

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LEONARDO RIBAS MARTINS CASTOR

**A Rede de Média Tensão como Meio de
Transporte de Dados em Redes *Smart Grid***

Vitória - Brasil

2015

Leonardo Ribas Martins Castor

Dissertação de Mestrado - 2015

LEONARDO RIBAS MARTINS CASTOR

**A Rede de Média Tensão como Meio de Transporte de
Dados em Redes *Smart Grid***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Espírito Santo

Centro Tecnológico

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Ph.D Marcelo Eduardo Vieira Segatto

Coorientador: D.Sc. Jair Adriano Silva

Vitória - Brasil

2015

LEONARDO RIBAS MARTINS CASTOR

A Rede de Média Tensão como Meio de Transporte de Dados em Redes *Smart Grid*/ LEONARDO RIBAS MARTINS CASTOR. – Vitória - Brasil, 2015 - 113 p.

Orientador: Ph.D Marcelo Eduardo Vieira Segatto

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015 .

1. BPL. 2. PLC. 3. *Smartgrid*. 4. Automação. 5. Média Tensão. I. Marcelo Eduardo Vieira Segatto. II. Universidade Federal do Espírito Santo. III. Título de Mestrado

CDU xx:xxx:xxx.x

LEONARDO RIBAS MARTINS CASTOR

A Rede de Média Tensão como Meio de Transporte de Dados em Redes *Smart Grid*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado

Vitória - Brasil, 11 de Dezembro de 2015

Ph.D Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Universidade Federal do Espírito Santo
(UFES)

D.Sc. Jair Adriano Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
(UFES)

D.Sc. Anilton Salles Garcia
Universidade Federal do Espírito Santo
(UFES)

D.Sc. Flávio Rabello de Souza
Agência Nacional de Telecomunicações
(ANATEL)

Vitória - Brasil
2015

*Cada sonho que você deixa para trás,
é um pedaço do seu futuro que deixa de existir.*

- Steve Jobs

*A Felicidade não se resume na ausência de problemas,
mas sim na capacidade que temos de lidar com eles.*

- Albert Einstein

Agradecimentos

Dedico este trabalho, primeiramente, a minha esposa, Tatiana Márcia Ribas Castor, por ter sido uma grande companheira em todos esses anos, por suportar as dificuldades com elegância e serenidade e, principalmente, por manter-me focado nos momentos em que estava perdido e cansado e; as minhas filhas maravilhosas, Mayara Souza Ribas Castor e Beatriz Souza Ribas Castor, por suportarem as minhas inúmeras ausências e ainda assim continuarem me amando incondicionalmente. Este amor é o que me mantém motivado a seguir sempre em frente. Agradeço aos meus pais, Israel Martins Castor e Maria Célia Crisostemo Ribas, pelo amor e carinho, pela educação e pelos sacrifícios feitos para que eu pudesse chegar até aqui. Agradeço ao meu orientador prof. Ph.D Marcelo Eduardo Vieira Segatto e meu coorientador prof. Dr. Jair Adriano Silva, pelos ensinamentos e direcionamentos no decorrer dos trabalhos e por acreditarem no meu esforço e permitirem que eu pudesse realizar este sonho, além da amizade e companheirismo que sempre demonstraram nesta trajetória. Um agradecimento especial ao prof. Dr. Anilton Salles Garcia, quem abriu, pela primeira vez, as portas da sala de aula e permitiu a minha participação como aluno ouvinte no programa de pós-graduação. Sem dúvida, esse foi um pequeno gesto que me permitiu dar um grande passo profissional.

Agradeço especialmente ao engenheiro Evandro Nunes Evangelista, da PETROBRAS, quem me ajudou a realizar os testes de campo e, com isso, enriquecer ainda mais o meu trabalho de pesquisa. Com a sua disposição e amizade o caminho para o alcance dos objetivos se tornou mais curto. Ao engenheiro Silvio, quem justificou o convênio UFES e PETROBRAS, permitindo que o projeto saísse do papel. Aos meus colegas de trabalho que sempre me incentivaram e acreditaram no meu potencial. Ao engenheiro Marcelo Eduardo Silva Melo pela essencial compreensão e apoio nas ausências do meu trabalho, justificadas pela participação nas aulas.

Agradeço ao mestre Jessé Gomes dos Santos pela amizade e ensinamentos a mim passados durante as horas de estudo e trabalho. Em especial ao estudante Ricardo Natale pela amizade, companheirismo, respeito, fidelidade e apoio durante todas as fases do projeto. Sem dúvida, o seu esforço e confiança foram fundamentais para o alcance dos resultados. Agradeço também aos amigos do LabTel pela amizade e convivência durante esses anos e ao prof. Ph.D Moisés Renato Nunes Ribeiro e Dra. Maria José Pontes, pelos ensinamentos e amizade.

Ficam aqui os meus sinceros agradecimentos e espero que, como Eu, outras pessoas também possam compartilhar da mesma sorte que tive de conviver com pessoas como vocês! Um grande abraço.

*“Quase todos os homens são capazes de suportar adversidades,
mas se quiser por à prova o caráter de um homem, dê-lhe poder.
Só tem direito de criticar aquele que pretende ajudar.
Pecar pelo silêncio, quando se deveria protestar,
transforma os homens em covardes.”*
(Abraham Lincoln)

Resumo

Um dos principais objetivos da indústria de Óleo & Gás é a redução de seus custos operacionais que influenciam diretamente os custos de produção do barril de petróleo. Aumentar a produção com custos operacionais reduzidos é o objetivo de qualquer companhia. Diante desse desafio a Automação Industrial ganha espaço como ferramenta redutora de custos, maximizadora da segurança operacional e facilitadora para o aumento da eficiência produtiva. Um dos principais fatores que eleva o custo operacional na indústria do petróleo é a utilização de recursos humanos em campo para operar, monitorar e controlar os processos de produção. Neste sentido, a automatização dos processos de produção torna-se inevitável e com ela surge a necessidade de prover sistemas de comunicação mais eficientes, mais confiáveis e com baixo custo de implementação. A indústria de Óleo & Gás utiliza tecnologias tais como fibra ótica e sistemas de comunicação sem fio para prover suas redes de acesso. Entretanto, essas redes são implementadas com prazos e custos elevados. Com alta capacidade de penetração nas unidades de produção *onshore* e baixo custo de investimento, o uso da tecnologia de comunicação de dados via rede elétrica, denominada de *Power Line Communication* - PLC, se torna uma alternativa economicamente e tecnicamente vantajosa quando comparada as tecnologias mencionadas anteriormente. Os poços de extração de petróleo *onshore* são cobertos pela planta elétrica de média tensão 13,8 kV, fato este que reduz o tempo de implantação e torna os custos de investimentos do projeto mais atraentes. Além disso, os sistemas PLC nos dias atuais utilizam técnicas de modulação, codificação, acesso múltiplos, embaralhamento, QoS etc., que garantem maior robustez na comunicação de dados, melhor utilização da potência do sinal e maior privacidade dos dados transmitidos, dificultando o seu rastreamento. Em contrapartida, o desempenho desta tecnologia depende diretamente das condições do canal de comunicação que é caracterizado pela transmissão com multipercursos, seletividade em frequência, ruídos impulsivo, interferências de radiofrequência, entre outros.

A rede de experimentos deste trabalho foi desenvolvida sob um cenário real e baseada conceitualmente nas redes inteligentes *Smart Grid*. Através de uma rede trifásica de média tensão, as informações de supervisão, controle e videomonitoramento do processo de produção de petróleo foram integradas e transportadas ao centro remoto de Operações SM-8, em São Mateus. Velocidades de *upstream* e *downstream* na ordem de 60 Mbps foram obtidas na camada física PLC em um trecho multipercurso de 322 m de comprimento e sem Repetidor. Já num trecho multipercurso de aprox. 2 km, um tráfego ethernet de 3 Mbps composto por dados de automação e imagens de alta definição, foi transportado em tempo real aos respectivos servidores, sem erros.

Palavras-chaves: *Powerline*. PLC. Automação. Média Tensão. Óleo & Gás. *Smart Grid*.

Abstract

The main purpose of any company is to increase its production with reduced operating costs and in the Oil & Gas industry is not different. In this scenario industrial automation plays a key role, maximizing operational safety and production efficiency. The use of human resources in order to operating, monitoring and controlling production's processes is intense on this field, which is, yet, a serious drawback for this kind of company. Systems communications as part of the production's automation contribute for reducing the operative expenditure and at same time provide efficient and reliable data traffic. The Oil & Gas industry has used fibre optics and wireless communications systems as last mile network solutions. However, these networks are implemented with high costs and at long time. More recently, the technology of data transmission over power line grid, called PLC, has becomes economically and technically a more interesting solution related to others technologies. As the onshore oil wells are already covered by the medium voltage power line grid, the reduced installation's costs for a PLC data network makes the project mre attractive. Additionally, the new PLC system use modern techniques, such as, adaptative coding and modulation, multiple access protocols, QoS, etc, for ensuring robustness, better use of signal power and greater privacy of data transmitted. In contrast, its performance depends on the communication channel condition based on transmission multipath, frequency selectivity, impulsive noise, RF interference, and others. This work was developed under a real scenario of Smart Grid conception. Through a three-phase medium voltage grid, supervisory, control and video surveillance information in oil production process have been transported to the remote operation center located at SM-8, São Mateus. It was obtained upstream and downstream speeds of 60 Mbps approximately in the physical layer through a multipath PLC channel with 322 m long without repeater. In a multipath stretch of 2 km long, a 3 Mbps ethernet traffic composed by automation data and high-definition images, was transported in a real-time frame to their servers without errors.

Key-words: *Power Line. Broadband. Automation System. Oil and Gas industry. Data Communication. Power Line Communication. Broadband Power Line.*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Infraestrutura de comunicação PLC em redes de média e baixa tensão para distribuição e acesso à dados de banda larga. UTP (<i>Unshielded Twisted Pair</i>).	30
Figura 2 – Tipos de redes elétricas no Brasil divididas por classe de tensão. (A) Rede de Alta Tensão, (B) Rede de Média Tensão e (C) Redes de Baixa Tensão	33
Figura 3 – Regulamentação em Radiofrequência na Europa, Japão e Estados Unidos da América.	34
Figura 4 – Topologia comum de uma rede de acesso BPL. HE: <i>Head End</i> , CPE: <i>Customer Premise Equipment</i> e TDR: <i>Time Division Repeater</i>	37
Figura 5 – Topologia conceitual de Redes Inteligentes <i>Smart Grid</i>	40
Figura 6 – Rede PLC Banda Larga como <i>backbone</i> em aplicações <i>Smart Metering</i>	42
Figura 7 – Topologia para comunicação na configuração back-to-back (B2B) com um cabo coaxial de 3.5 m de comprimento.	44
Figura 8 – Rede elétrica de baixa tensão usada nos testes dos equipamentos PLC. O analisador de rede e o osciloscópio digital são usados para capturar o sinal propagado nos domínios da frequência e do tempo, respectivamente.	45
Figura 9 – Espectros do sinal OFDM medidos com o analisador de rede nos cenários a) B2B, b) canal LV na saída do HE, na entrada do repetidor TDR e na entrada do CPE. e c) na entrada do CPE em um horário de uma segunda feira de maior movimento da semana, em que diversos alunos estavam utilizando a rede elétrica do laboratório.	46
Figura 10 – Sinal no domínio do tempo medido no conector próximo ao modem CPE da rede LV mostrada na Figura 8. As curvas a) e b) foram medidas sem tráfego de dados. As curvas c) and d) foram medidas sob tráfego UDP de 100 Mbps.	48
Figura 11 – Medida de tráfego UDP nas direções <i>downlink</i> e <i>uplink</i> realizada na configuração <i>back-to-back</i> . As curvas a) e b) representam o tráfego medido na camada MAC (interface Ethernet). As curvas c) e d) representam o tráfego medido na camada física (PLC).	49
Figura 12 – Medidas de tráfego UDP nas direções <i>downlink</i> e <i>uplink</i> registradas no cenário de testes envolvendo a rede de testes de baixa tensão.	50
Figura 13 – Topologia física da rede de testes preliminares em SM-8.	52
Figura 14 – Topologia lógica da rede de testes preliminares em SM-8.	53
Figura 15 – Fotografia do abrigo do CPE.	55
Figura 16 – Conjunto Isolador + Acoplador (15 KV)	56

