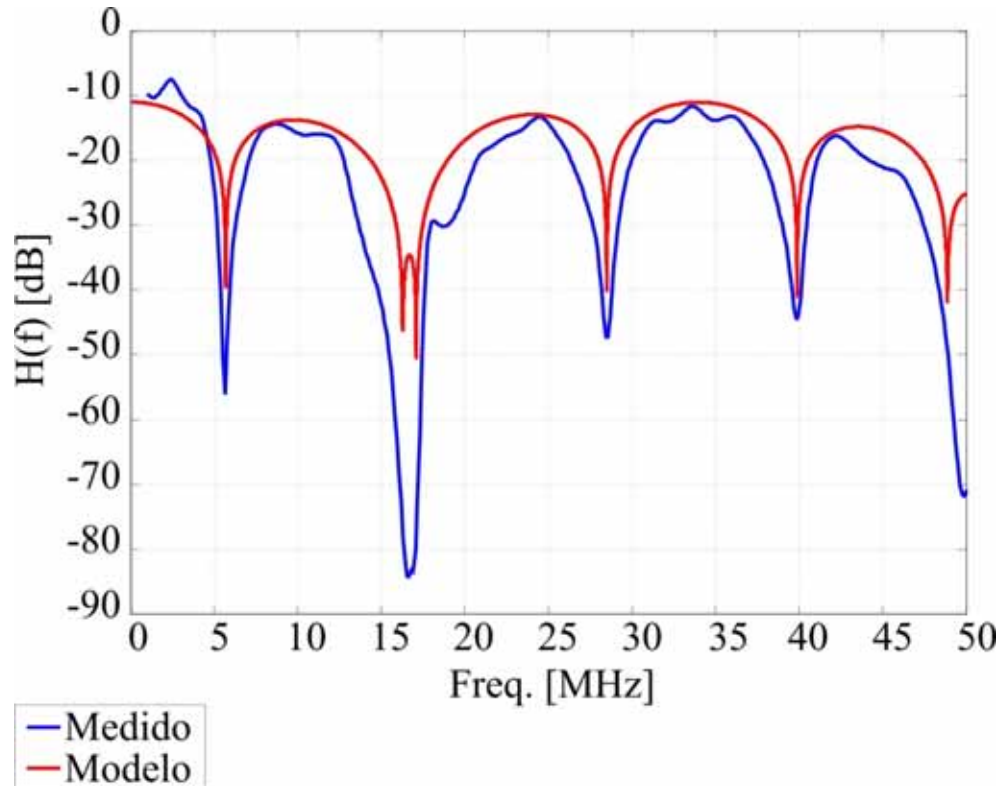


Figura 4-55: Resultado experimental e Modelo da Topologia 2.1.

Na frequência de 16 MHz, aproximadamente, existe um pequeno vale. Isso pode ser explicado através da Figura 4 -53, perceba que nessa frequência, existe uma diferença de frequência entre os nulos. Por isso, ocorre esse pequeno batimento no modelo proposto. Isso se propaga e na frequência de 50 MHz também ocorre o mesmo. Das topologias 2.1, 2.2 e 2.3, apenas a 2.2 apresenta esse pequeno vale, na sua resposta final. Veja Figura 4 -52.

Apesar disso, é possível afirmar que a técnica proposta para encontrar os pesos é bastante aceitável. Os demais nulos estão bem especificados e os vales também.

### 1.17 Aplicação a Rede Avaliada por Dostert e Zimmerman

Por fim, a técnica descrita nesse documento será aplicada a rede caracterizada por Zimmerman e Dostert, sem considerar a atenuação.

Através da Figura 4 -56, são encontrados os parâmetros através da analogia com o interferômetro. As frequências dos nulos estão especificadas:

