

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**MARCELO QUINTINO NASCIMENTO**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE VIDEO  
MONITORAMENTO *INDOOR VIA BROADBAND  
POWERLINE COMMUNICATION***

VITÓRIA – ES  
2021

MARCELO QUINTINO NASCIMENTO

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE VIDEO  
MONITORAMENTO *INDOOR* VIA *BROADBAND POWERLINE  
COMMUNICATION***

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Marcelo Quintino Nascimento**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

Coorientador: Eng. Ricardo Natale

marcelo Quintino Nascimento

MARCELO QUINTINO NASCIMENTO

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE VIDEO  
MONITORAMENTO *INDOOR* VIA *BROADBAND POWERLINE*  
*COMMUNICATION***

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Marcelo Quintino Nascimento**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 15, de Outubro de 2021.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



---

**Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**



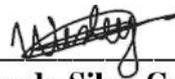
---

**Eng. Ricardo Natale**  
**Coorientador**

*Jair Adriano Lima Silva*

---

**Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinador**



---

**Eng. Wesley da Silva Costa**  
**Examinador**

## DEDICATÓRIA

Ao meu filho Pedro Henrique, espero deixar exemplo de persistência e trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, tenho que agradecer a Deus por me proporcionar perseverança durante toda a minha vida.

A ideia de fazer o TCC sobre este tema surgiu quando o professor Marcelo Segatto falou da possibilidade de transmitir dados pela rede elétrica, em uma das disciplinas que fui seu aluno. Registro aqui o meu “muito obrigado” por ser extremamente generoso com a doação do seu tempo e por aceitar me orientar neste projeto.

Tive a felicidade de receber assistência do coorientador e engenheiro Ricardo Natale, a quem sou grato pelas valiosas instruções dadas durante o processo de implementação dos protótipos, testes e coleta de dados nos experimentos.

A todos que me ajudaram ao longo da minha trajetória, expesso meu profundo reconhecimento:

Aos meus pais, Luiz Nascimento e Antônia da Penha Quintino Nascimento, pelo amor, apoio e incentivo que serviram de alicerce para as minhas realizações.

À Cellcity Vitória, empresa na qual fui funcionário durante 16 anos, por ter sido flexível comigo e ter tolerado meus atrasos em todos esses anos em que estive na Universidade, e, especialmente ao Sr. Alberto Maia pelos conselhos e ensinamentos.

Ao meu irmão André pela amizade e parceria, principalmente nesses últimos anos.

À minha ex-namorada Patrícia, mulher por qual tenho admiração, pelas dicas, pelo incentivo e carinho.

Aos colegas Manuel e João pela predisposição e ajuda em questões relacionadas ao CPID.

## **EPIGRAFE**

“A persistência é o menor caminho do êxito”. (Charles Chaplin)

## RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso aborda a tecnologia que permite a transmissão de dados pela rede elétrica (PLC – *Power Line Communication*) em circuitos *indoor*. Ele consiste na implementação de um circuito de vídeo monitoramento a fim de ser o protótipo para transmissão e medição de dados pela rede elétrica, com a finalidade de ser uma ferramenta auxiliar na vigilância da parte superior do edifício do CPID, onde estão alocados painéis solares e condensadoras do sistema de refrigeração. É feita uma breve introdução sobre o PLC contando um pouco de sua história, princípios de funcionamento, principais aplicações e topologias. Também são abordadas características da rede elétrica como meio de transmissão, uma vez que esta tem importância fundamental na recuperação do sinal e eficiência do sistema. O projeto foi realizado atendendo às normas aplicáveis aos setores elétrico e de telecomunicações, envolvendo recursos de engenharia, tanto na parte da construção de protótipos para transmissão de dados pela rede elétrica, como nas análises dos resultados obtidos nos testes de transmissão. Para tal conclusão, foi analisado, mediante os testes de HTTP, *ping* para *gateway*, RDP e velocidade, softwares dos fabricantes dos modems, a viabilidade de utilização da tecnologia PLC aplicada a vídeo monitoramento e vigilância, onde a passagem de cabos metálicos de par trançado não é viável devido às barreiras físicas existentes. Dentro deste contexto, este projeto é uma solução alternativa e robusta.

Palavras-chave: Rede elétrica. *Power Line Communications* (PLC). *Broadband over Power Line* (BPL).

## **ABSTRACT**

This course conclusion work addresses the technology that allows data transmission over the electrical network (PLC – Power Line Communication) in indoor circuits. It consists of the implementation of a video surveillance circuit in order to be the prototype for data transmission and measurement over the electrical network, with the view to an auxiliary tool in the surveillance of the upper part of the CPID building, where solar panels and condensers are allocated of the refrigeration system. A brief introduction about the PLC is made, telling a little of its history, operating principles, main applications and topologies. Characteristics of the electrical network as a means of transmission are also discussed, since this is important in signal recovery and system efficiency. The project was carried out in compliance with the standards applicable to the electrical and telecommunications sectors, involving engineering resources, both in the construction of prototypes for data transmission over the electrical network, as well as in the analysis of the results obtained in the transmission tests. For this conclusion, it was analyzed, through HTTP, ping to gateway, RDP and speed tests, software from modem manufacturers, the feasibility of using PLC technology applied to video surveillance and surveillance, where the passage of twisted pair metallic cables isn't feasible due to existing physical barriers. Within this context, this project is an alternative and robust solution.

**Keywords:** Electrical network. Power Line Communications (PLC). Broadband over Power Line (BPL).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia da rede PLC/BPL.....	27
Figura 2 – Camadas do Modelo OSI.....	30
Figura 3 – Atuação da rede PLC no Modelo OSI.....	31
Figura 4 – Modelo de Referência OSI comparado ao TCP/IP .....	32
Figura 5 – Modelo básico de linha de transmissão .....	33
Figura 6 – Onda senoidal.....	35
Figura 7 – Elementos de um sistema de comunicação.....	35
Figura 8 – Exemplo de modulação multiportadora sem sobreposição (a) e modulação multiportadora ortogonal (b) .....	37
Figura 9 – Vista panorâmica do CPID .....	38
Figura 10 – Layout da rede PLC/BPL implementada no CPID .....	41
Figura 11 – Dispositivo PLC da Corinex usado nos experimentos .....	42
Figura 12 – Interface do Tfgem .....	45
Figura 13 – Teste de conectividade entre o HE e o TDR1 .....	46
Figura 14 – Instalação do TDR1 no QD-08 .....	48
Figura 15 – Detalhe da conexão dos terminais do TDR1 no QD-08 .....	49
Figura 16 – Instalação do TDR1 no QD-08 com cabo de tamanho reduzido .....	50
Figura 17 – Tráfego no HE, em Kbps, no período de 26/09/2021 a 28/09/2021 .....	52
Figura 18 – Capacidade máxima de tráfego do HE para o TDR1, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021 .....	53
Figura 19 – Capacidade máxima de tráfego do TDR1 para o HE, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021 .....	53
Figura 20 – Capacidade máxima de tráfego do TDR1 para o TDR3, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021 .....	54
Figura 21 – Capacidade máxima de tráfego do TDR3 para o TDR1, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021 .....	54
Figura 22 – Capacidade máxima de tráfego do TDR3 para o CPE2, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021 .....	55
Figura 23 – Capacidade máxima de tráfego do CPE2 para o TDR3, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021 .....	55
Figura 24 – Tráfego no HE, em Kbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021 .....	56



## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Especificações técnicas do dispositivo PLC CXP-LVA-GWYC .....	42
Quadro 2 – Relação dos Dispositivos da rede PLC . .....	44

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Taxas alcançadas nos enlaces de comunicação, em Mbps .....	56
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPL	<i>Broadband over Power Line</i>
CPE	<i>Customer Premises Equipment</i>
CPID	Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento
FFT	Transformada Rápida de Fourier
HE	<i>Head-End Master</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LAN	<i>Local Area Networks</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
Mbps	<i>Megabits per second</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OPERA	<i>Open PLC European Research Alliance</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
RDP	<i>Remote Desktop Protocol</i>
RF	Rádio-frequência
SMS	<i>Short Message Service</i>
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>
SNR	Relação Sinal-Ruído
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDR	<i>Time Division Repeater</i>
TUG	Tomada de Uso Geral
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Constante de atenuação (Np / m)
$\beta$	Constante de fase (rad / m)
C	Capacidade do canal (bps)
$i(t)$	Corrente instantânea no elemento (A)
L	Valor da indutância do indutor (H)
$v_r(t)$	Tensão instantânea sobre o resistor (V)
t	Tempo (s)
R	Valor da resistência do resistor ( $\Omega$ )
$v_l(t)$	Tensão instantânea sobre o indutor (V)
m	Metro
SNR	Relação Sinal-Ruído (dB)
$v_c(t)$	Tensão instantânea sobre o capacitor (V)
W	Largura de banda do sinal (Hz)

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	Motivação .....	16
1.2	Justificativa e relevância do trabalho .....	17
1.3	Objetivos .....	18
1.3.1	Objetivo Geral .....	18
1.3.1	Objetivos Específicos .....	18
1.4	Escopo do trabalho .....	19
1.5	Estrutura do trabalho .....	19
<b>2</b>	<b>APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>20</b>
2.1	Problemas no uso do PLC .....	20
2.1.1	Ruído .....	20
2.1.2	Atenuação .....	22
2.1.3	Impedância da rede elétrica .....	23
2.1.4	Compatibilidade eletromagnética .....	23
2.1.5	Perda de Pacotes .....	24
<b>3</b>	<b>VISÃO GERAL DA TECNOLOGIA PLC/BPL .....</b>	<b>24</b>
3.1	Histórico .....	24
3.2	Princípio de Funcionamento .....	25
3.3	Topologia da rede PLC/BPL.....	26
3.4	Vantagens e Desvantagens .....	27
3.5	Regulamentação .....	29
3.6	A rede PLC e o Modelo OSI/ISO .....	30
3.7	Caracterização do canal PLC.....	32
3.8	O Sinal PLC/BPL.....	35
3.8.1	Técnica de Modulação.....	36
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E METODOLOGIA .....</b>	<b>38</b>
4.1	Ambiente Experimental.....	38
4.2	Planejamento dos Experimentos .....	39
4.3	<i>Hardware</i> .....	41
4.4	<i>Softwares</i> .....	43

<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO DOS TESTES COM RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
5.1	Primeiro teste – Conectividade a curta distância .....	45
5.2	Análise do primeiro experimento .....	46
5.3	Segundo teste – Fator distância.....	46
5.4	Análise do segundo experimento .....	50
5.5	Terceiro teste – Avaliação dos enlaces.....	51
5.6	Análise do terceiro experimento .....	55
5.7	Quarto teste – Comunicação do servidor com a câmera em regime permanente .....	56
5.8	Análise do quarto experimento .....	57
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>ANEXO.....</b>	<b>63</b>

# 1 INTRODUÇÃO

*Power Line Communication (PLC)*, ou *Broadband over Power Line (BPL)*, é uma situação particular na qual a onda de rádio é aplicada sobre os fios da rede elétrica (1). Seu principal apelo advém da possibilidade de compartilhar a estrutura de cabeamento da rede elétrica convencional com a transmissão de dados evitando assim a necessidade de uma nova estrutura física guiada para transmitir estes sinais.

Nas transmissões em banda base, o espectro do sinal não é deslocado, em contraste com a transmissão em RF, onde no processo de modulação o espectro do sinal é deslocado para a frequência da portadora (2).

Uma rede PLC/BPL pode ser implementada em ambiente exterior (*outdoor*) usando a rede elétrica de distribuição da concessionária local ou em ambiente interior (*indoor*) usando a rede elétrica interna de um apartamento ou edifício, que é o caso deste projeto.

As regras de uso da tecnologia PLC/BPL estão regulamentadas no Brasil desde 2009. A ANEEL através da Resolução Normativa nº 375/2009 estabelece as condições de compartilhamento da infraestrutura das distribuidoras, enquanto a ANATEL estabelece as condições de uso de radiofrequências por sistemas de banda larga por meio de Redes de Energia Elétrica, através da Resolução ANATEL Nº 527.

## 1.1 Motivação

A principal motivação para fazer este trabalho são os significativos benefícios obtidos através do uso da rede elétrica na transmissão de dados, como ausência de novo cabeamento, redução de custos com manutenção de cabeamento e a facilidade de poder contar com equipamentos de comunicação em qualquer ambiente do edifício. A passagem de novos cabos por tubos já lotados em prédios antigos embutidos em estruturas de alvenaria pode causar transtornos e custos conforme a infraestrutura existente muda.

Apesar das desvantagens perante a fibra óptica, que são mais estáveis em termos de não sofrer interferências de ondas eletromagnéticas, sustentam maior capacidade de tráfego de dados e por isso servem como infraestrutura para as grandes infovias (3), a BPL é uma alternativa de comunicação de dados para regiões remotas, onde a única infraestrutura disponível é a rede de distribuição de energia elétrica.