Figura 17 – Topologia de testes ponto-multiponto com acoplamento na Fase T. . . .	58
Figura 18 – Taxa de Bit por segundo medida nas interfaces 802.3 e física do modem BPL	58
Figura 19 – Curva do tempo de resposta (comando PING) medido na rede PLC na configuração da Figura 17.	59
Figura 20 – Velocidade da linha PLC (Mbps) medida na camada física - Teste 1 . .	60
Figura 21 – Taxa de bit medida nas interfaces 802.3 e PLC.	61
Figura 22 – Curva do tempo de resposta medido (comando PING).	62
Figura 23 – Taxa de transmissão em Mbps medida na camada física (PLC). . . .	62
Figura 24 – Topologia ponto-a-ponto na Fase R (sem TDR) - Teste 3	64
Figura 25 – Taxa de bit medida nas interfaces 802.3 e PLC - Teste 3	64
Figura 26 – Curva do tempo de resposta medido (comando PING) - Teste 3	65
Figura 27 – Velocidade da linha PLC (Mbps) medida na camada física - Teste 3 . .	65
Figura 28 – Taxa de bit medida nas interfaces 802.3 e PLC quando a câmera foi conectada ao HE.	66
Figura 29 – Curva do tempo de resposta medido quando a câmera foi conectada ao HE.	67
Figura 30 – Velocidade da linha PLC em Mbps medida na camada física quando a câmera foi conectada ao HE.	67
Figura 31 – Topologia ponto-multiponto na Fase R e sem repetidora TDR.	68
Figura 32 – Volume de tráfego nas interfaces 802.3 e PLC para o cenário da Figura 31.	69
Figura 33 – Taxa de Bit das interfaces 802.3 e PLC para o cenário da Figura 31. . .	69
Figura 34 – Gráfico do tempo de resposta (comando PING) para o cenário da Fi- gura 31.	70
Figura 35 – Velocidade da linha PLC (Mbps) na camada física para o cenário da Figura 31.	70
Figura 36 – Aparatos experimentais utilizados de medidas do espectro nas Fases R e T.	72
Figura 37 – <i>Espectros OFDM saída modem HE - Medida A</i>	72
Figura 38 – Espectros do Sinal OFDM e Ruído medidos nas Fase R e T	73
Figura 39 – <i>Espectros OFDM lado modem CPE</i>	73
Figura 40 – Proposta de procedimentos para elaboração de projetos de comunicação de dados via rede elétrica conforme tecnologia PLC.	74
Figura 41 – Foto ilustrativa da estrutura de suporte ao Trafo de alimentação do modem, Isolador, Acoplador e chave de proteção.	76
Figura 42 – Caixa hermética, fixada no poste e utilizada para acomodação dos cabos, acopladores direcionais e do sistema de proteção da alimentação (DPS e Disjuntor).	77

Figura 43 – Visão frontal da caixa hermética e suporte de fixação do modem BPL no posteamento.	77
Figura 44 – Diagrama ilustrativo contendo informações técnicas necessárias para o projeto de comunicação PLC nas redes elétricas de média tensão. . . .	78
Figura 45 – Medição de resposta em frequência em uma topologia do <i>site survey</i> realizado em campo com dois modems BPL padrão OPERA, sobre uma rede elétrica MV.	81
Figura 46 – Curva SNR versus Subportadora do sinal OFDM obtida com o <i>site survey</i> realizado em campo num trecho de 424 m e largura de banda de 30 MHz.	82
Figura 47 – Sinal OFDM medido no domínio da frequência com o analisador de espectro diretamente na linha elétrica MV, com a mesma configuração apresentada na Figura 45.	83
Figura 48 – Diagrama da topologia lógica para uma rede PLC segregada por VLANs de acordo com a proposta.	84
Figura 49 – Fluxograma da Metodologia de implementação de redes de acesso utilizando a tecnologia PLC sobre redes elétricas MV	86
Figura 50 – (a) Rede de média tensão em (13.8 kV) e 1.63 km de extensão utilizada com estudo de caso para validação da metodologia de aplicação da tecnologia PLC. (b) Disposição dos cabos de energia usados no transporte de dados.	88
Figura 51 – Topologia lógica implementada na rede de teste da Figura 50.	89
Figura 52 – Desenho da topologia física, constante na documentação técnica da Rede MV investigada em campo para validação da metodologia proposta.	91
Figura 53 – Topologia da rede PLC no modo de operação 1 (largura de banda de 10 MHz). As distâncias entre os equipamentos e as taxas da interface PLC também são mostradas.	93
Figura 54 – Taxa de transmissão medida na interface Ethernet na largura de banda de 10 MHz. (a) Tráfego de entrada e saída no modem HE e (b) no modem CPE em RP13.	94
Figura 55 – Desempenho do sistema em termos de velocidade na camada física (interface PLC), no modo de operação da largura de banda de 10 MHz.	95
Figura 56 – Medidas de SNR obtidas na interface PLC dos modems HE ao CPE1 no modo 10 MHz.	96
Figura 57 – Tempo de Resposta dos modems BPL - Modo 10 MHz.	97
Figura 58 – Topologia utilizada nos testes de modo de operação com banda de 30 MHz e com testes RFC-2544.	98
Figura 59 – Velocidade na interface <i>Ethernet</i> no modo com largura de banda de 30 MHz.	99

Figura 60 – Velocidade na interface PLC no modo com largura de banda de 30 MHz.	100
Figura 61 – Curvas de SNR obtidas no modo de operação com largura de banda de 30 MHz.	102
Figura 62 – Tempo de resposta obtido com o comando PING no modo de operação com largura de banda de 30 MHz.	102
Figura 63 – Valores de Latência e <i>Jitter</i> da rede PLC medidos de acordo com a RFC-2544.	103
Figura 64 – Valores de taxa de erro de bits medidos na rede PLC, através do instrumento Metro Scope Fluke.	104
Figura 65 – Detalhes da instalação dos modems BPL (Rede MV PETROBRAS).	111
Figura 66 – Lista de Materiais.	112
Figura 67 – <i>Setup</i> montado em bancada na PETROBRAS	113

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do BPL de acordo com o padrão OPERA	38
Tabela 2 – Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL	38
Tabela 3 – Características do perfil de tráfego das aplicações.	53
Tabela 4 – Especificações do modem PLC usado nos testes em campo.	54
Tabela 5 – Valores médios de <i>throughput</i> obtidos da camada de enlace.	60
Tabela 6 – Valores médios de <i>throughput</i> obtidos da camada de enlace.	63
Tabela 7 – Valores médios de <i>throughput</i> obtidos da camada de enlace - Teste 3 . .	65
Tabela 8 – Valores médios de <i>throughput</i> obtidos da camada de enlace para o cenário da Figura 31.	71
Tabela 9 – Exemplos de critérios para o planejamento de redes de comunicação de dados utilizando a tecnologia PLC.	80
Tabela 10 – Parâmetros PLC na banda de operação de 10 MHz.	92
Tabela 11 – Parâmetros BPL - Banda de operação 30 MHz.	98

Lista de abreviaturas e siglas

ADPSK	<i>Amplitude Differential Phase Shift Keying</i>
AMI	<i>Automated Meter Infrastructure</i>
AMR	<i>Automated Meter Reading</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BPL	<i>Broadband Power Line</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CENELEC	<i>Comité Européen de Normalisation Electrotechnique</i>
CPE	<i>Customer Premise Equipment</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
HE	<i>Head End</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
LV	<i>Low Voltage</i>
MV	<i>Medium Voltage</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PEV	<i>Plug-in Electric Vehicles</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SNMP	<i>Single Network Management Protocol</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
TDR	<i>Time Division Repeater</i>

TIC Tecnologia da Informação e Comunicação

WiFi Dispositivos sem fio baseados no padrão IEEE 802.11

WLAN *Wireless Local Area Network*

xDSL *Digital Subscriber Line*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Estado da Arte da Tecnologia PLC	22
1.2	A Rede de Média Tensão como Meio de Transporte de Informações	24
1.3	Objetivo Geral	25
1.4	Objetivos Específicos	25
1.5	Estrutura da Dissertação	26
1.6	Contribuições deste trabalho	26
1.7	Lista de Publicações	27
2	A TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA E SUA APLICAÇÃO EM REDES <i>SMARTGRID</i>	28
2.1	Histórico da Tecnologia PLC	28
2.2	Uso da Rede de Média Tensão como Canal de Comunicação	31
2.2.1	A Tecnologia PLC de banda estreita NBPLC	32
2.2.2	A Tecnologia de Comunicação PLC de banda Larga BPL	35
2.2.3	Visão Geral da Camada Física da Tecnologia BPL	37
2.3	O conceito <i>Smart Grid</i> na Rede Elétrica	39
3	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODEMS PLC EM REDE ELÉTRICA DE BAIXA TENSÃO	43
3.1	Metodologia dos Testes em Baixa Tensão	43
3.1.1	Comunicação ponto-a-ponto na Configuração <i>back-to-back</i>	43
3.1.2	Comunicação ponto-multiponto na Rede Elétrica de Baixa Tensão	45
3.2	Análise das Medidas de Camada Física	46
3.3	Análise das Medidas nas Interfaces dos Modems PLC	47
4	APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA PLC NA REDE DE MÉDIA TENSÃO	51
4.1	Topologias Física e Lógica da Rede de Testes Preliminares	51
4.2	A Metodologia dos Testes Preliminares	53
4.3	Análise dos Resultados dos Testes Preliminares	57
4.3.1	Testes com o HE Conectado à Fase T, o CPE e o TDR na Fase R	57
4.3.2	Testes com o Modem HE Conectado à Fase R e com Câmera de Vídeo Conectada ao CPE	63
4.3.3	Testes com o Modem HE Conectado à Fase R e dois Modems CPE na Topologia ponto-multiponto	68

