

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE E DESEMPENHO DE TRÁFEGO TRIPLE PLAY EM
REDES PLC DE BAIXA TENSÃO**

JOÃO VICTOR COSTA CARMONA

DM 35/2011

BELÉM-PA
DEZEMBRO/2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO VICTOR COSTA CARMONA

**ANÁLISE E DESEMPENHO DE TRÁFEGO TRIPLE PLAY EM
REDES PLC DE BAIXA TENSÃO**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Evaldo Gonçalves
Pelaes

BELÉM-PA

DEZEMBRO/2011

C287a Carmona, João Victor Costa

Análise e desempenho de tráfego triple play em redes PLC de baixa tensão / João Victor Costa Carmona; orientador, Evaldo Gonçalves Pelaes. – 2011.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2011.

1. Sistemas de transmissão de dados. 2. Sistemas de comunicação em banda larga. 3. Sistemas multimídia. 4. Linhas elétricas. I. Orientador. II. Título.

CDD 22. ed. 004.6

ANÁLISE E DESEMPENHO DE TRÁFEGO TRIPLE PLAY EM REDES PLC DE BAIXA TENSÃO

JOÃO VICTOR COSTA CARMONA

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Computação Aplicada**, e aprovado na sua forma final pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará em 15 de dezembro de 2011.

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
Orientador UFPA

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante
Membro – PPGEE/UFPA

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
Membro – ENGCOMP/UFPA

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
Coordenador PPGEE/ITEC/UFPA

BELÉM-PA

2011

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à Deus pela saúde, fé e perseverança que me tem dado. A todas aquelas pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para a conclusão dessa dissertação, e principalmente ao meu filho, Caio Nicolas da Silva Carmona.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pelas infinitas bênçãos derramadas em minha vida, e por nunca deixar que eu desistisse diante das dificuldades.

Aos meus pais João Bosco e Alcinéa Lúcia, pelo infinito amor, ensinamentos, incentivos, por e terem me proporcionado uma excelente educação, tanto em casa como nas escolas por onde passei. À estas duas pessoas não encontro palavras para agradecer pois sempre abriram mão de seus sonhos para compartilharem os meus, mesmo diante de tantas dificuldades.

À Minha esposa, Suelem Cristina, pelo amor, paciência e companheirismo durante todo o curso de mestrado.

Ao meu filho Caio Nicolas, que desde que nasceu tem me proporcionado muitos momentos de alegria e descontração, além de ser um dos meus maiores pontos de motivação para a conclusão deste Mestrado e a continuação da via acadêmica no Doutorado.

Ao professor Pelaes, pelos ensinamentos, apoio desde os tempos de estagiário da secretaria do PPGEE e pela oportunidade dada para a realização de mais essa etapa de minha vida. Serei eternamente grato!

Ao Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho (LPRAD) por ter cedidos os equipamentos necessários para os testes realizados neste trabalho, em especial ao grande amigo e conhecedor de PLC e outras coisas mais, Marcelino, pelos ensinamentos e apoio.

EPÍGRAFE

“Se A é o sucesso, então A é igual a X mais Y mais Z. O trabalho é X; Y é o lazer; e Z é manter a boca fechada”

Albert Einstein

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Espectro de um sinal com Modulação *Spread Spectrum*

Figura 2.2 Visão em 3D da Modulação OFDM

Figura 2.3 Espectro de um Sinal com Modulação GMSK

Figura 2.4 Cenário Típico de uma Rede PLC *Indoor*

Figura 2.5 Visualização do padrão *Outdoor* PLC

Figura 2.6 Quadro *Homeplug* Longo: Transporte dos Dados

Figura 2.7 Quadro *Homeplug* Curto: Transmissão da Resposta com Reconhecimento

Figura 2.8 Exemplo de Topologia de um Sistema Elétrico

Figura 2.9 Topologia de uma Rede PLC

Figura 2.10 Modems PLC Encontrados no Mercado

Figura 2.11 Repetidor de Sinal PLC

Figura 2.12 Acoplador de Rede Elétrica

Figura 2.13 Caixa de Distribuição

Figura 4.1 Efeito do *Jitter* para as Aplicações

Figura 4.2 Qualidade de Experiência

Figura 4.3 Avaliação do Ponto de Vista do Usuário

Figura 4.4 Funcionamento do SSIM

Figura 5.1 Quadros do vídeo Utilizado

Figura 5.2 Cenário 1 (sem ruído)

Figura 5.3 Cenário 2 (com ruído)

Figura 5.4 Cenário 3

Figura 5.5 Telas do chat de bate utilizado nas simulações

Figura 5.6 Coleta de Dados realizada pelo *Wireshark*

Figura 5.7 Tela de navegação do IPERF

Figura 6.1 Tela Resultado do PSNR de uma Transmissão do Vídeo

Figura 6.2 Largura de Banda Alcançada com o uso do Ventilador

Figura 6.3 Largura de Banda Alcançada com o uso do Liquidificador

Figura 6.4 Comparação dos Testes Aplicados para 60KB/s

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Avaliação do Ponto de Vista do Usuário

Tabela 4.2 Correlação PSNR e MOS

Tabela 6.1 Legenda dos Parâmetros Avaliados

Tabela 6.2 Satisfação do Usuário VoIP para Cenários 1 e 2

Tabela 6.3 Análise com Inserção de Tráfego

Tabela 6.4 Aparelhos Domésticos

Tabela 6.5 Resultado das Métricas Analisadas

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK - *Acknowledgment*

ADSL - *Asymmetric Digital Subscriber Line*

AMR - *Automatic Meter Reading*

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CAP - *Channel Access Priority*

CDMA - *Code Division Multiple Access*

CODEC - Acrônimo de Codificador/Decodificador

CPE - *Customer Premise Equipment*

CRC - *Cyclic Redundant Check*

CSMA / CA - *Carrier sense multiple access with collision avoidance*

DES - *Data Encryption Standard*

EFG - *End of Frame Gap*

EOF - *End of Frame*

ETSI - *European Telecommunications Standards Institute*

FC - *Frame Control*

FEC - *Forward error correction*

GESAC - Governo Eletrônico e Serviço de Atendimento ao Cidadão

GMSK - *Gaussian Minimum Shift Keying*

GSM - *Global System for Mobile Communications*

HD - *High definition*

HDTV - *High-definition television*

HG - *Home Gateway*

IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

ITU - União Internacional de Telecomunicações

LAN - *Local area network*

LPRAD - Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho

OSI - *Open Systems Interconnection*

MOS - *Mean Opinion Score*

MSR - *Mean Square Error*

NAVEPARÁ – Programa de Inclusão Digital do Governo do Estado do Pará

OFDM - *Orthogonal frequency-division multiplexing*

PCS - *Physical Carrier Sense*

PLC - *Power Line Communication*

PLIC - *Power Line Communication Indoor*

PLOC - *Power Line Communication Outdoor*

PNBL - Programa Nacional de Banda Larga

PoS - *Point of Service*

PSNR - *Peak Signal to Noise Ratio*

QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*

QoE - *Quality of Experience*

QoS - *Quality of Service*

QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying*

SBTD - Sistema Brasileiro de Televisão Digital

SDTV - *Standard-definition television*

SIP - *Session Initiation Protocol*

SOF - *Start of Frame*

SSIM - *Structural Similarity Index*

TCP / IP - *Transmission Control Protocol - Internet Protocol*

TDMA - *Time Division Multiple Access*

USB - *Universal Serial Bus*

VCS - *Virtual Carrier Sense*

VOIP - *Voice over Internet Protocol*

VQEG - *Video Quality Experts Group*

VQM - *Video Quality Metric*

WAN - *Wide Area Network*

WIFI - *Wireless Fidelity*

WLANS - *Wireless Local Area Network*

xDSL - Família de protocolos que trabalham com o sistema *Digital Subscriber Line*

RESUMO

Este trabalho faz uma análise de desempenho de aplicações triple play através da tecnologia Power Line Communication, fazendo uma abordagem direcionada para qualidade de serviço e qualidade de experiência. Apresenta resultados obtidos em cenários residenciais onde o uso desta tecnologia como última milha mostra-se uma solução passível de implementação diante dos testes realizados com transmissões de chamadas VoIP, transmissões de vídeo em alta definição e dados. O conceito de rede doméstica, interligando todos os pontos de uma casa, vem representando um novo rumo na definição de um padrão global, no qual a transmissão de dados por meio da fiação elétrica será uma das tecnologias empregadas e de maior destaque. Também será mostrado o desempenho das métricas avaliadas como *jitter*, largura de banda, perda de pacotes, PSNR, MOS, VQM, SSIM e suas correlações.

PALAVRAS-CHAVES: PLC, QoS, QoE, largura de banda, desempenho, tráfego *triple play*

ABSTRACT

This work is a performance analysis of triple play applications using Power Line Communication technology, making a targeted approach to quality of service and quality of experience. Presents results obtained in residential settings where the use of this technology as a last mile solution proves capable of implementation before the tests with transmission of VoIP calls, streaming high definition video and data. The concept of home network, connecting all the points of a house, has represented a new direction in defining a global standard, in which the transmission of data via the electrical wiring will be one of the technologies employed and the spotlight. Also shown will be evaluated performance metrics such as jitter, bandwidth, packet loss, PSNR, MOS, VQM, SSIM and their correlation.

KEYWORDS: PLC, QoS, QoE, bandwidth, performance, traffic triple play

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

1. INTRODUÇÃO..... Erro! Indicador não definido.

1.1 OBJETIVO Erro! Indicador não definido.

1.2. TRABALHOS RELACIONADOS..... Erro! Indicador não definido.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO..... Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO II.....ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

2. TECNOLOGIA PLC Erro! Indicador não definido.

2.1 TIPOS DE MODULAÇÃO..... **Erro! Indicador não definido.**

2.1.1- Spread Spectrum..... **Erro! Indicador não definido.**

2.1.2- OFDM..... **Erro! Indicador não definido.**

2.1.3- GMSK..... **Erro! Indicador não definido.**

2.3 Canal PLC..... **Erro! Indicador não definido.**

2.4 Padrões..... **Erro! Indicador não definido.**

2.4.1 *PLC Indoor* (PLIC)..... **Erro! Indicador não definido.**

2.4.2 PLC Outdoor (PLOC)..... **Erro! Indicador não definido.**

2.4.3 Homeplug..... **Erro! Indicador não definido.**

2.5 Topologias..... **Erro! Indicador não definido.**

2.6 Equipamentos que Compõe Uma Rede PLC..... **Erro! Indicador não definido.**

2.6.1-Modem PLC..... **Erro! Indicador não definido.**

2.6.2-Repetidor..... **Erro! Indicador não definido.**

2.6.3-Acopladores..... **Erro! Indicador não definido.**

2.6.4-Caixa de Distribuição..... **Erro! Indicador não definido.**

2.6.5-Estação Base..... **Erro! Indicador não definido.**

2.7 Características..... **Erro! Indicador não definido.**

2.7.1 Vantagens..... **Erro! Indicador não definido.**

2.7.2 Desvantagens..... **Erro! Indicador não definido.**

2.8 CAMPOS DE APLICAÇÃO..... **Erro! Indicador não definido.**

CAPÍTULO III.....ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

3. APLICAÇÕES Erro! Indicador não definido.

3.1 TELEFONIA: TRANSMISSÃO VOIP..... **Erro! Indicador não definido.**

3.1.1 Características..... **Erro! Indicador não definido.**

3.2 TRANSMISSÃO DE VÍDEOS HD.....	Erro! Indicador não definido.
3.2.1 Características.....	Erro! Indicador não definido.
3.3 AUTOMAÇÃO	Erro! Indicador não definido.
3.4 INTERNET BANDA LARGA	Erro! Indicador não definido.
3.5 PERSPECTIVAS	Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO IVERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

4. MÉTRICAS PARA ANÁLISE DE QoS e QoE EM REDES PLC.....	Erro! Indicador não definido.
4.1 QUALIDADE DE SERVIÇO – QoS.....	Erro! Indicador não definido.
4.1.1 Perda de Pacotes.....	Erro! Indicador não definido.
4.1.2 Atraso	Erro! Indicador não definido.
4.1.3 Jitter	Erro! Indicador não definido.
4.2 QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA – QoE	Erro! Indicador não definido.
4.2.1 Abordagem Subjetiva	Erro! Indicador não definido.
4.2.2 Abordagem Objetiva	Erro! Indicador não definido.
4.2.3 MSE e PSNR	Erro! Indicador não definido.
4.2.4 MOS.....	Erro! Indicador não definido.
4.2.5 SSIM e VQM	Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO VERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

5. METODOLOGIA	Erro! Indicador não definido.
5.1 FERRAMENTAS UTILIZADAS	Erro! Indicador não definido.
5.1.1 Analisador de Protocolos RADCOM	Erro! Indicador não definido.
5.1.2 MSU Video Quality	Erro! Indicador não definido.
5.2 VÍDEO UTILIZADO	Erro! Indicador não definido.
5.3 CENÁRIOS UTILIZADOS	Erro! Indicador não definido.
5.3.1 Para Transmissão de Chamadas VoIP	Erro! Indicador não definido.
5.3.2 Para Transmissão de Vídeo em HD	Erro! Indicador não definido.
5.3.3 Transmissão de Dados	Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO VI.....ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

6. RESULTADOS OBTIDOS.....	Erro! Indicador não definido.
6.1 AVALIAÇÃO DOS TESTES COM VoIP	Erro! Indicador não definido.
6.2 AVALIAÇÃO DOS TESTES COM VÍDEO	Erro! Indicador não definido.
6.3 AVALIAÇÃO DOS TESTES COM DADOS	Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO VIIERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

7. CONCLUSÃO.....	Erro! Indicador não definido.
7.1 Considerações Finais	Erro! Indicador não definido.
7.2 CONTRIBUIÇÕES	Erro! Indicador não definido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	Erro! Indicador não definido.
-----------------------------------------	-------------------------------

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A disseminação da informação através dos diversos meios de comunicação com maior velocidade de transmissão, baixo custo e com alta confiabilidade, tem sido uma das metas da população de usuários que cresce a cada dia e se torna mais exigente. Assim os centros de pesquisa têm buscado soluções para o desenvolvimento de tecnologias que apresentem um bom desempenho na transmissão *triple play* (fluxo de dados, voz e imagem), que possam atender as necessidades do mercado. Somado a este fator, tem-se observado o aumento de usuários de internet nos últimos anos, ver figura 1.1, o que implica no aumento de demanda de aplicações multimídia, com especial atenção para os vídeos, agora em alta definição.

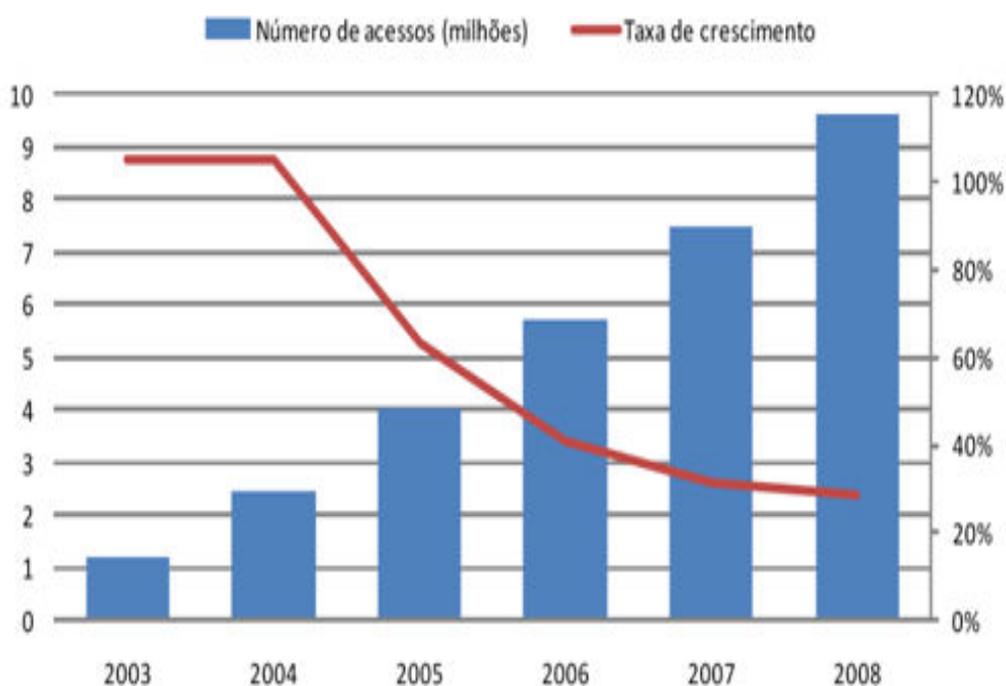


Figura 1.1 – Evolução do Acesso de Banda Larga no Brasil [BRASIL CONECTADO]

Nesse contexto, onde se buscam tecnologias que tragam à população um acesso a informação ubíquo e de qualidade, a baixo custo, através de redes de telecomunicações, surge a tecnologia de acesso *Power Line Communication* (PLC). Um

padrão promissor que vem despertando o interesse da indústria e do meio acadêmico pelo fato de ter como principal característica uma “infra-estrutura pré-existente”, que é um dos aspectos relevantes e diferencial se comparada com outras tecnologias de acesso, seja ela com ou sem fio.

Várias ações de inclusão digital têm sido desenvolvidas no Brasil, são elas: PNBL (Programa Nacional de Banda Larga), GESAC (Programa do Governo Federal e Coordenado pelo Ministério das Comunicações, com o objetivo de promover a inclusão digital em todo o território brasileiro), SBTB (Sistema Brasileiro de Televisão Digital), e a nível local tem-se o NAVAGAPARÁ, onde o PLC é umas das tecnologias que o Governo do Estado do Pará utiliza para levar a municípios distantes da capital e que carecem de acesso a informação, a “inclusão digital” através de redes de telecomunicações, ou seja, a internet. Ela é usada neste projeto como tecnologia de última milha, aquela que chega no usuário final, o que mostra a potencialidade do PLC, pois a energia elétrica chega em quase 95% dos lares do Brasil [ANEEL, 2009], e utilizar o meio elétrico como infra-estrutura de rede e com isso apresentando diversas vantagens, dentre elas destaca-se o custo de se construir uma rede de telecomunicações, quando comparado com as demais tecnologias existentes hoje.

Várias barreiras devem ser vencidas para se transmitir informações sobre a rede elétrica, tais como: a própria rede que não foi construída para suportar o tráfego de informações, e a falta de padronização, constituem-se os principais fatores que dificultam uma ampla disseminação desta tecnologia, aliado a falta de investimentos em pesquisas que possam contribuir para diminuir seus agravantes e torná-la de fato uma solução a ser usada em benefício da sociedade.

A fim de demonstrar que o PLC pode ser uma tecnologia usada por usuários domésticos em vários tipos de aplicação, este trabalho apresenta alguns resultados de testes realizados com tráfego de dados, voz e vídeo em redes PLC *Indoor* (dentro da residência do usuário final).