Além disso, por ser uma realidade, a tecnologia PLC oferece um largo espectro de aplicações, desde telefonia IP (*Internet Protocol*), telecontrole, serviços de controle de eletrodomésticos, automação residencial, comercial e industrial, serviços audiovisuais, monitoramento on-line de processos produtivos, segurança predial (4)(5).

## **1.2 Justificativa e relevância do trabalho**

O tema abordado foi desenvolvido observando-se a viabilidade técnica do projeto e o conhecimento das matérias abordadas, durante o curso. A importância deste trabalho deve-se principalmente ao grande número de aplicações que a tecnologia pode proporcionar. A complexidade e o escopo do tema podem inspirar vários outros projetos acadêmicos, apesar de não ser um tema novo.

A configuração de rede implementada constitui solução alternativa para video monitoramento e vigilância, instalando a câmera num ponto estratégico que irá capturar imagens de boa parte dos painéis fotovoltaicos alocados na área superior do edifício principal do CPID, onde não foi previsto cabeamento estruturado próximo e há apenas uma TUG disponível.

Segundo (3), diante de limitações como queda de velocidade na transmissão devido à interferência de aparelhos e equipamentos elétricos, esta tecnologia ainda demandaria investimentos, pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

O PLC se destaca entre outras tecnologias que possibilitam a automatização pelo fato dos equipamentos poderem se comunicar apenas plugando-os na rede elétrica. É neste cenário que encontramos os eletroeletrônicos “inteligentes” que, possuindo uma interface compatível com o sistema, é possível ter total controle sobre eles, além de oferecerem serviços especializados como uma geladeira informar por e-mail ou SMS se tem algum item em falta, a cafeteira

saber exatamente a hora de preparar o café, iluminação e climatização dos ambientes serem automáticos (6).

Estudos anteriores apontam que a PLC se tornou uma forte alternativa de comunicação para redes industriais, redes de sensores e similares, com o surgimento das *smart grids*. A *smart grid* trata-se de um sistema de energia elétrica que utiliza da tecnologia da informação para fazer com que o sistema seja mais eficiente (econômica e energeticamente), confiável e sustentável, seu objetivo é interligar por uma rede de dados todas as etapas do processo de geração, transmissão, distribuição e consumo em tempo real (7).

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Analisar uma aplicação da tecnologia *Power Line Communication* desenvolvendo um estudo de viabilidade mostrando as vantagens, desvantagens e funcionabilidade da tecnologia PLC para utilização do consumidor, avaliando a rede elétrica como meio de comunicação de dados.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

A seguir são enumerados os principais objetivos específicos do projeto:

- Levantar dados da transmissão via rede elétrica (PLC);
- Exercitar a aplicação da regulamentação vigente no Brasil sobre o tema escolhido;
- Obter a prática com um assunto importante, que pode agregar uma experiência ímpar;
- Analisar a qualidade do sinal recebido em relação ao enviado pela rede elétrica usada como canal de comunicação de dados;

#### 1.4 Escopo do Trabalho

Implementar uma rede de comunicação *indoor* utilizando modems comerciais PLC/BPL, para fazer uma demonstração da transmissão de dados pela rede elétrica, que será o canal de comunicação entre uma câmera IP (ou *Speed Dome*) e um PC *desktop* (ou *Netbook*) . Evidenciar as vantagens e desvantagens da tecnologia PLC.

Fazer uso do AutoCad para estudar o projeto elétrico do CPID e encontrar a melhor opção de rede para essa aplicação, onde os cabos elétricos não possuem nenhuma blindagem e nem foram projetados para uso em telecomunicações.

Realizar os testes e monitoramento utilizando os *softwares* PRTG Network Monitor e recursos do próprio Windows e avaliar as principais características da rede. Medir alguns fatores como: taxa de transmissão, atenuação por distância, interferência de ruídos, largura de banda e Relação Sinal-ruído.

#### 1.5 Estrutura do Trabalho

Além da introdução, o trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta os problemas enfrentados pela tecnologia PLC, ou seja, os principais obstáculos que existem atualmente na transmissão de dados via rede elétrica: ruído, impedância da rede elétrica local, atenuação, compatibilidade eletromagnética e erros no envio de dados.

O Capítulo 3 apresenta o arcabouço teórico e a base metodológica utilizada, onde são considerados os principais fundamentos dessa tecnologia.

O Capítulo 4 trata de materiais e métodos, onde é feita uma descrição detalhada dos principais componentes de *hardware* e *software* usados no projeto, a fim de testar cada trecho, estabelecendo comunicação e analisando a transmissão através do circuito.

No próximo capítulo, a aplicação da solução e resultados obtidos nos testes de campo. Com uma descrição detalhada das aplicações e resultados, são mostrados os dados mais relevantes.

O capítulo 6 finaliza o trabalho com as conclusões finais e as contribuições a respeito de todo o trabalho.

## **2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA**

### **2.1 Problemas no uso do PLC**

Os principais problemas encontrados na rede elétrica que afetam o sinal de dados que passa por esse meio são: ruído, atenuação, impedância da rede elétrica, compatibilidade eletromagnética e erro no envio de dados.

#### **2.1.1 Ruído**

Em residências brasileiras, geralmente todos os dispositivos eletrônicos estão localizados na mesma área da residência. Para adaptadores PLC / BPL, este é um desafio: a interferência eletrônica afetará muito seu desempenho. Colocar todos os dispositivos eletrônicos no mesmo local pode causar muitas interferências, o que pode prejudicar o desempenho do adaptador e tornar preferível o uso de outras tecnologias (8). Tais interferências são geralmente são ruídos de impulso, que podem ser divididos em quatro categorias: ruído de impulso síncrono, assíncrono, de alta frequência e de evento único. (9).

O ruído síncrono geralmente é causado por *dimmers*. Esses dispositivos controlam a intensidade luminosa da lâmpada para injetar pulsos elétricos no sistema em uma frequência mais alta do que a frequência da rede. O ruído tonal é de alta frequência e rico em harmônicos, causado principalmente pela troca de fontes de alimentação e geralmente existe em computadores, carregadores, etc. O motor é a fonte do terceiro tipo de ruído, que é o ruído de alta frequência, que gera pulsos na faixa de vários kHz. Este efeito é causado por motores em lâminas de barbear, aspiradores de pó, liquidificadores e vários outros itens domésticos (9).

O espectro de ruído varia muito com a frequência e o tempo. Há uma queda geral do nível de ruído com frequência crescente. A forma da curva de ruído depende muito da localização e do tempo (10).

Na engenharia de telecomunicações, a relação sinal-ruído (SNR), expressa em dB, é de suma importância, e é obtida como (1):

$$SNR = 10 \cdot \log(S/N) \quad (1)$$

onde

S = potência do sinal, em Watt (W);

N = potência do ruído, em Watt (W).

Uma das formas de se obter o valor da potência do ruído sobre uma carga de caráter resistivo, casada com a saída do amplificador ou receptor, é (1):

$$N = k \cdot T_o \cdot B \quad (2)$$

onde

k = constante de Boltzmann, igual a  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Joules/Kelvin;

B = largura de banda do canal, em Hz;

$T_o$  = temperatura ambiente, em Kelvin;

N = potência do ruído, em Watt (W).

A equação (2) não é a única forma de modelar ruído. De acordo com (11) o ruído impulsivo pode ser modelado através da equação (3):

$$p(v) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\exp(-A) \cdot A^k}{k!} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k}} \cdot \exp\left(\frac{-v^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (3)$$

onde A é o índice impulsivo e  $\sigma_k^2 = P \left( \frac{\left(\frac{k}{A}\right) + \Gamma}{1 + \Gamma} \right)$ ,  $P = \sigma_G^2 + \sigma_I^2$ ,  $\sigma_G^2$  é a potência do ruído Gaussiana,  $\sigma_I^2$  é a potência do ruído impulsivo e  $\Gamma = \sigma_G^2 / \sigma_I^2$ . O índice impulsivo e potência total de ruído são variáveis que são escolhidos para atender um específico ruído impulsivo desejado.

### 2.1.2 Atenuação

A atenuação é a diminuição da intensidade do sinal, que ocorre em função da impedância do meio de propagação. Nas linhas de transmissão de energia, a distância é a maior causa de atenuação do sinal, sendo particularmente crítica na transmissão de longa distância, portanto, repetidores devem ser usados para recombinar os sinais a serem enviados para evitar tais efeitos desnecessários. É importante verificar que a atenuação não é uniforme na faixa de frequência, e é mais crítica em frequências mais altas (12).

As medições da atenuação, conforme (13), podem ser feitas usando dois transceptores como modems, um deles é o transmissor e o outro é o receptor. T1 e C são o acoplamento transformador e capacitor de acoplamento no modem do transmissor e os outros T2 e C são iguais componentes no lado do receptor. Um voltímetro AC é usado para medir as tensões V1 e V2 em ordem para calcular as atenuações de sinal ao longo das linhas de energia. Experimentos em atenuações de sinal do linhas de energia são realizadas em diferentes partes de onde será implementada a rede PLC. Os parâmetros da atenuação do sinal medidas são: o comprimento da linha, a frequência da portadora e os números da caixa de conexão. Os condutores de fase-neutro, fase-terra e neutro-terra podem ser usados como canais de comunicação. Normalmente os condutores de fase e neutro são usados como canal do PLC.

### 2.1.3 Impedância da rede elétrica

A variação da impedância ao longo da rede constitui um dos principais problemas na transmissão do sinal PLC.

A impedância delimita a potência que o transmissor deve injetar na rede, aumentando assim a complexidade e, conseqüentemente, o custo dos transmissores. Alguns dos fatores que modificam a impedância são: impedância do transformador de distribuição, impedância característica do cabo e a impedância dos equipamentos conectados.

A impedância do transformador de distribuição aumenta com a frequência; a impedância característica do cabo é afetada quando tem-se cabos com características e finalidades diferentes apresentam impedâncias distintas, o que prejudica a homogeneidade do canal de transmissão. O efeito disso é uma diminuição da potência do sinal original devido ao aumento do índice de reflexão do sinal transmitido, conseqüência do aumento do descasamento de impedância. Segundo (14), a impedância dos equipamentos conectados pode variar entre 10 e 100  $\Omega$ .

### 2.1.4 Compatibilidade eletromagnética

Ao transmitir altas frequências sem blindagem adequada, os cabos da linha de energia podem se comportar como antenas. A corrente alternada passa pelo condutor gerando um campo magnético (também alternado) em torno do condutor, bem como um campo elétrico, sendo este gerado apenas pela presença de cargas elétricas. Esses campos magnéticos são extremamente prejudiciais para equipamentos de radiofrequência operando perto de linhas de energia. O efeito antena é uma das maiores deficiências do uso da tecnologia PLC, sendo duramente criticado por diversos setores da sociedade (como a *American Radio Amateurs Association*) e defensores da proibição do uso dessa tecnologia. Deve-se destacar também que a radiação eletromagnética emitida pelo sistema PLC é um dos pontos-chave da supervisão técnica em diversos países (12).

### 2.1.5 Perda de pacotes

O percentual de perda de pacotes é um dos principais indicadores de qualidade de uma rede. A perda de pacotes ocorre em redes quando os pacotes de dados são perdidos durante a transmissão ou os pacotes de dados individuais chegam atrasados ao seu destino.

Por ser um meio bastante ruidoso, a rede elétrica acaba por distorcer as mensagens enviadas, sendo necessária assim a aplicação de técnicas que diminuam o percentual de perda de pacotes, aumentando, por conseguinte, a qualidade do serviço.

A tecnologia PLC emprega duas maneiras de minimizar a perda de pacotes. A primeira consiste no reenvio de mensagens com a informação de que a mensagem original chegou de forma satisfatória. A segunda técnica opera inserindo dados redundantes (sem informação) na mensagem, mas que são capazes de proteger a informação do ruído presente no canal.

## 3 VISÃO GERAL DA TECNOLOGIA PLC/BPL

Para fazer um panorama sobre a tecnologia PLC/BPL, a seguir conta-se um pouco do histórico, princípio de funcionamento, topologias, vantagens e desvantagens. Posteriormente, busca-se abordar as informações teóricas.

### 3.1 Histórico

De acordo com (15), a ideia de PLC remonta a 1920, quando foi criada a primeira proposta de utilização de ondas portadoras para comunicação em redes de alta tensão, utilizando modulação analógica na faixa de 15 a 50 kHz. Naquela época, não existiam métodos de codificação nem sistemas digitais, o que permitiria a implementação de tecnologias avançadas.

Em (15) afirma-se que foi somente em 1930 que a primeira técnica que tornou possível a utilização da rede elétrica para se transmitir dados foi criada: a *Ripple Control* (RC). Seu objetivo era transmitir sinais de controle em frequências baixas (0,1 a 0,9 kHz), permitindo a

comunicação a pequenas taxas e alta potência. Esta tecnologia permitia que fosse feita comunicação de modo unidirecional e foi usada para a realização de tarefas como a ativação da iluminação pública. Foi até os anos 80 que outros sistemas que possuíam taxas baixas foram sendo produzidos. Além disso, esses sistemas foram utilizados também para a telemetria, controle remoto e comunicação de voz.