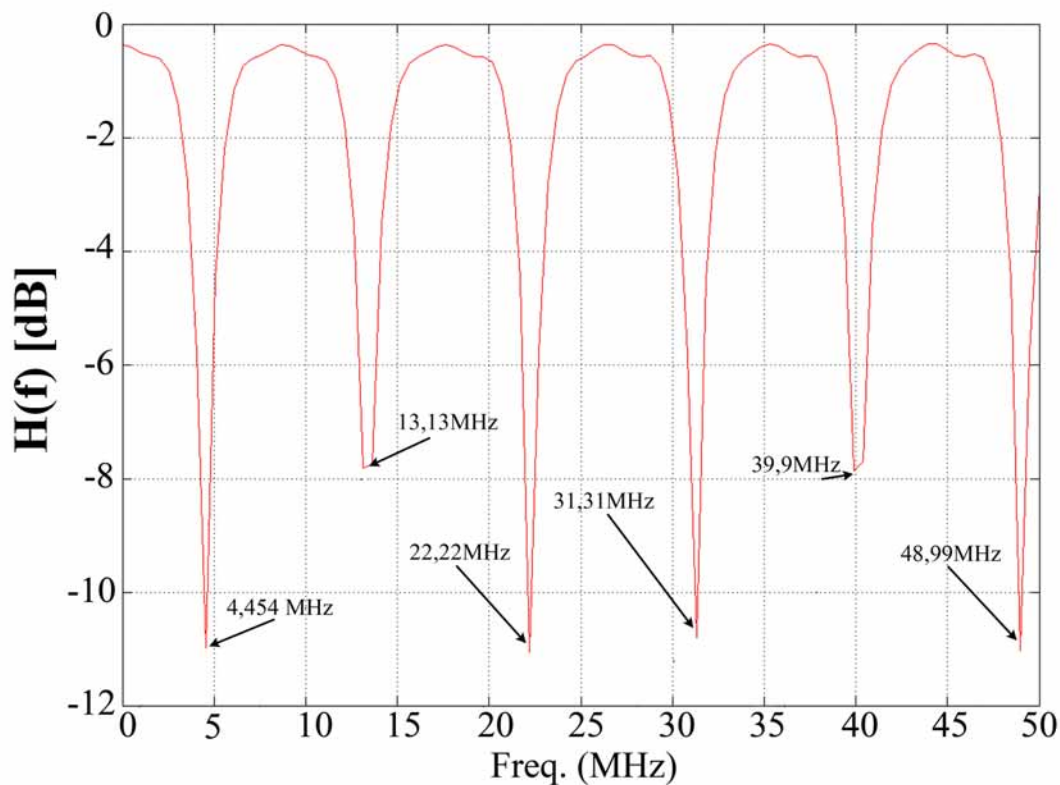


Figura 4-56: Frequências dos Nulos da rede avaliada por Dostert e Zimmerman.

As frequências dos nulos estão especificadas na Figura 4 -56, as variações de frequências entre os nulos são:

$$\Delta f_{21} = 8,58\text{MHz}$$

$$\Delta f_{32} = 9,09\text{MHz}$$

$$\Delta f_{43} = 9,09\text{MHz}$$

$$\Delta f_{54} = 8,59\text{MHz}$$

$$\Delta f_{65} = 9,09\text{MHz}$$

A partir do valor médio desses valores, foram encontrados os atrasos dos percursos. A variação de frequência é bem próxima, portanto é possível considerar apenas dois caminhos distintos para o sinal. Assim, é mostrado a seguir:

$$\Delta f_{Medio} = 8,889\text{MHz}$$

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Delta f_{Medio}} = 1,124986 \cdot 10^{-7} \text{seg}$$