1.1 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é fazer uma análise qualitativa através de métricas subjetivas e objetivas, de transmissões de dados, voz e vídeos de alta definição em rede PLC Indoor com ambientes controlados, no caso dos testes realizados no Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho (LPRAD) da Universidade Federal do Pará (UFPA), e em um ambiente residencial, analisando o impacto que alguns aparelhos encontrados em residências típicas, como lavadora de roupas, motor bomba d'água, aparelho de ar condicionado, ventilador e liquidificador podem causar durante as transmissões de informações.

1.2. TRABALHOS RELACIONADOS

Vários artigos, encontrados na literatura, estão relacionados com a transmissão de voz, vídeo e dados, além de testes que utilizam a tecnologia PLC (*Power line communication*) em empresas, instituições de ensino e pesquisa. Considerando-se o uso promissor de tecnologias de acesso, o presente trabalho apresenta um estudo com medições de rede em cenários reais, com transmissões de string de dados, testes com telefonia VoIP (Voz Sobre IP), e transmissão/recepção de Vídeo em HD (*High Definition*) em redes PLC *indoor*.

Em [ZENUN et al, 2008] é realizada uma análise através da visão do usuário final de uma aplicação VoIP, são analisadas métricas como a perda de pacotes e o *jitter* durante as chamadas de forma a avaliar a qualidade da chamada.

Análise de parâmetros como taxa de transferência e latência são realizadas para transmissões multimídia em redes banda larga sem fio instaladas em municípios da região amazônica [SOUZA et al, 2009], através de um projeto do governo local que visa disponibilizar acesso gratuito à algumas instituições e departamentos, garantindo assim a inclusão digital.

A tecnologia PLC encontra ainda algumas barreiras que fazem com que sua utilização não seja tão expandida entre o meio comercial, um desses motivos é a perda de dados durante uma transmissão, fato este abordado em [CHEN, 2008], o qual propõe um mecanismo de retransmissão para que assim possa ser garantido a integridade de uma aplicação de áudio ou vídeo por exemplo.

Avaliações da qualidade de vídeos podem ser observadas em [NEVES et al, 2011], [MADEIRA, 2011] e [DUTTAB, 2009], já que algumas métricas utilizadas para voz também são usadas para análises subjetivas (do ponto de vista do usuário) e objetivas de vídeos.

Testes de desempenho de rede através da tecnologia PLC em baixa tensão [SANTOS et al, 2006] com o objetivo de avaliar o comportamento das transmissões, observando a capacidade do canal com a presença de interferência causada por equipamentos domésticos pode ser encontrados neste artigo.

Com o surgimento da Tv Digital, diversas propostas tem sido estudadas para serem utilizadas no canal de retorno [Margalho et al, 2004], uma alternativa para a região amazônica seria baseada no padrão IEEE 802.11 que não necessita de meio físico como os cabos. Parâmetros como vazão, atraso, *jitter*, e probabilidade de bloqueio são investigados.

Em [LEE et al, 2003], é realizado um estudo através de simulações, de streaming de vídeos sobre redes PLC, onde são verificados alguns parâmetros de QoS como PSNR, e parâmetros simples como a distância entre o transmissor e o receptor de vídeo sob demanda por exemplo, estas variáveis são utilizadas para propor um novo mecanismo chamado de Descrição Múltipla de Vídeo baseada em codificação, através do padrão *Homeplug AV*.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação está estruturada da seguinte forma:

O Capítulo 2 os principais conceitos relacionados com a tecnologia PLC, tipos de modulação, canal de comunicação, padrões, topologias, equipamentos necessários para seu uso, as principais características e por fim sua área de aplicação.

O Capítulo 3 aborda os tipos de aplicações que essa tecnologia suporta, como telefonia (Voz sobre IP), transmissão de vídeo, automação, o uso na internet de banda larga, apresenta as características de cada uma dessas aplicações, assim como uma perspectiva do está por vir.

No Capítulo 4 serão apresentadas as métricas utilizadas para as análises de qualidade de serviço e qualidade de experiência, dando-se ênfase para as principais medidas usadas para análise da transmissão VoIP e transmissão de vídeos.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia empregada neste trabalho assim como as ferramentas de análise, o vídeo utilizado, os cenários propostos tanto para as chamadas de VoIP como para a transmissão de dados.

No Capítulo 6 serão mostrados os resultados obtidos com os cenários descritos acima, avaliando as métricas de qualidade como PSNR, MSE, MOS, SSIM, VQM, Perda, Atraso e *Jitter*.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões da dissertação, as considerações finais sobre a tecnologia, e as contribuições geradas por este trabalho.

CAPÍTULO II

2. TECNOLOGIA PLC

Apesar de ter sua aplicação comercial regularizada em diversos países ao longo dos últimos anos, em 1920 concessionárias de energia elétrica já utilizavam a tecnologia PLC em modulação analógica para telemetria, comunicações e controle remoto, aplicações viáveis em banda estreita, uma vez que a transmissão em alta velocidade exigiria altas frequências, cuja tecnologia era indisponível para a época.

Em 1991, a empresa *Norweb Communications*, responsável pela distribuição de energia elétrica em Manchester, começou a realizar testes de banda larga por meio das linhas elétricas. Só em 1997, as empresas *Norweb* e *Nortel* conseguiram resolver questões que eram obstáculos ao longo do desenvolvimento da nova tecnologia, como interferências e ruídos. Ao fim do mesmo ano, as mesmas empresas testaram o acesso à Internet em uma escola, demonstrando as possibilidades da chamada *Digital Power Line* [MEMÓRIA e OLIVEIRA, 2009].

A partir de então, a questão da padronização dos sistemas passou a ser discutida, já que representa um importante aspecto do desenvolvimento dessa tecnologia. Com essa finalidade, foram criados fóruns, principalmente nos Estados Unidos, Japão e Europa. Os mais destacados são: *HomePlug Powerline Alliance*, *PLCForum* e *PLC Utilities Alliance* [TIBALDI e JUNIOR, 2000].

Sendo aplicada na camada de enlace do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), a tecnologia Power Line Communications é compatível com tecnologias já desenvolvidas da mesma camada, podendo também ser utilizada em conjunto com protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) da camada de rede. A transmissão de dados por meio da fiação elétrica utiliza sinais de rádio frequência (RF) enviados nas redes de corrente alternada de baixa e média tensão. Esse envio é feito através da modulação dos dados, em formato digital, com o sinal de rádio, transmitido, então, para as linhas elétricas em frequências próprias [MALATHI e VANATHI, 2007].

Uma das principais questões que se coloca sobre a finalidade da tecnologia PLC seria a de continuar transmitindo o sinal da energia elétrica, juntamente com o sinal de comunicação, sem interferências, através das redes de média e baixa tensão já

disponibilizadas pela distribuição de energia. A solução para esse problema está em efetuar a superposição de um sinal de baixa energia sobre o sinal da energia elétrica [LITTLE, 2004]. Os sinais PLC para banda larga fazem uso de frequências entre 1,7 e 30 MHz. Onde os sinais PLC utilizam intervalos de frequência bem distantes da frequência utilizada pelo sinal de energia elétrica, que é de 50 ou 60 Hz.

2.1 TIPOS DE MODULAÇÃO

Por atuar em um meio cujo objetivo principal não é a transmissão de dados e sim o fornecimento de energia elétrica, os sistemas PLC estão sujeitos a problemas, como interferências e ruídos, o que exige métodos de modulação que sejam capazes de controlar ou diminuir os intempéries presentes na rede elétrica. As técnicas mais estudadas e encontradas na literatura são: *Spread Spectrum*, OFDM e GMSK.

2.1.1- Spread Spectrum

A técnica de *Spread Spectrum*, também conhecida como espalhamento espectral, visa garantir que a densidade espectral de potência do sinal seja muito baixa, procedendo com a distribuição dessa potência através de uma grande faixa de frequências [TIBALDI e JUNIOR, 2000]. Apesar de reduzir o tempo necessário para a transmissão, exige uma largura de banda maior.

A técnica de espalhamento é muito usada em transmissões digitais, principalmente em WLANs, uma vez que, pelo fato de espalharem o sinal na banda de frequência, proporcionam uma série de vantagens que melhoram consideravelmente o desempenho da transmissão. Estas vantagens são:

- Imunidade com relação a ruídos e interferências
- Imunidade a distorções devido a multipercursos
- Imunidade a interferências e de desvanecimentos de banda estreita
- Diversos usuários podem compartilhar a mesma banda de frequência, com baixa interferência

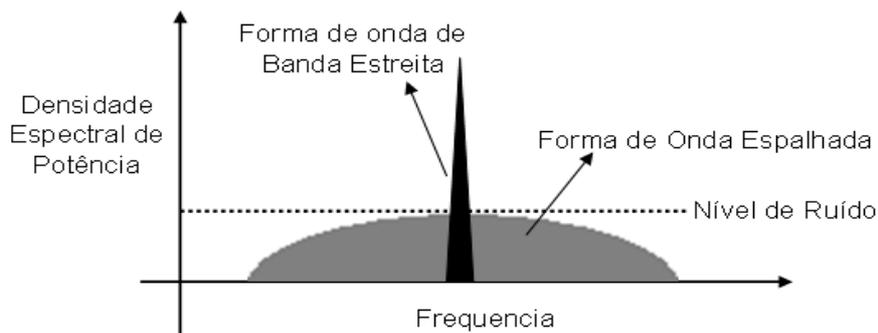


Figura 2.1 – Espectro de um sinal com Modulação *Spread Spectrum*.

A técnica de *spread spectrum*, vista da figura 2.1, consiste em codificar e modificar o sinal de informação executando o seu espalhamento no espectro de frequências. O sinal espalhado ocupa uma banda maior que a informação original, porém possui baixa densidade de potência e, portanto, apresenta uma baixa relação sinal/ruído. Para os receptores convencionais esta comunicação pode até ser imperceptível. Ela é implementada através dos seguintes processos: Salto de Frequência (*Frequency Hopping*), Seqüência Direta (*Direct Sequence*) ou então uma combinação dos dois processos chamada de Sistema Híbrido.

2.1.2- OFDM

A técnica de Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequencia, cuja sigla OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), representa uma abordagem envolvendo modulação com esquemas de múltiplo acesso, conforme mostra a figura 2.2, onde cada canal de comunicação pode ser compartilhado por vários usuários. A modulação ortogonal implementada por esta técnica supera alguns inconvenientes presentes em aplicações que utilizam outros métodos, como Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA) e Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA).

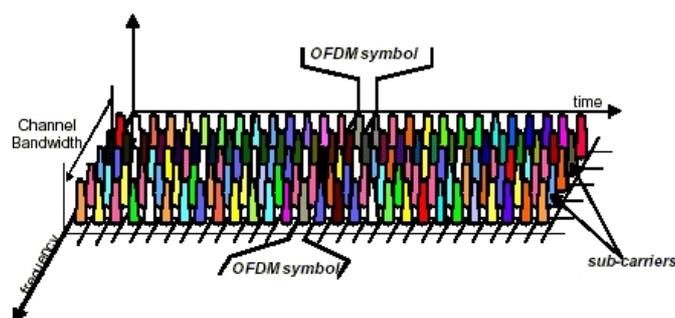


Figura 2.2 – Visão em 3D da Modulação OFDM.

A figura ilustra o esquema utilizado pela modulação OFDM, que aplica uma modulação de blocos, onde cada bloco de informação é transmitido em paralelo e em subportadoras. A largura de banda disponível é dividida em um grande número de subcanais paralelos, sendo que para cada subcanal são destinados bits e recursos, cujo carregamento varia de acordo com a relação sinal/ruído ou atenuação do enlace [MALATHI e VANATHI, 2007]. Com a propagação do ruído através de diferentes frequências, buscando-se a melhor condição para a transmissão dos sinais, estes são modulados em diversas frequências simultaneamente, variando-se também o carregamento dos bits.

A flexibilidade dessa técnica também pode ser destacada pela capacidade de desconsiderar subportadoras com interferência. O uso de amplificadores lineares torna-se necessário a fim de evitar interferências entre as harmônicas das subportadoras.

No processo de modulação OFDM, diversas portadoras em frequências diferentes são utilizadas para modular o sinal digital, sendo que cada portadora transporta apenas alguns bits do sinal original após passar pelos processos de *interleaving*, embaralhamento e incluir códigos de correção de erro. Estas portadoras são ortogonais entre si, para evitar que haja interferência entre elas. Isso significa que o espaçamento entre as portadoras é igual ao inverso da duração de um símbolo. A figura acima mostra como as portadoras são separadas no tempo e na frequência. As portadoras são ilustradas com cores diferentes mostrando que pedaços de um mesmo bit são transmitidos por portadoras distantes entre si tanto no tempo como na frequência.

Normalmente, nos sistemas de TV digital, por exemplo, são utilizadas 2000 ou 8000 portadoras. Estas portadoras podem ser moduladas utilizando, por exemplo, QPSK, 16 QAM ou 64 QAM. Desta forma, cada portadora pode transportar uma taxa relativamente baixa de bits. Além disso, como cada parte do sinal é transportada por uma portadora em uma frequência diferente, isso permite também imunidade ao sinal quanto à interferência em frequências específicas, uma vez que somente uma pequena quantidade de bits serão atingidos, os quais estão bem distantes no sinal original.

2.1.3- GMSK

A técnica GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*), conhecida como Chaveamento por Deslocamento Mínimo Gaussiano, é como um sistema OFDM banda larga. Ele realiza modulação de faixa estreita, transmitindo dados na fase da portadora, o

que resulta em uma envoltória constante. O uso de amplificadores se torna menos complexo, sem resultar em distúrbios harmônicos. A origem do nome da técnica GMSK tem relação no fato de que o espectro do sinal tem um formato semelhante a uma Gaussiana [TIBALDI e JUNIOR, 2000].

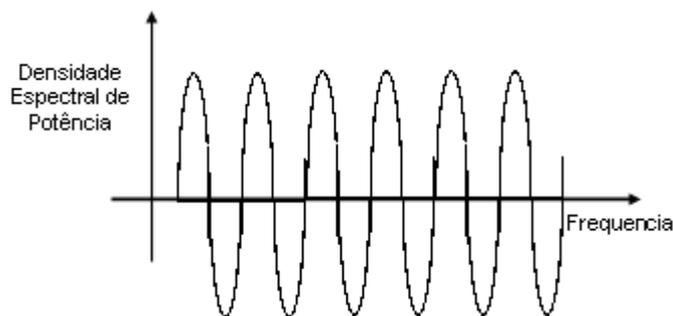


Figura 2.3 – Espectro de um Sinal com Modulação GMSK.

A figura 2.3 ilustra a Modulação GMSK, a qual é o mesmo método de modulação utilizado no GSM (*Global System for Mobile Communications*). O GMSK é um tipo especial de modulação de faixa estreita que transmite os dados na fase da portadora. Isto permite o uso de amplificadores menos complexos, sem produzir distúrbios harmônicos.

Os equipamentos fabricados pela ASCOM utilizam a modulação GMSK, uma modulação robusta contra a interferência de faixa estreita tipicamente presente na faixa de frequência utilizada pelo PLC. O GMSK tem um formato de espectro do tipo Gaussiana, daí a origem do seu nome.

O sistema do PLC usa a codificação para correção de erro. Isto permite a correção de erros de transmissão no lado da recepção. Um código de relação 1:2 é usado, implicando que os dados transmitidos estão duplicados, isto é, para cada bit de dados o sistema do PLC transmite 2 bits no canal correspondente. A experiência tem mostrado, que o canal do PLC é frequentemente de excelente qualidade para as estações próximas da “*Master*”, neste caso não há necessidade de usar o FEC, consequentemente a capacidade do canal é duplicada.

2.3 Canal PLC

A tecnologia PLC utiliza espectro de frequência na faixa de 1,7 MHz a 35 MHz, que é uma faixa diferente da utilizada no sistema de energia elétrica. No sistema

elétrico a faixa espectral é de 50 ou 60 Hz, dessa forma não ocorre interferência do sinal PLC no sinal elétrico devido a grande faixa de frequência que separa os dois sistemas.

No sistema rádio é possível que cabos metálicos possam vaziar radiação provocando interferência e prejuízos nos serviços que utilizam o espectro, sendo assim a tecnologia PLC utiliza faixas que viabilizam seu serviço sem causar interferências ao rádio de ondas curtas ou aos rádios amadores. Em países como EUA e Alemanha foram estabelecidos limites de radiação para que não houvesse interferências entre os serviços PLC e de rádio [HRASNICA e RALF, 2004]. Já para outros serviços como os militares e de segurança usam a faixa de 1,5 a 30 MHz, faixa conhecida por ondas curtas.

Os sistemas PLC podem provocar interferências em outros sistemas licenciados, causada principalmente pela falta de regulamentação da tecnologia pelos órgãos responsáveis, pois no Brasil ainda não existe uma padronização para que haja a criação de uma norma regulamentadora; Pode-se também causar interferências por outros usuários licenciados no sistema PLC em operação, esta ocorre devido a redução do espectro disponível para o sistema, podendo ocorrer a redução da taxa de transmissão, inviabilizando a aplicação. Com isso deve-se levar em consideração o prévio conhecimento dos níveis de sinal interferente.

Muitas dificuldades estão sendo encontradas com relação à aparelhos domésticos que possuem motores (ar condicionados, lavadoras de roupas, bombas d'água, etc.), fontes de alimentação chaveadas e capacitores que são utilizados na correção da potência das lâmpadas de iluminação pública à vapores metálicos, estes necessitam de reatores com alto fator de potência que são diretamente alimentados na rede de baixa tensão, atenuando ainda mais o sinal PLC. Para tentar minimizar estes problemas utilizam-se métodos mais eficientes de modulação como: OFDM e GMSK e a modulação por espalhamento espectral (*Spread Spectrum*).

A maior preocupação da transmissão de dados pela rede elétrica vem sendo a imunidade a ruídos eletromagnéticos gerados por outros dispositivos conectados à rede.

2.4 Padrões

A tecnologia *Power Line Communications* apresenta dois tipos de padrão, diferenciados quanto à localização da aplicação, que são descritos a seguir:

2.4.1 PLC Indoor (PLIC)

Visando tornar todas as tomadas da rede elétrica interna de um ambiente, como uma casa, em pontos de acesso para conexão de redes de transmissão de dados, o padrão *Power Line Indoor Communication* (PLIC) pode, através de uma caixa comutadora, interligar qualquer rede de dados, como uma rede de banda larga, com a rede de energia elétrica interna de um local.

Este sistema abrange o trecho que vai desde o medidor de energia do usuário até todas as tomadas no interior da residência. Caso seja necessário, é instalado um equipamento na entrada do medidor de energia para repetir o sinal para o interior da residência [MEMÓRIA e OLIVEIRA, 2009].

O padrão PLIC – *Power Line Indoor Communication* ou *Internal Telecom* (também denominado de *In-house BPL*), muito difundido nos Estados Unidos, Europa e Ásia, consiste em uma caixa comutadora que interliga uma rede de banda larga, xDSL, WiFi, Cable Modem ou outra qualquer, com a rede elétrica interna de uma casa. Com isso, todas as tomadas estão habilitadas a transmitir dados além da eletricidade, ou seja, funcionariam também como pontos de conexão de uma rede de dados. Para se conseguir esta arquitetura, deve-se utilizar um modem externo especial para converter os sinais. A figura 2.4 mostra um cenário típico de ambientes indoor.