Conta-se que empresas de energia presentes tanto nos Estados Unidos como na Europa passaram a realizar pesquisas para fazer análises sobre as características da rede elétrica e a capacidade desta como um canal de comunicação. Nos testes realizados, descobriu-se que as faixas de 5 a 500 kHz eram as que tinham melhor potencial de usabilidade, devido, principalmente, a relação sinal/ruído e a atenuação do sinal (15).

Utilizando a técnica de modulação *Spread Spectrum* ou espalhamento espectral, o primeiro protótipo de um modem que conseguiu transmitir taxas de 60 bps a distância de até 1 km foi criado em 1998 (15).

Na década de 1990, surgiu o primeiro sistema que permitia a comunicação bidirecional (15). A empresa britânica *Norverb Communications* começou a testar as comunicações de alta velocidade usando as linhas de transmissão de energia existentes em 1991. Mas foi só em 1997 que a *Nortel* e a *Norverb* puderam usar a tecnologia em desenvolvimento para acessar a Internet, mostrando ao mundo uma forma de acesso, ou seja, uma rede de computadores atrativa porque permite utilizar a infraestrutura que já existe na maioria das residências e escritórios do mundo (12).

Em 2000, a *HomePlug Powerline Alliance* surgiu como uma aliança principalmente entre fornecedores, com o objetivo de estabelecer um padrão aberto para a tecnologia PLC de rede domiciliar (15).

### **3.2 Princípio de Funcionamento**

O princípio básico do PLC consiste na sobreposição do sinal PLC ao sinal CA, em 60 Hz, da rede elétrica. Por regulamentação ANATEL, o sinal PLC deve trafegar entre as frequências

entre 1,705 kHz e 50 MHz, a fim de que os dois sinais fiquem livres de interferências entre si e possam fazer uso do mesmo meio de transmissão.

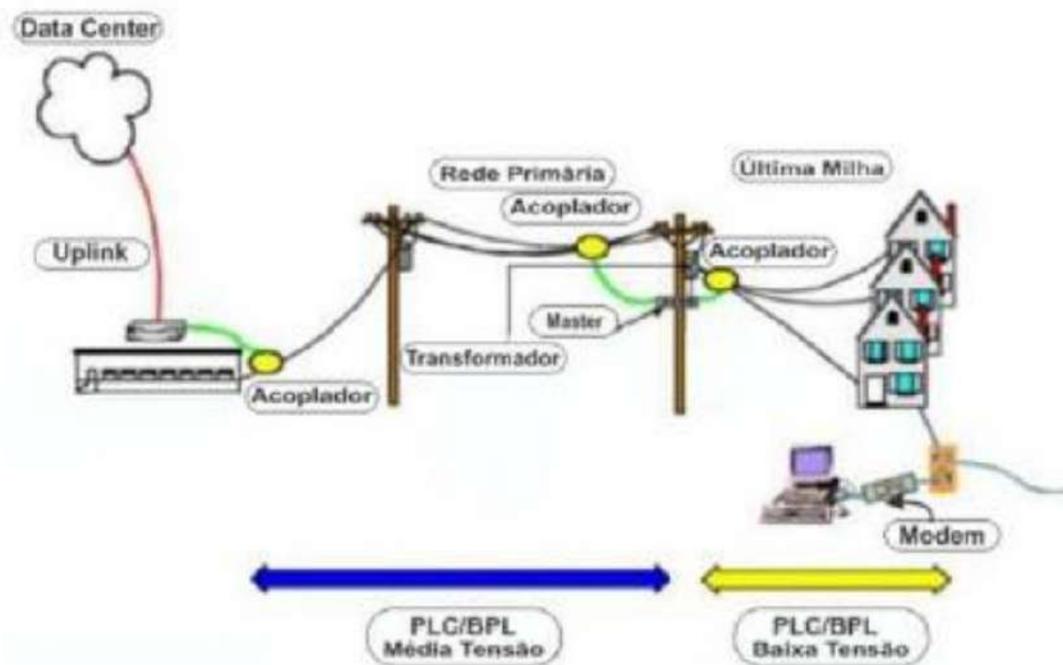
### 3.3 Topologia da rede PLC/BPL

De forma panorâmica, o sistema PLC possui uma topologia bem simples, conforme a Figura 1 mostra: uma rede radial, onde existe um ponto central que determina o início de toda rede de comunicação. Para chegar na subestação, o sinal de Internet que vem da operadora pode utilizar qualquer outro meio que for mais viável, como fibra óptica ou cabo coaxial. Daí, a partir da subestação, o sinal é acoplado, modulado e transportado por toda rede elétrica de média tensão. Nos postes há repetidores conectados à rede de media tensão, que recebem o sinal e regeneram o sinal vindo da subestação, faz a leitura e converte para rede de baixa tensão, deixando pronto para ligação do modem na residência do usuário (16).

Didaticamente a tecnologia PLC/BPL pode ser agrupada da seguinte forma:

- PLC Externo (*Outdoor*), é empregado na infraestrutura elétrica de propriedade da concessionária, nas redes de média ou baixa tensão;
- PLC Interno (*Indoor*), ou seja, o foco deste trabalho, uso da tecnologia dentro das edificações ou condomínios;
- PLC Doméstico, quando o a tecnologia é empregada dentro da área privada do usuário final, no caso quando já possui conectividade com a internet, tratando-se assim de uma rede de acesso;

Figura 1 – Topologia da rede PLC/BPL



Fonte: MARTINS (2016).

Ao analisar o canal PLC e as varias topologias dentro de uma rede, percebe-se que cada seção do caminho de propagação do sinal possui características próprias, ocasionando variações de impedância, e, por consequência, outros problemas como reflexões, descasamentos e ondas estacionárias. Então, a rede pode ser subdividida em varias redes de duas portas, e, como há varias reflexões, o canal PLC pode ser descrito como uma rede de parâmetros distribuídos ao longo de sua extensão (17).

### 3.4 Vantagens e Desvantagens

O principal atrativo da tecnologia PLC é o uso da infraestrutura da rede elétrica já existente, desta forma agregando valor a esta.

A tecnologia PLC faz de cada ponto de acesso de energia um potencial ponto de acesso à Internet ou porta de comunicação. Para utilizá-lo, basta conectar um dispositivo que possa

receber sinais modulados e torná-los adequados para uso (modem). Dessa forma, a eletrônica inteligente e os serviços avançados de telecomunicações podem ser suportados, como dados sincronizados, transmissão de voz e vídeo.

A rapidez na implantação é outro ponto positivo desta tecnologia devido ao uso de uma infraestrutura que já está pronta, necessitando, em alguns casos de apenas pequenos ajustes. Ainda temos outro fator que torna a tecnologia PLC muito atrativa, que é a grande capilaridade que as redes de distribuição de energia elétrica atingem. A instalação por parte das operadoras é bastante simplificada, e para o usuário final basta conectar o modem PLC na tomada com o devido cabo e fazer a configuração da rede local como qualquer outro modem (16).

Outro ponto a destacar é que os modems PLC fazem uso de padrões de criptografia, dando mais segurança aos dados do usuário, mesmo que as redes PLC geralmente tenham forma radial (16).

Como em todas as tecnologias, o PLC apresenta algumas desvantagens que, de certa forma, impedem a maior disseminação desta tecnologia.

Uma das questões mais discutidas é que a rede elétrica é muito sensível a ruídos, por isso alguns eletrodomésticos, como liquidificadores, secadores de cabelo, aspiradores de pó, fornos de micro-ondas, etc., causarão interferências de diferentes intensidades. Esses ruídos podem afetar a propagação do sinal, portanto, muitas tecnologias estão sendo desenvolvidas e aprimoradas, como o desenvolvimento de novos métodos e filtros de modulação de sinal.

As diferentes características encontradas na topologia da rede de distribuição e sua qualidade apresentam outra desvantagem, pois em algumas concessionárias de energia, grandes melhorias - melhorias que irão aumentar a qualidade da própria energia distribuída - são necessárias para fornecer suporte à tecnologia PLC.

### 3.5 Regulamentação

A regulamentação da tecnologia PLC/BPL no Brasil está em vigor por resoluções da ANATEL e da ANEEL. A ANATEL estabelece, através da Resolução 527 (18), os critérios e parâmetros técnicos que permitem a utilização dessa tecnologia de forma harmônica com as aplicações de radiocomunicação que usam radiofrequência na faixa entre 1,705 kHz e 50 MHz. Essa resolução descreve em seu artigo 7º as características técnicas dos sistemas BPL:

I - incorporar técnicas de mitigação de interferências que possibilitem reduzir remotamente a potência do sinal e remanejar as frequências em operação em tais sistemas, incluindo filtros ou permitindo o completo bloqueio de radiações indesejadas em frequências ou de faixas de frequências, em conformidade com este Regulamento.

II - para frequências abaixo de 30 MHz, quando da utilização de filtros para evitar interferência em uma faixa de radiofrequências específica, os filtros devem ser capazes de atenuar as radiações indesejadas dentro desta faixa a um nível de, pelo menos, 20 dB abaixo dos limites especificados neste Regulamento.

III - para frequências acima de 30 MHz, quando da utilização de filtros para evitar interferência em uma faixa de radiofrequências específica, os filtros devem ser capazes de atenuar as radiações indesejadas dentro desta faixa a um nível de, pelo menos, 10 dB abaixo dos limites especificados neste Regulamento.

IV - manter as configurações de mitigação de interferência, mesmo quando houver falta de energia na rede ou quando o equipamento for desligado e religado, de forma consecutiva ou esporádica.

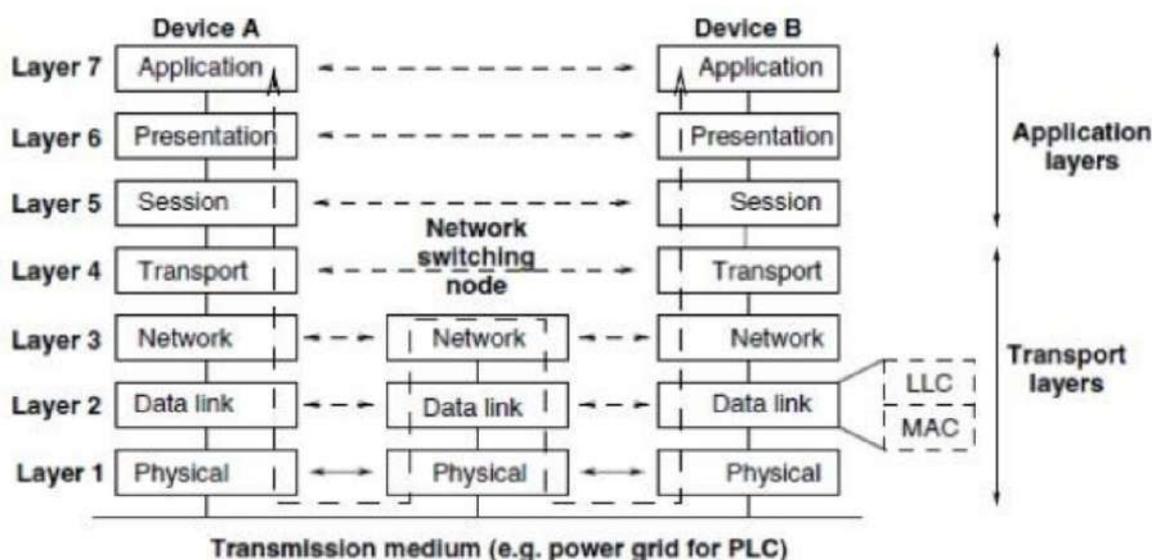
V - dispor de mecanismo que possibilite, remotamente, a partir de uma central de controle, o desligamento da unidade causadora de interferência prejudicial, caso outra técnica de mitigação não alcance o resultado esperado.

Por outro lado, a ANEEL, através da Resolução Normativa nº 375 (19) regulamenta a utilização das instalações de distribuição de energia elétrica como meio de transporte para a comunicação digital ou analógica de sinais, ratificando no artigo 4º que uso da tecnologia PLC não deve comprometer o atendimento aos parâmetros de qualidade da energia elétrica, segurança das instalações e proteção ao meio ambiente estabelecidos pelos órgãos competentes.

### 3.6 A rede PLC e o Modelo OSI/ISO

O Modelo OSI é uma arquitetura que divide as redes de computadores em 7 camadas para obter camadas de abstração. Cada protocolo realiza a inserção de uma funcionalidade assinalada a uma camada específica. Com ele é possível realizar comunicação entre máquinas distintas e definir diretivas genéricas para a elaboração de redes de computadores independente da tecnologia utilizada, sejam essas redes de curta, média ou longa distância. Na Figura 2 é mostrado cada uma das camadas e suas funções. As camadas são: Aplicação (*Application*), Apresentação (*Presentation*), Sessão (*Session*), Transporte (*Transport*), Rede (*Network*), Dados (*Data Link*) e Física (*Physical*).