4.3.4	Medidas de Espectro dos Sinais OFDM do Sistemas PLC Investigados	71
5	A METODOLOGIA PROPOSTA PARA PROJETO DE SISTEMAS PLC EM REDES ELÉTRICAS DE MÉDIA TENSÃO	74
5.1	A Documentação Técnica Necessária	75
5.2	Requisitos e Premissas da Rede de Comunicação	77
5.3	Levantamento da Resposta em Frequência	80
5.4	Definição das Arquiteturas Física e Lógica da Célula PLC	82
6	VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA EM UMA REDE ELÉTRICA MV DE 1.6 KM: ESTUDO DE CASO	87
6.1	Averiguação da Documentação Técnica Necessária	89
6.2	Testes Realizados no Modo de Operação 1: Largura de Banda de 10 MHz	90
6.2.1	Topologia da Rede Conforme a Ferramenta de Gerência	92
6.2.2	Resultados Obtidos	92
6.2.2.1	Medidas de <i>throughput</i> na interface Ethernet	94
6.2.2.2	Medidas de Velocidade na Interface PLC	94
6.2.2.3	Medidas de Espectro dos Sinais OFDM	95
6.2.2.4	Medidas de Tempo de Resposta	96
6.3	Testes Realizados no Modo de Operação 3: Largura de Banda de 30 MHz	97
6.3.1	Topologia da Rede Conforme a Ferramenta de Gerência	98
6.3.2	Resultados Obtidos	99
6.3.2.1	Medidas de <i>throughput</i> na interface Ethernet	99
6.3.2.2	Medidas de Velocidade na Interface PLC	100
6.3.2.3	Medidas de Espectro dos Sinais OFDM	101
6.3.2.4	Medidas de Tempo de Resposta	101
6.3.2.5	Medidas de Latência e <i>Jitter</i>	101
6.3.2.6	Medida de Taxa de Erro	104
6.4	Comentários Finais	104
7	CONCLUSÕES	106
	Referências	107
	ANEXOS	110
	ANEXO A – DETALHES DA INSTALAÇÃO DOS MODEMS PLC NA REDE MV DA PETROBRAS	111

ANEXO B – DETALHES DOS TESTES REALIZADOS NA PE-	
TROBRAS, EM BANCADA	113

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos serviços de telecomunicações que vem ocorrendo ao redor do mundo e ao longo dos últimos anos, têm feito com que os fabricantes de equipamentos de Telecomunicações invistam cada vez mais em novas tecnologias para garantir que seus produtos disponibilizem maior capacidade de transmissão (dado em bit por segundo), maior eficiência espectral (dado em bit/s/Hz), maior segurança, confiabilidade, escalabilidade e, principalmente, menores custos operacionais e de investimentos que tragam um retorno financeiro esperado. Este cenário tem favorecido, além dos usuários finais, também os Engenheiros projetistas pois diversas tecnologias, que vão de pequenos modems de comunicação de dados sem fio baseados no padrão IEEE 802.11 (*WiFi*) atingindo capacidade de transmissão na ordem dos 300 Mbps ([IEEE COMPUTER SOCIETY, 2012](#)), até sistemas óticos mais complexos com capacidade de 100 Gbps operando em longas distâncias ([IEEE COMPUTER SOCIETY, 2015](#)), sejam disponibilizadas no mercado. A atual necessidade por troca de informações, sejam elas através de compra ou venda *online* de produtos, transações bancárias, compartilhamento em tempo real de conteúdo tais como vídeo e/ou áudio, troca de mensagens instantâneas, entre outros, tem requerido que as atuais tecnologias de comunicação de dados disponibilizem a baixos custos, altas taxas de transmissão com grande capacidade de penetração ([SILVA, 2006](#)). O alto investimento com infraestrutura tem feito com que os provedores de serviços busquem opções por soluções que entreguem banda larga de qualidade ao cliente utilizando meios físicos existentes. Esse é o caso das tecnologias xDSL (*Digital Subscriber Line*) que utiliza o cabo de par trançado do assinante, destinado para serviços de telefonia convencional (300 a 3,4 kHz), para transportar dados em banda larga na faixa de 25 kHz a 1100 kHz ([TANENBAUM, 2011](#)) e da tecnologia PLC. Esta última, utiliza as redes elétricas para a transmissão de dados e vem ganhando notoriedade no campo da pesquisa e desenvolvimento por apresentar diversas vantagens, dentre elas:

- infraestrutura de rede elétrica presente em praticamente todas as cidades do mundo;
- alta taxa de transmissão de dados para o caso da tecnologia PLC em banda larga BPL (*Broadband Power Line*);
- fácil integração com outras tecnologias para a composição de uma rede de acesso;
- equipamentos mais robustos e totalmente compatíveis com o protocolo SNMP (*Single Network Management Protocol*), definido como sendo o protocolo de padrão aberto destinado ao gerenciamento de dispositivos em redes IP (*Internet Protocol*);
- compatibilidade com a tecnologia *Ethernet*;

- alta capacidade de penetração;
- solução adequada para serviços *smart metering* para a integração às redes inteligentes do tipo *Smart Grid*.

Entretanto, o fato do canal de comunicação ser inicialmente designado à transmissão de energia faz com que a tecnologia PLC seja questionada quanto à qualidade de serviço. De fato, as frequentes interferências eletromagnéticas provocadas pela ativação e desativação de dispositivos conectados à rede elétrica, pelas variações de impedância e atenuação provocadas pela inserção e remoção de cargas e pelos efeitos nocivos da propagação multipercurso, são motivos que contestam a confiabilidade da tecnologia (SILVA, 2006), (GÖTZ; RAPP; DOSTERT, 2004), (ANATORY; THEETHAY, 2010).

Por outro lado, o surgimento de novas técnicas de modulação tornando os sistemas mais robustos à presença de ruídos e mantendo altas taxas de transmissão, como é o caso do método de codificação digital de dados em múltiplas frequências portadoras denominado de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), a implementação de detectores e codificadores de correção de erro e a presença de técnicas de mapeamento adaptativo de bit nos moduladores, aprimoram o desempenho dos equipamentos PLC diante dos efeitos destrutivos de sinal presentes nesses tipos de canais (SILVA, 2006), (SILVA et al., 2003) (KLENNER, 2004).

Esta evolução elevou o desempenho do sistema PLC aumentando o interesse do seu uso em aplicações *Smart Grid* tais como telemetria, medição remota, supervisão e controle. As redes *Smart Grid* ou simplesmente redes inteligentes requerem a integração das informações geradas por tecnologias instaladas nas "pontas" com o centro de Operações, onde estão localizados os sistemas de processamento inteligente que analisam as informações recebidas do campo e tomam as decisões adequadas. Uma infraestrutura composta por linhas de distribuição de energia em baixa e média tensão é existente entre o centro e os dispositivos inteligentes, o que justifica ainda mais o uso do PLC na comunicação de dados, reduzindo assim os investimentos com infraestrutura.

1.1 Estado da Arte da Tecnologia PLC

O transporte de dados sobre a rede elétrica é uma demanda bastante antiga, datada da década de 30, e desde então vem sendo pesquisada por grandes empresas e Universidades com o objetivo de estudar o comportamento dessas redes físicas como canal de comunicação para a transmissão de dados (CARCELLE, 2006) (ANATORY; THEETHAY, 2010). No início, pequenas quantidades de dados eram transmitidas utilizando sistemas analógicos de grande porte que, por sua vez, consumiam muita potência para conseguir atingir pequenas distâncias (CARCELLE, 2006). Com o passar dos anos, o desenvolvi-

mento desta tecnologia foi ganhando mais espaço e, hoje em dia, já é possível transmitir grande quantidade de informação através de sistemas com processamento digital de sinais que consomem menos potência e atingem razoáveis distâncias (CORINEX, 2014).

A normatização da tecnologia de transmissão de dados pela rede elétrica também evoluiu ao longo desses anos. Um dos primeiros padrões especificados pelo CENELEC (*European committee for electrotechnical standardization*), na Europa, estabelecia um espectro de frequência na faixa de 9 a 140 kHz para uso nos equipamentos PLC, diferentemente dos padrões Norte Americano (USA) e Japonês, que especificavam um espectro de até 500 kHz (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004). Alguns serviços tais como telemetria, transmissão de dados de baixa velocidade (dados de automação, por exemplo), medição remota e alguns canais de voz poderiam ser suportados pela norma CENELEC (ANATORY; THEETHAY, 2010). Todavia, a evolução dos serviços de TIC provocaram uma revolução nas redes de Telecomunicações, elevando sua capacidade de transmissão de dezenas para centenas de Mbps. Para que a tecnologia PLC pudesse sair da posição banda estreita e ocupar um lugar de concorrência com os sistemas atuais de banda larga, novas especificações da camada física precisariam surgir. A partir de então, foram criados diversos consórcios pelo mundo envolvendo a indústria, o governo e as Universidades que elevaram o desempenho da tecnologia ao patamar de banda larga. O *HomePlug Powerline Alliance* é uma organização global composta por mais de 40 membros privados (HOMEPLUG, 2015). Sua missão é promover um fórum para a criação de especificações abertas para sistemas residenciais de banda larga. A primeira versão surgiu no ano 2000 com a especificação de equipamentos com taxas de até 14 Mbps, o HomePlug 1.0. Em 2001 e 2005 surgiram as versões Turbo e AV com taxas de 85 Mbps e 200 Mbps, respectivamente (HOMEPLUG, 2015). Já o OPERA (*Open PLC European Research Alliance*) representa um consórcio formado por instituições dos diversos segmentos da Europa tais como companhias do ramo de energia (*Utilities*), indústrias, provedores de tecnologia, operadoras de telecomunicações, Universidades, empresas de desenvolvimento, engenharia e consultoria, com o único objetivo estratégico de oferecer serviços de acesso banda larga com baixo custo para todos os cidadãos Europeus usando a mais abundante infraestrutura existente, ou seja, as redes de distribuição de energia da cidade. A proposta do OPERA foi impulsionar a tecnologia PLC em todos os diferentes aspectos (padronização, aprimoramento da tecnologia, serviços de telecomunicações, serviços em redes inteligentes, disseminação) de modo a permitir que ela se tornasse uma alternativa competitiva frente as demais tecnologias utilizadas no fornecimento de banda larga aos usuários. O resultado final deste grupo de trabalho, encerrado em 2008, foi a criação de um padrão preliminar para sistemas de acesso banda larga operando sobre redes elétricas (IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010) e que foi submetido ao grupo de trabalho IEEE 1901 - *Access Power Line Networks Standard* como contribuição da União Européia na construção de um único padrão para os sistemas que utilizam a tecnologia BPL.

Atualmente, o consórcio não está mais ativo, mas as suas recomendações técnicas estão presentes no padrão IEEE 1901 que especificam o controle de acesso ao meio e a camada física da interface PLC.

Hoje no mercado existem equipamentos que operam na faixa de frequência de 1 a 50 MHz, com variação de banda em 10, 20 e 30 MHz, atingindo taxa de transmissão nominal de até 205 Mbps (CORINEX, 2014). Além disso, possuem algoritmos corretores de erros e modulação adaptativa, permitindo o alcance de altas taxas de transmissão mesmo em canais interferentes. O protocolo da modulação adaptativa analisa o valor da relação sinal-ruído SNR (*Signal to Noise Ratio*) de cada portadora OFDM e adapta a sua modulação de bit de acordo com esse valor. O resultado dessas implementações é o aumento da eficiência na camada física do modem (CORINEX, 2014). Outra facilidade encontrada é a possibilidade de alteração da máscara de potência do sinal afim de otimizar o nível de potência em algumas bandas, criando um formato adequado para a densidade de potência do sinal. Já na camada 2 (Ethernet), os modems implementam priorização de pacotes baseado em até sete classes de serviços, controle da banda de transmissão em cada nó, marcação de pacotes contendo redes locais virtuais de acesso VLAN (*Virtual Local Access Network*), criptografia dos dados utilizando DES/3DES, entre outros (CORINEX, 2014).

No Brasil, a resolução 527 de 8 de abril de 2009 da ANATEL regulamenta as condições de uso de radiofrequências por sistemas de Banda Larga por meio de Redes de Energia Elétrica. Um dos requisitos específicos desta resolução é a emissão indesejada de radiações causadas por sistemas BPL operando sobre rede de baixa e média tensão nas faixas de radiofrequências atribuídas ao Serviço Móvel Aeronáutico e Radioamador que compreende de 2,754 MHz a 29,700 MHz. Para esses casos a ANATEL estabelece o máximo nível de radiação que o equipamento deve emitir quando operando sobre estas redes (ANATEL, 2015). A regulamentação define também que a comunicação estabelecida pelo sistema BPL, sobre redes de energia elétrica, somente ocorra na faixa de radiofrequências de 1,705 MHz a 50 MHz e em caráter secundário (ANATEL, 2015). Todos os equipamentos deverão possuir certificados de homologação da ANATEL (ANATEL, 2015).