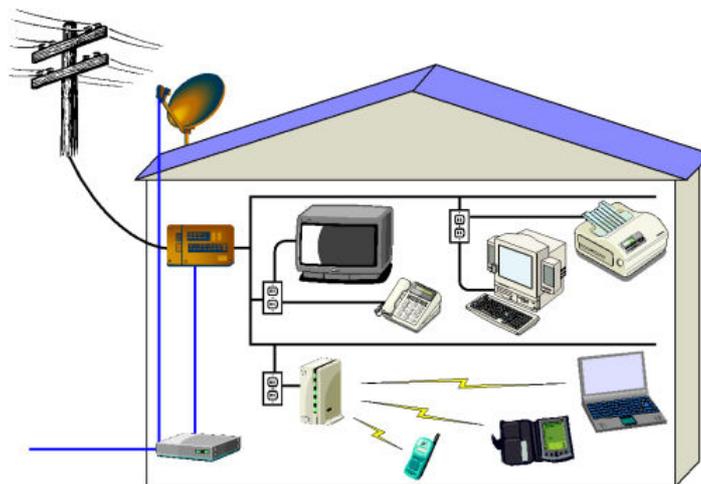


Figura 2.4 – Cenário Típico de uma Rede PLC Indoor

2.4.2 PLC Outdoor (PLOC)

O padrão *Power Line Outdoor Communication* (PLOC) tem em sua configuração um *Master* que, interligado à distribuição secundária ou primária,

responsabiliza-se pela repetição e pelo controle. Caso este *Master* seja instalado na distribuição primária, todas as tomadas do ambiente do usuário também poderiam funcionar como pontos de acesso, de modo semelhante ao que ocorre com o padrão PLIC. Como característica própria, o padrão PLOC apresenta a possibilidade de estipular taxas de transmissão, da mesma maneira como acontece em serviços de banda larga [MEMÓRIA e OLIVEIRA, 2009].

É composto pela rede elétrica que vai desde o transformador de distribuição (lado de baixa tensão) até o medidor de energia elétrica residencial, a figura 2.5 ilustra a disposição do padrão PLOC. Na rede secundária do transformador é instalado o transceptor de sinais para a rede de baixa tensão para conectar o *backbone* Internet à rede elétrica. Neste ponto existe uma conversão de tipo do sinal para que os dados possam ser injetados na rede elétrica. Posteriormente no modem PLC será realizado a operação inversa para inserir dados TCP/IP no computador cliente.

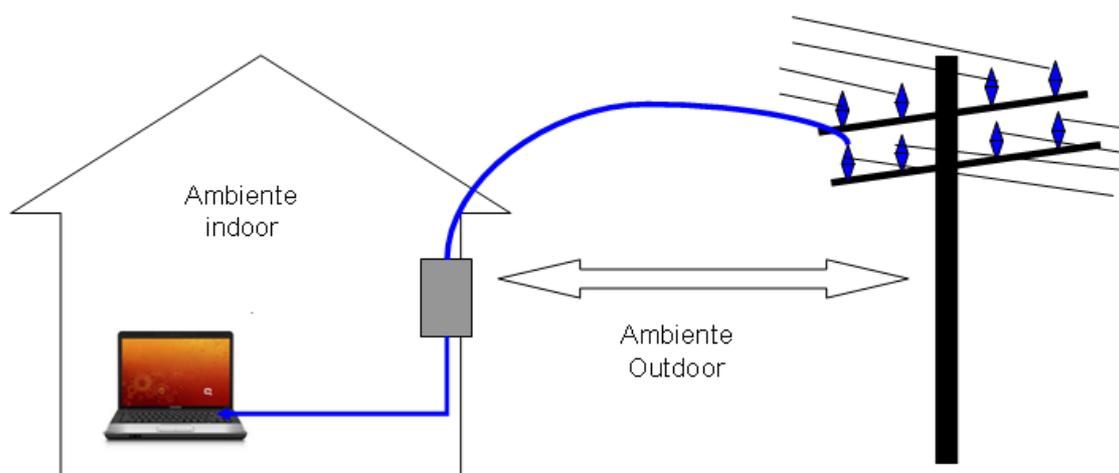


Figura 2.5 – Visualização do padrão Outdoor PLC

O padrão PLOC funciona basicamente como redes de TV à cabo, por exemplo. Nesta configuração, há o papel do *Master*, o qual é responsável pelo controle e pela repetição, que é conectado à distribuição secundária ou primária. O número de usuários que podem ser conectados em um mesmo *Master* varia, porém geralmente o número máximo são 40 usuários. Segundo alguns testes que estão sendo feitos, caso o *Master* esteja na rede de distribuição primária, ou seja, na rede elétrica que apresenta tensão de 13,8 KV, poderá cobrir uma área de até 2 Km, sem perdas. Com esta configuração, assim como a configuração PLIC, todas as tomadas estariam prontas para servirem de

ponto de acesso, diferenciando-se apenas no modo de controle e local de interligação dos equipamentos elétricos e de transmissão de dados.

Uma outra característica do tipo PLOC é a possibilidade de se personalizar a taxa de transmissão de acordo com o contrato de assinatura do usuário, tal como existe hoje em serviços ADSL e *Cable Modem*.

2.4.3 Homeplug

Visando fornecer serviços de qualidade em redes domiciliares, o padrão de rede HomePlug faz uso da fiação elétrica já presente no ambiente de sua implementação. O padrão HomePlug 1.0 teve sua especificação detalhada pela *HomePlug Powerline Alliance* e sua camada física utiliza a técnica OFDM em uma banda de aproximadamente 4.49 a 20.7 MHz [LEE et al., 2003].

A camada de acesso do padrão *HomePlug* utiliza o método de múltiplo acesso CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), que busca detectar e evitar colisão, uma vez que tal objetivo seria de grande dificuldade em um meio como as redes elétricas, com presença de ruído e atenuação. Juntamente com essa técnica, são definidos quatro níveis de acesso ao meio, seguindo uma prioridade que varia de acordo com o tipo de tráfego, sendo esta prioridade conhecida como CAP (*Channel Access Priority*). As prioridades são definidas através de classes, variando desde a classe CAP0 até a classe CAP3, sendo esta última a de maior prioridade.

Antes de iniciar uma transmissão, cada estação precisa verificar se o meio está ocupado. A estação aplica a detecção física PCS (*Physical Carrier Sense*), buscando reconhecer sinais de prioridade em outras transmissões, além da detecção virtual da portadora VCS (*Virtual Carrier Sense*), que tenta determinar um vetor de alocação através do quadro “escutado” no meio, o que possibilita conhecer o período de transmissão do quadro atual [CAMPISTA et al., 2005].

Em termos de formatos de quadro utilizados ao longo das transmissões, o padrão HomePlug versão 1.0 define dois tipos: um destinado ao transporte dos dados, referenciado como quadro longo, e outro responsável por transmitir a resposta, com o reconhecimento do envio de quadros, conhecido como quadro curto.

O quadro longo, ilustrado na figura 2.6, é formado por três estruturas básicas: um delimitador de início SOF (*Start of Frame*), um espaço destinado à carga útil, indicado por *payload*, um campo conhecido como EFG, cuja sigla significa *End of Frame Gap*,

além de um delimitador de fim de quadro EOF (*End of Frame*). Já o quadro curto, figura 2.7, possui apenas um delimitador de resposta em seu formato.

	25 bits	17 bytes	Tamanho variável	Tamanho variável	2 bytes		25 bits
Preâmbulo	Frame Control	Frame Header	Corpo	PAD	FCS	Preâmbulo	Frame Control
SOF		Payload				EOF	

Figura 2.6 - Quadro *Homeplug* Longo: Transporte dos Dados.

	25 bits
Preâmbulo	Frame Control
Resposta	

Figura 2.7 – Quadro *Homeplug* Curto: Transmissão da Resposta com Reconhecimento.

É importante destacar melhor características específicas de cada estrutura básica. Os delimitadores, tanto os de início e de fim como os de resposta, compartilham do mesmo tipo de esquematização. Cada delimitador possui outros dois campos, conhecidos como preâmbulo e controle de quadro FC (*Frame Control*).

O preâmbulo é destinado para fins de sincronismo, detecção de portadora e controle automático de ganho. Seu campo é preenchido com símbolos OFDM e sua duração é de 38,4 ms. Já o controle de quadro é formado por vinte e cinco bits, onde: o controle de disputa é identificado por um bit, cujo valor é 1 até o último segmento durante uma rajada de quadros; o tipo de delimitador é conhecido por três bits, diferenciando entre SOF, EOF e delimitador de resposta; o campo variante ocupa treze bits, que possui organização diferente dependendo do tipo de delimitador; e oito bits são destinados à sequência de verificação, conhecida como CRC (*Cyclic Redundant Check*), que realiza cálculo sobre os outros dezessete bits [FERREIRA, 2005].

No que diz respeito ao campo variante, quando se trata de um delimitador de início, oito bits são destinados ao comprimento do quadro e cinco bits ao índice de mapa de tons. No caso de ser um delimitador de fim de quadro, dois bits são voltados para a prioridade de acesso ao meio, importantes para transmissões em rajadas. Para enviar uma mensagem de reconhecimento ACK, dois bits copiam a prioridade do

quadro reconhecido e os demais onze bits repetem os onze bits menos significativos da sequência de verificação do quadro que originou a resposta. Quando ocorrer um NACK, dois bits identificam a prioridade de acesso, um bit reconhece como sendo um NACK, cujo valor é 0, e dez bits voltados para a verificação. No caso de um FAIL, dois bits continuam identificando a prioridade, um bit reconhece como sendo um FAIL, cujo valor passa a ser 1, e dez bits destinados à sequência de verificação.

O campo de carga útil do quadro longo também conta com espaços para cabeçalho, os dados em si, enchimento de bloco, usado no último segmento de um quadro, preenchendo o bloco físico com zeros, e sequência de verificação de quadro, ocupando dezesseis bits, calculado a partir de todos os demais campos do espaço de carga útil. Cabe ressaltar também que o espaço de fim de quadro EFG tem um período de duração de 1,5 μ s.

O campo de cabeçalho, conhecido como *Frame Header*, contém três estruturas principais, como controle de segmento, além dos endereços de quarenta e oito bits de origem e de destino. O campo de controle de segmento conta com três bits para controle de versão, dois bits são reservados, um campo de sinalização para *multicast*, a prioridade de acesso conta com dois bits, o comprimento de segmento utiliza quinze bits, um bit reservado para indicar caso de último segmento, seis bits são destinados para contagem de segmento, que juntamente com os que dez bits para números de sequência, são utilizados para remontagem e segmentação [FERREIRA, 2005].

A tecnologia *Homeplug* possui ainda outros equipamentos com especificações direcionadas para aplicações específicas como o *Homeplug AV*, *AV2*, *GreenPhy*, *Acess BPL* e outros

2.5 Topologias

Como as redes elétricas foram originalmente propostas e desenvolvidas apenas para a transmissão de energia elétrica, torna-se importante verificar as características da topologia das redes de geração, transmissão e distribuição do sistema elétrico, a fim de viabilizar serviços de qualidade na transmissão de dados a partir das redes PLC [15 FERREIRA, 2005].

Em termos de geração da energia, deve-se considerar de forma geral o processo de transformação de energia mecânica em energia elétrica, traço marcante que

caracteriza a fonte de geração de energia do tipo hídrica, bem difundida no Brasil. Além desse tipo, há fontes de energia do tipo nuclear e térmica, além das chamadas fontes de energia alternativas, como eólica e solar.

Direcionando-se a visão para o meio de transmissão, verificam-se dados interessantes quanto à forma como a energia elétrica é enviada das estações de distribuição até o ambiente do consumidor final. Buscando-se uma maneira eficiente de se transmitir a energia a partir das usinas de geração, toda a energia gerada é destinada a subestações que elevarão a sua tensão a patamares entre 69 kV e 750 kV. Após essa etapa, a energia é transmitida por meio das linhas de transmissão até alcançar subestações nos centros consumidores, que serão responsáveis por reduzir a tensão a níveis de 13,8 kV a fim de transmiti-las aos consumidores. Essa etapa da transmissão é conhecida como distribuição primária, onde a energia é enviada das subestações até os transformadores em postes, que reduzirão novamente a tensão, nesse caso para 127/220 V, configurando a distribuição secundária, onde a energia finalmente alcança as casas e edifícios, onde será consumida [FERREIRA, 2005]. A Figura 2.8 ilustra o esquema da topologia do sistema elétrico.

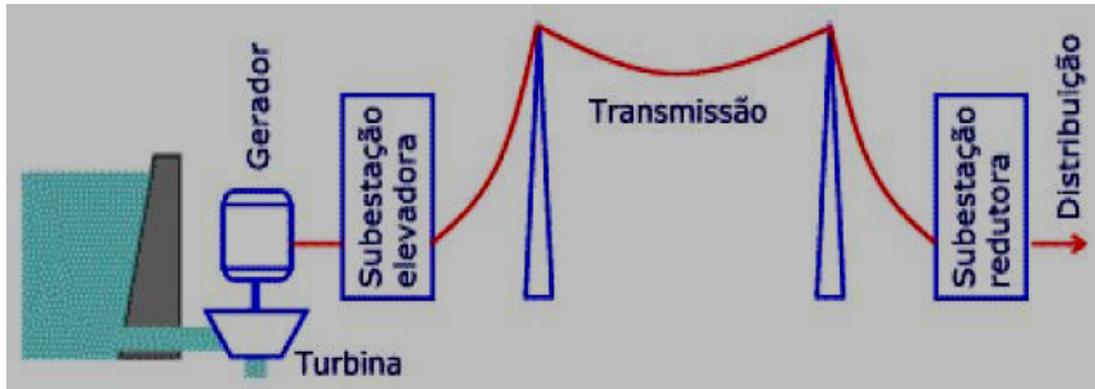


Figura 2.8 – Exemplo de Topologia de um Sistema Elétrico.

A organização da rede que incorpora a tecnologia PLC de transmissão de dados sobre a fiação elétrica segue uma topologia que distingue quatro níveis principais, sendo: Rede Interna, Rede de Acesso, Rede de Distribuição e Rede de Transporte. Cada um dispõe de especificidades e conta com características importantes na interligação com os demais níveis.

A Figura 2.9 ilustra o esquema da topologia das redes PLC.

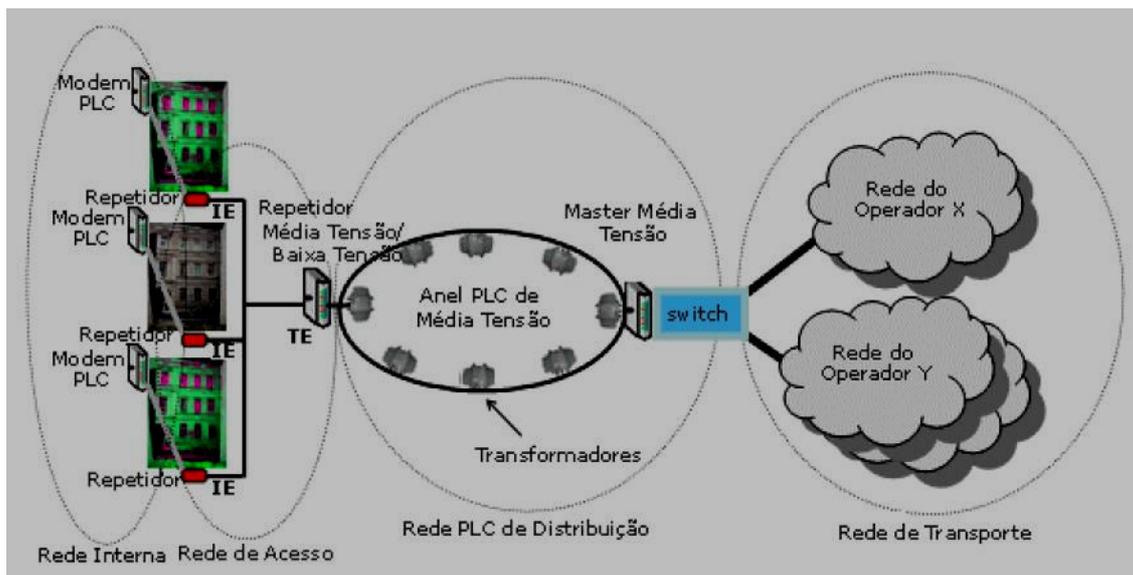


Figura 2.9 – Topologia de uma Rede PLC.

A Rede Interna corresponde à rede de distribuição de energia elétrica já instalada no local de acesso do usuário final. Os *modems* que ligam os equipamentos à rede também fazem parte da Rede Interna, podendo ser interconectados às tomadas existentes no ambiente. Já a Rede de Acesso é estruturada sobre a rede de baixa tensão, iniciada a partir do medidor de energia localizado no ambiente do usuário e tendo como extremidade final o equipamento transformador, na transição entre as redes de baixa e média tensão. A Rede de Distribuição, por sua vez, interconecta subestações de média tensão, até ligar-se com a Rede de Transporte da operadora de telecomunicações. Nesse nível da topologia ocorre a junção entre a transmissão de energia elétrica e a transmissão de dados [FERREIRA, 2005]. Por fim, a Rede de Transporte representa a conexão da rede PLC com as redes dos provedores de serviço, onde são estabelecidas ligações com pontos de acesso à Internet e serviços de telefonia [LITTLE, 2004].

2.6 Equipamentos que Compõe Uma Rede PLC

A tecnologia PLC foi desenvolvida com o objetivo de utilizar as redes de distribuição de energia elétrica como meio físico para o transporte dos sinais de telecomunicações. A configuração básica de uma rede PLC é constituída por um equipamento "*Master*" instalado próximo ao transformador de baixa tensão que tem a função de gerenciar e distribuir/concentrar a transmissão das informações aos equipamentos "*Modem*" que são instalados nos assinantes.

Portanto, em uma rede PLC os enlaces de Telecomunicações são estabelecidos no segmento da rede de distribuição de energia elétrica, entre o transformador de baixa tensão e as instalações dos clientes/assinantes. Onde os equipamentos terminais ("*Modem*") são conectados às tomadas de energia [MEMÓRIA e OLIVEIRA, 2009].

A Topologia da rede PLC é ponto-multiponto e tem configuração de rede local (LAN - *Local Area Network*) utilizando o TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) como protocolo.

Certos dispositivos caracterizam as redes de distribuição e acesso em um sistema baseado em PLC. Alguns dos principais equipamentos, que se integram à rede e possuem diferentes funcionalidades, serão descritos a seguir:

2.6.1-Modem PLC

Também conhecido pela sigla de CPE (*Customer Premise Equipment*), o *modem* recebe, além do sinal de dados, a própria energia elétrica. É o equipamento utilizado para conectar o usuário a operadora de serviço de telecomunicações, onde o modem do usuário é conectado com um repetidor [FRANÇA et AL., 2006]. Este dispositivo localiza-se no ambiente do usuário final, nos casos mais gerais sendo em residências ou pontos de acesso. Existem *modems* específicos para determinados serviços, como aqueles voltados para Internet, contando com conexões Ethernet RJ45 (figura 2.10) e USB, os destinados à telefonia juntamente com Internet, acompanhando *sockets* RJ11 com conexões USB e Ethernet, além de modems destinados unicamente à telefonia, possuindo apenas o *socket* RJ11. Dispositivos com funcionalidades extras como Wi-Fi também já estão disponíveis. O *modem* destina o tráfego de voz e dados para o dispositivo adequado, de acordo com as conexões disponíveis.