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_0$$

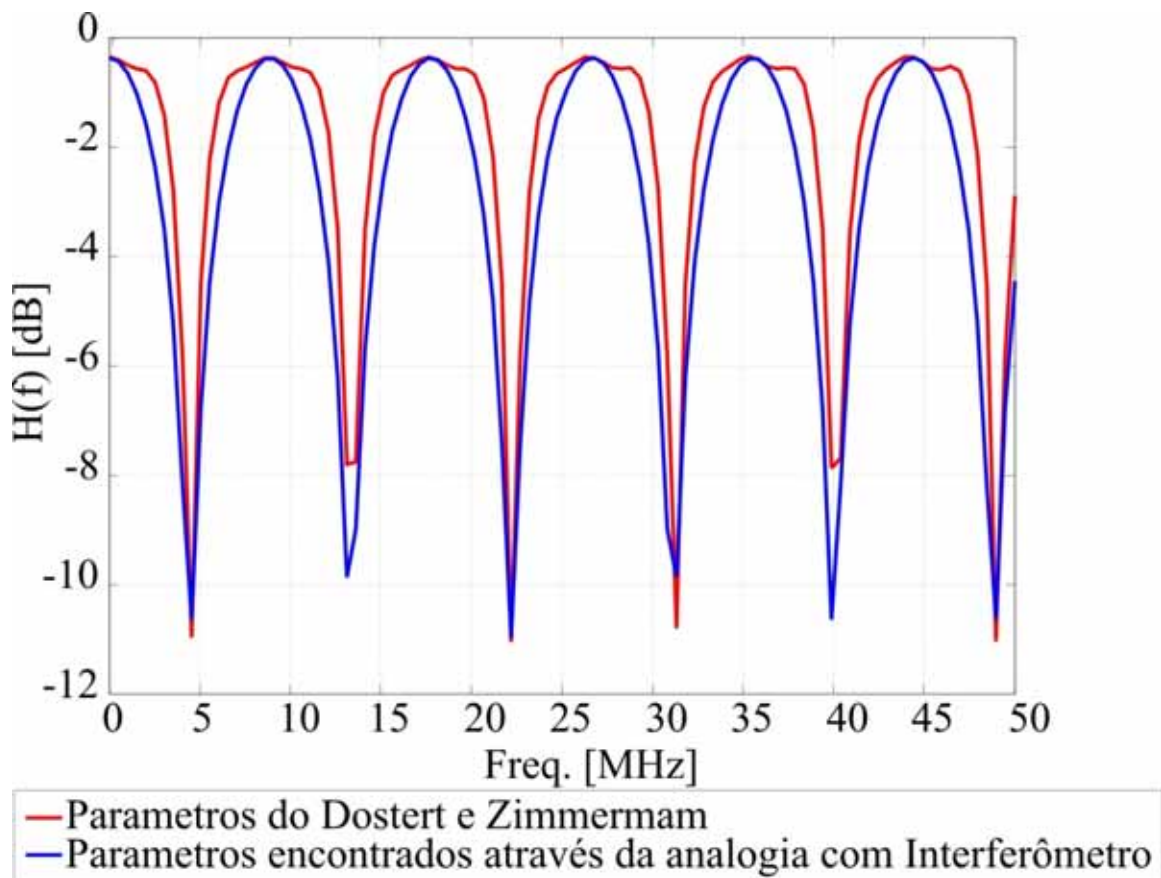
$$\tau_0 = 0\text{seg}$$

$$\tau_1 = 1,124986 \cdot 10^{-7} \text{seg}$$

Resta, agora, encontrar os pesos. Para esses, não houve tanto rigor. Através do primeiro nulo e do primeiro máximo foi feito o sistema de equações para determinar os pesos:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 = 0,917403 \\ a_0 - a_1 = 0,079799 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_0 = 0,498601 \\ a_1 = 0,4018802 \end{cases}$$

Foi plotado o modelo dado por (4.1.9), utilizando os parâmetros encontrados. Na Figura 4-57, é feita a comparação entre o mesmo modelo, porém com parâmetros diferentes:



**Figura 4-57: Comparação da Técnica do Dostert e Zimmerman e Analogia com Interferômetro.**

Através de um procedimento simples é possível encontrar os parâmetros necessários para aplicar o modelo de multipercursos. É notada, pela Figura 4-57, que a analogia com interferômetro é eficaz na determinação dos máximos e mínimos de interferência. Porém, é preciso ser ajustada, pois os gráficos não são totalmente iguais.

Isso se deve ao fato de que há percursos que não foram considerados. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.1, para uma rede com uma derivação foram encontrados quatro percursos, ao invés, de apenas dois. Por conta disso, há diferença entre as técnicas.

## Conclusão

A tecnologia PLC, a partir do Projeto Opera, está sendo disseminada. Para isso, órgãos de pesquisas, empresas de tecnologia e concessionárias de energia elétrica estão juntos no desenvolvimento de projetos pilotos e no avanço dos equipamentos PLC.

Aplicações em banda estreita estão sendo largamente utilizadas para automação de medições de serviços oferecidos à população, como o fornecimento de energia elétrica, gás e água. Além disso, é possível detectar roubo de energia elétrica de maneira automática e interromper o furto, com desligamento automático de energia. Assim, a tecnologia proporciona redução nas perdas de energia elétrica.