1.2 A Rede de Média Tensão como Meio de Transporte de Informações

A utilização de duas ou mais tecnologias de comunicação de dados no transporte de informações de automação é uma prática bastante aplicada na indústria de Óleo & Gás devido as características dos ambientes em que suas atividades são desenvolvidas. Por exemplo, áreas com alta densidade de vegetação dificultam a penetração dos serviços utilizando apenas as redes sem fio. Pontos de interesse espalhados em grandes áreas geo-

gráficas exigem soluções de comunicação de dados com alta capacidade de cobertura e a falta de infraestrutura de transmissão encareçam as soluções de redes de acesso formadas por tecnologias já consolidadas tais como a fibra ótica e/ou sistemas de comunicação sem fio. Não menos importante, outros requisitos como disponibilidade, confiabilidade e tempo reduzido de implantação, também são exigências do cenário apresentado.

Diante disso, pensar em outras alternativas tecnológicas que atendam aos requisitos de comunicação dos sistemas de automação e que aproveitam a infraestrutura existente, parece ser razoável em se tratando de soluções para comunicação de dados. Aplicar os conceitos de redes inteligentes (*Smart Grid*) no monitoramento e controle dos sistemas de Automação, utilizando as redes elétricas de média tensão como meio de transporte, tem se mostrado uma opção vantajosa por permitir maior penetração e maior cobertura dos serviços TIC em ambientes complexos. Sistemas confiáveis e escalonáveis também são requisitos exigidos pelas redes inteligentes e por isso são aplicáveis aos sistemas de comunicação PLC. Acesso à internet, telefonia, videomonitoramento, telemetria e Automação Industrial são alguns exemplos de serviços que podem ser providos pela tecnologia PLC sob níveis de qualidade satisfatórios.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho de um sistema BPL sob aspectos físicos da interface PLC e capacidade de transmissão de dados em Mbps, quando utilizado em redes elétricas de média tensão como meio de transporte de dados. Pretende-se ainda propor e testar uma metodologia de elaboração de projetos usando sistemas PLC sobre linhas de média tensão. Para isso, planeja-se interligar três poços de petróleo à estação coletora SM-8, utilizando como meio de transporte a própria rede elétrica de média tensão (13,8KV) e prover, no mínimo, 1 Mbps de taxa de transmissão em cada poço. Esses poços estão localizados na região de Rio Preto, São Mateus/ES, e distam 2 km da estação coletora.

1.4 Objetivos Específicos

O presente trabalho tem como objetivo específico avaliar alguns requisitos de rede como latência, *throughput* e disponibilidade implementados pelo sistema PLC, conforme segue:

- analisar o desempenho da camada Ethernet do sistema quando submetido aos testes recomendados pela RFC 2544;

- analisar o desempenho dos equipamentos com base no gerenciamento de rede, utilizando para isso uma ferramenta SNMP de padrão aberto e outra customizada pelo fabricante;
- levantar a resposta em frequência do canal utilizando um analisador de espectro e através dos valores de SNR medidos pela ferramenta do fabricante;
- analisar a adaptação do sistema BPL ao canal de comunicação, em tempo real, simulando falhas nos terminais repetidores;
- levantar a máxima distância alcançada pelo modem BPL sem repetição;

1.5 Estrutura da Dissertação

Para que a leitura e compreensão deste trabalho atinja os níveis esperados pelo autor, o conteúdo foi segregado em cinco Capítulos.

O primeiro Capítulo trata da contextualização da dissertação, apresentando ao leitor um conteúdo teórico mínimo para o entendimento deste trabalho.

No segundo Capítulo é apresentada a fundamentação teórica sobre a tecnologia PLC. Histórico da tecnologia, estado da arte, aplicações *smart grid*, entre outros assuntos, também são abordados neste Capítulo.

Uma metodologia para o desenvolvimento de uma rede de comunicação de dados utilizando a tecnologia PLC sobre linhas de média tensão é mostrada no Capítulo três.

Os procedimentos executados e os resultados obtidos nos experimentos deste trabalho, incluindo os testes em laboratório e os testes de campo, são tratados no Capítulo quatro. Nesse Capítulo estão descritos os procedimentos adotados, o cenário montado e os objetivos de cada teste. Gráficos de taxa de transmissão, latência, velocidade da interface física, resposta em frequência do canal também são mostrados e discutidos.

Por fim, o Capítulo cinco apresenta a conclusão desta pesquisa e possíveis trabalhos futuros que poderão contribuir com o tema discutido.

1.6 Contribuições deste trabalho

Este trabalho proporcionou algumas contribuições científicas para desenvolvimento e continuidade do mesmo. Dessas contribuições, destacam-se:

- o desenvolvimento de uma metodologia própria para o desenvolvimento de uma rede de comunicação de dados sobre redes de média tensão como meio de transporte de dados em redes *Smart Grid*;

- a realização de experimentos com a tecnologia BPL em rede de baixa e média tensão, em distâncias curtas e longas;
- a medição da resposta em frequência e dos valores de SNR do sinal PLC, na faixa de 4 a 34 MHz, propagando-se sobre a linha elétrica de média tensão;
- a investigação exaustiva, através de experimentos em campo, sobre aspectos de latência e taxa de transmissão de bit;

1.7 Lista de Publicações

Esta pesquisa contribuiu para a publicação de trabalhos em conferências internacionais como o *International Symposium on Power Line Communications - ISPLC* e o *Innovative Smart Grid Technologies - Latim America - ISGT-LA*. Os trabalhos publicados durante o desenvolvimento desta pesquisa foram:

- Leonardo R. M. Castor, Jair A. L. Silva, “Aplicação da Tecnologia de Comunicação de Dados via Rede Elétrica para Automação de Poços de Petróleo Onshore usando a Rede de Média Tensão”, *16º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, 2014.
- Leonardo R. M. Castor, Ricardo Natale, Jair A. L. Silva, Marcelo. E. V. Segatto, “Experimental Investigation of Broadband Power Line Communication Modems for Onshore Oil And Gas Industry: A Preliminary Analysis,” *IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, 2014.
- Leonardo R. M. Castor, Jair A. L. Silva, Marcelo. E. V. Segatto, “Medium Voltage Overhead Power-line as a Smart Distribution Grid for Onshore Oil & Gas Industries Automation and Broadband Data Transport,” *IEEE ISGT-LA Innovative Smart Grid Technologies Conference Latiamerica*, 2015.

Um outro trabalho foi submetido a revista *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* (JMoe) e, devido ao longo prazo de análise, o resultado da publicação ainda é esperado. Segue a descrição do artigo:

- Leonardo R. M. Castor, Ricardo Natale, João P. Favero, Jair A. L. Silva, Marcelo. E. V. Segatto, “The Smart Grid Concept in Oil & Gas Industries by a Field Trial of Data Communication in MV Power Lines,” *JMoe - Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. X, No. Y, Month 2015*

2 A TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO DE DADOS VIA REDE ELÉTRICA E SUA APLICAÇÃO EM REDES *SMARTGRID*

Com o surgimento da energia elétrica como serviço de utilidade pública nas grandes áreas urbanas, surgia também a necessidade de se implantar redes de distribuição de energia em larga escala, sejam elas de baixa ou média tensão, para transportar a energia das unidades geradoras aos seus consumidores finais. Como consequência, uma enorme infraestrutura cabeada e com grande capacidade de penetração aparece nestas grandes cidades. Por outro lado, a necessidade de se expandir a cobertura das redes de acesso para atender densas áreas urbanas e prover novos serviços de comunicação de dados, a custos competitivos, se torna um desafio para as Operadoras de telefonia. De fato, os custos com a instalação, operação e manutenção da infraestrutura destas redes, na sua grande maioria, representam mais que 50% do total dos investimentos na rede ([HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004](#)). Diante deste fato pode-se afirmar que a principal idéia por trás da tecnologia de comunicação de dados via a rede elétrica PLC, é a redução dos custos operacionais e de investimentos em novas redes de telecomunicações ([HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004](#)). O desenvolvimento recente de aprimoradas técnicas de modulação, codificação e equalização vêm contribuindo para que haja a transmissão de dados sobre este tipo de canal ([DOSTERT, 2001](#)), ([ANATORY; THEETHAY, 2010](#)), ([CASTOR et al., 2014b](#)). Com a tecnologia PLC é possível transmitir dados em banda larga ou banda estreita sobre redes elétricas de alta, média ou baixa tensão, sendo estas duas últimas as mais utilizadas por esta tecnologia ([HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004](#)), ([SILVA, 2006](#)), ([CASTOR; SILVA; SEGATTO, 2015](#)), ([CASTOR et al., 2014b](#)).

2.1 Histórico da Tecnologia PLC

Os primeiros esforços no desenvolvimento da tecnologia PLC foram para estabelecer enlaces de comunicação de dados de baixíssima velocidade em banda estreita sobre redes elétricas ([ANATORY; THEETHAY, 2010](#)). A idéia de aproveitar a infraestrutura elétrica para comunicação é datada de 1838, quando uma proposta para medição remota de níveis de tensão de baterias do sistema de telégrafo Londres - Liverpool foi implementada ([CARCELLE, 2006](#)). Isso abriu portas para a primeira patente de sinalização via rede elétrica registrada em 1897 na Grã Bretanha ([CARCELLE, 2006](#)). Relatos de mais patentes realizadas em 1905 nos EUA, conduziram à primeira produção comercial de

medidores eletromecânicos repetidores de sinal em 1913, produção essa economicamente inviável pelo fato de usar cabos adicionais para comunicação (TENGDIN, 1998), (PAVLIDOU et al., 2003). Em 1922 o primeiro sistema de transmissão do tipo portadora começou a operar sobre redes de alta tensão na frequência de 15 – 500 kHz para suportar os sistemas de telemetria (ANATORY; THEETHAY, 2010). Em 1930, sistemas de sinalização do tipo onda portadora operando sobre linhas de média tensão MV (*Medium Voltage*) e baixa tensão LV (*Low Voltage*) começaram a ser utilizados (ANATORY; THEETHAY, 2010). Mais tarde, outras aplicações tais como monitoramento e controle de dispositivos elétricos, telemedição, gerenciamento de consumidores, registro de consumo, entre outros, também se beneficiaram com a comunicação de dados sobre redes elétricas (ANATORY; THEETHAY, 2010), (CASTOR et al., 2014b), (SILVA, 2006). Outros sistemas PLC de banda estreita, operando na faixa 9 – 500 kHz com capacidade de transmissão de 576 kbps, também foram usados para suportar aplicações remotas tais como sistemas de coleta de dados, monitoramento e controle SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), leitura automática de medidor de consumo, monitoramento da qualidade da energia, entre outros (ANATORY; THEETHAY, 2010).

Os primeiros sinais de voz só foram transmitidas nas redes de média e baixa tensão a partir de 1935 (DOSTERT, 2001). Empregou-se a multiplexação por divisão de tempo TDM (*Time Division Multiplexing*) como a metodologia de injeção na rede de uma única portadora de áudio. Esse método permitiu o tráfego de informações de telemetria, além de servir como base para a criação das avançadas técnicas de comunicação existentes hoje em dia (DOSTERT, 2001).