Figura 2.10 - Modems PLC Encontrados no Mercado

O Modem PLC adquire o sinal de dados diretamente da rede elétrica através de uma tomada simples. Neste modem existe um filtro passa alta para os sinais de dados e um filtro passa baixa para os sinais elétricos.

2.6.2-Repetidor

O repetidor, figura 2.11, é um equipamento intermediário em uma rede PLC, também chamado de *gateway* PLC (HG – *Home Gateway*). Sua instalação normalmente é realizada em algum ponto intermediário entre as estações de média ou baixa voltagem e o ponto de acesso. Sua função principal é recuperar e reinjetar o sinal proveniente do transformador na rede elétrica de baixa voltagem do local de acesso, com um alcance de até 300 metros. Sua aplicação não é obrigatória, de acordo com a conexão estabelecida na rede elétrica entre o transformador e o *modem*, que pode gerar atenuação do sinal. Nessa situação, o repetidor amplia a banda e a cobertura [LITTLE, 2004]. Pode ser chamado de MASTER e pode atender até 256 modems quando colocado no quadro elétrico principal da residência ou edifício.



Figura 2.11 – Repetidor de Sinal PLC.

2.6.3-Acopladores

São necessárias unidades especiais a fim de adaptar o sinal de telecomunicações, a partir dos equipamentos PLC, com o sinal que segue pelas redes de energia elétrica. O modelo de acoplador a ser utilizado vai depender das características da rede, variando

com a qualidade do sinal, bem como com a facilidade de instalação [FERREIRA, 2005]. São conhecidos dois tipos de acopladores: os indutivos, que injetam o sinal nas linhas de energia por indução, e os capacitivos, que transmitem o sinal por contato direto com a rede elétrica, um exemplo deste é mostrado na figura 2.12.



Figura 2.12 - Acoplador de rede elétrica.

2.6.4-Caixa de Distribuição

Este equipamento é um acessório utilizado visando à distribuição do sinal em painéis elétricos (figura 2.13). Costuma vir com filtros de ruídos, causados por outros aparelhos eletrônicos na rede.



Figura 2.13 - Caixa de Distribuição.

2.6.5-Estação Base

Chamado de *Head End* é o equipamento que faz a interface de comunicação com outras tecnologias, comumente é instalado nos centros de transformação da companhia. O repetidor conecta-se a ele para injetar o sinal de dados na rede elétrica.

2.7 Características

Como toda tecnologia, as redes *Power Line Communications* também possuem vantagens e desvantagens em sua aplicação. A principal vantagem do PLC sobre as outras tecnologias é a utilização de uma infra-estrutura física já existente. Todos os edifícios, apartamentos e casas já possuem uma rede elétrica instalada. Isto permite conectar um computador ou qualquer outro dispositivo na tomada e receber um sinal. Nenhum cabeamento adicional é necessário.

Por outro lado, as linhas de potência são um dos meios mais inóspitos à comunicação de dados, apresentando diversas desvantagens.

2.7.1 Vantagens

A fim de se mostrar uma tecnologia eficiente, com diferenciais que a tornem competitiva perante os demais padrões existentes no mercado, o sistema PLC possui alguns fatores que merecem destaque:

- **Infraestrutura:** a utilização da malha elétrica como infra-estrutura, evitando gastos maiores com adaptação do ambiente, é considerado um dos maiores atrativos da tecnologia PLC, esse aspecto torna a implantação de redes PLC um grande incentivo no sentido de expandir o acesso a serviços como Internet banda larga e telefonia.
- **Segurança:** questão da segurança na tecnologia PLC é um dos fatores que mais suscita questionamentos. O método empregado no sentido de evitar esse problema é o algoritmo criptográfico DES (*Data Encryption Standard*), faz uso de substituição e deslocamento de bits repetidas vezes, seguindo um processo controlado por uma chave

2.7.2 Desvantagens

Por basear seu funcionamento sobre um meio projetado inicialmente para apenas a distribuição de energia elétrica, a tecnologia de transmissão de dados sobre as linhas elétricas apresenta algumas dificuldades em sua aplicação. Os estudos nessa área,

juntamente com o desenvolvimento de novos padrões para as redes PLC, buscam propor métodos de superar tais obstáculos.

- **Limitações:** com o objetivo de garantir certa qualidade na prestação do serviço, foi estabelecido um número máximo em termos de equipamentos numa mesma rede PLC.
- **Impedância:** a questão da impedância de uma rede está diretamente relacionada ao custo de saída dos transmissores.
- **Atenuação:** em transmissões que utilizam altas frequências, a distância percorrida pelo sinal revela outro problema comum em redes PLC: a atenuação. Essa questão também é evidenciada por descontinuidades ao longo da fiação elétrica, como: tomadas, interruptores e emendas feitas nos fios. Atenuação de acordo com a frequência: divisores de tensão, acoplamento entre fases;
- **Ruído:** um dos problemas mais discutidos em termos de tecnologia PLC diz respeito à sua suscetibilidade a ruídos. A interferência causada por aparelhos eletroeletrônicos insere ruídos no canal de transmissão, reduzindo a qualidade da transferência de dados. Essas interferências são denominadas de ruídos impulsivos e podem ser classificadas em: impulso síncrono, impulso tonal de interferência não intencional, impulso tonal de interferência intencional, impulso de alta frequência e impulso de apenas uma ocorrência [FERREIRA, 2005].

2.8 CAMPOS DE APLICAÇÃO

Na implementação de uma rede PLC existe um conjunto de benefícios potenciais para o serviço de utilidade pública e para a prestação de serviços pela empresa de energia na medida que possibilita um incremento de eficiência operacional e utilização da sua infra-estrutura, permitindo o acréscimo de serviços de valor adicionado ao portfólio da empresa. Os campos de atuação incluem a leitura automática de medidores, supervisão e gestão da empresa, análise de sobrecargas, notificação de quedas, supervisão de perda de fase, caracterização de falhas, e muitas outras. Outras aplicações adicionais podem ser instaladas, como [DELGADO, 2006]:

- Tele-controle de subestações de transformadores;

- AMR – *Automatic Meter Reading*: Leitura remota de parâmetros de energia elétrica, tensão, corrente e potência;
- Voz corporativa, ou seja, para o pessoal interno a corporação baseada em VoIP;
- Tarifação sobre leituras em tempo real;
- Autorização e desconexão remotas de interruptores e dispositivos pelos utilizadores por razões de segurança e controle operacional de ações remotas;
- Comparação entre a energia fornecida pelos transformadores e a energia consumida;
- Detecção de roubos e prevenção de uso não autorizado de medidores;
- Supervisão da qualidade de serviço fornecida a cada consumidor (por exemplo, número e extensão das interrupções de serviço);
- Detecção de fraudes;
- Previsão de consumo, gestão do consumo, e serviço automatizado dos utilizadores;

A tecnologia PLC pode contribuir para complementar o conjunto de aplicações de telecomunicações existentes, tanto no nível metropolitano (por exemplo, WiFi, 3G) quanto no nível doméstico (jogos, vídeo sob demanda, vídeo conferência, casas inteligentes, rede residencial, segurança e alarmes).

Finalmente, pela forma como a tecnologia vem sendo planejada, todas as potenciais aplicações dos Serviços Internet e protocolos IP poderão ser implementados sobre redes PLC, por exemplo *Teleworking*, *Telemedicina* e *e-Health*, *e-Learning*, *e-Government*, com alta disponibilidade da largura de banda, fornece uma plataforma de comunicações bidirecional em banda larga, útil em uma ampla variedade de aplicações e serviços de valor acrescentado [Little, 2004].

CAPÍTULO III

3. APLICAÇÕES

As possibilidades de serviços oferecidos pela tecnologia PLC variam entre diferentes áreas. Os modelos de negócios a serem postos em prática visam oferecer serviços de qualidade que representam concorrência direta para outras tecnologias. No entanto, alguns serviços têm nas redes PLC o sistema mais adequado, ou cuja implementação comercial seria de maior dificuldade a partir de outra tecnologia, como gerenciamento e medição de energia elétrica, controle de utensílios domésticos e automação de partes de uma casa [20 LOUIE et al., 2006]. A seguir serão descritas algumas das aplicações das redes baseadas no sistema PLC com maior potencial em termos comerciais.

3.1 TELEFONIA: TRANSMISSÃO VOIP

A crescente demanda por serviços de qualidade no que diz respeito a serviços de telefonia baseados em VoIP (*Voice over Internet Protocol*) coloca a tecnologia PLC como importante competidor nesse cenário, podendo atuar futuramente como agente principal na oferta desse serviço ou mesmo complementar as soluções já existentes. Como a qualidade da telefonia IP vem progredindo, tomando espaço da telefonia tradicional em alguns setores, a competição nessa área tende a aumentar. As redes PLC demonstram vantagem nesse tipo de aplicação, uma vez que priorizam dados de VoIP ao longo de transmissões [ALVES, 2004].

O fornecimento de telefonia através de VoIP (protocolos SIP, H.323) ratifica a posição de PLC como uma alternativa de redes de acesso de telecomunicações. A telefonia voz sobre IP está atingindo os níveis de qualidade da telefonia tradicional comutada e os experimentos na Europa confirmaram essa elevada qualidade através da preferência dos usuários [GHIATA e MARCU, 2010]. A tecnologia PLC permite

priorizar os dados VoIP na entrega de tráfego a rede, para obter a máxima qualidade no serviço.

Um dos benefícios imediatos para a concessionária de energia elétrica com o uso da tecnologia PLC, pode ser a aplicação de voz corporativa, onde as chamadas telefônicas entre usuários da mesma rede de distribuição não necessitam ser comutadas para as redes de prestadoras de serviços de telecomunicações. Isto significa que o serviço de voz é fornecido sem custos adicionais quando as duas partes da chamada são usuários da mesma rede PLC.

O VoIP é a tecnologia que torna possível realizar ligações telefônicas utilizando uma rede de comutação de pacotes IP [ZENUN et al, 2008]. Para que ela seja possível é necessária a transição de uma infraestrutura de telefonia de circuitos digitais comutados para a comutação de pacotes. Outros aspectos dessa mudança são os que impactam diretamente na qualidade do serviço oferecido, como a qualidade da voz em redes que utilizam o protocolo IP, onde tem-se como os principais fatores que afetam esta qualidade, a latência, o *jitter* e a perda de pacotes.

3.1.1 Características

A inclusão do serviço de voz na oferta de conectividade via PLC é um grande atrativo para a implantação do PLC na rede, devido à inclusão do serviço a um baixo custo, principalmente na expansão da rede. Entretanto o serviço de voz em redes de dados sofre com a qualidade ofertada pela rede e por equipamentos que a constituem. A voz no sistema PLC será transmitida sobre um protocolo de rede, no caso o IP, portanto é recomendável a comprovação da qualidade de voz que tanto os equipamentos quanto à solução proporcionam ao referido serviço. Isto para assegurar a oferta de uma qualidade mínima ao serviço de voz. Além da qualidade, é necessário também realizar testes de protocolos para a verificação da implementação e suas limitações, como, por exemplo, a disponibilidade de serviços suplementares (chamada em espera, transferência, etc.).

Os parâmetros mínimos recomendados a serem verificados são:

- avaliação do protocolo de VoIP e levantamento de limitações da implementação;
- testes de verificação do protocolo utilizado;
- tamanho de pacotes das amostras de voz;
- medida objetiva da qualidade de voz;

- medida objetiva da qualidade de voz por sentido da chamada;
- levantamento dos benefícios e insumos da utilização ou não de VAD (supressão de silêncio);
- indicação e verificação do CODEC a ser utilizado;
- avaliação do eco proporcionado pelo sistema à chamada de voz;
- atraso da voz na rede;
- verificação da transmissão de fax, modem e dígitos DTMF pela rede;
- levantamento dos parâmetros de configuração de voz e análise crítica.

As normas utilizadas para qualidade de voz são:

- ETSI --> série TR 101 329
- ITU --> P.861 (PSQM+)
- ITU --> P.862 (PESQ)

3.2 TRANSMISSÃO DE VÍDEOS HD

A conexão de banda larga fornecida pela transmissão de dados através da fiação elétrica apresenta meios suficientes para possibilitar serviços como videoconferência, televisão digital e outras aplicações audiovisuais. Comparando-se a eficiência nesse tipo de serviço com outra tecnologia como as redes sem fio, verifica-se certa equivalência com relação a confiabilidade por parte das redes PLC, que apresentam alguns problemas de interferência em seu meio físico, já com as redes sem fio, os obstáculos encontrados são as barreiras de propagação durante o percurso das transmissões. O ponto contrário seria a atenuação, em uma comparação com a tradicional banda larga através de cabos. De modo geral, com o desenvolvimento da tecnologia PLC, será possível transmitir vídeos de cada vez maior qualidade [MARKARIAN & HUO, 2005].

Recentemente tem sido cada vez mais visível o grande crescimento do suporte aos mais variados tipos de aplicações em tempo real pelos sistemas de telecomunicação, dentre os quais um dos mais utilizados tem sido o de transmissão de vídeo.

3.2.1 Características

A transmissão de vídeo na Internet através de fluxo contínuo de vídeo (*streaming*) permite que o usuário assista ao vídeo em tempo real. Além disso, não é necessário aguardar todo o tempo de recebimento da integralidade do vídeo para assisti-lo. Assim que a conexão é estabelecida e os primeiros quadros de vídeo começam a chegar ao destinatário, este pode começar a assistir ao vídeo [SILVEIRA, 2011].

Os principais problemas relacionados à transmissão de fluxo contínuo de vídeo residem no grande volume de dados que devem ser transmitidos com baixa tolerância a atrasos. Porém aplicações que envolvem transmissão de vídeo são muitas vezes mais tolerantes à degradação por atraso e *Jitter* que aplicações de voz devido à utilização de *buffers*.

Os requisitos de largura de banda necessários para transmissão de vídeo variam de alto para baixo dependendo do vídeo a ser enviado pela rede [DARONCO, 2009]. Porém com o crescimento do uso no formato de alta definição esses valores tendem a ser cada vez maiores. Na compressão usando MP4, os requisitos mínimos são os seguintes [ITU-T P-900]:

- **Taxa de Transferência:** 5Kbps – 2 Mbps
- **Atraso:** < 200 ms;
- **Jitter:** < 25 ms;
- **Perda de Pacotes:** Até 5%.

Na prática, nem sempre estes valores seguem uma regra rígida, já que muitas vezes essas aplicações possuem requisitos diferentes devido a necessidade específica.

3.3 AUTOMAÇÃO

Com a realidade de uma rede doméstica interna baseada na tecnologia Power Line Communications, estabelecendo o conceito de “*Home Area Network*”, algumas aplicações de automação, estendendo a ideia de casa inteligente, seriam viáveis, como automatização do funcionamento de aparelhos de ar condicionado, controle de temperatura, acendimento de lâmpadas, além de outros [LITTLE, 2004].

3.4 INTERNET BANDA LARGA

Considerada como a principal aplicação do leque de possibilidades da tecnologia PLC, a Internet Banda Larga por meio das linhas de energia unificaria a conexão de grande parte dos dispositivos que acessam a Internet, uma vez que essa parcela também se liga à rede elétrica. Além desse aspecto, como a necessidade de se estar conectado à Internet é tão grande quanto à necessidade de ligação às redes de energia elétrica [GALLI et al., 2003], somando-se ao fato de que a instalação de infraestrutura em determinadas regiões ainda representa um processo complexo e caro, aproveitar a base da fiação elétrica já presente como infra-estrutura para servir como meio de conexão à Internet, com velocidades de transmissão razoáveis, demonstra ser uma opção de grande impacto.

Sendo importante destacar o fato de que o serviço de acesso à Internet a partir de redes PLC possui semelhanças com outros serviços já existentes, os serviços que envolvem telecomunicação sobre a fiação elétrica também são baseados sobre os protocolos TCP/IP e atingem velocidades máximas de 45 Mbps [LITTLE, 2004].

3.5 PERSPECTIVAS

Atualmente, alguns padrões seguem diferentes linhas no que diz respeito ao mercado de redes domésticas (*Home Networking*) através da fiação elétrica. Isso dificulta a aceitação e expansão da tecnologia. As principais organizações que propõem esquemas para a tecnologia Power Line Communications são: *High-Definition Power Line Communication* (HD-PLC) *Alliance*, *HomePlug Powerline Alliance* (HPA) e *Universal Powerline Association* (UPA).

A *HomePlug Powerline Alliance* anunciou, em 2005, o padrão HomePlug AV, com o objetivo de suportar transmissões de dados e conteúdos de entretenimento com taxas de até 200 Mbps, permitindo assim distribuir sinais de HDTV (*High Definition Television*) e SDTV (*Standard Definition Television*) para toda uma residência através da fiação elétrica [LEE et al., 2003]. Esse padrão possui compatibilidade com o sistema HomePlug 1.0, destacando-se pelo fato de seu método de acesso ao meio suportar tanto CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), fornecendo quatro níveis de prioridade, como TDMA (*Time Division Multiple Access*), garantindo Qualidade de Serviço (QoS – *Quality of Service*), por meio de reserva de banda, confiabilidade e controle de latência [HOMEPLUG POWERLINE ALLIANCE, 2005].

A adoção de um padrão único garantiria compatibilidade com outros sistemas, simplicidade de instalação, redução de custos e consolidação de mercado. Nesse sentido, o *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T) passou a desenvolver um projeto, denominado G.hn, em 2006 com o objetivo de se tornar um padrão mundial de telecomunicações operando sobre linhas elétricas, telefônicas e cabos coaxiais, alcançando taxas de até 1 Gbps. O padrão G.hn é apoiado pelo *HomeGrid Forum* e por um conglomerado de empresas [OKSMAN e GALLI, 2009]. Atualmente, o grupo IEEE P1901, formado por pesquisadores do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), é o responsável por decisões na definição do padrão global para a tecnologia de transmissão de dados através das linhas elétricas.

O Brasil apresenta um cenário cuja aplicação da tecnologia PLC poderia ser de grande valia. Considerando as características desse cenário, onde a capilaridade das redes de energia elétrica atingem cerca de 98% do território brasileiro, o sistema PLC representaria uma alternativa de inclusão digital, como uma nova proposta para a questão da última milha, a largura de banda insuficiente na rede entre o usuário final e o provedor de Internet [MARTINHÃO, 2007].

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) realizaram testes ao longo dos últimos anos a fim de determinar a viabilidade da tecnologia e proceder com sua regulamentação. Após várias audiências públicas e contribuições de diversas organizações, em agosto de 2009, a ANEEL aprovou uma Resolução estabelecendo um regulamento para a utilização da tecnologia PLC no Brasil, mais especificamente sobre a infra-estrutura das empresas que realizam a distribuição de energia. Há expectativa por um acesso mais amplo à Internet por parte da população, uma vez que a penetração dos serviços de telecomunicação no país ainda é reduzido se comparado com o sistema de redes de energia elétrica [MARTELLO, 2009].