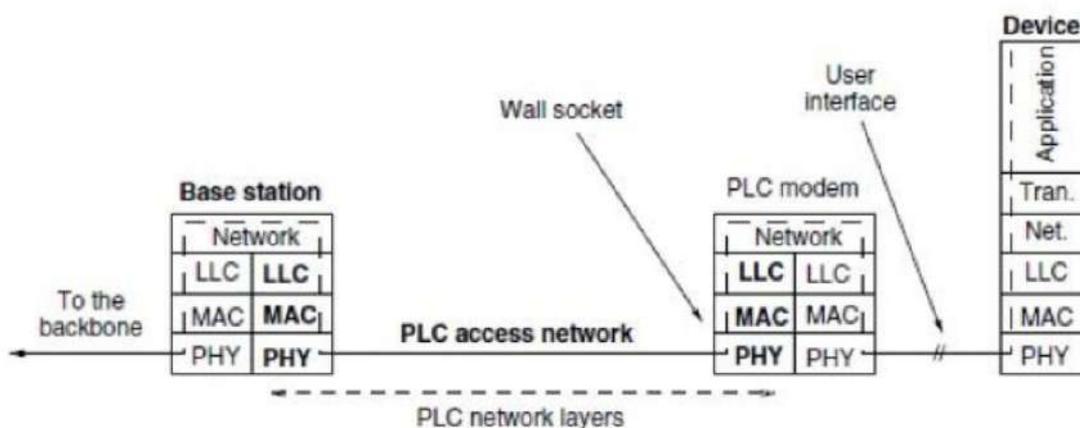
Figura 2 – Camadas do Modelo OSI



Fonte: PARENTE (2011).

A rede PLC realiza o tráfego de dados pela rede elétrica (camada 1), porém essa tecnologia implementa ainda acesso múltiplo ao canal e emprega detecção e correção de erros, estratégias inerentes à camada 2. Então, pode-se afirmar, com base na Figura 3, que a interface específica do PLC inclui as duas primeiras camadas da rede. No entanto, a camada 3 (camada de rede) é imprescindível para a tecnologia PLC, pois é ela a responsável pela interconexão entre a rede PLC e as outras redes de comunicação (12).

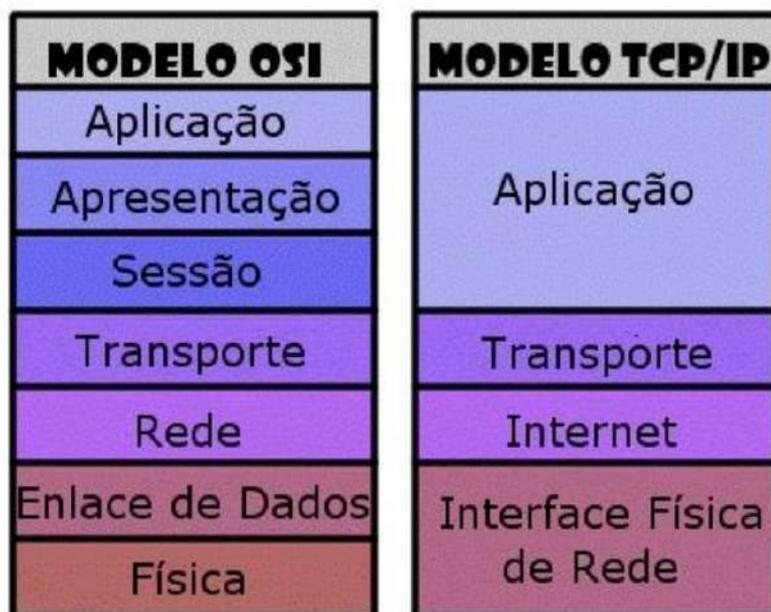
Figura 3 – Atuação da rede PLC no Modelo OSI



Fonte: PARENTE (2011).

O TCP / IP é um protocolo universal, pois devido à sua arquitetura aberta, outros fabricantes podem criar suas próprias versões de TCP / IP. Portanto, todos os sistemas operacionais podem se comunicar entre si sem problemas. Ao contrário do modelo OSI, o TCP / IP possui apenas quatro camadas. A camada de aplicação correspondente às 5ª, 6ª e 7ª camadas do modelo OSI é onde ocorre a comunicação entre a aplicação e a camada de transporte, esta última é a contrapartida direta da 4ª camada do modelo OSI. A camada da Internet corresponde à camada 3 do modelo OSI. A camada de interface de rede é equivalente à primeira e segunda camadas do modelo OSI, conforme mostrado na Figura 4 (12).

Figura 4 – Modelo de Referência OSI comparado ao TCP/IP



Fonte: COSTA; PEREIRA (2021).

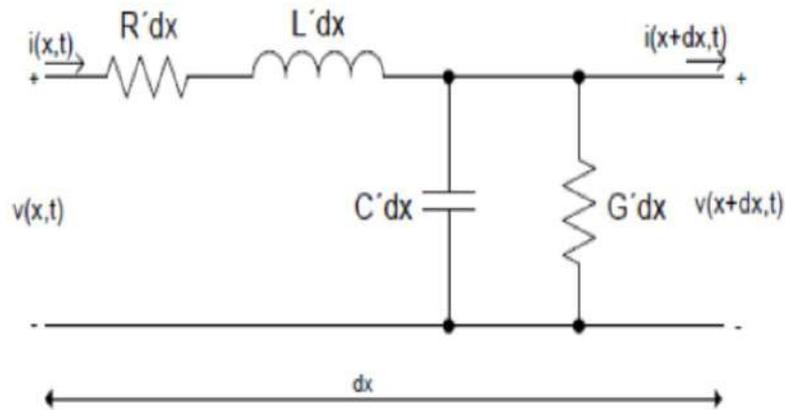
### 3.7 Caracterização do canal PLC

As características do canal da rede elétrica mostram um comportamento típico que pode ser caracterizado por alta variação de impedância, entre  $\Omega$  e  $k\Omega$ , em função da variação da frequência do sinal. Nesses picos, a rede se comporta como um circuito ressonante paralelo. Na maioria das faixas de frequência, a impedância mostra comportamento indutivo ou capacitivo. A Impedância característica de um cabo de força está normalmente na faixa de  $90 \Omega$ .

No entanto, a impedância da rede não é apenas influenciada pela impedância característica, mas também pela topologia da rede e cargas conectadas que podem ter uma grande variação de impedâncias também (10).

A linha de transmissão pode ser descrita por meio dos parâmetros  $R'$ ,  $L'$ ,  $C'$ ,  $G'$  conforme Figura 5.

Figura 5 – Modelo básico de linha de transmissão



Fonte: SILVA (2014).

Teoricamente, a partir do modelo de linha de transmissão formada por dois condutores de comprimento  $\Delta x$  em paralelo, é descrito pelos parâmetros distribuídos,  $R'$ , a resistência por comprimento da unidade,  $L'$ , a indutância por comprimento da unidade,  $G'$ , a condutância e  $C'$ , a capacitância por unidade comprimento. A impedância característica é calculada como (20):

$$Z_o = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (5)$$

E a constante de propagação calculada como (20):

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta \quad (6)$$

Onde  $\alpha$  = constante de atenuação em Np / m e  $\beta$  = constante de fase em rad / m.

Conforme (17), pode-se considerar para uma rede PLC que  $R' \ll \omega L'$  e  $G' \ll \omega C'$  nas frequências de interesse. Logo:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( R' \sqrt{\frac{C'}{L'}} + G' \sqrt{\frac{L'}{C'}} \right) \quad (7)$$

$$\beta = \omega \sqrt{L' \cdot C'} \quad (8)$$

Ainda em (20) é detalhado um procedimento experimental usando um analisador de rede, que possibilita medir a impedância de curto-circuito visto da entrada do circuito e a impedância de circuito aberto, e a partir delas calcular a impedância característica e a constante de propagação como:

$$Z_o = \sqrt{Z_{oc} \cdot Z_{sc}} \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{Z_{sc}}{Z_{oc}}} \quad (10)$$

onde  $l$  = comprimento do cabo,  $Z_{oc}$  = impedância de entrada da extremidade do cabo com circuito aberto e  $Z_{sc}$  = impedância de entrada da extremidade do cabo em curto-circuito.

A matriz de parâmetros distribuídos (ou Matriz ABCD) descreve a relação entre a tensão de entrada e saída e a corrente do rede de duas portas pode ser aplicada para modelar a função de transferência do canal PLC. Este método facilita a análise porque a topologia em T da Figura 4 é uma amostra da rede de conexão de duas portas.

A relação entre a tensão e corrente de entrada ( $U_1$  e  $I_1$ ) e tensão e corrente de saída ( $U_2$  e  $I_2$ ) da rede composta de duas portas pode ser representada como (21):

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma \cdot l) & Z_o \cdot \text{sen}(\gamma \cdot l) \\ \frac{1}{Z_o} \cdot \text{sen}(\gamma \cdot l) & \cos(\gamma \cdot l) \end{pmatrix} \quad (12)$$

E a função de transferência pode ser escrita como:

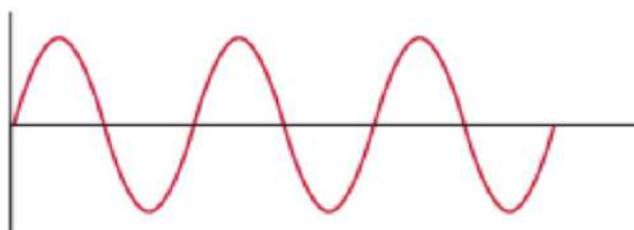
$$H = \frac{U_L}{U_S} = \frac{Z_o}{AZ_o + B + CZ_o Z_S + DZ_S} \quad (13)$$

### 3.8 O Sinal PLC/BPL

Por definição, um sinal é uma função de uma ou mais variáveis, na qual são veiculadas informações sobre a natureza de um fenômeno físico (22).

A tensão (e a corrente) alternada que alimenta nossas casas e as indústrias é um sinal elétrico senoidal caracterizado por sua amplitude, frequência e fase, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Onda senoidal

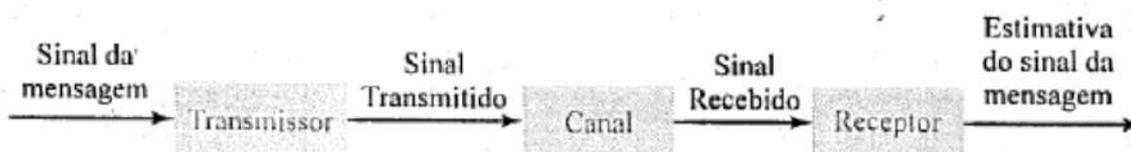


Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

O processo pelo qual alguma característica de uma onda portadora é variada de acordo com a mensagem (sinal modulante), produzindo um sinal modulado, cujas propriedades são mais compatíveis com as características do canal é tipicamente chamado de modulação (14). Logo, o sinal PLC/BPL é uma modulação em frequência senoidal, em que o sinal que contém informação é usado para variar a frequência de um sinal senoidal, no caso, o sinal elétrico.

Conforme observa-se na Figura 7, em todo sistema de comunicação há três elementos básicos: o transmissor, o canal e o receptor (22).

Figura 7 – Elementos de um sistema de comunicação



Fonte: HAYKIN (2001)

Após a propagação através do canal, o receptor reconstrói o sinal de mensagem original a partir da versão degradada do sinal de transmissão. Essa recriação é realizada por meio de um processo denominado demodulação, que é o processo inverso do processo de modulação usado no transmissor. No entanto, devido à presença inevitável de ruído e distorção no sinal recebido, acreditamos que o receptor não pode recriar com precisão a mensagem original. A degradação do desempenho de todo o sistema será afetada. De acordo com o tipo de esquema de modulação utilizado. Especificamente, acreditamos que alguns esquemas de modulação são menos sensíveis a ruído e efeitos de distorção do que outros (23).

### 3.8.1 Técnica de Modulação

As técnicas de modulação, além de permitirem incorporar informações aos sinais que podem ser efetivamente transmitidos, também possibilitam a transmissão simultânea de mais de um sinal com espectros sobrepostos no mesmo canal, através de um conceito chamado de multiplexação (24). A técnica de modulação mais empregada no PLC/BPL é a OFDM.