Nas décadas subseqüentes, aumentou-se o interesse em diminuir a potência de transmissão no intuito de permitir a comunicação bidirecional e aumentar a taxa de comunicação através do emprego de esquemas de modulação mais eficientes, nas redes de média e baixa tensão (PAVLIDOU et al., 2003). A partir de 1980 com sistemas de comunicação mais sofisticados implementando códigos de controle de erros em *hardware*, surgiram novas técnicas de transmissão como, por exemplo, a denominada X-10 que utiliza uma portadora de 120 kHz, modulação OOK (*On-Off Keying*) e taxa de transmissão de 120 bps; e a extinta *EnermetMELKOTM* publicada em 1984 utilizando a banda de frequência de 3025 a 4825 Hz, modulação PSK (*Phase Shift Keying*) e 50 bps como taxa de transferência (AHOLA, 2003).

Na década de 1990, novos serviços e dispositivos denominados banda larga ou *Broadband*, apareceram no mercado para atender ao advento da Internet (SILVA, 2006). Com eles, surgiram também a necessidade por sistemas que utilizassem faixa larga de frequência para o transporte de dados em alta velocidade, forçando a migração dos equipamentos PLC a novos patamares tecnológicos. Pesquisas relacionadas a técnicas de modulação, características do canal e dos protocolos de comunicação foram realizadas nos anos pos-

teriores, causando o surgimento e desenvolvimento em 1991, pelo CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*), do padrão Europeu de comunicação de dados de baixa velocidade via rede elétrica, porém com baixa potência (na ordem de 5 mW), alcançando distâncias médias entre o transmissor e receptor de 500 m (CENELEC, 2015). Novos padrões e pesquisas continuaram a ser desenvolvidos com o objetivo de alcançar maiores taxas de transferência na ordem de dezenas a centenas de mega bits por segundo (Mbps), em bandas de frequências maiores e em frequências acima de 1 MHz. Nos anos 2000, surgiram os sistemas de comunicação BPL (*Broadband Power Line*), revolucionando os antigos sistemas PLC. O BPL é um sistema que utiliza a tecnologia PLC para prover serviços de banda larga sobre redes elétricas de baixa e média tensão, em faixa de frequência de 1 MHz a 50 MHz, alcançando taxas de até 200 Mbps com baixa potência (CASTOR et al., 2014b), (CORINEX, 2014), (IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010). Isto significa que se conectar um modem BPL em uma suposta rede elétrica residencial é possível obter acesso à Internet, em banda larga, conectando um outro modem em uma tomada elétrica qualquer pertencente a mesma rede. A Figura 1 ilustra uma rede BPL usando as instalações elétricas de média e baixa tensão com distribuição em uma residência.

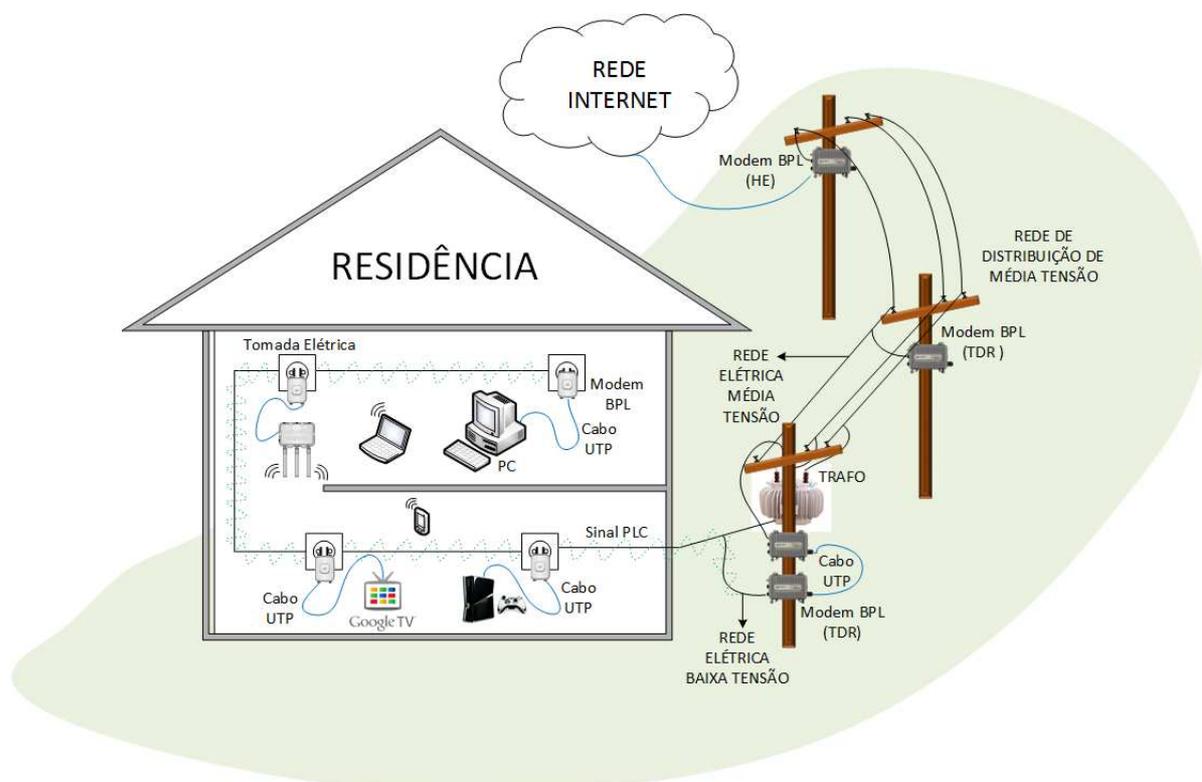


Figura 1 – Infraestrutura de comunicação PLC em redes de média e baixa tensão para distribuição e acesso à dados de banda larga. UTP (*Unshielded Twisted Pair*).

É possível notar que a rede elétrica de baixa tensão instalada internamente à residência, representada pela casa na Figura 1, pode ser usada como canal de comunicação

por vários dispositivos de dados banda larga, como por exemplo, sistemas sem fio WLAN 802.11 (*Wireless Local Access Network* padrão IEEE 802.11), videogames de última geração, computadores pessoais, entre outros, para acesso à Internet. Os modems internos BPL utilizados na conexão com a rede elétrica, modulam os dados provenientes destes dispositivos na rede elétrica e se conectam aos modems BPL externos, representados pela figura TDR (*Time Division Repeater*), para realizar a transição entre as redes LV e MV e ter acesso a rede do provedor de Internet. O acesso à internet se dá através da conexão entre o equipamento HE (*Head End*). Este cenário mostra uma evolução da tecnologia PLC para uso em redes de acesso à internet, onde o uso da infraestrutura elétrica como canal de comunicação representa economia nos investimentos (SOUKAL, 2009). As redes de média tensão são compostas, geralmente, por três fios aéreos equidistantes, dispostos horizontalmente e possuem comprimentos de dezenas de quilômetros. Já as redes de distribuição externas de baixa tensão possuem extensão de centenas de metros e, geralmente, são compostas por quatro fios (três fases e um neutro) equidistantes e dispostos na vertical. As redes internas de baixa tensão são utilizadas nas transmissões de dados dentro de ambientes tais como residências, lojas, escritórios e são compostas, geralmente, por fase e neutro.

2.2 Uso da Rede de Média Tensão como Canal de Comunicação

A utilização dos cabos das redes elétricas como canal de comunicação diminuem drasticamente os investimentos com infraestrutura, uma vez que além de proverem energia, estes já estão conectados aos mais variados pontos de interesse para provimento de serviços de valor agregado, tais como, automação remota da produção de petróleo, monitoramento e controle remoto dos sistemas elétricos, medição remota de energia, controle do funcionamento da iluminação pública e semáforica, acesso à internet para residências, comércio, indústrias, entre outros. Por outro lado, as redes elétricas não foram desenvolvidas para a transmissão de dados, podendo variar seus aspectos construtivos de acordo com cada país e, não menos importante, também os aspectos regulatórios quanto a compatibilidade eletromagnética, interferências e emissão. Por exemplo, na Europa utiliza-se instalações subterrâneas com cabos protegidos por malha para conduzir energia de baixa e média tensão (DOSTERT, 2007). Esse fator favorece a utilização da tecnologia BPL em larga escala para o provimento de banda larga, haja vista que os cabos são mais imunes à ruídos. Já nos Estados Unidos da América e Brasil utilizam-se cabos aéreos, geralmente fabricados em alumínio e sem capa de proteção, fixados em postes, formando assim as redes de energia pública para baixa e média tensão (ANEEL, 2015).

As redes elétricas no Brasil são divididas em três tipos por classe de tensão (ANEEL, 2015), a saber:

- Rede de Alta Tensão - rede com classe de tensão acima dos 69 kV e inferior a 230 kV. São redes utilizadas na conexão entre as estações geradoras de energia com as unidades de transformação espalhadas pelas grandes áreas urbanas. Também podem ser utilizadas para conectar grandes clientes as estações geradoras. Estas redes são caracterizadas por utilizar instalações aéreas de grande porte e por percorrer grandes distâncias.
- Rede de Média Tensão - possui classe de tensão onde o valor eficaz da tensão entre fases é superior a 1 kV e inferior a 69 kV. São utilizadas para energizar grandes áreas urbanas, indústrias ou comércio e até os transformadores públicos de baixa tensão. Ela conecta as estações de transformação com os grandes consumidores e as redes de distribuição de energia em baixa tensão.
- Rede de Baixa Tensão - sua classe de tensão é definida pelo valor eficaz entre fases podendo ser igual ou inferior a 1 kV. São aplicadas para alimentar os consumidores finais e se caracterizam por possuírem centenas de metros de comprimento, com instalações embutidas ou aéreas. Está presente em ruas, residências, escolas, comércios etc.

A [Figura 2](#) ilustra a divisão das redes de distribuição de energia no Brasil, onde nota-se que as redes de média e baixa tensão são mais utilizadas como canal de comunicação de dados pela tecnologia PLC do que a rede de alta tensão.

Ambas apresentam um poder de penetração na ordem de milhões de consumidores ([ANEEL, 2015](#)). A diferença básica entre as duas, do ponto de vista da propagação do sinal, está nos tipos de ruídos existentes em cada uma delas ([ANATORY; THEETHAY, 2010](#)), ([HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004](#)), ([ANATORY et al., 2012](#)). Enquanto nas redes de baixa tensão o ruído impulsivo é mais comum, nas redes de média tensão as interferências eletromagnéticas externas provocadas por rádio frequência na faixa de HF (*High Frequency*) prejudicam o sinal PLC. Composta por três fios aéreos paralelos e dispostos horizontalmente sobre postes, as redes de média tensão possuem comprimentos de dezenas de quilômetros e estão presentes nas regiões urbanas e rurais.

Uma visão geral sobre o funcionamento e arquitetura de uma rede BPL, seguindo as especificações feitas pelo consórcio europeu OPERA, é mostrado na subseção [2.2.1](#).

2.2.1 A Tecnologia PLC de banda estreita NBPLC

As redes de comunicação via rede elétrica NBPLC (*Narrowband Power Line Communication*) são compostas por equipamentos operando na faixa de frequência de 9 a 500 kHz ([HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004](#)), ([ANATORY; THEETHAY, 2010](#)).