Após a regulamentação por parte da ANEEL, as empresas, tanto as distribuidoras de energia, como as que serão provedoras de conteúdo, já podem se organizar a fim de disponibilizar o serviço à população [ANEEL, 2009]. A ANEEL fiscalizará apenas o serviço de distribuição da energia elétrica, enquanto que a transmissão de dados ficará a cargo da ANATEL.

Apesar de estar de certo modo atrasado em relação a alguns países no que diz respeito à aplicação de serviços das redes PLC, o Brasil tende a ganhar benefícios com a

implementação dessa tecnologia. O aumento da concorrência no setor de telecomunicações pode trazer vantagens para a população, reduzindo o custo dos serviços, além de buscar-se maior qualidade na oferta dos mesmos.

CAPÍTULO IV

4. MÉTRICAS PARA ANÁLISE DE QoS e QoE EM REDES PLC

Este capítulo apresentará as principais métricas de avaliação de desempenho baseadas em informações da rede (QoS) e também sob a perspectiva do usuário da aplicação (QoE). Serão discutidos as principais características de cada análise realizada através das métricas de qualidade de serviço e qualidade de experiência.

4.1 QUALIDADE DE SERVIÇO – QoS

Sempre que uma rede é estruturada, uma das principais dificuldades encontradas é o atendimento das características de desempenho almejadas. Um vez que o projeto é implementado, pode ser essencial a realização de testes probatórios de desempenho. Os testes de desempenho são executados com a injeção de um determinado tráfego na rede e, por consequência, a análise da resposta da rede a este tráfego. O método de geração deste tráfego pode ser simples ou obedecer a padrões complexos. Vários aspectos de desempenho podem ser observados, como a taxa de transmissão máxima suportada, o tempo que um quadro levou em trânsito, ou quanto tempo a rede necessita para se recuperar de uma falha.

Oferecer níveis aceitáveis de QoS é um fator importante, principalmente quando os recursos de rede são escassos. Isso se torna mais evidente em aplicações multimídias como VoIP e transmissão de vídeo que são sensíveis ao atraso, e toleram pequenas perdas [OLIVEIRA, 2011]. Exemplos de métricas que são utilizadas para alcançar um melhor gerenciamento de fluxo são: perda, atraso (ou latência) e jitter. Abaixo segue a descrição de cada uma delas.

4.1.1 Perda de Pacotes

A perda de pacotes causa um impacto direto no desempenho de aplicações principalmente multimídias como no serviço de VoIP e transmissões de Vídeos em HD. Quando essa perda é elevada, o nível de qualidade da aplicação fica prejudicado, podendo até ocasionar a interrupção da transmissão. Tais perdas podem estar relacionadas aos seguintes fatores [KUROSE e ROSS, 2010]:

- **Limitação de dispositivos de rede:** dispositivos como roteadores podem ter um buffer limitado, assim quando o limite da fila é atingido, pacotes posteriores serão descartados.
- **Erros de transmissão:** a perda é ocasionada principalmente pelo meio utilizada na transmissão, é bem comum em redes sem fio onde o meio é compartilhado, e que por conta disso esse erro é mais suscetível a interferências externas, seja provenientes de outras faixas de frequência, ou até mesmo obstáculos como árvores e edifícios.
- **Descarte por parte do usuário:** esse tipo de perda ocorre quando o usuário recebe um pacote fora de ordem, ou quando a recepção do mesmo esta bastante atrasada em relação aos demais.

4.1.2 Atraso

O atraso é outra métrica que pode afetar o nível de qualidade de uma aplicação. Cada tipo de aplicação possui uma tolerância de atraso, sendo que para aplicações multimídias atrasos altos podem levar os usuários ao descontentamento.

Abaixo estão descritos alguns fatores que influenciam no atraso [KUROSE e ROSS, 2010]:

- **Atraso de propagação:** Este tipo de atraso está diretamente ligado ao meio através do qual os pacotes estão sendo transmitidos. Transmissões realizadas através de cabos sofrem menos atrasos quando comparados com transmissões realizadas em meios sem fio, que possuem largura de banda menor
- **Atraso de processamento:** Entre os fatores que estão ligados a esse tipo de erro estão: (i) o tempo gasto para examinar o cabeçalho de um pacote e determinar seu destino; (ii) tempo necessário para verificação de erros de bits durante a transmissão.

- **Atraso de fila:** É o tempo que o pacote leva enquanto espera para ser transmitido no enlace. O tamanho do atraso é proporcional a quantidade de pacotes que esta trafegando na rede.
- **Atraso de transmissão:** É o tempo requerido para que todos os bits do pacote sejam inseridos no enlace.

4.1.3 Jitter

O *jitter* é uma variação estatística da taxa de intervalo entre chegadas de pacotes. Um dos principais motivos dessa variação é a ocorrência de filas formadas nos equipamentos de rede [GREENGRASS et al, 2009]. O número de pacotes na fila varia com certa freqüência, isso faz com que o atraso também sofra uma variação. Quando a variação é muito acentuada, ela causa prejuízos na transmissão de aplicações multimídias, pois os decodificadores recebem os pacotes em uma taxa constante.

Como os pacotes podem trafegar na rede por diferentes caminhos, o tempo de chegada geralmente varia, fato este que diminui a qualidade de serviço [34 COSTA, 2008]. A figura 4.1 mostra o efeito do *jitter* entre o envio de pacotes na origem e o seu processamento no destino, onde ele causa não somente uma entrega com periodicidade variável, mas também a entrega destes pacotes fora da ordem.

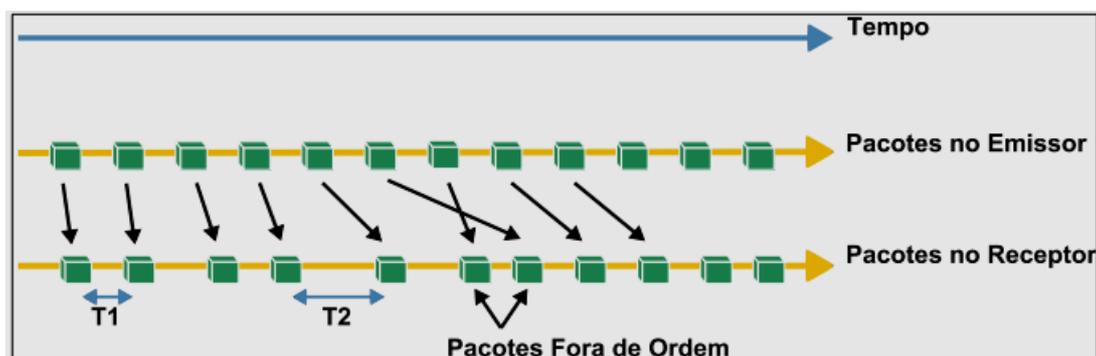


Figura 4.1 - Efeito do *Jitter* para as Aplicações [33 COSTA, 2008]

4.2 QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA - QoE

Grande parte das avaliações atuais realizadas sobre aplicações multimídias se baseiam em técnicas tradicionais de QoS. Porém, o grande problema dessa técnica está

relacionado ao fato dessa avaliação ser feita levando em consideração apenas o ponto de vista da rede, deixando de lado a qualidade percebida pelo usuário.

A fim de suprir a lacuna deixada pelas avaliações baseadas em QoS, surgiu um novo tipo de técnica de avaliação conhecida com Qualidade de Experiência (QoE) [TAKAHASHI et al, 2008], técnica que objetiva avaliar a qualidade perceptível do usuário, a qual pode ser realizada por três tipos de abordagem: Objetiva, Subjetiva e Híbrida. Diferente das de QoS, que se baseiam apenas em parâmetros da rede, métricas de QoE são usadas para mensurar como o usuário percebe a aplicação. As Figuras 4.2 e 4.3 mostram a principal diferença entre as abordagens. A subjetiva é baseada na opinião de usuários e inclui, dentre outros fatores, emoções, serviços e experiência. Enquanto a objetiva tenta modelar a percepção humana através de algoritmos baseados em informações da rede, transporte e fatores de aplicação [OLIVEIRA, 2011].

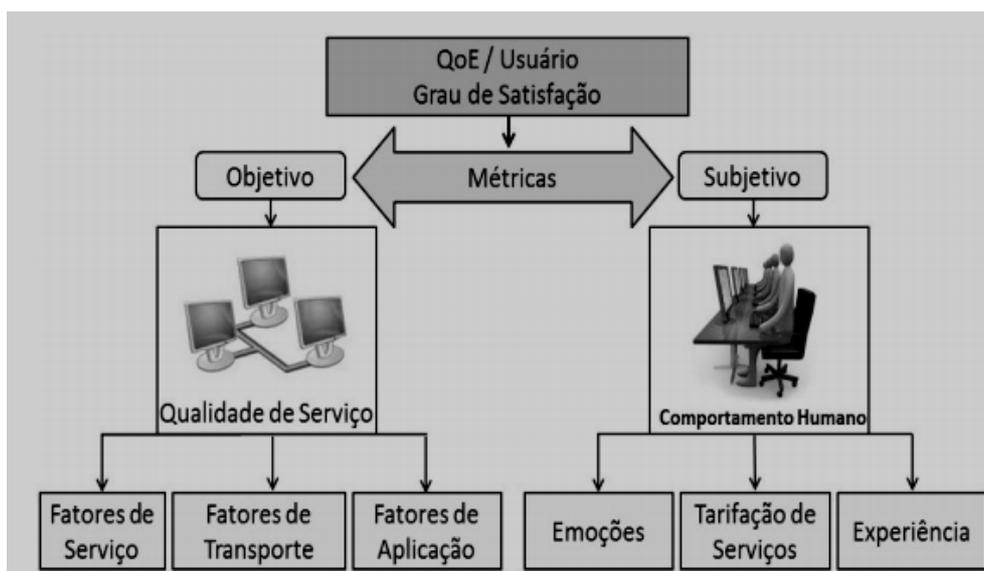


Figura 4.2 - Qualidade de Experiência [OLIVEIRA, 2011]

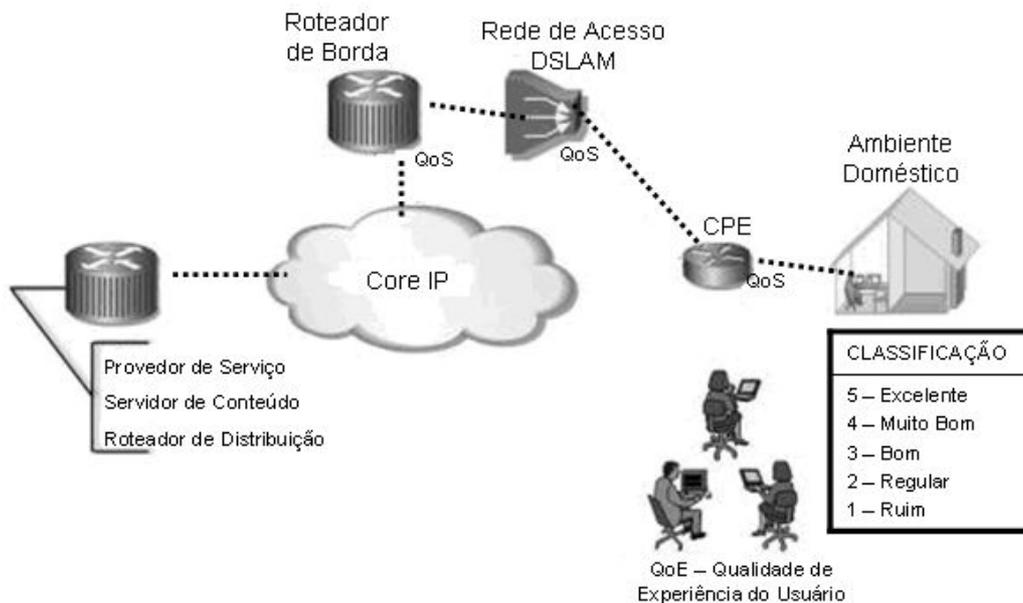


Figura 4.3 - Avaliação do Ponto de Vista do Usuário

A análise de qualidade em dados multimídia vem sendo estudada por alguns grupos de pesquisa, como é o caso do *Video Quality Experts Group* (VQEG), que faz parte do ITU-T (*International Telecommunication Union*), cujas pesquisas se concentram na análise de modelos de avaliação objetiva perceptual com intuito de definir métodos que possam ser utilizados para representar fielmente uma análise subjetiva (VQEG, 2000), e do ETSI STQ (*European Technical Committee for Speech, Transmission, Planning, and Quality of Service*).

4.2.1 Abordagem Subjetiva

A abordagem mais precisa para se avaliar a qualidade de um vídeo é a avaliação subjetiva, porque não há melhor indicador do que o concedido pelos seres humanos. Porém, o índice de qualidade dado por um ser humano depende de diversos fatores como experiência em avaliação, o próprio humor no momento da avaliação, dentre outros.

Os métodos de avaliação subjetiva se baseiam em técnicas definidas por padrões internacionais, como a ITU-T. Há normas específicas para cada área de atuação, a saber: televisão a cabo, broadcast, aplicações multimídias, dentre outras. Além disso, nelas estão recomendações que devem ser seguidas em cada etapa da análise, seja na configuração do ambiente, escolha dos avaliadores, metodologia de testes e etc. Existem algumas normas específicas para avaliação de vídeo de

forma subjetiva. As mais utilizadas são a BT.500 da ITU [ITU, 2000] e a P.900 também da ITU [ITU, 2008].

Tabela 4.1 – Avaliação do Ponto de Vista do Usuário

MOS	AVALIAÇÃO	Dano ao Vídeo
5	Excelente	Imperceptível
4	Bom	Perceptível
3	Razoável	Levemente razoável
2	Pobre	Irritante
1	Ruim	Muito irritante

De forma resumida, o processo de avaliação de forma subjetiva obedece a uma seqüência de ações, começando pela construção de um painel de observadores que irá avaliar um vídeo (ou mais de um), interpretá-lo e atribuir uma nota de acordo o nível de qualidade, mostrado na tabela 4.1. Esta nota obedece a uma escala de valores pré-determinada, que dependendo do objetivo da avaliação podem ser previamente descrita aos avaliadores. O resultado do teste é medido através do *Mean Opinion Score* (MOS) onde o nível de qualidade de uma seqüência de vídeo varia na escala de 1 a 5. Onde 5 é o melhor valor possível.

Ainda que essa abordagem de avaliação seja a mais precisa, demanda muito mais tempo para sua execução, pois requer um grande número de avaliadores o que eleva os custos e investimentos. Além disso, a dependência humana no momento da avaliação impede que a abordagem subjetiva seja utilizada repetida vezes e de forma automática em sistemas de tempo real. Maiores detalhes de avaliação subjetiva podem ser encontradas em [DARONCO, 2009]. Por outro lado, os resultados das técnicas que utilizam abordagem objetiva são obtidos de uma maneira muito mais simples. Em seguida, a abordagem objetiva será descrita com maiores detalhes.

4.2.2 Abordagem Objetiva

Diferente da abordagem subjetiva, a objetiva dispensa a interação humana para visualização e avaliação dos vídeos. Tal técnica faz uso de algoritmos e modelos matemáticos computacionais para mensurar as características do vídeo ou para fazer uma previsão, aproximada, da qualidade observada pelos seres humanos [EDEN,

2008]. Essas técnicas, além de facilitar o processo de avaliação, diminuem tanto o tempo da análise, quanto os custos.

Outra vantagem da abordagem objetiva é que depois de implementada, tende a ser muito mais simples que a aplicação de uma metodologia subjetiva, pois, basicamente a análise é feita através da execução de um aplicativo que tenha acesso aos vídeos degradados e aos originais, o restante do processo ocorre de forma automatizada. Métodos objetivos também podem possibilitar outras aplicações da análise de qualidade, como, por exemplo, a adaptação dinâmica de uma transmissão multimídia de acordo com a qualidade que está sendo obtida pelo receptor.

As técnicas objetivas utilizam artifícios matemáticos e computacionais para tentar fazer uma análise mais próxima o possível da percepção humana, também conhecida como técnicas perceptuais. Elas são desenvolvidas em função da baixa correlação existente entre os resultados de técnicas objetivas simples e a qualidade realmente percebida pelos seres humanos.

4.2.3 MSE e PSNR

Algumas métricas objetivas foram desenvolvidas para estimar ou prever o nível de qualidade vídeo streaming de acordo a percepção do usuário. Dentre elas está o PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*) que é medido em uma escala logarítmica e depende do MSE (*Mean Square Error*). O cálculo do MSE é realizado através da soma das diferenças quadráticas de todos os pixels da imagem original e da imagem processada, que esta sendo avaliada. O resultado é dividido pelo número de pixels totais.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(f(i,j) - F(i,j))]^2}{M * N} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde $f(i,j)$ é o valor de cada pixel na imagem original, $F(i,j)$ é o valor do pixel na imagem avaliada, M é número de linhas, e N o número de colunas do quadro. O MSE sempre possui valor positivo e seu valor mínimo é zero, o que significa que as duas imagens são iguais. A partir do MSE o PSNR pode ser obtido:

$$PSNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{((2^n - 1))^2}{MSE} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde $(2^n - 1)^2$ representa o quadrado do maior valor possível de sinal na imagem, n é o número de bits de cada imagem.

4.2.4 MOS

O PSNR também pode ser usado para mapear valores do MOS, conforme descrito na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Correlação PSNR e MOS

PSNR	MOS
Maior que 37	5 (Excelente)
De 31 a 37	4 (Bom)
De 25 a 31	3 (Razoável)
De 20 a 25	2 (Pobre)
Menor que 20	1 (Ruim)

4.2.5 SSIM e VQM

Diante das limitações apresentadas, além do uso do PSNR, outras métricas são encontradas na literatura cujos testes são realizados de forma mais sofisticadas, e que conseqüentemente possuem uma proximidade maior dos resultados subjetivos. Dentre as quais estão a SSIM (figura 4.4) e a VQM.