Qualquer técnica de modulação está diretamente relacionada com a Lei de Shannon, que pode ser escrita da seguinte forma:

$$C = W \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (14)$$

onde

C = capacidade do canal em bps;

W = largura de banda do sinal Hz;

SNR = Relação Sinal-ruído;

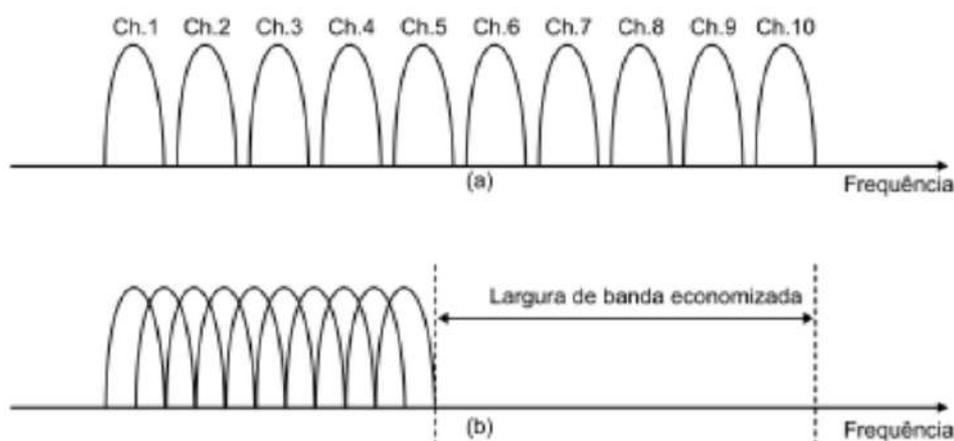
A Lei de Shannon permite que, dada a capacidade de um canal fixo, a comunicação possa ser realizada mesmo em meios hostis, apenas aumentando a potência do sinal transmitido ou aumentando sua largura de banda. Portanto, existe a possibilidade de negociação entre a largura de banda do sinal e sua potência. Esta característica do canal de transmissão é muito importante para o sistema PLC, pois não é obrigatório aumentar a potência do sinal a ser

transmitido como forma de transpor o ruído inerente ao canal, que pode aumentar a largura de banda do sinal transmitido. Isso é interessante, pois o aumento da intensidade do sinal aumentará a radiação eletromagnética da rede, o que é uma desvantagem do sistema PLC.

A modulação OFDM apresenta boa imunidade a trechos multipercursos, fácil implementação através da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e se adapta bem às condições ruins do canal de comunicação (25).

Em um sistema de transmissão de dados paralelo, a largura de banda total do sinal é dividida em N subcanais sem sobreposição. Cada canal é modulado com um símbolo separado para formar N subcanais de reutilização de frequência. Para reduzir essa ineficiência, o conceito de usar transmissão paralela de dados e multiplexação por divisão de frequência (FDM) surgiu, onde subportadoras se sobrepõem. A Figura 8 mostra a diferença entre a tecnologia tradicional sem sobreposição de multiportadoras e a tecnologia de multiportadoras com sobreposição (26).

Figura 8 – Exemplo de modulação multiportadora sem sobreposição (a) e modulação multiportadora ortogonal (b)



Fonte: DUTRA (2010).

## 4 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 4.1 Ambiente Experimental

Os ensaios foram realizados no CPID, localizado na cidade de Cariacica-ES, que é considerado a primeira usina para pesquisa de energia fotovoltaica do Espírito Santo. A Figura 9 mostra o edifício e o conjunto de módulos fotovoltaicos instalados.

As instalações elétricas do CPID apresentam características de rede de baixa tensão com tensões disponíveis de 127 V e 220 V. O edifício foi construído em estrutura metálica e paredes feitas de placas cimentícias com *drywall* por dentro, sem o uso de lajotas. A rede elétrica está devidamente aterrada e isolada por tubos de PVC embutidos nas paredes.

Figura 9 – Vista panorâmica do CPID



Fonte: ESBRAZIL (2021).

## 4.2 Planejamento dos Experimentos

Em um processo de transmissão de dados, conhecer o meio no qual o sinal será conduzido é um processo importante para projetar e simular o enlace de comunicação.

Na hierarquia da rede PLC/BPL, o dispositivo pode assumir três funções: HE, TDR e CPE. A unidade configurada como HE é um modem Master que controla o tráfego e a negociação de conexão de unidades TDR e CPE na mesma cobertura de linha de energia. Uma unidade CPE pode ser conectada diretamente à unidade HE ou por meio da unidade TDR, dependendo das opções de definição de configuração. As unidades TDR têm a função principal de estender a cobertura para distâncias mais longas ou o número de usuários finais, em suma, são repetidores de sinal. As unidades TDR se comportam como escravo para a unidade mestre e mestre para a unidade escrava.

A escolha dos locais onde serão instaladas a unidade HE e a primeira unidade CPE, passa por definir onde ficará o computador servidor da rede e o ponto de energia mais próximo do local onde será instalada a câmera IP (ou câmera IP Speed Dome), respectivamente. O PC Servidor da rede ficou alocado na sala de gerenciamento de redes (segundo pavimento do edifício) e a câmera IP na parte superior externa do edifício. Uma unidade CPE ficará ali próximo das caixas d'água, num cômodo denominado no projeto elétrico como Barrilete.

Do projeto elétrico do CPID em ANEXO, observa-se que, partindo da sala de gerenciamento de redes, o sinal faz o caminho passando pelo QD08A, segue por eletrocalha do pavimento 2, passa por eletrocalha vertical trecho F e A e chega ao QCG. Daí o sinal retorna pela eletrocalha vertical F e A mas pelos cabos que vão para o QD06, seguindo para a tomada disponível no barrilete.

Medidos no primeiro pavimento, partindo do QCG até a eletrocalha vertical na prumada, tem-se 27 m de comprimento, por onde passa os cabos que vão para QD07, QD07, QD08A.

Do QD06 ao QD08A somam-se 28,41 m; do QD08A à tomada do HE somam-se 32 m; do subsolo onde encontra-se o QCG até a eletrocalha do segundo pavimento, tem-se 6 m. Do

QD06 até a tomada disponível no barrilhete, onde fica o Modem *Slave* (CPE2), somam-se 22,3 m.

Assim, fisicamente, o menor caminho que um sinal PLC, que sai do HE e chega ao CPE, percorre é:

$$32 \text{ m} + 28,41 \text{ m} + 6 \text{ m} + 27 \text{ m} + 27 \text{ m} + 6 \text{ m} + 22,3 \text{ m} = 148,71 \text{ m}$$

Para usar o menor número de repetidores, e evitar criar uma “topologia em T”, os dois modems configurados como repetidor, TDR-1 e TDR-2, foram instalados respectivamente nos quadros de distribuição QCG e QD08, segundo o layout proposto na Figura 10. Também foram configurados o modem repetidor TDR-3 e o modem escravo CPE-2 para ficarem sobressalentes.

Um modelo de câmera IP que pretende-se instalar na extremidade dessa rede é a Speed Dome VIP SD1.3M 18X Intelbras, que pode ter até 10 usuários remotos simultâneos segundo o fabricante. Tomando-a como parâmetro, das especificações técnicas da câmera, para o bom funcionamento, é necessário ter relação sinal/ruído (SRN) > 50 dB e taxa (ou fluxo) de bits entre 32 Kbps e 8 Mbps (28). Conferindo:  $10 \log 100000 = 10 \cdot 5 = 50 \text{ dB}$ . Assim, 50 dB corresponde, em potência, à relação S/N = 100000:1.

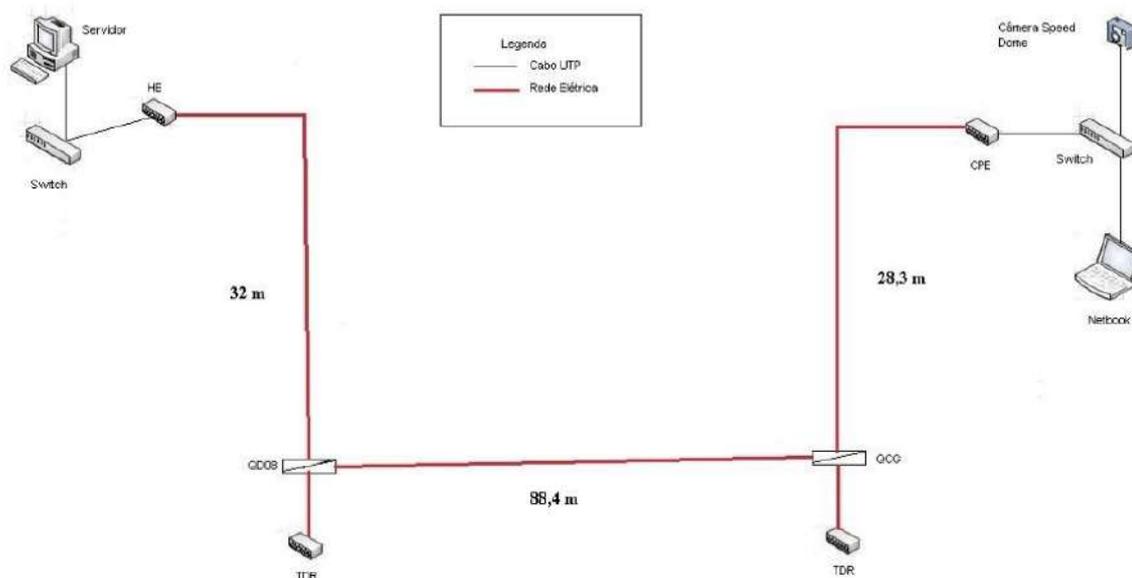
Da Lei de Shannon, para um canal com capacidade 32 Kbps:

$$32000 = W \cdot \log_2(1 + \text{SNR}) = W \cdot \log_2(51) = W \cdot 5,672 \quad \rightarrow \quad W = 5.641,75 \text{ Hz (largura de banda do sinal).}$$

Para um canal com capacidade de 8 Mbps:

$$8000000 = W \cdot \log_2(1 + \text{SNR}) = W \cdot \log_2(51) = W \cdot 5,672 \quad \rightarrow \quad W = 1.410.437,23 \text{ Hz} = 1,41 \text{ MHz (largura de banda do sinal).}$$

Figura 10 – Layout da rede PLC/BPL implementada no CPID



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

### 4.3 Hardware

O principal *hardware* da rede é o dispositivo PLC da Corinex, modelo CXP-HDA-GWYC, mostrado em foto na Figura 11. Ele pode ser configurado como HE (*Master*), TDR (Repetidor) ou CPE (*Slave*).

O Quadro 1 apresenta as especificações técnicas do dispositivo PLC usado neste projeto. A partir dele pode-se extrair um detalhe de suma importância: apesar de a tecnologia BPL permitir taxas de até 200 Mbps, a interface *Ethernet*, usada para conectar o dispositivo PLC ao PC servidor (ou à câmera IP), limita essa velocidade a 100 Mbps.

Foram utilizados também um computador *desktop* com Windows 7 (servidor), dois *netbooks* com Windows 7 para auxiliar nos testes, um modem 4G Vivo para monitorar a rede remotamente.

Figura 11 – Dispositivo PLC da Corinex usado nos experimentos



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

Quadro 1 – Especificações técnicas do dispositivo PLC CXP-LVA-GWYC

Padrões	ITU-T G.984.x, IEEE 802.3u, 802.1P 802.1Q, especificação de acesso UPA
Segurança e EMI	EN 55022 Classe B, EN 55024, EN 50412 EN 60950 -1: 2001 IEC 60950-1: 2001
Velocidade de <i>backbone</i>	GPON ONT: 2.488 Gbps downstream, 1.244 Gbps upstream BPL: Até 200 Mbps (PHY) Ethernet: 10/100 Mbps Full Duplex (AUTO)
Acoplador trifásico para linha de energia	110VAC / 220VAC / 240VAC
Interfaces	Conector óptico SC / APC, Conector de linha de energia, Conector coaxial fêmea tipo F, 10 / 100BaseT Fast Ethernet RJ-45
Faixa de frequência <i>Powerline</i> usada	2 - 34 MHz
Entrada de energia	85 a 265 VAC, 50 / 60Hz

Dimensões	230 x 185 x 80 mm
Peso	2 Kg
Densidade espectral de potência transmitida	-50 dBm / Hz
Consumo de energia	Máximo de 20 Watts
Temperatura de operação	-20 ° a 70 ° C (-4 ° F a 158 ° F)
Umidade operacional	10% a 80% sem condensação
Grau de Proteção	IP68

Fonte: CORINEX (2008)

#### 4.4 Softwares

Os softwares utilizados neste trabalho foram: AutoCad, MatLab, TeamViewer, PRTG Network Monitor, Tfgem e recursos do próprio Windows 7, como ping, Telnet, Gerenciador de Tarefas (guia Rede). O software do fabricante dos dispositivos PLC, a Corinex, não foi utilizado devido a dificuldades de fornecimento junto ao fabricante, comprometendo o cronograma proposto, mas agregaria informações importantes ao trabalho, como SNR por exemplo.

O AutoCad foi utilizado para consultar o projeto elétrico do CPID e mensurar o tamanho total do circuito que define a rede a fim de encontrar o circuito de menor comprimento.

O Tfgem é um programa gerador de pacotes, útil para manter a rede em uso contínuo e realizar testes buscando estressar a rede; sua interface é mostrada na Figura 12.

O TeamViewer serve para acessar o PC servidor remotamente.

No PRTG, "sensor" é o elemento básico de monitoramento. Os sensores geralmente monitoram medições na rede, como tráfego nas portas do switch, carga da CPU nos servidores e espaço livre nas unidades de disco. O monitoramento da largura de banda é um método de medir a largura de banda real disponível no sistema local (LAN ou WiFi). As ferramentas de monitoramento de largura de banda exibem dados em tempo real, como velocidade de download e upload, o que ajuda a evitar a pressão da rede.