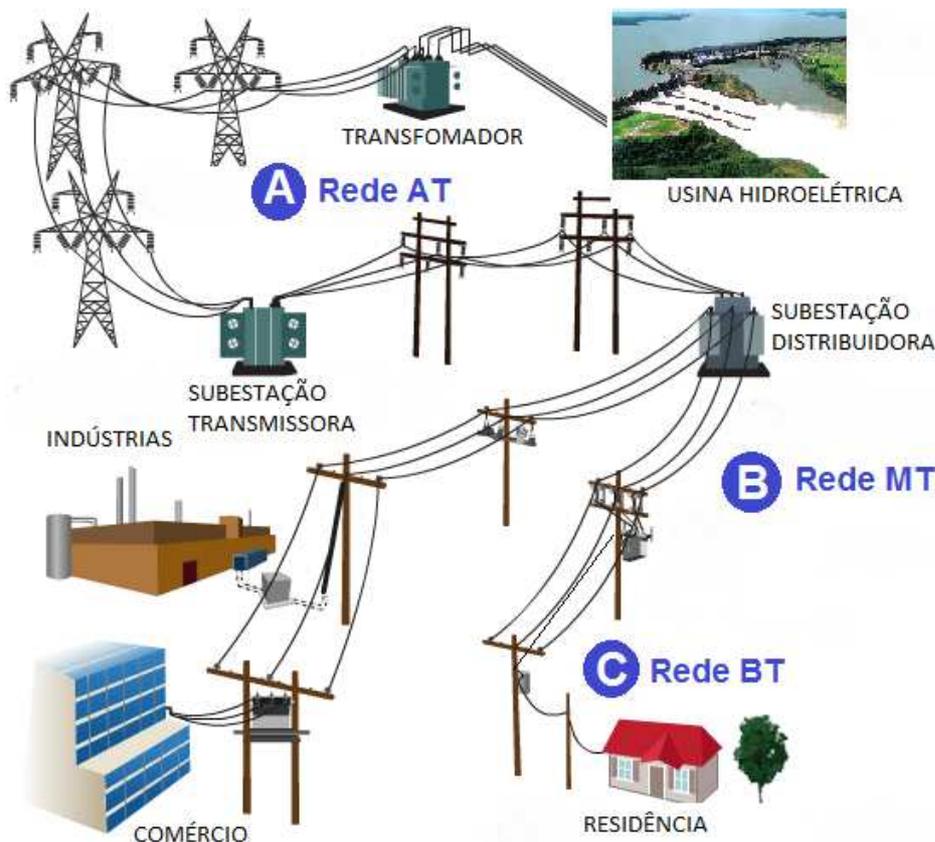


Figura 2 – Tipos de redes elétricas no Brasil divididas por classe de tensão. (A) Rede de Alta Tensão, (B) Rede de Média Tensão e (C) Redes de Baixa Tensão

De acordo com o padrão europeu CENELEC, foram definidos três segmentos de canal dentro da faixa de frequência 9-140 kHz (ANATORY; THEETHAY, 2010), a saber:

- 9-95 kHz para uso das empresas de energia;
- 95-125 kHz para uso privado e;
- 125-140 kHz para uso privado.

Na faixa de frequência acima de 140 kHz são definidas e utilizadas pelos padrões dos EUA e Japonês, conforme mostra a Figura 3.

As empresas de energia utilizam o PLC de banda estreita para fins de implementação de telemetria, medição remota, controle e comandos de sistemas elétricos. Por exemplo, com o uso do PLC é possível realizar a comunicação interna entre o centro de operações e os diferentes dispositivos da rede, sem a necessidade de construção de uma nova infraestrutura de rede de comunicação para este fim. Além disso, com o uso desta tecnologia é possível realizar a leitura remota dos medidores de energia dos consumidores finais, diminuindo assim eventuais erros de leitura e custos envolvidos com a leitura manual.

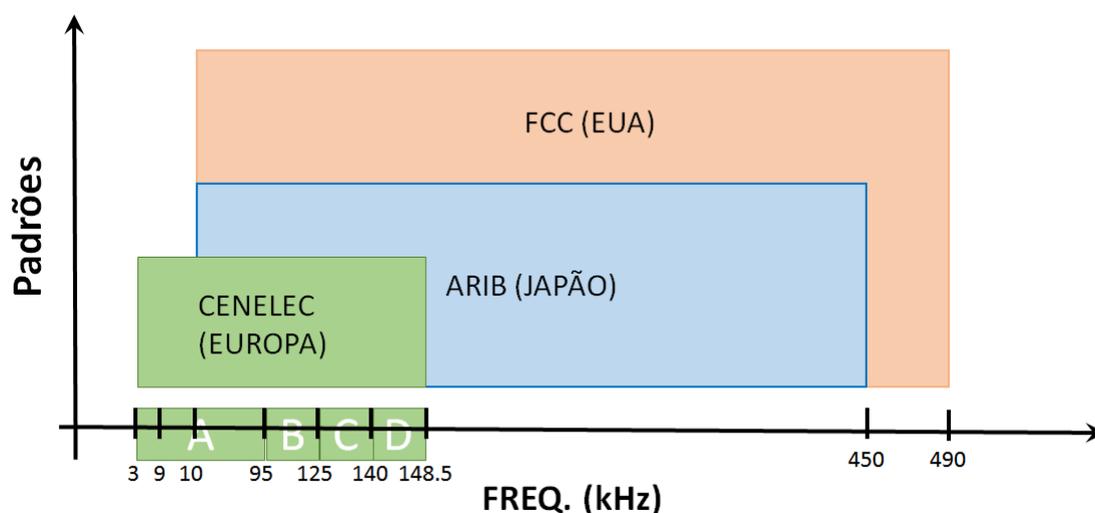


Figura 3 – Regulamentação em Radiofrequência na Europa, Japão e Estados Unidos da América.

Outra possibilidade é observar e controlar o consumo e produção de energia na rede permitindo que as *Utilities* pratiquem preços variáveis ao longo do dia de acordo com a demanda e a geração. Isto só pode ser feito com a integração das redes de controle das pequenas plantas produtoras de energia tais como, pequenas hidrelétricas, termoelétrica, usinas eólicas, de modo que as empresas possam controlar o fornecimento de energia, intercambiando a produção dessas plantas às redes de distribuição conforme a necessidade. Para isso, é essencial manter a comunicação de dados entre as plantas, o que pode ser alcançado com o uso da tecnologia de comunicação via rede elétrica. Já as aplicações de uso privado utilizam esta tecnologia, por exemplo, para implementar redes de automação residencial e predial. O controle de dispositivos tais como iluminação, aquecedores, ar condicionados, elevadores, sensores de segurança, controle de acesso, entre outros, pode ser implementado sem a necessidade de infraestrutura específica para a implantação da rede de comunicação. Desta forma, o uso da tecnologia PLC diminui drasticamente os custos de investimentos com infraestrutura interna de comunicação para ambientes de prédios e residências.

Os sistemas NBPLC possuem capacidade de transmissão em torno de 1 Mbps e podem alcançar distâncias de até 1 Km, sem repetição. As primeiras redes NBPLC utilizavam a modulação baseada em chaveamento de amplitude ASK (*Amplitude Shift Keying*), mas devido a alta sensibilidade à ruídos, este esquema foi descartado (ANATORY; THE-ETHAY, 2010). Em contrapartida, o esquema de modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), que se baseia no chaveamento de fase, é mais robusto contra distúrbios e, apesar de apresentar uma certa complexidade na implementação do estágio de detecção de fase, os sistemas NBPLC passaram a utilizá-lo com mais frequência. A modulação baseada no chaveamento de frequência FSK (*Frequency Shift Keying*) também é utilizada e junto

com ela também a técnica de espalhamento espectral. Por outro lado, os equipamentos PLC banda estreita também podem operar com esquemas de modulação baseados em sistemas banda larga. O esquema de multiplexação utilizado para isso é a multiplexação por divisão de frequências ortogonais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), o que eleva a robustez das redes de banda estreita contra ruídos de faixa estreita e atenuação por seletividade em frequência (PAPADOPOULOS et al., 2013). Os grupos de normatização do ITU-T e IEEE vêm padronizando o uso do OFDM nos sistemas NBPLC, elevando assim a sua robustez sobre os variados meios de transmissão (LYS, 2015). Esses novos padrões, baseados no OFDM, estão sendo denominados de PLC banda estreita de próxima geração e vêm sendo, macizamente, adotados por diversos fabricantes na Europa e Ásia (LYS, 2015), (SOUKAL, 2009).

No Brasil, não há regulamentação para emissão de radiofrequência sobre as redes elétricas para os sistemas PLC de banda estreita.

2.2.2 A Tecnologia de Comunicação PLC de banda Larga BPL

A tecnologia de comunicação de dados de banda larga via rede elétrica BPL (*Broadband Power Line*) fornece maiores taxas de transmissão (acima dos 2 Mbps) do que a tecnologia destinada para banda estreita. Enquanto as redes NBPLC suportam tráfego com poucos canais à baixas taxas de transmissão, as redes BPL oferecem serviços mais sofisticados tais como múltiplos canais de informação, acesso banda larga à internet, vídeo sob demanda, além de serviços banda estreita como automação, telemetria etc (ANATORY; THEETHAY, 2010), (CASTOR et al., 2014b), (CASTOR; SILVA; SEGATTO, 2015), (HRASNICA; HAIDINE; LEHNERT, 2004), (CARCELLE, 2006). A utilização da tecnologia sobre redes elétricas de baixa ou média tensão abre uma leque de oportunidades para as empresas de telecomunicações proverem serviços de qualidade sem a necessidade de gastar com novos cabos. Porém, como já é sabido, as redes elétricas impõem algumas limitações para a tecnologia BPL por não serem customizadas para a transmissão de dados. As distâncias de cobertura, assim como as taxas de transmissão alcançadas pelo canal PLC, são limitadas devido aos efeitos nocivos provocados pelas linha de transmissão (SILVA, 2006), (CASTOR et al., 2014b), (CASTOR; SILVA; SEGATTO, 2015).

Uma rede de comunicação de dados baseada na tecnologia BPL consiste numa quantidade de terminais usuário conectados a um meio físico comum, a rede elétrica, cujo acesso ao meio é feito de modo compartilhado para recepção/transmissão de dados de/para um terminal central (IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010), (CORINEX, 2014). De acordo com o padrão OPERA, este procedimento pode ser feito de duas maneiras. A primeira, enviando individualmente para cada nó de usuário um quadro de dados contendo as informações do terminal central, porém terminado por uma permissão de uso do canal denominada de *token*. Este *token* contém informações do próximo nó de

usuário ou de uma lista priorizada de terminais que poderão ocupar o canal de dados, em ordem pré-determinada, logo após o término da primeira transmissão. O tempo para uso do canal, determinado pelo terminal central, pode ser fixado em um intervalo de tempo (IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010). Neste caso, a alocação do canal pode ser sincronizada com o terminal central. No caso em que não há fixação do intervalo de tempo, se o terminal não utilizar todo o tempo reservado para ele o direito de transmitir é imediatamente dado ao próximo terminal da lista ou retornado ao terminal central. A outra forma de acesso ao meio, é usando um protocolo de controle de acesso ao meio que busca ao máximo evitar colisões de quadros, CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*). É enviado um pacote CSMA *token* para todos os terminais da célula BPL que iniciarão uma disputa de prioridade entre si. O vencedor da disputa obtém o direito de transmitir durante um dado período de tempo e em seguida o direito de transmissão volta para o controle do terminal central que repetirá o processo sempre que houver dados a serem transmitidos(IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010).