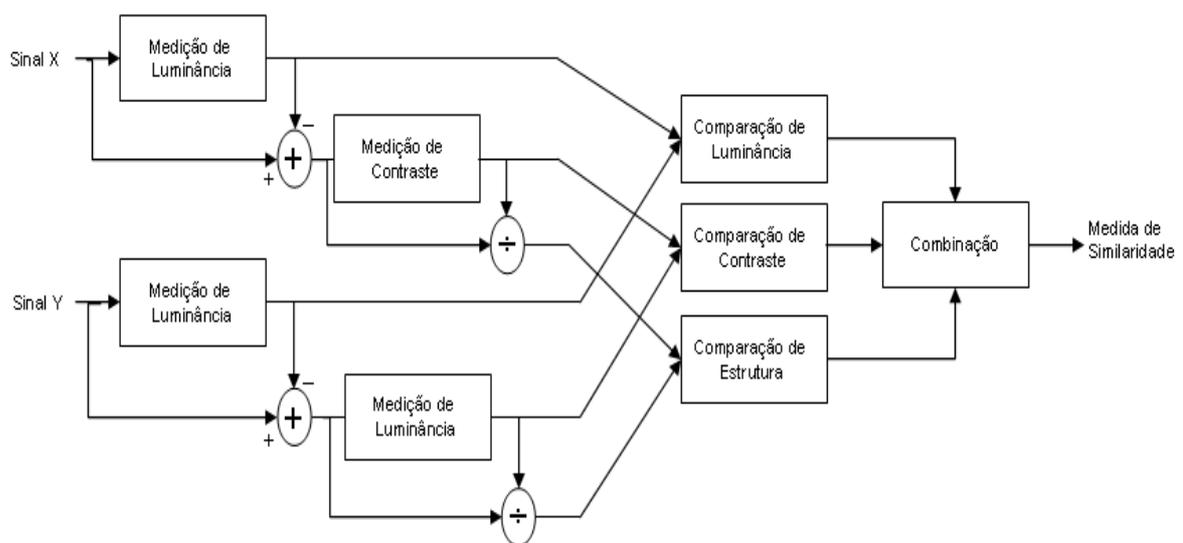


Figura 4.4 - Funcionamento do SSIM

A métrica SSIM (*Structural Similarity Index*) faz a avaliação frame a frame dos componentes cor, luminosidade e estrutura, e os combina em único valor chamado de índice (index) como é visto na Figura 4.4 (WANG et al., 2004). Assim, a SSIM em consideração aspectos que refletem com mais prioridade como o sistema de visão humana extrai informações das imagens ou vídeos. O índice do SSIM é dado em um escala de 0 a 1, onde 1 representa a maior qualidade, e conseqüentemente quanto mais perto de 0, pior será a qualidade do vídeo.

Já a métrica VQM (*Video Quality Metric*) define um conjunto de modelos computacionais que buscam avaliar a qualidade de um vídeo com o uso dos parâmetros de distorção de cor, distorção de pixels, ruído e nível “embassamento” do vídeo. O vídeo original e processado são passados como entrada, e a partir de então é verificado o nível de qualidade baseado na percepção do olho humano e aspectos de subjetividade (REVÉS et al.,2006). Os valores dos resultados de avaliação VQM variam de 0 e 5, onde 0 é o melhor valor possível.

CAPÍTULO V

5. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para geração da base de dados envolveu o uso combinado de um conjunto de ferramentas. A idéia deste capítulo é descrever as principais características de cada ferramenta e as etapas seguidas para obtenção dos resultados.

5.1 FERRAMENTAS UTILIZADAS

5.1.1 Analisador de Protocolos RADCOM

O analisador de protocolos RADCOM[®] tem o papel de capturar os pacotes transmitidos e analisar todas as camadas da rede, além de poder utilizar os mais diversos protocolos.

Oferece uma variedade de interfaces e ferramentas para monitoramento de redes LAN/WAN/ATM/PoS/Metro. Faz análise do status e contadores do tráfego da linha por tecnologia e é constituído de módulos. Um deles é o MediaPro, que realiza a análise real da chamada VoIP, correlação da sinalização, voz e vídeo, avaliação da qualidade de serviço (QoS) como *jitter*, *packet loss*, MOS e R-Factor, suporta ainda SIP e H.323, e provê relatórios estatísticos e gráficos.

5.1.2 MSU Video Quality

O MSU é um programa *free* para medições de qualidade de vídeo. Seus principais recursos incluem: métricas objetivas entre elas: PSNR, MSE, SSIM, VQM e etc. Possui suporte a mais de 30 formatos de vídeo, dentre os quais destacam-se AVI, YUV (YUV, YV12, UYVY, etc), BMP, MOV, VOB, WMV [39 MSU, 2011]. Possui uma opção para visualização da métrica, onde este pode gerar visualização de vídeo para cada métrica especificada. Este vídeo contém a informação visual sobre os valores da métrica em cada pixel do quadro. A visualização gerada do vídeo permite facilmente julgar sobre a qualidade do vídeo analisado.

5.2 VÍDEO UTILIZADO

Como hoje já vivemos a realidade dos vídeos em alta definição (high definition), utilizou-se neste trabalho um vídeo em HD com as seguintes características: formato wmv, 45,8 MB, duração de 2:46 minutos, 16:9, 854x480 pixels, taxa de bits total de 5272 kbps e frame rate 59.940 fps.

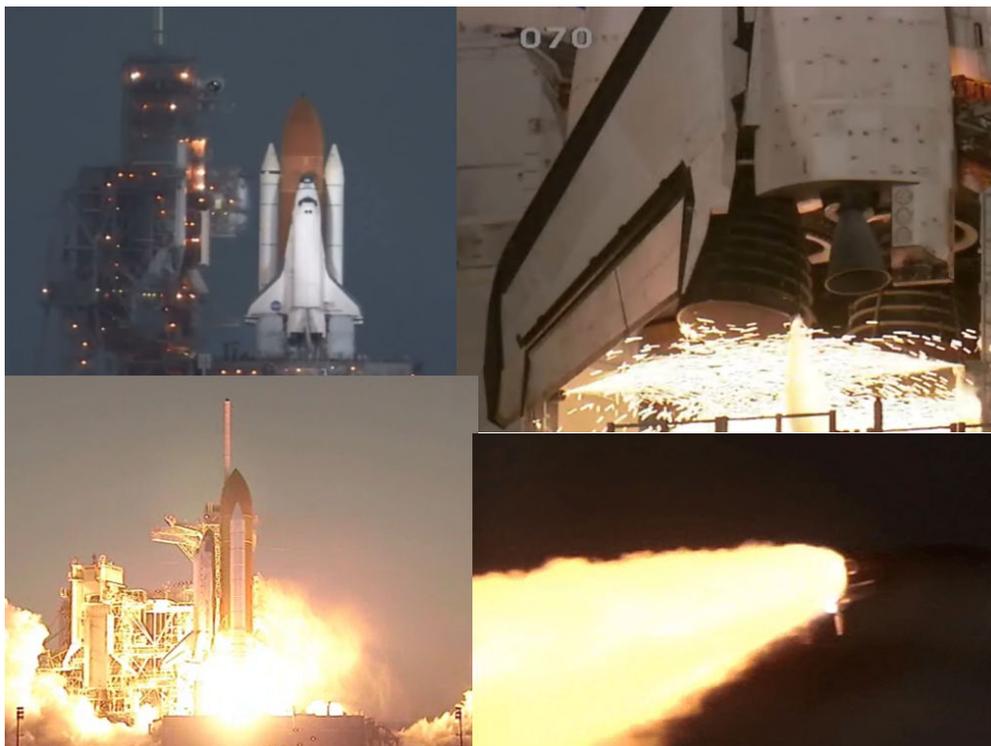


Figura 5.1 – Quadros do vídeo Utilizado

5.3 CENÁRIOS UTILIZADOS

5.3.1 Para Transmissão de Chamadas VoIP

No primeiro cenário montado, utilizou-se uma rede elétrica ativa projetada para prover acesso via PLC, ou seja, uma linha de tomadas de baixa tensão disponível para testes com PLC. Para a realização da chamada telefônica foi instalado o aplicativo “*Callgen*” [BRUNO, 2011] no computador transmissor e o “*OpenPhone*” [MARCELO, 2011] no receptor, onde o primeiro é um gerador automático de chamadas na rede que utiliza para sinalização o protocolo H.323. Neste cenário 1, mostrado na figura 5.2, foram realizados apenas testes básicos com ambiente controlado, sem interferência de outros componentes à rede elétrica.

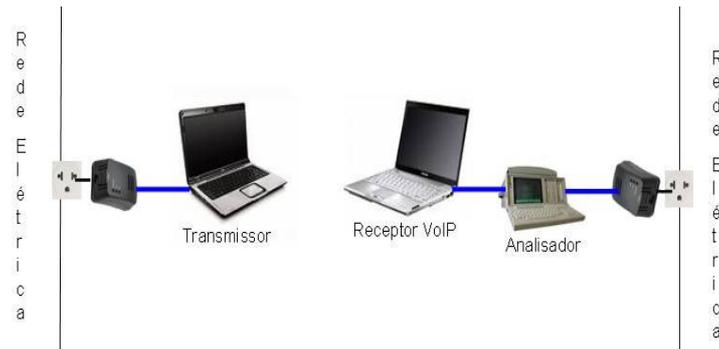


Figura 5.2 – Cenário 1 (sem ruído)

Para este cenário, montado no LPRAD/UFPA, foram usados dois *notebooks*, dois modems PLC e um Analisador de protocolos RADCOM com a seguinte configuração, um dos *notebooks* foi ligado diretamente a um modem PLC e o outro modem PLC conectado ao Analisador de protocolos somado a este o segundo *notebook*. Deste modo, passando todo o tráfego da rede PLC pelo analisador de protocolos. Com esta disposição, testes mais simples foram feitos, analisando apenas a comunicação VoIP com a interferência da própria rede elétrica [39 MENG e GUAN, 2005], oscilações nos níveis de energia normalmente detectados no sistema monofásico entre 110 e 127 volts.

Com o objetivo de realizar a análise de uma comunicação VoIP em um rede PLC com uma diversidade maior de aparelhos eletro-eletrônicos, montou-se o cenário 2, conforme visto na figura 5.3, onde foram acrescentados elementos causadores de ruídos, além de mais usuários na rede.

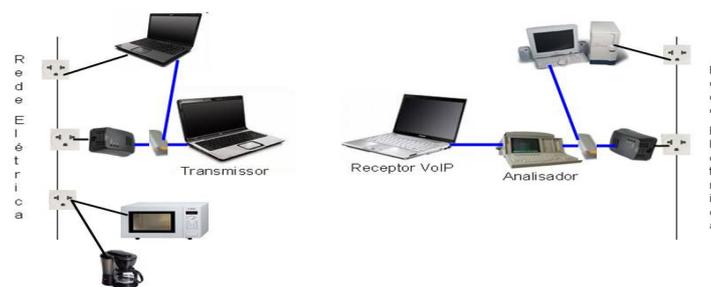


Figura 5.3 – Cenário 2 (com ruído)

Para este cenário, mais dois computadores foram adicionados à rede do cenário 1, assim além das interferências geradas pela própria rede elétrica, foram acrescentados dois computadores geradores de tráfego TCP (*Transmission Control Protocol*) e UDP (*User Datagram Protocol*) concorrente com o tráfego da aplicação

VoIP. Dois *switchs*, um para cada modem PLC, foram usados para conectar todos os quatro computadores.

Para a análise da aplicação VoIP foram adotados três tipos de testes, sendo dois realizados no cenário 1 e um terceiro feito no cenário 2, utilizando uma ferramenta para gerar um tráfego de TCP E UDP.

O primeiro teste foi realizado no cenário 1, como este possui apenas dois computadores, um foi utilizado como o servidor VoIP, usando o *software callgen323*, e o outro como cliente, usando o *OpenPhone*. Na rede elétrica usada pelos modems PLC, apenas os dispositivos padrões do laboratório estavam conectados às tomadas da rede elétrica, como computadores, *access point*, impressora, porém alguns desligados com a impressora. Assim com um nível de ruído não significativo para a rede PLC. No servidor foram feitas três sessões de chamadas para o cliente, uma sessão com 1 chamada e outras sessões com 20 e 30 chamadas simultâneas, cada chamada com tempo de duração de cerca de um minuto, onde cada uma foi capturada e interpretada pelo Analisador de protocolos. O Analisador, através desta varredura na transmissão, disponibiliza várias características de cada chamada, como largura de banda usada, *jitter*, porcentagem de pacotes perdidos, atrasos de resposta, PMOS e outros.

Neste mesmo cenário também foi realizado um segundo teste, que consistiu na tentativa do aumento do nível de ruído na rede elétrica, adicionando-se alguns equipamentos à rede. Neste teste, 60 chamadas foram realizadas, também com tempo de aproximadamente um minuto cada (todas simultâneas) e além dos equipamentos padrões ligados na rede, mais outros três equipamentos eletrodomésticos foram ligados, um forno de microondas, uma cafeteira e um frigobar. Neste a transmissão continuou satisfatória, não havendo nenhuma grande interferência na transmissão do tráfego VoIP, apesar de outros equipamentos ligados na mesma rede.

O terceiro teste foi realizado no cenário 2, em que foram utilizados mais dois computadores ligados a redes, onde estes se encarregaram da função de serem geradores de tráfego TCP e UDP na rede afim de concorrer com o tráfego da aplicação VoIP e aumentar a ocupação do canal. A ferramenta usada para gerar o tráfego de *background* foi o *software Iperf* que possibilita, através do uso do protocolo UDP, especificar a largura de banda desejada para a transmissão do seu tráfego. Um computador cliente executando o *iperf* inicia uma transmissão de tráfego *background* com o servidor também rodando o *iperf* ocupando uma determinada parte da banda, uma vez que é usado o protocolo UDP. Os outros dois computadores continuaram com seus mesmos

papéis, de transmissor e receptor VoIP. Resumindo, o objetivo do teste foi realizar o envio dos pacotes da aplicação VoIP junto com a transmissão do *iperf*. Desta forma analisando o quanto um tráfego concorrente pode interferir ou não na qualidade de uma chamada de voz sobre IP.

5.3.2 Para Transmissão de Vídeo em HD

O modem *master* ficou conectado ao computador servidor em uma tomada elétrica no início da residência e o modem com a configuração *slave* ligado ao computador cliente em uma outra tomada elétrica no final da casa, e entre esses pontos elétricos foram inseridos um a um os equipamentos domésticos (Ar condicionado, Bomba D'água e Lavadora de roupas). A figura 5.3 ilustra o cenário 3 de testes.

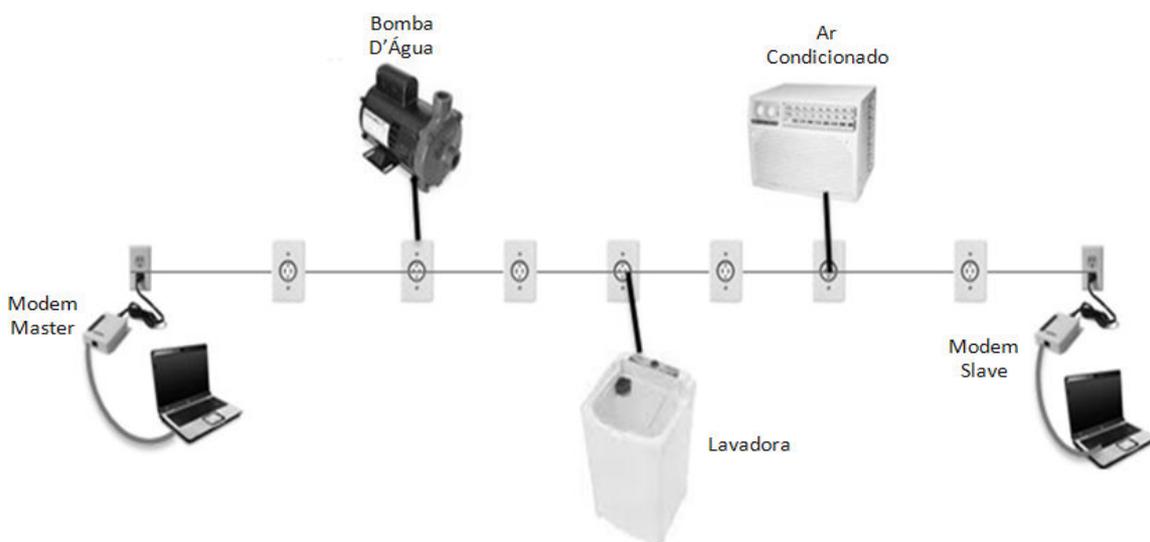


Figura 5.4 – Cenário 3

Após a montagem do cenários foram realizadas cinco baterias de testes. A primeira consistiu na transmissão do vídeo HD do servidor para o cliente apenas com o aparelho de ar condicionado sendo ligado e desligado algumas vezes, por segundo o mesmo testes foi repetido apenas com o motor bomba d'água também sendo ligado e desligado algumas vezes, e da mesma forma aconteceu com a lavadora de roupas.

Os dois últimos testes já possuíam um conjunto maior de aparelhos ligado simultaneamente, onde no quarto conjunto de transmissão foram feitos com a presença da lavadora de roupas e do ar condicionado ligados ao mesmo tempo, e o testes final

agrupou-se os três aparelhos (lavadora + ar condicionado + bomba d'água) ligados e desligados de forma quase simultânea para tentar causar a maior interferência possível (ruído impulsivo na rede).

Para analisar essas transmissões de vídeos utilizou-se a ferramenta livre, MSU Video Quality Measurement Tool [MSU, 2011], da qual podemos avaliar as métricas de MSE, VQM, SSIM e PSNR que podemos associar ao MOS.

Algumas dessas métricas são objetivas, porém ligadas a outras subjetivas, [PEVQ, 2011], [SPERANZA et al, 2010] e foram desenvolvidas para estimar a qualidade do streaming de vídeo de acordo com a percepção do usuário. O PSNR depende de valores do MSE (sempre possuindo valor positivo) e a partir deste valor pode ser feita a correlação com o MOS que a opinião média do usuário, métrica baseada na opinião do usuário a respeito da qualidade do vídeo percebida.

Já o SSIM realiza a avaliação frame a frame de três componentes, cor, luminosidade e estrutura, combinando-os em um valor chamado Index (escala de 0 a 1, onde quanto mais próximo de 1 maior a qualidade do vídeo). Por fim o VQM é uma métrica que busca analisar a qualidade do vídeo através de parâmetros de distorção de cor, distorção de pixels, ruído e embassamento, os valores de VQM variam de 0 a 5, onde 0 é o melhor resultado possível.

Aplicações que utilizam vídeos ou imagens têm uma forte relação com o usuário final, responsável de fato pela avaliação da qualidade do vídeo recebido. A partir daí surgem novos conceitos relacionados às técnicas tradicionais que baseiam-se em aspectos de rede (QoS). Hoje no meio científico esses são ditos como QoE (Quality of Experience) onde a avaliação do usuário final em detrimento a aplicação é o principal parâmetro mensurado [OLIVEIRA, 2011]. Ambas as metodologias de avaliação são complementares, e se usadas de forma combinada podem gerar uma avaliação mais robusta, e é justamente isso que pretende-se alcançar com estes testes.

5.3.3 Transmissão de Dados

Uma vez a proposta da TV Digital brasileira divide-se, basicamente, em dois segmentos: O primeiro consiste na digitalização e compactação de sinais de áudio e vídeo provendo alta qualidade de som e imagem na recepção.

O segundo envolve a interatividade e todos os benefícios e aplicações que dela decorrem, incluindo educação à distância (EAD), comércio eletrônico, vídeo sob demanda (VoD), etc.

Através da ferramenta de rede *wireshark*, e de uma aplicativo de chat, rodando em uma máquina servidor, e outra cliente fazendo a “conversa” propriamente dita, realizou-se a caracterização de uma carga de bate papo (visualizado na figura 5.5) de Tv Digital.

Este Chat é chamado de “*TVD-EDUC 2.0*”, pode ser visto na figura 5.5, disponibilizado pelos alunos do LPRAD/UFPA utilizado no artigo publicado no SBTVD 2011 como Um Estudo de Caso de Aplicação Educacional Interativa para TV Digital.