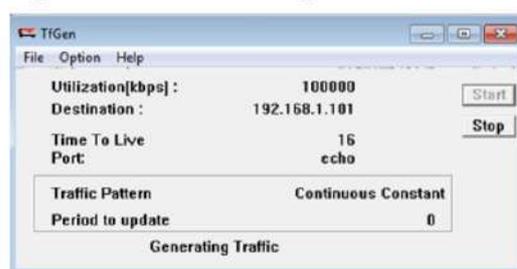
Dos recursos do Windows, foi utilizado o ping, ou taxa de latência, que é o tempo que leva para um pacote viajar de seu dispositivo para um servidor na Internet e de volta para o dispositivo, em milissegundos. É importante entender que quanto maior o valor do ping, mais lenta é a conexão do dispositivo. Portanto, um valor mais alto impede a sincronização de informações em tempo real. O Quadro 2 mostra todos os dispositivos que compõem a rede criada. Dois TDR's e um CPE sobressalentes foram configurados.

Quadro 2 – Relação dos dispositivos da rede PLC

<b>Designação</b>	<b>Endereço IP</b>	<b>MAC</b>	<b>Local</b>	<b>Quadro elétrico</b>
CPE (1) - Reserva	192.168.1.103	00:0B:C2:0F:EF:AE	Reserva	-
CPE (2)	192.168.1.104	00:0B:C2:0F:F1:A7	Barrilete	QD06
HE	192.168.1.102	00:0B:C2:0F:F0:12	Pesquisa e Gerenciamento de Redes	QD08A
Netbook	192.168.1.99	-	Caixa d'água (parede interna)	QD06
Servidor	192.168.1.100	-	Pesquisa e Gerenciamento de Redes	QD08A
TDR (1)	192.168.1.105	00:0B:C2:0F:CC:5C	Com. Ópticas	QD08
TDR (2) - Reserva	192.168.1.106	00:0B:C2:0F:EF:E3	Reserva	-
TDR (3)	192.168.1.107	00:0B:C2:0F:CD:25	Subestação do Consumidor	QCG
TDR (4) - Reserva	192.168.1.109	00:0B:C2:0F:EF:C4	Reserva	-
Câmera IP	192.168.1.108	-	Caixa d'água (parede externa)	QD06

Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

Figura 12 – Interface do Tfggen



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

## 5 APLICAÇÃO DOS TESTES COM RESULTADOS

Foram realizados quatro experimentos, para avaliar as taxas de transmissão, sob a malha elétrica em estudo, e os dados foram coletados com o auxílio de *softwares* medidores de tráfego, utilizando tomadas nas mais variadas distâncias uma da outra no maior número possível de ambientes, para avaliar mais adequadamente a tecnologia PLC nesta aplicação e constatar de qual forma conseguir acoplamento estável.

### 5.1 Primeiro teste – Conectividade a curta distância

Após configurar os modems HE, TDR e CPE, seguindo os procedimentos descritos em (29), o passo seguinte foi testar a conectividade entre os modems na mesma bancada em tomadas diferentes da sala de Comunicações Ópticas, onde ficam os quadros de distribuição QD-08, QD-08A e QD-08B.

Usar o comando *ping* é uma maneira eficaz de testar a conectividade. Geralmente chamado de teste de pilha de protocolo, este comando se move da camada 3 do modelo OSI para a camada 2 e, em seguida, para a camada 1, e, através do protocolo ICMP, verifica a conectividade.

A Figura 13 apresenta o resultado de um dos testes de conectividade entre o HE e o TDR1, instalado em uma tomada da sala de Comunicações Ópticas, a 32 m de distância um do outro.

Figura 13 – Teste de conectividade entre o HE e o TDR1

```

C:\windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [versão 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.
C:\Users\pc1>ping 192.168.1.105
Disparando 192.168.1.105 com 32 bytes de dados:
Resposta de 192.168.1.105: bytes=32 tempo=5ms TTL=255
Resposta de 192.168.1.105: bytes=32 tempo=3ms TTL=255
Resposta de 192.168.1.105: bytes=32 tempo=3ms TTL=255
Resposta de 192.168.1.105: bytes=32 tempo=3ms TTL=255
Estatísticas do Ping para 192.168.1.105:
    Pacotes: Enviados = 4, Recebidos = 4, Perdidos = 0 (0% de
    perda).
Aproximar um número redondo de vezes em milissegundos:
    Mínimo = 3ms, Máximo = 5ms, Média = 3ms
C:\Users\pc1>ping 192.168.1.105
Disparando 192.168.1.105 com 32 bytes de dados:
Resposta de 192.168.1.105: bytes=32 tempo=5ms TTL=255
Resposta de 192.168.1.105: bytes=32 tempo=2ms TTL=255
Resposta de 192.168.1.105: bytes=32 tempo=2ms TTL=255
Resposta de 192.168.1.105: bytes=32 tempo=2ms TTL=255
Estatísticas do Ping para 192.168.1.105:
    Pacotes: Enviados = 4, Recebidos = 4, Perdidos = 0 (0% de
    perda).
Aproximar um número redondo de vezes em milissegundos:
    Mínimo = 2ms, Máximo = 5ms, Média = 2ms
C:\Users\pc1>_

```

Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

## 5.2 Análise do primeiro experimento

O resultado indica que quatro pacotes de 32 bytes de teste foram enviados e foram retornados do *host* 192.168.1.105 em um tempo médio de 2 ms. TTL é a sigla em inglês para *Time-to-live* (vida útil), e define o número de saltos restantes que o pacote do ping tem antes de ser ignorado. Esse resultado é considerado satisfatório, uma vez que não houve perda de pacote.

## 5.3 Segundo teste – Fator distância

Após estudo prévio do projeto elétrico do CPID, onde se estimou que a rede BPL/PLC teria um comprimento físico aproximadamente de 150 m, e o local onde ficaria a câmera IP foi definido, o próximo passo foi buscar conectividade entre o HE e o CPE sem uso de repetidores. Para isso foram realizados testes, sem sucesso, conectando o CPE primeiramente na tomada disponível no barrilete, e posteriormente na tomada usada para iluminação de emergência.

Essa foi a etapa prática mais trabalhosa, porque em seguida, já se teria a certeza da necessidade de usar repetidores, mas o ideal seria utilizar o menor número possível.

Empiricamente, buscou-se a conectividade testando o TDR1 em todas as tomadas aéreas, as quais ficam conectadas lâmpadas de emergência. Mais uma vez não houve sucesso, o que já se esperava. A detecção de harmônicos presentes na rede elétrica onde será instalada uma rede PLC/BPL é um passo preliminar à execução do projeto (25). Ao fazer uma inspeção visual com o objetivo de identificar as cargas elétricas existentes que potencialmente causarão problemas à rede de comunicação, incluí-se as lâmpadas de emergências, que geralmente possuem fontes chaveadas.

Daí, buscou-se em seguida testar o TDR1 apenas nas tomadas de uso geral (TUG) disponíveis, reservando a tomada aérea próximo ao local onde ficaria a câmera, para ligar uma régua de tomadas que serviria para inserir as fontes de alimentação da própria câmera IP e do *Netbook*, que auxiliaria nos testes. Mais uma vez não houve conectividade.

A conectividade entre o HE e o CPE ocorreu quando foram utilizados dois repetidores, TDR1 e TDR 2, ligados diretamente nos quadros de distribuição de energia QD-08 e QCG, respectivamente. Essa ligação usa as três fases e o neutro, conforme a Figura 14 mostra.

Figura 14 – Instalação do TDR1 no QD-08

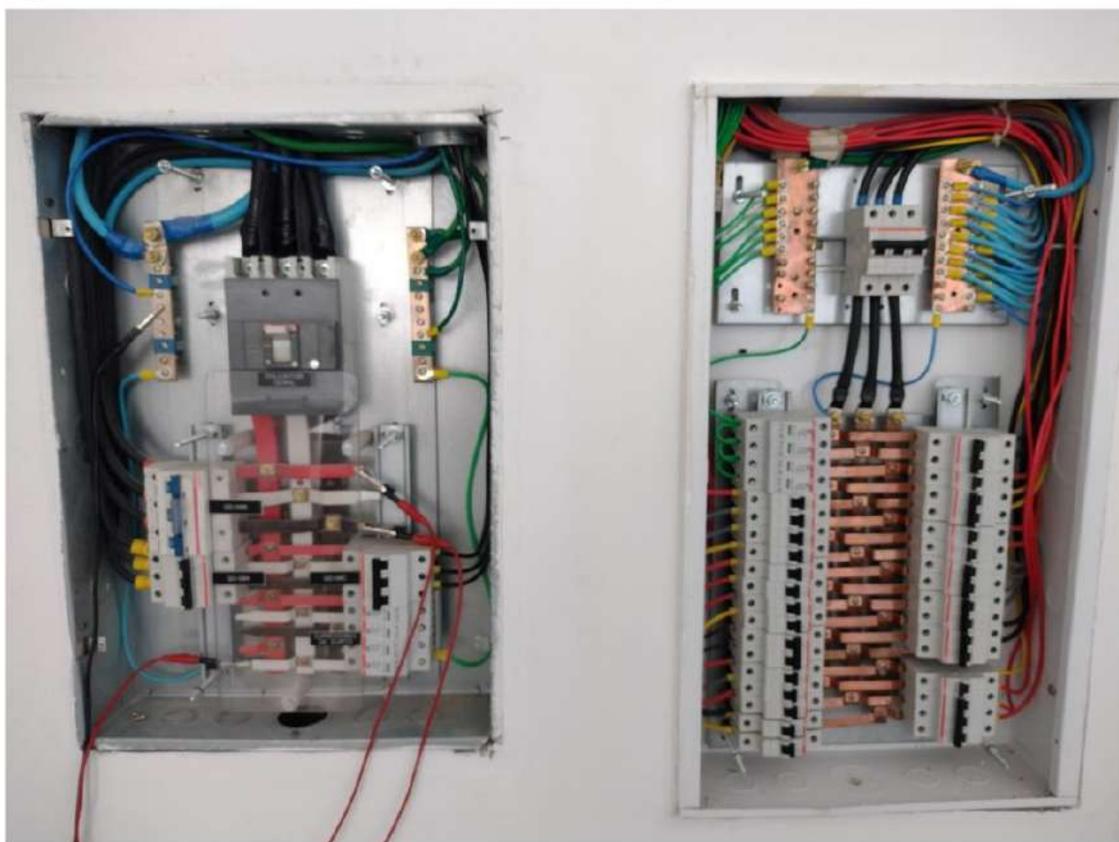


Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

Outro fator importante ao realizar essa ligação é a segurança e atenção a fim de se evitar um acidente por choque elétrico ou provocar uma falta elétrica. A Figura 15 traz um detalhe: os barramentos das fases A, B e C do QD-08 estão identificados pelas cores vermelho, branco e preto e isolados entre si. É prudente conectar uma das garras, designada para uma das fases do TDR1, ao barramento branco na extremidade inferior, e não entre a extremidade disponível entre as extremidades dos barramentos vermelho e preto. A garra poderia se desprender ou simplesmente declinar devido a gravidade, encostando com a outra e dar origem a uma falta elétrica.

Todavia, observou-se que após injetar os sinais PLC na rede elétrica buscando acoplamento, de imediato havia conectividade, mas com o tempo a conexão se perdia. Ao desligar e religar os dispositivos PLC, a rede se reestabelecia, mas verificava-se o ping com o tempo médio alto. O comando ping nem sempre irá identificar a natureza do problema, mas pode ajudar a identificar a origem do mesmo, um primeiro passo importante na solução de problemas de uma falha de rede.

Figura 15 – Detalhe da conexão dos terminais do TDR1 no QD-08



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

Nesse contexto, o ping retornando um tempo médio de resposta alto significa que o canal precisa ser otimizado. E o que se identificou de imediato que poderia ser feito para tornar a rede mais estável seria reduzir o comprimento dos cabos terminais do dispositivo TDR1, que apoiado na bancada, seus cabos terminais mediam 7 m de comprimento cada.

A redução dessa ramificação de 7 m para 1 m de comprimento reduziu o tempo médio de resposta do ping para todos os dispositivos PLC da rede, bem como tornou a rede estável. A Figura 22 mostra como o TDR1 ficou bem próximo do quadro de distribuição QD-08.

Figura 16 – Instalação do TDR1 no QD-08 com cabo de tamanho reduzido



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

#### 5.4 Análise do segundo experimento

Nesse experimento foi observado o fator atenuação por distância. Na avaliação de um sistema de comunicação de dados é a distância máxima em que se garante a qualidade da comunicação do sistema (14).

## 5.5 Terceiro teste – Avaliação dos enlaces

Após obter conectividade entre os dispositivos PLC da rede, através do comando ping, com um tempo médio de resposta aceitável, seguiu-se para uma etapa que consiste na avaliação quantitativa do canal de comunicação, onde busca-se determinar a capacidade de transmissão do referido canal de comunicação.