Na transmissão de dados em banda larga, a partir da utilização da rede elétrica, o uso da rede da concessionária de energia torna-se mais atrativo por possibilitar investimentos dessas empresas. Contudo, o alcance do sinal PLC não é suficiente para abranger muitos *sites*, sem a introdução de repetidores por toda rede. Além disso, devido aos problemas de emissão eletromagnética, a potência emitida por esses equipamentos na rede elétrica deve ser reduzida. Isso acarreta em um menor alcance. Para solucionar tal problema, é preciso avançar nas técnicas de modulação e codificação do sinal.

Esses avanços estão ocorrendo com as novas gerações do *Chip* DS2, usado nos equipamentos PLC. Atualmente, os equipamentos que estão sendo utilizados nos projetos pilotos existentes em Recife-PE e Porto Alegre-RS são da primeira geração da tecnologia.

Já se está anunciando a terceira geração com velocidade de 400Mbps. Como a terceira geração é quase dez vezes maior do que a atual, e já foram obtidos sucessos com a geração de 45Mbps, existe otimismo quanto ao futuro da tecnologia PLC.

Além de avanços significativos nas técnicas de modulação e codificação, as quais provocaram a evolução nas taxas dos *chips* fabricados pela empresa DS2, houve um crescimento nos procedimentos de instalação da tecnologia em campo. Esse trabalho propõe uma técnica eficaz para implementação da tecnologia PLC em sistemas trifásicos, através do uso da injeção do sinal em apenas uma fase para utilizar a indução nas demais. Dessa forma, pode-se escolher a melhor fase, e utilizar as outras com o sinal induzido.

A partir do modelo do canal e de simulações, é possível avaliar o impacto de diferentes topologias em sistemas PLC. Além de redes com diferentes características físicas. O referido modelo proporciona a avaliação de novos equipamentos, como também novas técnicas de

codificação e modulação de sinal que podem ser aplicadas à rede elétrica quando a rede estiver submetida à transmissão de dados em banda larga.

O modelo de multipercurso aliado à teoria de linhas de transmissão caracteriza o canal PLC. Através dessa teoria é possível encontrar a função transferência adequada ao comportamento do canal no domínio da frequência. Entretanto, é necessário encontrar os parâmetros requeridos por esse modelo, que são: atrasos, peso e atenuação. Essa dissertação propõe uma nova técnica para encontrar os pesos e atrasos da função transferência. A analogia realizada com o interferômetro mostrou-se simples e eficaz, apresentando alta precisão na determinação dos nulos e vales.

### **1.18 Sugestões para Trabalhos futuros**

A seguir seguem alguns temas que podem ser continuação desse trabalho:

- Aplicação da técnica em redes elétricas com uma ou mais derivações, considerando a atenuação na rede;
- Avaliação da inclusão de cargas nas derivações;
- Encontrar o atraso mínimo, o qual é importante na definição da banda de guarda do sistema de modulação adotado na tecnologia PLC, OFDM;
- Utilização da resposta no domínio do tempo para encontrar os parâmetros do modelo, em seguida comparar com o método descrito nesse trabalho.