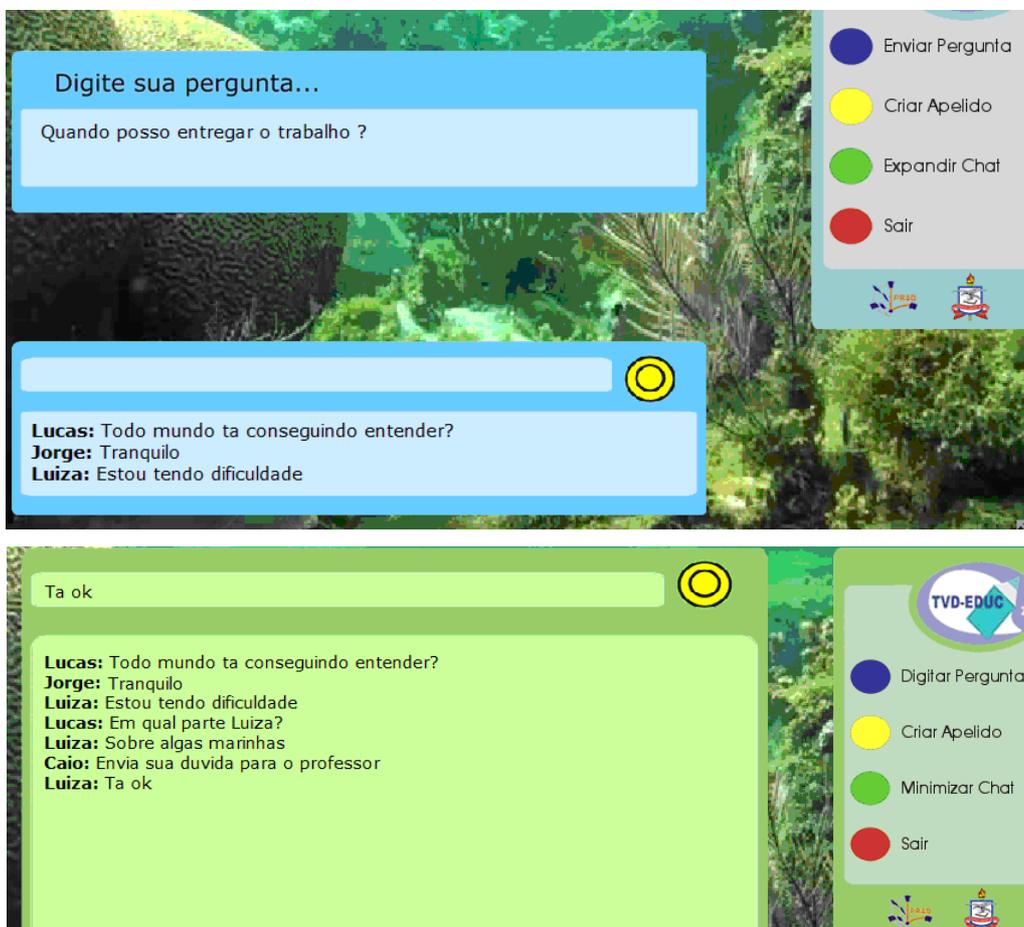


Figura 5.5 Telas do chat de bate papo utilizado nas simulações.

A caracterização da carga de TV digital foi realizada da seguinte maneira, após 09:25 minutos de troca de mensagens entre os usuários do chat, coletou-se as informações necessárias para simular este tráfego de dados através de uma interpolação feita no *wireshark* de forma que esta ferramenta analisa o tráfego de pacotes recebidos e organiza-os por protocolo. Todo tráfego de entrada e saída é analisado e mostrado em

uma lista de fácil navegação, onde foram selecionadas apenas as linhas que utilizavam o protocolo TCP/IP.

A figura 5.6 mostra a tela de relatório do programa, onde podem ser visualizadas na coluna “*Displayed*”, as informações que serão utilizadas para simular a carga TCP de TV digital.

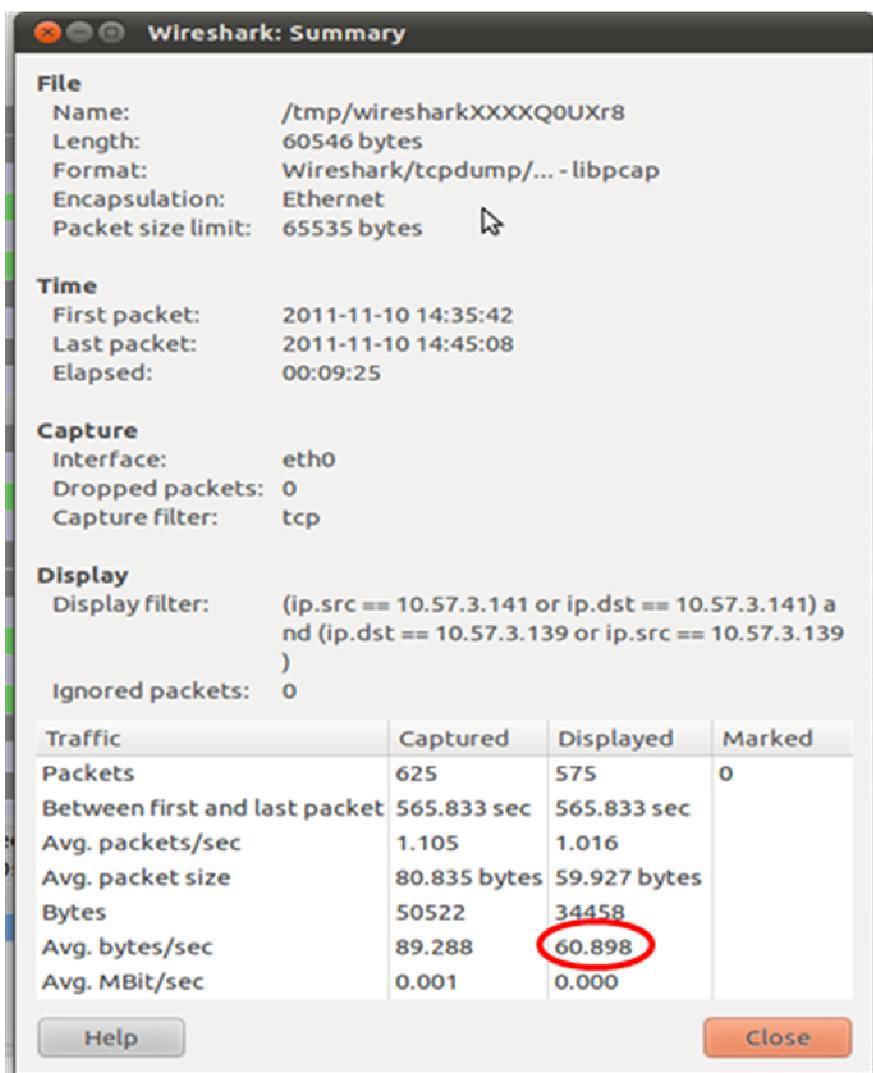


Figura 5.6 – Coleta de Dados realizada pelo *Wireshark*

A geração de tráfego foi feita através da ferramenta IPERF, que é um gerador automático de tráfego que permite a medição da vazão da rede usando protocolo TCP.

A figura 5.7 mostra os menus de navegação do programa, assim como a sua interface gráfica, que mostra em tempo real a variação da largura de banda que determinado tráfego esta utilizando.

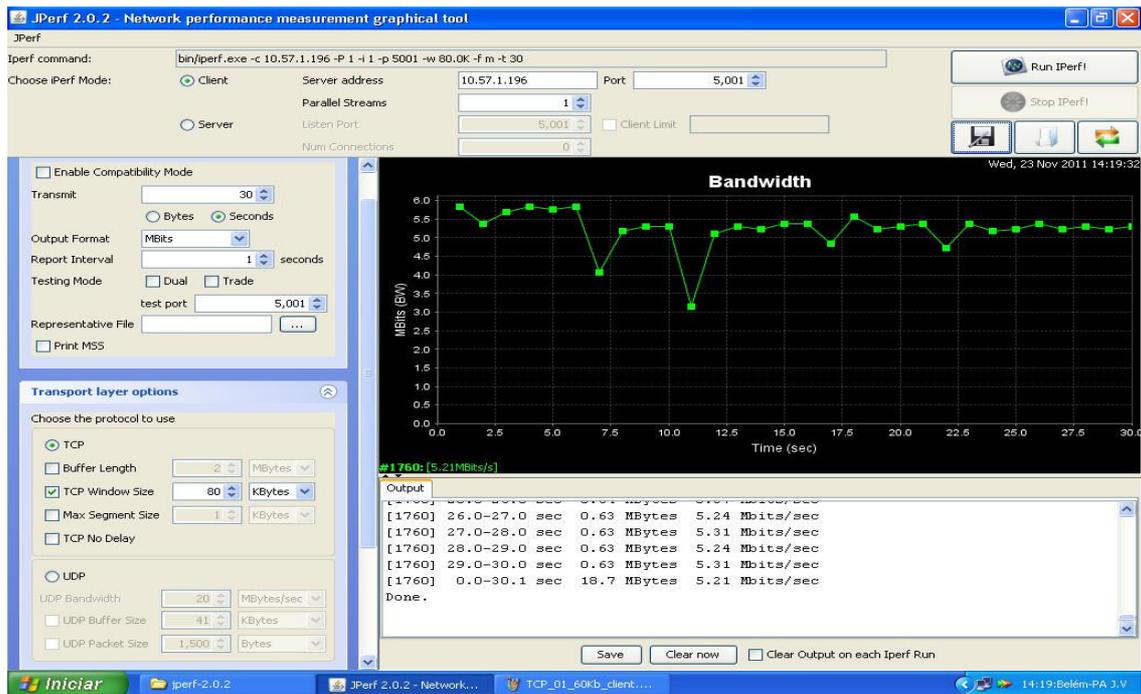


Figura 5.7 Tela de navegação do JPERF

CAPÍTULO VI

6. RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão apresentando os resultados obtidos na metodologia utilizada para a avaliação de desempenho nos tráfegos de dados, voz e vídeo.

6.1 AVALIAÇÃO DOS TESTES COM VoIP

No primeiro teste realizado, a análise foi feita somente com o nível de ruído padrão da rede elétrica do LPRAD, apenas como um teste empírico para verificar o comportamento da transmissão VoIP na tecnologia PLC em um ambiente controlado.

A tabela 6.1 apresenta a legenda das métricas analisadas durante todos os testes realizados no trabalho. Na tabela 6.2, observa-se nas três primeiras linhas os resultados do primeiro teste (sem ruído), mostrando que não apresentou perda de pacotes durante a transmissão, um baixo *jitter* e tempo de atraso e principalmente um nível de satisfação de usuário elevado visto na através da escala de caracterização do PMOS ([0-1] Péssimo, [1.1-1.9] Regular, [2-2.9] Bom, [3-3.9] Ótimo e [4-5] excelente). Esta métrica, PMOS é subjetiva e baseada na qualidade de áudio e vídeo percebida pelo usuário, comumente conhecido como *QoE* (qualidade de experiência) [16].

Tabela 6.1 - Legenda dos Parâmetros Avaliados

PC	Phone Calls
BW	Bandwith
PL	Packet Loss
AD	Answer Delay
PMOS	User satisfaction
Jitter	Statistical variation of delay

Tabela 6.2 - Satisfação do Usuário VoIP para Cenários 1 e 2

	PC	BW (bps)	PL	AD (ms)	PMOS	Jitter (ms)
Sem Ruído	1	127970	0	150	4,8	2
	20	110356	0	256	3,8	3
	30	116779	0	274	3,7	3

	60	116129	0	281	3,6	3
Com Ruído	10	133310	0	373	4,18	6
	20	127257	0	279	4,2	6
	30	126181	0	284	4,2	6
	40	122739	0	253	4,2	6
	50	127607	0	291	4,2	6
	60	123837	0	268	4,2	6

Com a inserção dos três aparelhos eletrodomésticos, forno de microondas, cafeteira e frigobar tentou-se aumentar o nível do ruído na rede, para se analisar quais possíveis efeitos que a comunicação de voz sofreria. Porém, mesmo com esse incremento na rede, a tecnologia PLC se manteve estável e não prejudicando a transmissão VoIP, como pode ser observado na tabela 6.2 (com ruído), foram realizadas sessenta chamadas individuais de um minuto cada, e para todas os resultados se mantiveram satisfatórios próximos aos resultados do primeiro teste sem ruído. Os valores de *answer delay* se mantiveram abaixo do valor de limite, os valores do *jitter* de cada chamada tiveram valores médios iguais e o PMOS se manteve em um nível ÓTIMO para todas as sessenta chamadas. A tabela 6.3 mostra uma terceira análise feita com inserção de tráfego concorrente.

Tabela 6.3 - Análise com Inserção de Tráfego

PC	BW	End Cause	PL	AD	PMOS	Jitter
1	134319	Normal call clearing	1,01	395	2,9	7
20	163310	Normal call clearing	4.11	18014	1.21	8
30	173310	Normal call clearing	6.68	18912	0,82	10
40	0	Destination rejection	0	0	0	0

No último teste, um tráfego *background* foi inserido na rede para concorrer com a transmissão VoIP, através da ferramenta *Iperf*, gerou-se um tráfego utilizando o protocolo UDP ocupando parte da banda disponibilizada pelo modem PLC. As duas transmissões foram iniciadas juntas para se analisar a qualidade das chamadas VoIP. Conforme mostra a tabela 6.3, foram realizados 4 sessões de testes, com 1 chamada

apenas e posteriormente com 20, 30 e 40 chamadas simultâneas. Os resultados para estes testes com ruído e tráfego concorrente se mostram bastante insatisfatórios, pois apenas quando realizou-se 1 chamada observou-se um PMOS classificado com regular, apesar do tempo de atraso chegar próximo do limite aceitável pelo serviço VoIP, e já apresentando perda de pacotes e um elevado *jitter*.

Já as sessões seguintes com 20 e 30 chamadas simultâneas apresentaram problemas em todos os seus parâmetros avaliados e uma satisfação do usuário abaixo do esperado considerado PÉSSIMO. Observou-se também que a partir das 40 chamadas a transmissão ficou comprometida, não conseguindo concluí-las

6.2 AVALIAÇÃO DOS TESTES COM VÍDEO

Com os equipamentos montados, conforme a figura 5.4, realizou-se primeiro o teste de transmissão do vídeo em HD com apenas o ar condicionado ligado no momento da transmissão. Em um segundo plano de testes desligou-se o ar condicionado e ligou-se a bomba d'água, e posteriormente também desligando a bomba e ligando o terceiro aparelho (a lavadora de roupas). A tabela 6.4 descreve as características dos aparelhos residenciais utilizados para os testes.

Tabela 6.4 - Aparelhos Domésticos

Ar Cond.	7000BTUs, Corrente de 6,2A, Potência 700W, 110V
Bomba D'Água	110V, 1cv, 3400rpm
Lavadora	110V, 400W de potência, consumo aproximado 0,21KWh/ciclo

O quarto e quinto testes foram realizados com a intenção de acrescentar mais ruído na rede elétrica, combinado primeiramente a lavadora de roupas e o ar condicionado e por fim juntando os três aparelhos de forma a causar o máximo de ruído possível. A tabela 6.5 mostra o resultado de todos esses testes, ressaltando a média das métricas de 30 transmissões para cada conjunto de testes estabelecido na residência.

Tabela 6.5 – Resultado das Métricas Analisadas

Apar. Domésticos	PSNR	MOS	MSE	SSIM	VQM
Ar Cond.	44,84	5	2,383	0,991	0,269
Bomba D'Água	45,323	5	1,985	0,992	0,203
Lavadora	45,252	5	1,678	0,992	0,248
Lavadora+ArCond	46,162	5	1,626	0,986	0,236
Lav+Ar Cond+Bomba	42,161	5	4,277	0,981	0,415

Pode-se observar que os valores obtidos foram bastante satisfatório de todos os pontos de vista, tanto da avaliação realizada sob a percepção usuário final, como através dos resultados das métricas objetivas relacionadas a valores próximos dos desejáveis.



Figura 6.1 Tela Resultado do PSNR de uma Transmissão do Vídeo

O “pior” caso foi constatado no último teste, onde todos os aparelhos foram ligados simultaneamente com a transmissão do vídeo, neste teste encontrou-se o maior valor de MSE (4,277) e o menor de PSNR (42,161), porém não impactando no MOS, considerado “excelente”, com valor 5, e também neste teste o “pior” VQM foi encontrado (0,415), mas também considerado um bom resultado, pois em sua escala de avaliação que varia de 0 a 5, ficou próximo de 0.

Os outros resultados não chegaram a variar de maneira negativa, de forma que todos os parâmetros analisados são considerados muito bons. O SSIM, por exemplo, não variou mais do que 11 décimos, sempre ficando próximo de 1 (caso ideal).

6.3 AVALIAÇÃO DOS TESTES COM DADOS

Em um ambiente residencia obteve-se os seguintes resultados com relação às simulações da carga de TV digital através do canal PLC, com diferentes valores de tráfego TCP e com inclusão de alguns aparelhos elétricos.

Na figura 6.2 pode-se ver o resultado da largura de banda alcançada pela tecnologia, com a inserção de um ventilador ligado e desligado várias vezes ao longo da transmissão de dados.

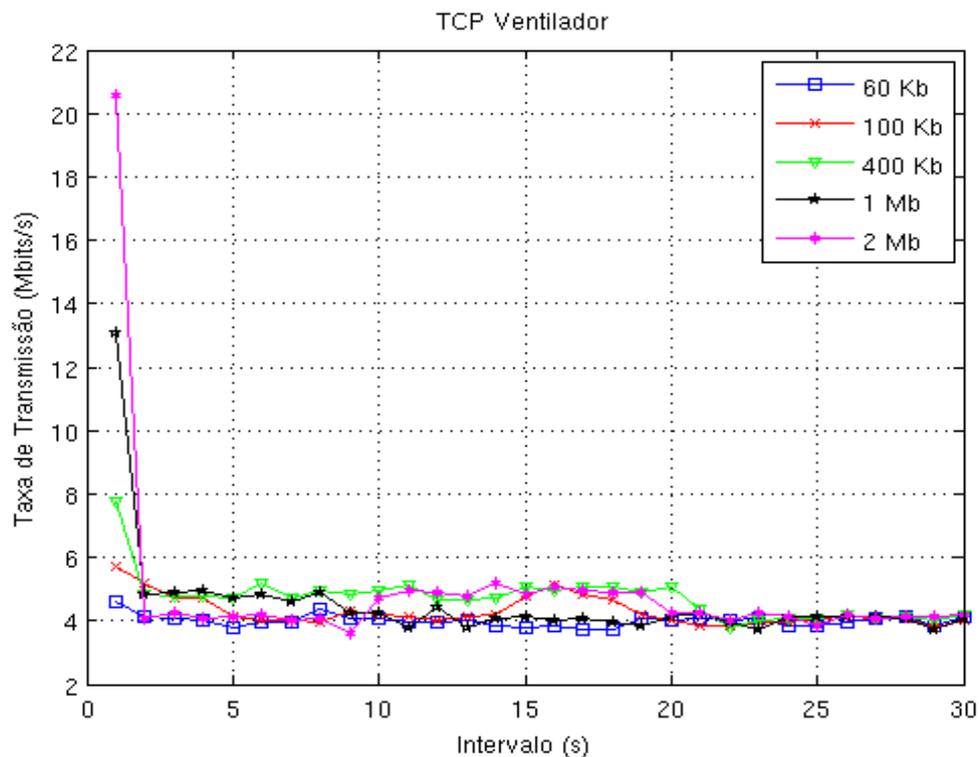


Figura 6.2 – Largura de Banda Alcançada com o uso do Ventilador

Já na figura 6.3, tem-se o resultado da mesma análise agora realizada com o uso na rede elétrica de um liquidificador.