Os testes foram realizados usando a ferramenta de software PRTG Network Monitor, no qual foi criado um conjunto de sondas que avalia o desempenho dos trechos da rede em ambos sentidos, ou seja, do HE para o TDR1 e vice-versa, do TDR1 para o TDR3 e vice-versa, e do TDR3 para o CPE2 e vice-versa. Isso se deve ao fato da capacidade de todos os trechos serem diferentes.

O PRTG possui uma interface inovadora, com dashboards, gera gráficos, e se traduz numa ferramenta bastante versátil.

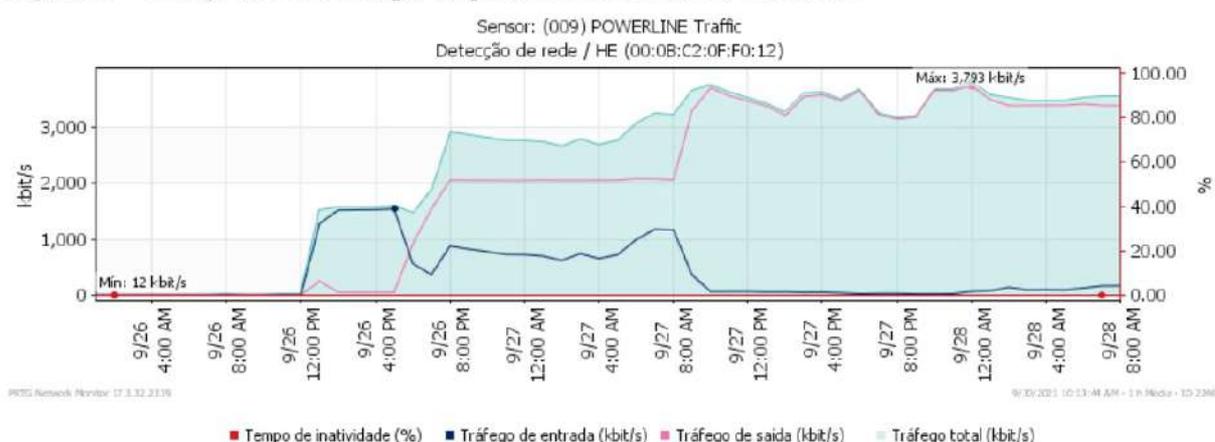
Ao passo que as sondas foram sendo criadas, também foi instalada a câmera IP no local definido previamente no projeto, conectada ao CPE2. A princípio ela exibia imagem usando a interface web, pelo navegador do *Internet Explorer*, mas percebeu-se que dessa forma, após um tempo, fazia-se necessário fazer novo *login* para exibir as imagens. Com isso buscou-se instalar no servidor e gerenciar a câmera através de um programa do próprio fabricante, o SIM Next.

Com o intuito de encontrar a capacidade do canal, e com a câmera em funcionamento transmitindo dados via rede elétrica, usou-se o gerador de pacotes Tfggen, variando periodicamente os valores das taxas, iniciando com 1000 Kbps até 9000 Kbps, estressando a rede até a câmera deixar de transmitir imagens.

A Figura 17 apresenta o tráfego de entrada e o tráfego de saída no HE (Master) por meio das informações coletadas pelo sensor (009) Power Line Traffic. Às 12h do dia 26/09 a câmera foi ativada, e ficou transmitindo as imagens a taxas próximas de 1,5 Mbps até às 16h, de forma praticamente constante, identificado na legenda como tráfego de entrada. Às 16h injeta-

se na rede pacotes a taxa fixa de 2 Mbps, através do aplicativo Tfgen, disparando do servidor para o *netbook*, ou seja, do HE para o CPE2. Observa-se que neste instante, o tráfego de entrada cai e oscila entre taxas de 366 Kbps a 1175 Kbps, mas a conexão com a câmera é mantida, até às 8h do dia 27/09. A partir deste instante, a taxa de geração de pacotes no Tfgen é aumentada para 4000 Kbps e com isso o tráfego de saída satura e atinge seu limite, o tráfego total passa a ser o tráfego de saída porque o tráfego de entrada (dados da câmera) cai vertiginosamente abaixo dos 32 Kbps. O tráfego total no HE a partir daí fica saturado oscilando em torno de 3600 Kbps.

Figura 17 – Tráfego no HE, em Kbps, no período de 26/09/2021 a 28/09/2021

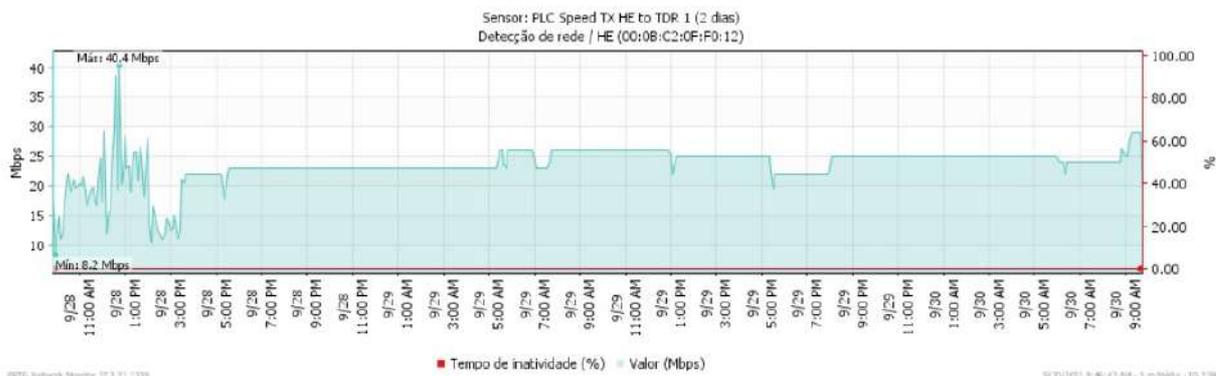


Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

Para avaliar o enlace total da rede é necessário avaliar o enlace trecho a trecho. O primeiro trecho a se estudar é o enlace HE – TDR1. No dia 28/09/2021 foram realizados testes em intervalos de 1h de estresse da rede gerando pacotes com Tfgen do *Netbook* para o servidor. Esses testes foram realizados de 8h às 15h. Esse teste não é possível fazer remotamente, por isso foi realizado em intervalos curtos, mas houve tempo suficiente para a rede se estabilizar. Isso explica as oscilações na capacidade máxima de transmissão do HE para o TDR1, no início do gráfico mostrado na Figura 18. Com o encerramento dos testes, a rede se estabilizou e foi possível verificar a capacidade máxima de transmissão, dada por esse sensor, ficar por mais tempo em 22 Mbps, por vezes acima disso.

No entanto, ao se avaliar da mesma forma o desempenho desse trecho no sentido contrário, a Figura 19 mostra que do TDR1 para o HE a capacidade máxima de transmissão permaneceu por mais tempo entre 4 Mbps e 6 Mbps, ou seja, muito inferior ao sentido oposto.

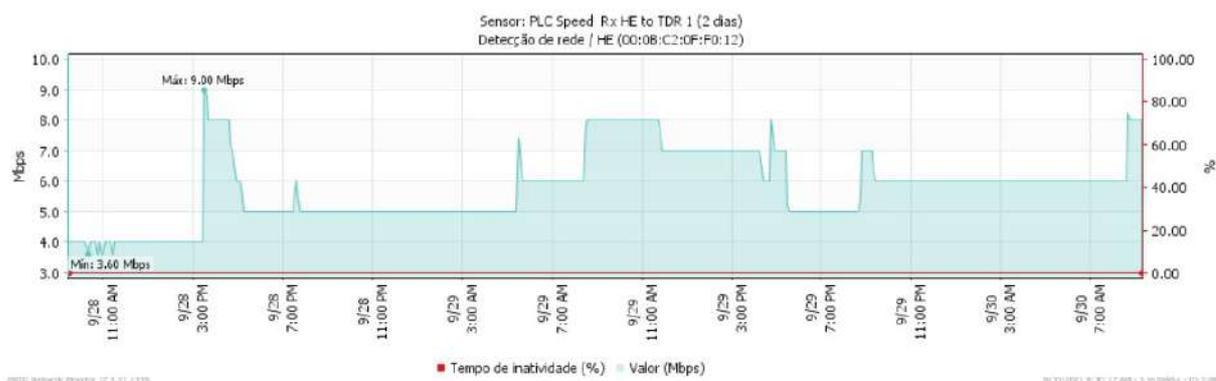
Figura 18 – Capacidade máxima de tráfego do HE para o TDR1, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

Avaliando o trecho correspondente ao enlace TDR1 – TDR3, do dia 28/09 após às 16h, a Figura 20 mostra a capacidade máxima de transmissão estável sempre acima de 27 Mbps, no sentido TDR1 para TDR3.

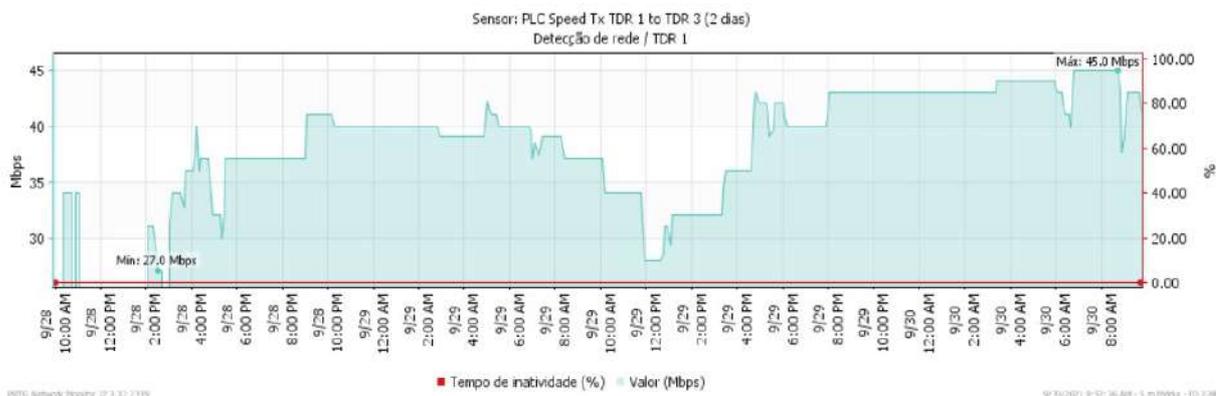
Figura 19 – Capacidade máxima de tráfego do TDR1 para o HE, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

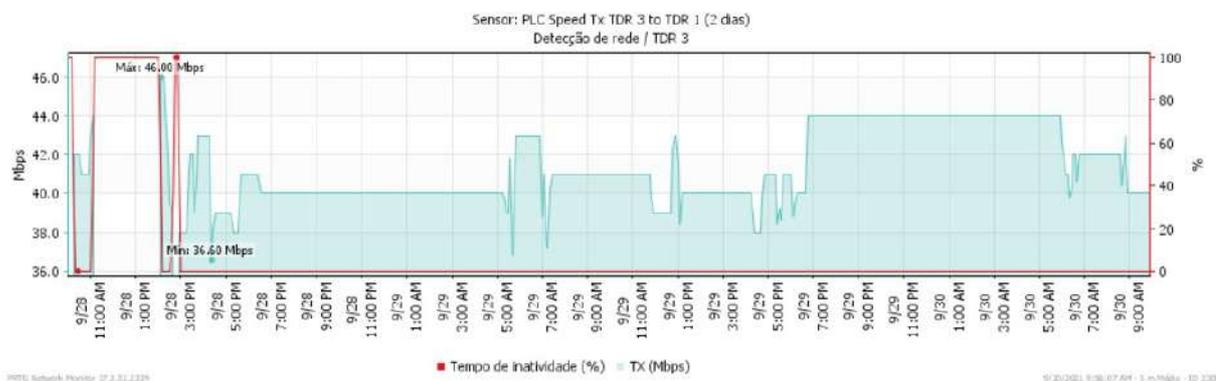
Ao verificar o enlace do TDR3 para o TDR1, o desempenho é ainda melhor: a Figura 21 mostra a capacidade máxima de transmissão estável e sempre acima de 36 Mbps, após as 16h do dia 28/09.