## Referências

- [1] Aptel, Grupo de Trabalho Powerline-GT Powerline, versão final, outubro de 2003, acessado em <http://www.afrr.qsl.br/plc-anatel.pdf>, ETSI Standard (ETSI 2000) para primeira geração de sistemas PLC, 2000, último acesso em 10 de maio de 2007.
- [2] ETSI Standard (ETSI 2000) para primeira geração de sistemas PLC, 2000.
- [3] Pimentel, P.R.S.; Baldissin, A.; Cesar, L.S.; Framil, R.R.; Pascalicch, A.; "Revolution in the distribution (use of the technology power line communication in the transmission of data, voice and images)," *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES*, pp. 314- 320, 8-11 Nov. 2004
- [4] [http://pwweb2.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/abemtic/usu\\_doc/plc\\_porto\\_alegre.pdf](http://pwweb2.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/abemtic/usu_doc/plc_porto_alegre.pdf), acessado em 10 de maio de 2007.
- [5] Zimmermann, M.; Dostert, K., "A multipath model for the powerline channel," *Communications, IEEE Transactions on*, vol.50, no.4, pp.553-559, Apr 2002
- [6] Technology Review of Powerline Communications (PLC) Technologies And Their use In Australia, [http://www.dbcde.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0014/8420/Technology\\_Review\\_of\\_Powerline\\_Communications\\_Technologies\\_and\\_Their\\_Use\\_in\\_Australia\\_-\\_Final\\_Report.pdf](http://www.dbcde.gov.au/_data/assets/pdf_file/0014/8420/Technology_Review_of_Powerline_Communications_Technologies_and_Their_Use_in_Australia_-_Final_Report.pdf), acessado em 10 de maio de 2007.
- [7] <http://www.utc.org/>, acessado em 10 de maio de 2007.
- [8] <http://www.aptel.com.br/powerline2008/>, acessado em 10 de maio de 2007.
- [9] White Paper on Power Line Communications (PLC) 2004, disponível em [http://www.pua-plc.com/files/upload/041021\\_Whitepaper\\_PLC\\_2004.pdf](http://www.pua-plc.com/files/upload/041021_Whitepaper_PLC_2004.pdf), acessado em 10 de maio de 2007.
- [10] <http://www.ist-opera.org/>, acessado em 10 de maio de 2007.
- [11] Halid Hrasnica, Abdelfatteh Haidine, Ralf Lehnert, "Broadband Powerline Communication", Dresden University of Technology Germany, John Wiley & Sons, Ltd, January, 2004.
- [12] Dostert, K., "Powerline Communication, Prentice Hall PTR, Network", USA, April, 2001.
- [13] Neto, Alberto Baldissin., Eletropaulo, "Aplicações da Tecnologia PLC nas Empresas Brasileiras: AMR, Automação e Monitoramento", VI Simpósio de *Power Line Communication*, 28 de junho de 2006, Pestana Rio Atlântica Hotel-Rio de Janeiro.
- [14] Oliveira, Orlando César de., Aplicações da Tecnologia PLC, COPEL – Companhia Paranaense de Energia, VI Seminário Powerline Communications, 28 de junho de 2006, Pestana Rio Atlântica Hotel-Rio de Janeiro.



- [15] Cidades Digitais, Projeto Barrerinhas – Fase 2, VI Simpósio Brasileiro de *Power Line Communications*, 28 de junho de 2006, Pestana Rio Atlântica Hotel-Rio de Janeiro.
- [16] <http://www.homeplug.org/home>, acessado em 10 de maio de 2007.
- [17] <http://www.dealtime.com/xPO-Linksys-Powerline-AV-Adapter-Kit-PLK200>, acessado em 10 de maio de 2007.
- [18] <http://www.nextag.com/Panasonic-BL-PA100KTA-HD-502609296/prices-html>, acessado em 10 de maio de 2007.
- [19] Held. Gilbert, *Understanding Broadband over Power Line*, 2006.
- [20] [http://hypertrade.tempsite.ws/arqsist/certificado\\_master\\_plc.pdf](http://hypertrade.tempsite.ws/arqsist/certificado_master_plc.pdf), acessado em 10 de maio de 2007.
- [21] <http://www.ds2.es/>, acessado em 10 de maio de 2007..
- [22] *Mitsubishi PLCLINK, REP-AM10-212S0, Instalation Guide.*
- [23] *User Guide, Technical Reference for ioLink 1 Wireless System.*
- [24] Tran-Anh, T.; Auriol, P.; Tran-Quoc, T., "Distribution network modeling for power line communication applications," *2005 International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, pp. 361-365, 6-8 April 2005
- [25] Cheng, D. K. , "Fundamental of Engineering Electromagnetics". Reading, MA: Addison-Wesley, 1992.
- [26] Johnson, *Transmission Line and Networks*, International Student Edition, Edit-Mcgraw-Hill kogakusha, 1St Edition edition, 1950.
- [27] Xiaoxia Wei, Jie Liu, Yan Li, "Simulation Analysis of Power Transmission Line Model", *Symposium on Power Line Communication and its application*, pp.256-260, 2006
- [28] Pozar, D. M. , "Microwave Engineering", Third Edition, Wiley, 2005.
- [29] Melo, M. T., "High Temperature Superconducting Devices, School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering", PhD. Thesis, Faculty of Engineering, University of Birmingham, Birmingham, UK, December 1996.
- [30] Meng, H.; Chen, S.; Guan, Y.L.; Law, C.L.; So, P.L.; Gunawan, E.; Lie, T.T., "Modeling of transfer Characteristics for the broadband power line communication channel," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.19, no.3, pp. 1057-1064, July 2004
- [31] Galli, S.; Banwell, T., "A novel approach to the modeling of the indoor power line channel-Part II: transfer function and its properties," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.20, no.3, pp. 1869-1878, July 2005.