Ainda que a rede BPL disponha de grande capacidade de transmissão de dados e permita o transporte dos mais variados serviços de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação), outras facilidades como a qualidade de serviço QoS(Quality of Service) são necessárias para contrapor alguns efeitos de latência, *jitter* e largura de banda. De acordo com o IEEE P1901, as redes BPL devem fornecer diversos mecanismos de QoS para o seu tráfego corrente (IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010), (CORINEX, 2014). Um total de oito classes de serviços estão disponíveis no terminal BPL, onde cada uma delas possuem uma préprogramação de latência, largura de banda e nível de garantia dos recursos requeridos, podendo variar entre taxa constante de transmissão CBR (*Constant Bit Rate*), taxa de transmissão disponível ABR (*Available Bit Rate*), taxa de transmissão variável VBR (*Variable Bit Rate*) e taxa de transmissão por melhor esforço *Best Effort*.

A Figura 4 mostra uma topologia do tipo "árvore" encontrada numa rede PLC banda larga (BPL), onde o terminal central, denominado de HE - *Head End*, concentra e comanda todos os fluxos de dados nas direções *upstream* e *downstream* da rede. O terminal central é responsável pelo controle completo da célula BPL. Ele tem a função de designar os recursos de rede para todos os terminais da célula BPL, utilizando para isto o *token*, com base na qualidade de serviço requerida pelos fluxos de dados circulando pela célula. O terminal central sempre será o mestre de qualquer terminal conectado a ele (IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010), (CORINEX, 2014). Quando o sinal PLC é muito atenuado para se alcançar, a partir do terminal central, todos os terminais usuário CPE(*Customer Premise Equipment*) conectados ao meio, um equipamento repetidor denominado de TDR (*Time Division Repeater*) é instalado na rede para reforçar este sinal PLC e assim aumentar ainda mais a cobertura da rede.

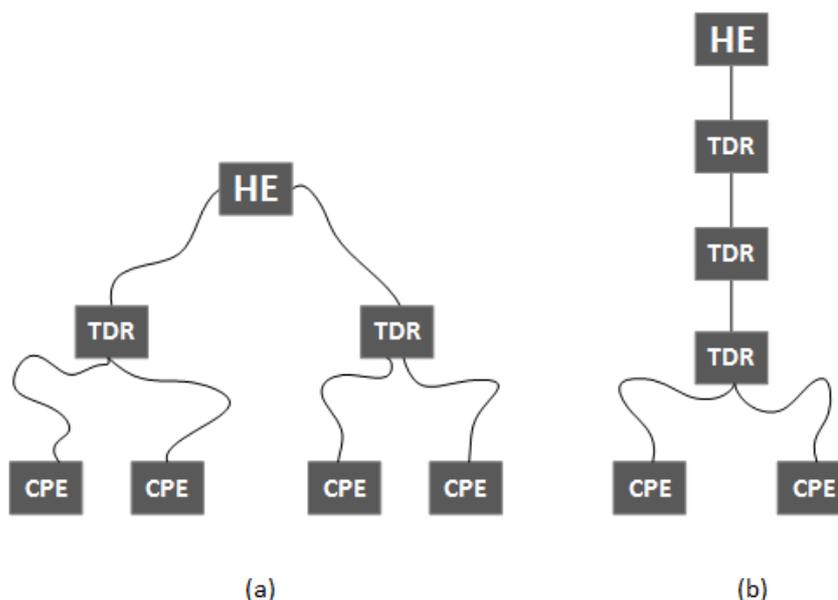


Figura 4 – Topologia comum de uma rede de acesso BPL. HE: *Head End*, CPE: *Customer Premise Equipment* e TDR: *Time Division Repeater*.

Quando conectado ao HE ou a um outro terminal repetidor, o TDR age como um terminal mestre, compartilhando o canal alocado entre seus terminais CPE de acordo com o fluxo de tráfego, com a classe de serviço e origem e destino. Porém, ele sempre será escravo do HE ou de um outro TDR antecessor, mas mestre de seus escravos (IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010), (CORINEX, 2014).

Os terminais CPE são unidades BPL instaladas próximas aos usuários. Como um escravo, o CPE deve se identificar para a célula BPL antes de ter acesso ao canal. Isto significa que o CPE deve selecionar primeiro um nó mestre para que um tempo de acesso ao canal seja designado. Assim, um processo de autenticação deve ocorrer para saber se o CPE requisitante é válido na rede. Depois de ser autenticado na rede, o CPE automaticamente baixa o arquivo de configuração (processo de auto-configuração) e prossegue com os ajustes dos seus parâmetros de configuração (IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010).

2.2.3 Visão Geral da Camada Física da Tecnologia BPL

Uma das mais significantes características do canal PLC é a sua seletividade em frequência devido as reflexões causadas pelo descasamento de impedância da linha (ANATORY; THEETHAY, 2010), (SILVA, 2006), (CLAYTON, 2008). Além disso, os efeitos associados a variação do tempo na propagação do sinal, ocorridos devido as mudanças na topologia, nos cabos e nas cargas conectadas, também limitam a distância e largura de banda utilizada na comunicação de dados (PAPADOPOULOS ANDREAS I. CHRYSOCHOS, 2013). Para combater estes problemas, a técnica de multiplexação por divisão de

frequências ortogonais, OFDM, tem sido adotada nas especificações da camada física da tecnologia BPL por causa da sua habilidade de adaptação ao canal diante da presença de seletividade em frequência, da sua robustez frente aos ruídos impulsivos e pela sua alta eficiência espectral. Entre suas várias subportadoras, o OFDM pode definir, por exemplo, diferentes níveis da modulação ADPSK (*Amplitude Differential Phase Shift Keying*) em um esquema de mapeamento adaptativo, baseando-se nas informações do canal estimado, realizado através de símbolos OFDM específicos (CORINEX, 2014).

De acordo com as definições do grupo OPERA, a rede BPL pode operar em até três modos de largura de banda: 30 MHz, 20 MHz e 10 MHz. Os equipamentos utilizados nos experimentos desta pesquisa operam apenas nos modos 30 MHz e 10 MHz, com taxas que alcançam os 205 Mbps e 84 Mbps, respectivamente, sendo que um terminal BPL só pode operar em um único modo por vez (CORINEX, 2014). O espectro ocupado pelo sinal é definido de acordo com a largura de banda e opera dentro da faixa de frequências compreendida entre 2 e 34 MHz. As especificações dos principais parâmetros encontrados nos modems BPL podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do BPL de acordo com o padrão OPERA

Freq. Central	Larg. de Banda	Dens. de Pot.	Max. Taxa de Transm.
7.968.750 Hz	10 MHz	-72 dBm/Hz	84 Mbps
19.062.500 Hz	30 MHz	-77 dBm/Hz	205 Mbps

No Brasil, a resolução 527 de 8 de abril de 2009 da ANATEL regulamenta as condições de uso de radiofrequências por sistemas de Banda Larga por meio de Redes de Energia Elétrica. Um dos requisitos específicos desta resolução é a emissão indesejada de radiações causadas por sistemas BPL operando sobre rede de baixa e média tensão nas faixas de radiofrequências atribuídas ao Serviço Móvel Aeronáutico e Radioamador que compreende de 2,754 MHz a 29,700 MHz. Os limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL sobre baixa e média tensão são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites de radiações indesejadas causadas por sistemas BPL

Faixa de Freq	Intensidade do Campo	Distância da Medida	Aplicação
1,705 a 30 MHz	30 microvolt/m	30 m	baixa tensão
30 a 50 MHz	100 microvolt/m	3 m	baixa tensão
1,705 a 30 MHz	30 microvolt/m	30 m	média tensão
30 a 50 MHz	90 microvolt/m	10 m	média tensão

2.3 O conceito *Smart Grid* na Rede Elétrica

A malha elétrica de um país pode ser considerada um sistema de entrega de *commodity*, onde o produto final é a energia elétrica (SOUKAL, 2009). Neste sistema, a produção, a entrega e o consumo ocorrem todos ao mesmo tempo. Esta fato requer das Companhias Elétricas ações voltadas para o monitoramento, a comunicação e o controle dos diversos sistemas que garantam a disponibilidade do produto. Adicionalmente, a integração de novas tecnologias voltadas para a produção sustentável de energia, modernização das plantas elétricas e a redução das emissões de gás de efeito estufa, eleva ainda mais os desafios devido a necessidade de:

- integração das fontes de energias renováveis conectadas aos sistemas de transmissão;
- monitoramento e controle dos recursos distribuídos de energia que alimentam as redes de distribuição;
- controle sobre as novas fontes de consumo como é o caso dos carros elétricos PEV (*Plug-in Electric Vehicle* e seus efeitos sobre as redes elétricas;
- monitoramento e controle sobre novos dispositivos IED (*Intelligent Electronic Device*) tais como disjuntores digitais, sensores de corrente e tensão, entre outros.

Estas e outras iniciativas elevaram o nível de complexidade das redes elétricas onde a integração das novas tecnologias, sejam elas para proteção de circuitos, ou sensoriamento de corrente, tensão e potência, ou medição remota de consumo, é fundamental para a estabilidade e segurança das plantas elétricas mundiais. Diante disso, surge um novo conceito de operação dessas plantas elétricas que reúne todos os requisitos e premissas impostos pela evolução tecnológica, denominado de redes inteligentes ou simplesmente, *Smart Grid* (LYS, 2015), (SOUKAL, 2009), (PAPADOPOULOS ANDREAS I. CHRYSOCHOS, 2013). Os componentes básicos que caracterizam uma rede inteligente são o monitoramento em tempo real das diversas variáveis de controle, a reação imediata frente aos eventos ocorridos na rede e a redução do tempo de reparo através do isolamento do problema (SOUKAL, 2009). Seu funcionamento consiste na integração das informações provenientes dos sensores, processadores e medidores inteligentes e dos dispositivos elétricos como disjuntores, transformadores, barramentos, através de uma rede de comunicação de dados de baixo custo. Esta por sua vez transporta as informações dos dispositivos até o centro de operações onde encontram-se os sistemas que farão o processamento dos dados para apresentação aos operadores e envio de comandos autônomos à rede elétrica para correção ou configuração de acordo com as informações processadas. A Figura 5 mostra a topologia conceitual de uma rede *Smart Grid*. As redes de comunicação são comumente constituídas por tecnologias heterogêneas tais como sistemas óticos, redes sem fio, sistemas xDSL, entre outros.

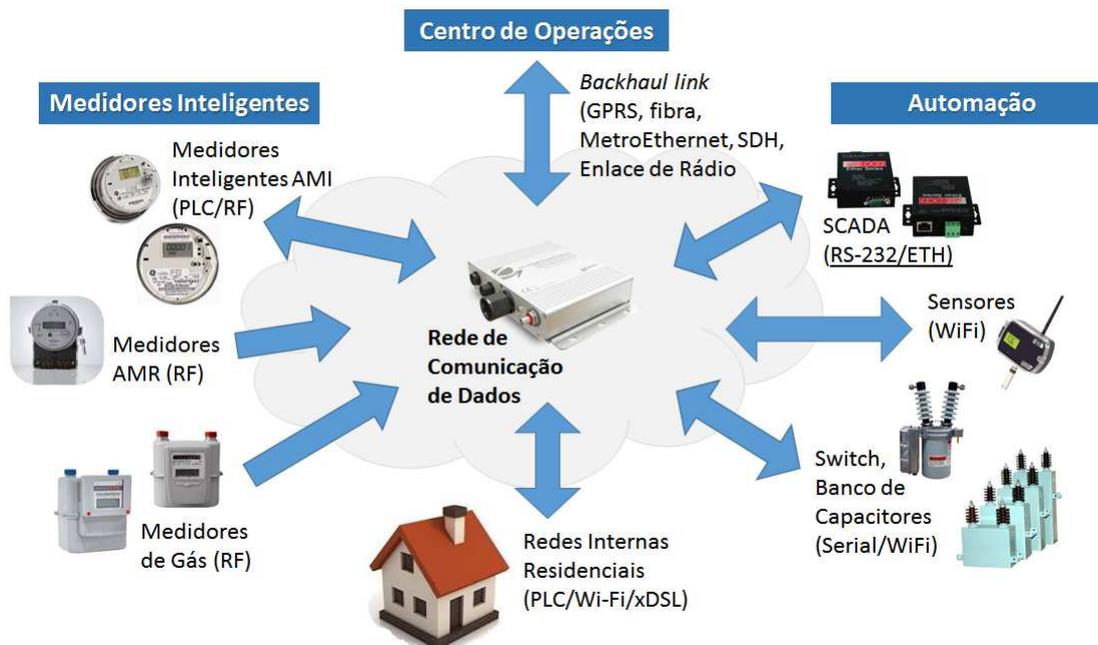


Figura 5 – Topologia conceitual de Redes Inteligentes *Smart Grid*.