Figura 20 – Capacidade máxima de tráfego do TDR1 para o TDR3, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

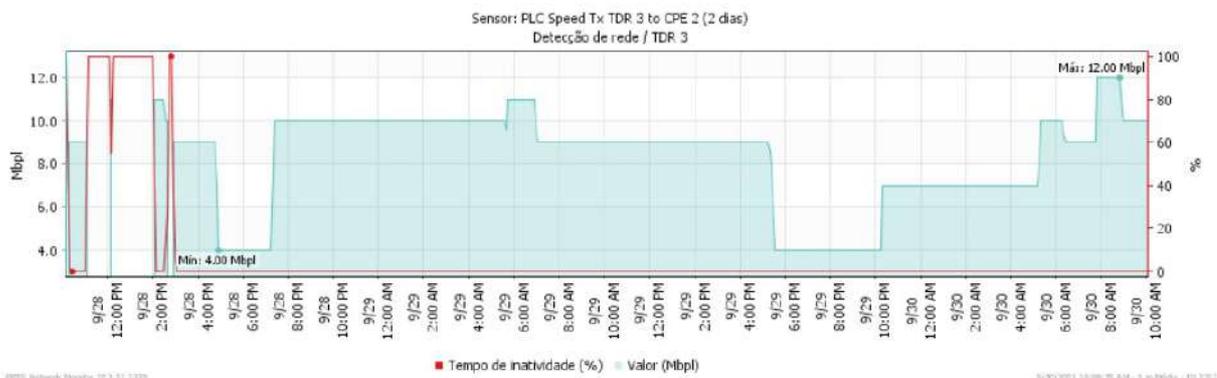
Figura 21 – Capacidade máxima de tráfego do TDR3 para o TDR1, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

O último trecho da rede, compreende ao enlace TDR3 – CPE2. As características desse enlace são parecidas com a do enlace HE – TDR1. Do TDR3 para o CPE2 a Figura 22 mostra momentos estáveis onde a capacidade máxima de transmissão ficou por horas em 4 Mbps. Porém, na maior parte do período ela permaneceu acima dos 6 Mbps. No sentido contrário, a Figura 23 mostra que do CPE2 para o TDR3 a capacidade máxima de transmissão é ligeiramente melhor: acima de 7,2 Mbps, após às 16h do dia 28/09/2021.

Figura 22 – Capacidade máxima de tráfego do TDR3 para o CPE2, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

Figura 23 – Capacidade máxima de tráfego do CPE2 para o TDR3, em Mbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

## 5.6 Análise do terceiro experimento

A análise quantitativa de todos os trechos da rede PLC/BPL revelou que o enlace TDR1 – TDR3 pode ser considerado excelente, ao passo que o enlace HE – TDR1, no sentido do TDR1 para o HE está limitando o desempenho geral da rede para um nível que permite o funcionamento da câmera IP, porém o desempenho não será ótimo porque está sendo limitado em 3600 Kbps. Esse comparativo pode melhor ser observado na Tabela 1. Uma câmera Speed Dome Intelbras pode, segundo o fabricante, atingir 8000 Kbps se o canal permitir.

Tabela 1 – Taxas alcançadas nos enlaces de comunicação, em Mbps

ENLACE	TX		RX	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
HE – TDR1	8,2	40,4	3,6	9,0
TDR1 – TDR3	27,0	45,0	36,6	46,0
TDR3 – CPE	4,0	12,0	7,2	19,0

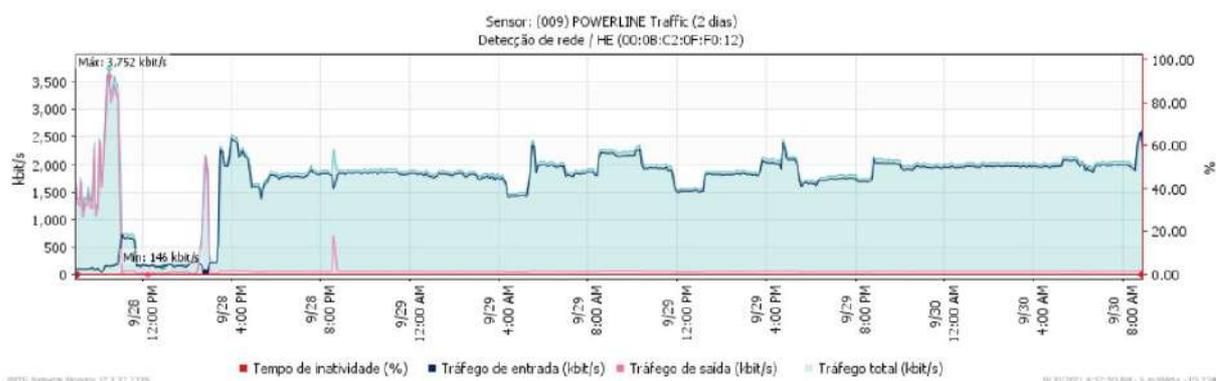
Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

## 5.7 Quarto teste – Comunicação do servidor com a câmera em regime permanente

Este último teste busca observar o desempenho da comunicação entre a câmera IP e o servidor por um período maior, a fim de fazer uma avaliação qualitativa da rede.

Na Figura 24 observa-se que, após as 16h do dia 28/09, o tráfego de entrada no HE, proveniente da câmera IP, se mantém estável por 40 horas seguidas, sempre acima de 1500 Kbps. Em alguns momentos chegou a atingir 2500 Kbps, mas isso pode ser explicado pelo controle adaptativo pelo carregamento de bits (*Adaptive Bit Loading Protocol*), que é o componente de *software* responsável por adaptar a modulação de cada portadora OFDM, dependendo do SNR dessa portadora (29). Isso permite alcançar taxa de transferência mais alta. A principal funcionalidade deste componente é alterar a modulação da portadora quando o SNR da portadora mudar, adaptando-se à nova qualidade do *link* e evitando erros de linha (se a modulação for muito alta para a qualidade do link atual) ou aumentar a eficiência (se a qualidade do *link* atual suportar uma melhor modulação).

Figura 24 – Tráfego no HE, em Kbps, no período de 28/09/2021 a 30/09/2021



Fonte: PRODUÇÃO DO AUTOR

## **5.8 Análise do quarto experimento**

A avaliação que se faz é que, com a estabilidade da rede PLC/BPL, o tráfego se manteve dentro de um nível aceitável podendo explorar inclusive recursos de gravação de vídeo via aplicativo SIM Next. Dessa forma, qualitativamente, o resultado é considerado bom.

## 6 CONCLUSÕES

O objetivo de projetar, implementar e testar uma rede utilizando a rede elétrica como meio de comunicação entre uma câmera, alocada na área externa, com o PC Servidor, alocado numa sala no interior do CPID, foi totalmente atendido.

A rede PLC/BPL implementada pode ser utilizada para vídeo monitoramento. No entanto, deve-se considerar o cenário de melhor desempenho da câmera IP, onde a taxa (ou fluxo) de bits pode chegar a 8 Mpps, conforme o fabricante (Intelbrás). Diante disso, não seria prudente acrescentar mais câmeras na rede, sabendo que foi observado nos testes que ao estressar a rede com taxas se aproximando de 3,6 Mbps a comunicação fica comprometida.

Percebe-se que alguns itens que poderão ser objeto de pesquisa para o aprimoramento do projeto de vídeo monitoramento através de uma rede PLC/BPL dentro do CPID, na medida em que se faz necessário acrescentar mais câmeras para monitorar outras áreas. Tais objetos são:

- Testar o modem HE ligado diretamente às três fases e o neutro no QD-07, igual ficou a ligação do TDR1 ao QD-08. Com isso o servidor também mudaria de sala e iria para uma posição central dentro do prédio;
- Como o modem mestre HE pode servir uma rede BPL de até 64 endereços MAC (29), pode-se também criar outra rede, utilizando outra frequência central, ligada ao mesmo HE. Para isso teria que indicar onde o modo está colocado no espectro (em Hertz). Assim, mais câmeras poderiam ser acrescentadas ao sistema;

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MEDEIROS, J. C. O. **Princípios de Telecomunicações: Teoria e Prática**. 5ª. ed. Editora Saraiva, 2016.
- (2) CARVALHO, R. M. **Comunicações analógicas e digitais**. 1ª. ed. Editora LTC, 2009.
- (3) SILVA, S. P.; BIONDI, A. **Caminhos para a universalização da internet banda larga: experiências internacionais e desafios brasileiros**. 1. ed. São Paulo: Intervezes, 2012..
- (4) SILVA, E. S.; JÚNIOR, J. A. S. **Redes PLC I: Alternativa para Acesso Banda Larga**. 2010. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredesplc1/default.asp>. Acesso em: 21 jun. 2021.
- (5) VITAL, R. B. N.; GUIMARÃES, D. A. **Metodologia e Recursos para Caracterização do Canal de Comunicação em Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Baixa Tensão**. Revista de Telecomunicações, vol. 14, nº 1, junho, Santa Rita do Sapucaí, 2012.
- (6) MODRO, N. S. **Tecnoloia PLC – Uma Opção para a Transmissão de Dados**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Informática) – Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis – IMESA, Assis, 2010.
- (7) PINHEIRO, A. P.; COELHO, J. C.; CORRÊA, F. A. C. **Transmissão de dados usando a rede elétrica no contexto de redes smart grids e micro-redes**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 20., Belo Horizonte, MG, 2014. Anais... Belo Horizonte, MG, 2014. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/cba2014/anais/PDF/1569935743.pdf>>. Acesso em: 1 jul. 2021.
- (8) OLHAR DIGITAL. **Internet pela rede elétrica: o que falta para essa ideia decolar?** 2015. Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2015/10/26/noticias/internet-pela-rede-eletrica-o-que-falta-para-essa-ideia-decolar/>. Acesso em: 2 jul. 2021

- (9) SILVA, Z. P. B. **Estudo da Aplicação da Modulação OFDM em Power Line Communications**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Elétrica) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2014.
- (10) PHILIPPS, H. **Modelling of Powerline Communication Channels**. Institute for Communications Technology, Braunschweig Technical University Schleinitzstr. 22D-38 106 Braunschweig, Germany, 1999.
- (11) TEMANEH-NYAH, C.CHIFAMBA, P. **An investigation of the effects of impulsive noise and channel distortion in narrow band power line communication**. 2015 Third International Conference on Digital Information, Networking, and Wireless Communications (DINWC), 2015.
- (12) PARENTE, D. A. **Estudo de Sistemas PLC (Power Line Communications)**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Teleinformática) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- (13) CAVDAR, H.; KARADENIZ, E. **Measurements of Impedance and Attenuation at CENELEC Bands for Power Line Communications Systems**. Sensors 2008, 8, 8027-8036, 2008.
- (14) KRONEMBERGER, I. H. M. **Implementação de um sistema indoor de comunicação de dados, pela rede elétrica, em um circuito isolado**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2009.
- (15) SANTOS, T. L. **Power Line Communications**. 2008. Disponível em: [https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_vf\\_2008\\_2/tulio/index.htm](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/tulio/index.htm). Acesso em: 17 jun. 2021.
- (16) MARTINS, G. V. S. **Power line communication: arquitetura, funcionamento e aplicações**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Engenharia de Redes e Sistemas de Telecomunicações) – Instituto Nacional de Telecomunicações, 2016.

- (17) VITOR, U. R. C. **Internet via rede elétrica: Modelagem do canal baseada em interferômetro**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- (18) BRASIL. Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL. **Resolução normativa nº 527, de 8 de abril de 2009**. Aprova o regulamento sobre condições de uso de radiofrequências por sistemas de banda larga por meio de redes de energia elétrica. Brasília: ANATEL, 2009. Disponível em: < <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2009/101-resolucao-527>>. Acesso em: 1 jul. 2021.
- (19) BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 375, de 25 de agosto de 2009**. Regulamenta a utilização das instalações de distribuição de energia elétrica como meio de transporte para a comunicação digital ou analógica de sinais. Brasília: ANEEL, 2009. Disponível em: < [www.aneel.gov.br/cedoc/ren2009375.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2009375.pdf) >. Acesso em: 1 jul. 2021.
- (20) ZWANE, F.; AFULLO, T. J. O. **An Alternative Approach in Power Line Communication Channel Modelling**. Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 47, 85-93, 2014.
- (21) MLYNEK, P.; MISUREC, J.; KOUTNY, M.; ORGON, M. **Power line cable transfer function for modelling of power line communication system**. Journal of electrical engineering, Vol. 62, nº 2, 104-108, Bratislava, 2011.
- (22) HAYKIN, S.; VEEN, B. V. **Sinais e Sistemas**. 1ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- (23) HAYKIN, S. **Sistemas de Comunicação: Analógicos e Digitais**. 4ª. ed. Editora Bookman, 2004.
- (24) OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. **Sinais e Sistemas**. 2ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. **Sinais e Sistemas**. 2ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

- (25) OLIVEIRA, O. L. **Contribuições Metodológicas à Implementação da Tecnologia PLC/BPL**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- (26) DUTRA, R. B. **Avaliação do desempenho da modulação OFDM em canais HF para rádios cognitivos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- (27) ESBRASIL. **Governo do Estado inaugura usina fotovoltaica em Cariacica**. 2021. Disponível em: <https://www.esbrasil.com.br/usina-fotovoltaica-cpdi-cariacica/>. Acesso em: 01 set. 2021.
- (28) INTELBRAS. **Manual do Usuário - Câmera speed dome IP de alta definição com zoom VIP SD1.3M 18X**. Manaus, 2012.
- (29) CORINEX. **User Guide – Low voltage access and GPON BPL Gateway for last mile solution**. Vancouver, 2008.

**8 ANEXO**