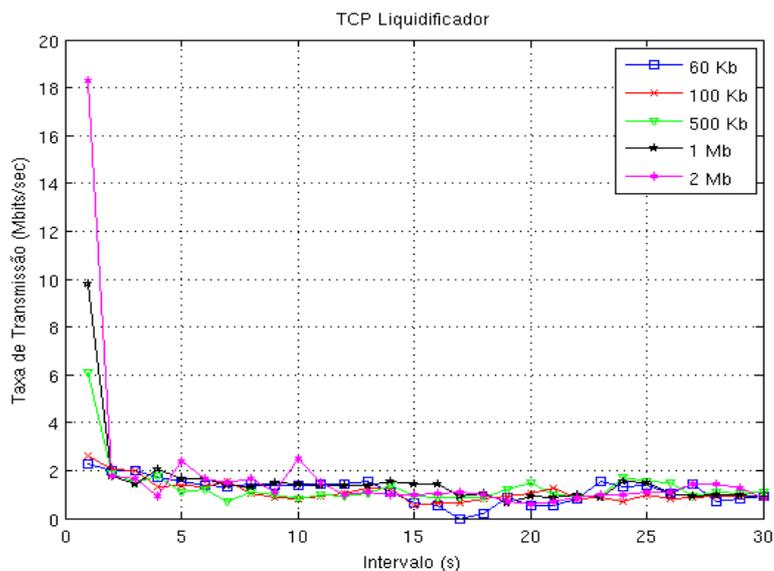


Figura 6.3 – Largura de Banda Alcançada com o uso do Liquidificador

Na próxima figura, é feita uma comparação das larguras de banda alcançadas pelo PLC, durante os três tipos de testes aplicados, com o tráfego TCP em interferências, e com a utilização do ventilador e do liquidificador inseridos na rede separadamente, para uma carga 60 KB/s, que foi a carga encontrada de TV digital rodando com o chat de bate papo.

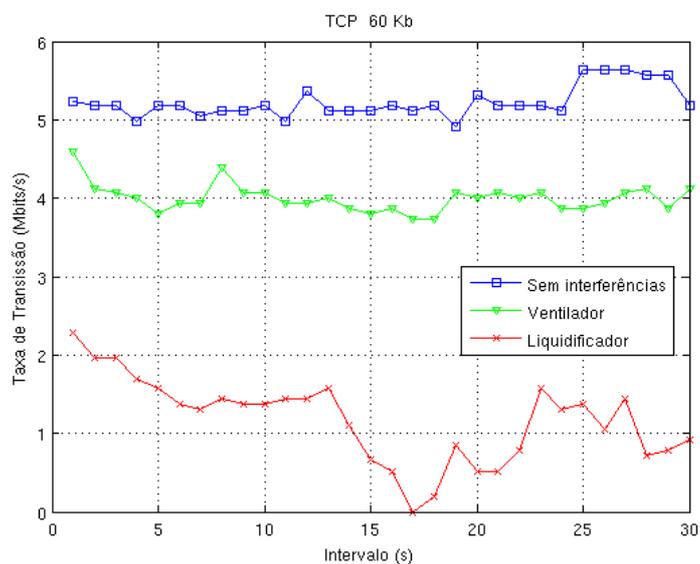


Figura 6.4 – Comparação dos Testes Aplicados para 60KB/s

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSÃO

As redes PLC são altamente susceptíveis a ruídos por usar uma infra-estrutura já existente que não foi projetada para o tráfego de dados. Apesar das técnicas utilizadas para tratamento de ruídos no canal, deve-se verificar o real comportamento da tecnologia em ambientes reais mediante diversas aplicações. Estes testes tiveram o objetivo de analisar a transmissão de chamadas VoIP, transmissões de vídeo e dados utilizando uma rede PLC com suas possíveis fontes de ruído e tráfego concorrente.

Nos testes realizados no cenário 1, observou-se que mesmo com a geração de ruídos pelos eletrodomésticos a transmissão VoIP foi completada e assim certificando a rede como estável para este tipo de serviço. Os resultados dos testes realizados no cenário 2, apresentaram algumas falhas na tentativa de conexão com o receptor das chamadas VoIP, pois a alta taxa de ocupação da banda pelo tráfego de *background* fez com que duas primeiras chamadas falhassem, estabelecendo somente as duas posteriores, diante destes resultados, conclui-se que a transmissão VoIP teve uma péssima qualidade uma vez que quatro chamadas foram feitas e apenas duas se estabeleceram.

Realizando um cálculo da média do valor de PMOS entre as quatro chamadas, fica claro que a satisfação do usuário é quase mínima indicando a má disponibilidade do serviço VoIP para a aplicação concorrentes com outros tipo de tráfegos simultâneos na rede, e com adição de ruídos inseridos através dos eletrodomésticos.

Os testes analisados durante a transmissão de vídeo em HD, obteve índices bastante satisfatórios em todas as métricas utilizadas na avaliação, mesmo quando foi inserido aparelhos que possuem motores, e que geram ruído impulsivo que as vezes podem causar perdas na rede devido os harmônicos [Maia e Pinheiro, 2006], encontrou-se valores de MOS “excelentes” comprovando perdas imperceptíveis ao olho humano [ITU 900, 2008]. A avaliação realizada pelo SSIM, mostrou um resultado bem próximo do ideal (índice = 1), indicando uma excelente qualidade de vídeo recebido, já que quase não registrou-se variação dos frames nos componentes de luminosidade, cor e estrutura.

Este trabalho também apresentou uma avaliação de desempenho de uma proposta alternativa do canal de retorno para a TV digital brasileira utilizando PLC. Os dados resultantes da simulação apresentam um claro indicativo de viabilidade da proposta, inclusive para aplicações que requerem banda larga.

Como a maioria das aplicações para a TVD brasileira requerem uma baixa taxa de transmissão de dados no canal de retorno, o padrão proposto mostra-se conveniente para a aplicação em regiões carentes de infraestrutura de rede, apesar de que em ambientes residenciais a tecnologia apresenta uma largura de banda bem diminuída em relação à ambientes controlados.

7.1 Considerações Finais

A tecnologia Power Line Communications representa uma importante proposta na prestação de alguns serviços, principalmente a fim de prover acesso à Internet de banda larga, alternativa notável em termos de inclusão digital em certas regiões, como no caso do Brasil, mas especificamente a Amazônia que carece de infra-estrutura de telecomunicações para prover acesso a população carente. Essa possibilidade é reforçada se também for considerado o alcance da malha elétrica, superior se comparado com a oferta dos serviços de telecomunicação.

Após as regulamentações estabelecidas pelas agências reguladoras responsáveis pelo setor no Brasil, espera-se que serviços fornecidos por redes PLC fiquem disponíveis aos consumidores brasileiros em breve. Tal cenário poderia aquecer ainda mais o mercado nacional de banda larga, representando maior concorrência e, com isso, redução dos preços e busca por maior qualidade na oferta dos serviços.

Em aspectos gerais, a tecnologia PLC encontra-se em desenvolvimento, buscando novos métodos de superar problemas e fornecer soluções mais eficientes.

7.2 CONTRIBUIÇÕES

Podemos destacar:

- Levantamento do estado da arte referente à trabalhos práticos realizados com a tecnologia PLC, com cenários reais;
- Integração de métricas de qualidade de experiência que hoje compõe as métricas de qualidade de serviço em análise de redes PLC;
- Análise do comportamento da tecnologia em ambiente residencial real para transmissão de vídeos em alta definição;

- Trabalhos completos aceitos para publicação em anais de congressos:

1. ★ CARMONA, J. V. C. ; Pelaes, E. Gonçalves . ***Network PLC Indoor: Application with VoIP and Video Streaming in HD***. In: 10th International Information and Telecommunication Technologies Conference, 2011, Florianópolis. 10th International Information and Telecommunication Technologies Conference, 2011.
2. ★ CARMONA, J. V. C. ; Pelaes, E. Gonçalves . ***Avaliação de Desempenho de Serviço VoIP através de uma Rede PLC***. In: X Simpósio de Informática da Região Centro / RS, 2011, Santa Maria. X Simpósio de Informática da Região Centro / RS, 2011.
3. ★ CARMONA, J. V. C. ; Pelaes, E. Gonçalves . ***Análise da Transmissão de Vídeos de Alta Definição em uma Rede PLC Indoor***. In: X Simpósio de Informática da Região Centro / RS, 2011, Santa Maria. X Simpósio de Informática da Região Centro / RS, 2011.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alves S. A. Carlos. “***Voice Over Ip***” Tcc 2004, Faculty Of Applied Sciences Of Minas, Disponível Em: <http://www.si.lopesgazzani.com.br/tfc/monografias/monografia%20voip%20julho%202004.pdf>, Acessado em 09 de janeiro de 2011.
- [2] André M. França, Carlos A. F. Lima, José R. P. Navas E Loreno M. Silveira. “***Technology Plc: Opportunity For Telecommunications And Electricity***”. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialkbns/default.asp>. Acessado em 11 de fevereiro de 2011.
- [3] Aneel. ***Plc: Internet Pela Rede Elétrica***, Agência Nacional De Energia Elétrica - Aneel, 2009. Disponível Em: <<http://www.aneel.gov.br/hotsite/plc>>. Acesso Em: 07 Nov 2009.
- [4] Bruno Auzier Cavalcante. ***Callgen323***. Disponível em: <http://callgen323.sourceforge.net/>. Acessado em 18 de março de 2011.
- [5] Campista, M. E. M.; Costa, L. H. M. K.; Duarte, O. C. M. B. ***Um Mecanismo Eficiente De Redução De Colisões Para A Transmissão De Dados Através Da Fiação Elétrica Domiciliar***, XXIII Simpósio Brasileiro De Redes De Computadores - Sbrc '05, 2005.
- [6] Canal Energia, “***PLC: Mais Incentivos Para Avançar***”. Disponível Em: <http://www.redeinteligente.com/2010/07/26/plc-mais-incentivos-para-avancar/>. Acessado Em 30 De Julho De 2010.
- [7] Chang-Kuan Lin, Hao-Wei Chu, Shiann-Chang Yeh, Meng-Ting Lu, Jason Yao E Homer Chen. “***Robust Video Streaming Over Power Line***”. Power Line Communications And Its Applications, ISPLC 2006 IEEE International Symposium.
- [8] Costa G. H. “***Métricas Para Avaliação De Desempenho Em Redes Qos Ip***”. TCC 2008, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre.
- [9] Daronco, F. C. “***Avaliação Subjetiva De Qualidade Aplicada À Codificação De Vídeo Escalável***”. 2009. Dissertação (Mestrado Em Ciência Da Computação). Programa De Pós-Graduação Em Computação, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2009.
- [10] Delgado J. J.L. ***Redes Electricas Digitais Power Line Communication: Desafios E Oportunidades Para Cabo Verde***. TCC 2006 Universidade Jean Piaget De Cabo Verde.

- [11] Duttav A. V. P., Chetlurb M., Guptab P., Shivkumar K., Amitabha G. **“Perspectives On Quality Of Experience For Video Streaming Over Wimax”** Acm Sigmobile Mobile Computing And Communications Review. Vol. 13 Issue 4, October 2009.
- [12] EDEN, A. **No-Reference Image Quality Analysis For Compressed Video Sequence**. IEEE Transaction On Broadcasting, V. 54, N. 3, P. 691-697, 2008
- [13] Ferreira, M. V. A. **Plc - Power Line Communication**. TCC Universidade Federal Fluminense, 2005.
- [14] Madeira Frederico. **“Qualidade De Voz E Mos”**, Disponível Em: <http://www.voipcenter.com.br/modules/news/article.php?storyid=2487>. Acessado Em 20 Março De 2011.
- [15] Galli, S.; Scaglione, A.; Dosterl, K. **Broadband Is Power: Internet Access Through The Power Line Network**. IEEE Communications Magazine, 2003.
- [16] Ghiata, N. Marcu, M. **“Voip Communication Qos Analysis System”**. Iccc-Conti 2010.
- [17] Greengrass, J., Evans, J., Begen, A.C. Not All Packets Are Equal, Part 2: **The Impact Of Network Packet Loss On Video Quality**. On: IEEE Internet Computing, V.13, P.74-82, 2009.
- [18] H. Meng, Y. L. Guan. **“Modeling And Analysis Of Noise Effects On Broadband Power-Line Communications”**, In: IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 20, No. 2. P.630-637,2005.
- [19] Homeplug Powerline Alliance. **Homeplug Av White Paper**. Homeplug Powerline Alliance, 2005.
- [20] Hrasnica H., Haidine A. And L. Ralf. **Broadband Powerline Communications Networks**. Network Design. Londres: John Wiley & Sons, 2004.
- [21] ITU. Recommendation ITU-T P.900: **Subjective Video Quality Assessment Methods For Multimedia Application**, 2008. Disponível Em: <<http://www.itu.int/rec/t-rec-p.910-200804-i> />. Acesso Em Abril De 2011
- [22] ITU. Recommendation ITU-R BT.500: **Methodology For The Subjective Assessment Of The Quality Of Television Pictures**, 2000. Disponível Em:

<http://www.dii.unisi.it/~menegaz/doctoralschool2004/papers/itu-r_bt.500-11.pdf>.

Acesso Em Abril De 2011.

[23] Jianfeng Chen. ***“A Fast Retransmission Mechanism In Power Line Communication Network”***. ISPLC 2008 IEEE.

[24] Kurose, J. F.; Ross, K. W. ***Redes De Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down***, 5ª Edição. Tradução Sob a Direção De Opportunity Translations, São Paulo: Addison Wesley, 2010.

[25] Lee, M. K.; Newman, R. E.; Latchman, H. A.; Katar, S.; Yonge, L. ***Homeplug 1.0 Powerline Communications Lans - Protocol Description And Performance Results***, International Journal Of Communication Systems, 2003.

[26] Little, A. D. ***White Paper On Power Line Communications (PLC)***. PLC Utilities Alliance, 2004.

[27] Louie, K. W.; Wang, A.; Wilson, P.; Buchanan, P. ***Discussion On Power Line Carrier Applications***, Canadian Conference On Electrical And Computer Engineering - Ccece '06, 2006.

[28] Marcelo Arza Lobo da Costa. Openphone. Disponível em: http://www.voip.nce.ufrj.br/pg_voip/download/Manual_Openphone_e_OhPhone.pdf. Acessado em 18 de março de 2011.

[29] Pevq. ***“Perceptual Evaluation Of Video Quality”***. Disponível Em: <http://www.pevq.org/>. Acesso Em Junho De 2011.

[30] Malathi, P.; Vanathi, P. T. ***Power Line Communication Using Ofdm And Oga***, Aimpl Journal, Volume 7, 2007.

[31] Markarian, G.; Huo, X. ***Distribution Of Digital Tv Signals Over Home Power Line Networks***. International Symposium On Power Line Communications And Its Applications, 2005.

[32] Martello, A. ***Aneel Aprova Distribuição De Internet E Tv Por Assinatura Pela Rede De Energia***, G1, 2009. Disponível Em: <http://g1.globo.com/noticias/economia_negocios/0,,mul1270896-9356,00-aneel+aprova+distribuicao+de+internet+e+tv+por+assinatura+pela+rede+de+ener.html>. Acesso Em: 29 Set 2009.

- [33] Martinhão, M. S. *PLC – Testes De Campo E Considerações Da Anatel*, Workshop Sobre Power Line Communications (Plc), Agência Nacional De Energia Elétrica - Aneel, 2007.
- [34] Mauro Margalho, Keller Nascimento, Diego L. Cardoso, R. Francês, J.C.W.A.Costa. “*Proposta De Canal De Retorno Para Tvd Brasileira Em Um Cenário Típico Da Região Amazônica*”. XXI Simpósio Brasileiro De Telecomunicações SBT 2004.
- [35] Memória, E.C; Oliveira, L. P. *Redes Power Line Communication: Uma Aplicação Indoor*. Especialização PPGCC/UFPA 2009.
- [36] Ministério Das Comunicações. “*Brasil Conectado*”. Disponível Em: <http://www4.planalto.gov.br/brasilconectado>. Acessado em 01 de julho de 2011.
- [37] MSU. Disponível Em: http://compression.ru/video/quality_measure/video_measurement_tool_en.html. Acessado Em 20 De Março De 2011.
- [38] Neves Filipe, Cardeal Simão, Salviano S, Assunção Pedro. “*Quality Model For Monitoring Qoe In Voip Services*”. EUROCON 2011 IEEE
- [39] Oksman, V.; Galli, S. *G.HN: The New ITU-T Home Networking Standard*, IEEE Communications Magazine, 2009.
- [40] Oliveira R. S. “*Predição De Qualidade De Experiência Em Redes Wimax Em Aplicações E Video Baseada Em Aspectos De Qualidade De Serviço*”. Dissertação PPGEE/UFPA 2011.
- [41] Programa Navegapará. Disponível em: <<http://www.navegapara.pa.gov.br/>>. Acesso em 05 de outubro de 2011.
- [42] Santos Christiane B., Fábio S. Marques, Dominique C. Fernandes, Cláudio A. Fleury, João Batista J. “*Análise De Transmissão E Desempenho Em Redes PLC Em Baixa Tensão*”. SBPO 2006.
- [43] Silveira Pedro Pisa. *Transmissão De Vídeo*. Disponível Em: http://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/video-p2p/transmissodevdeonainternet.html. Acessado Em 20 De Junho 2011.

- [44] Souza, L.V.; Castro, B.S.L.; Oliveira, E.L.; Rego, L.P.; Carvalho, J.C.C.; Costa, J.C.W.A.; Frances, C.R.L.; **“Multimedia Transmission On Amazon Region Using Wireless Broadband Networks”**. BMSB 2009 IEEE.
- [45] Speranza Et Al. **“Objective And Subjective Quality Assessment With Expert And Non-Expert Viewers”**. In: International Workshop On Quality Of Multimedia Experience, Hong Kong 2010
- [46] Takahashi, A., Hands, D.; Barriac, V. **Standardization Activities In The ITU For A QoE Assessment Of IPTV**. IEEE Communication Magazine, V. 46, N.2, P. 78-84, 2008.
- [47] Tibaldi, C. M. G., Junior, C. E. M. **PLC - Power Line Communications**, Cefet-Mt, 2000.
- [48] Silveira Pedro Pisa. **Transmissão De Vídeo**. Disponível Em: http://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/video-p2p/transmissodevdeonainternet.html. Acessado Em 20 De Junho 2011.
- [49] Zenun A. M., Diego L. Kreutz, Rafael R. Righi. **“An Architecture For Integration And Evaluation Of Voice Over IP Technology PLC Links”**. SBC 2008.