Um dos principais requisitos que as redes de comunicação deve atender é a total integração entre as tecnologias envolvidas com alta disponibilidade e velocidade de transmissão. Este fator garante às Companhias Elétricas mais estabilidade e segurança nas operações de suas plantas. Mas outro fator importante considerado na implementação das redes inteligentes está relacionado aos custos de investimentos e de Operação & Manutenção das redes de comunicação de dados. Neste sentido e diante da evolução ocorrida na tecnologia PLC de banda estreita e de banda larga, sua escolha como parte da solução das redes de comunicação torna-se inevitável. A tecnologia PLC oferece grandes benefícios quando são utilizadas na composição das redes inteligentes (LYS, 2015), como por exemplo:

- permite utilizar a infraestrutura cabeada existente como canal de comunicação redundante sem custos adicionais, sendo que os requisitos de redundância exigidos pelas redes inteligentes aos seus sistemas de proteção e controle, incluem também redundância no canal de comunicação para que haja alta disponibilidade na comunicação dos dados;
- permite que funções de sensoriamento e comunicação de dados possam ser desenvolvidas pelo mesmo *transceiver* PLC;
- a rede elétrica representa na maioria dos casos a rota mais curta entre os dispositivos eletrônicos inteligentes IEDs e seus controladores quando comparada às redes públicas *Metro Ethernet*, trazendo como vantagem uma rede de comunicação com baixa latência, sendo este um requisito crucial para aplicações de teleproteção;

- as redes elétricas estão sobre o controle direto e completo das empresas *Utilities* o que é benéfico em países onde o mercado de Telecomunicações ainda não está regulamentado;

Também é possível utilizar o PLC banda estreita em aplicações *Smart Grid* voltadas para a infraestrutura de medidores automatizados AMI (*Advanced Metering Infrastructure*). Esta infraestrutura é responsável por medir, coletar e analisar o uso da energia a partir de dispositivos avançados tais como medidores de eletricidade, medidores de vazão de gás, medidores de vazão de água, utilizando para isso meios de comunicação de dados que permitam realizar medições sob demanda ou agendadas. A implantação desta infraestrutura reduz os custos operacionais das empresas de utilidade, evitando assim as visitas humanas para leitura dos medidores e permitindo a distribuição de forma rápida e segura de informações de consumo, demanda e tarifas para os consumidores. Devido a baixa taxa de transmissão exigida por esta infraestrutura, o uso do NBPLC na coleta dos dados dos medidores é suficiente.

O controle da iluminação pública é outra aplicação *Smart Grid* que pode ser feita com o uso do PLC banda estreita (LYS, 2015), (CARCELLE, 2006). A maioria dos sistemas de iluminação pública utilizam sensores de luz para chavear as lâmpadas entre ligado ou desligado, de acordo com a claridade natural do dia. Realizando o monitoramento e controlando remotamente a iluminação pública é possível saber em tempo real o funcionamento das lâmpadas, ou seja, se estão ligadas ou desligadas, e obter informações de alarmes caso haja mal funcionamento. Isso evitaria eventuais desperdícios de energia e diminuiria o tempo de reparo.

O uso do BPL pode ser feito em soluções de acesso que suporta a infraestrutura AMI. Utilizando terminais gateways e repetidores é possível criar uma rede de transporte que receberá os dados provenientes dos diversos sistemas banda estreita e os encaminhará para o centro de operações da *Utility*. A Figura 6 mostra uma rede de transporte formada por um sistema BPL, com aplicações *Smart Metering* formada por sistemas NBPLC.

Nota-se na Figura 6 que a rede de transporte BPL é implementada em cima do canal de comunicação da rede elétrica MV, sendo que os equipamentos NBPLC utilizam as redes LV como infraestrutura de acesso para transportarem os dados dos dispositivos de medição até a rede de transporte. Esta por sua vez, se encarrega de transportar esses dados até o centro de operações, onde o monitoramento e controle da infraestrutura AMI é executado. Consumidores diversos, tais como, prédios residenciais e comerciais, indústrias e comércios podem usufruir da tecnologia PLC para terem suas infraestruturas elétricas gerenciadas pela concessionária a baixos custos. O videomonitoramento é uma aplicação que também pode ser suportada pelas redes BPL. As secretarias de segurança pública, presentes nas diversas esferas governamentais, utilizam as câmeras de vídeo para realizarem o monitoramento do trânsito e aumentar a segurança pública.

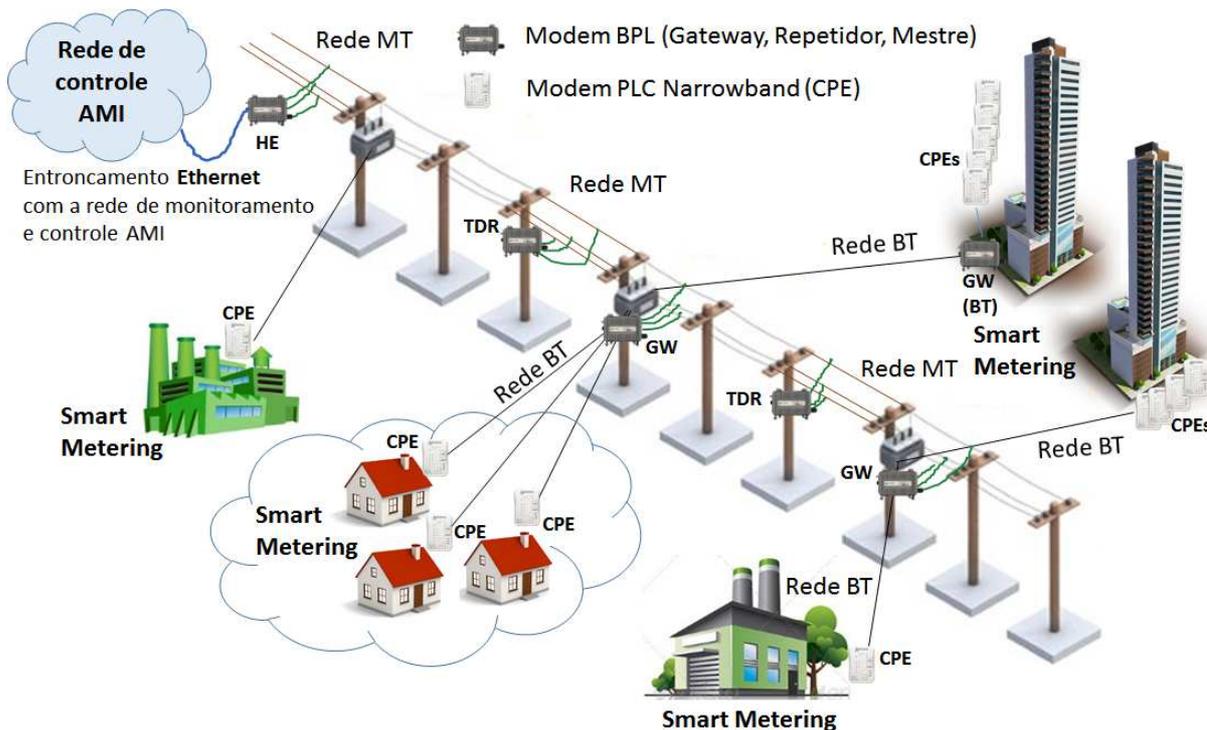


Figura 6 – Rede PLC Banda Larga como *backbone* em aplicações *Smart Metering*.

Estas câmeras são comumente instaladas nas vias públicas, sendo que o postea-mento da rede elétrica ou da iluminação pública são frequentemente usados para isso. O uso da tecnologia BPL neste caso, reduz os investimentos com infraestrutura dedicada para comunicação e o tempo de implementação. Apesar das redes BPL apresentarem uma certa latência de rede (CASTOR et al., 2014b), (CASTOR; SILVA; SEGATTO, 2015), as taxas de transmissão alcançadas pelos equipamentos nas rede elétricas são suficientes para suportar os serviços deste tipo.

3 Avaliação de Desempenho dos Modems PLC em Rede Elétrica de Baixa Tensão

A realização de testes em rede de baixa tensão teve como principais objetivos investigar o desempenho dos equipamentos PLC adquiridos pelo laboratório de Telecomunicações da UFES (o LabTel) em termos de taxa de transmissão, largura de banda, bem como o comportamento dos mesmos perante os efeitos de multipercurso no sinal PLC. Como método de investigação utilizou-se a análise dos resultados de medidas de taxa nas camadas física e lógica do sistema BPL implantado, latência da rede e desempenho da gerência remota dos referidos equipamentos. Assim, apresenta-se neste capítulo os resultados de medidas realizadas em laboratório na configuração *back-to-back*¹ (B2B) e em uma rede de testes de baixa tensão de aproximadamente 180 metros e 6 derivações, envolvendo equipamentos BPL que seguem os padrões IEEE 1901 - *Access Power Line Networks Standard*.

Convém ressaltar que estes experimentos foram realizados com modems BPL operando na banda que compreende frequências entre 2 e 34 MHz (30 MHz de largura de banda) para alcançar 205 Mbps de *throughput* com o suporte da modulação multiportadora OFDM. Em um ambiente de laboratório e com uma topologia ponto-a-ponto entre um equipamento mestre HE e um escravo CPE, algumas dezenas de Mbps foram alcançados. Adaptabilidade às características do canal foi uma importante funcionalidade observada na avaliação desta tecnologia como possível de ser aplicada em redes de média tensão.

3.1 Metodologia dos Testes em Baixa Tensão

Os experimentos realizados em laboratório foram divididos em duas partes, quais sejam, topologia ponto-a-ponto em configuração B2B e topologia ponto-multiponto na rede de baixa tensão de 180 m. A primeira representando uma situação ideal para a transmissão de dados, serviu para melhor conhecimento dos modems disponíveis, enquanto a segunda para essencialmente avaliar os efeitos do multipercurso neste tipo de transmissão.

3.1.1 Comunicação ponto-a-ponto na Configuração *back-to-back*

A topologia de rede montada para a realização dos testes em B2B com cabos coaxiais é mostrada na [Figura 7](#). Ela é composta de cabos coaxiais RG6, com 3.5 m de comprimento, impedância de 75 ohms, largura de banda de 3 GHz e é compartilhada

¹ Aquela em que o transmissor é ligado diretamente no receptor.

entre os equipamentos HE e CPE. No meio desta rede está conectado um acoplador direcional (*splitter*) com atenuação de 3.5 dB com a função de derivar o sinal PLC e permitir que um analisador de espectro seja conectado para medição. O segmento C-D mostrado na topologia da Figura 7 representa o caminho do sinal PLC derivado até o analisador de espectro, quando os equipamentos HE e CPE são localizados nos pontos A e B respectivamente.

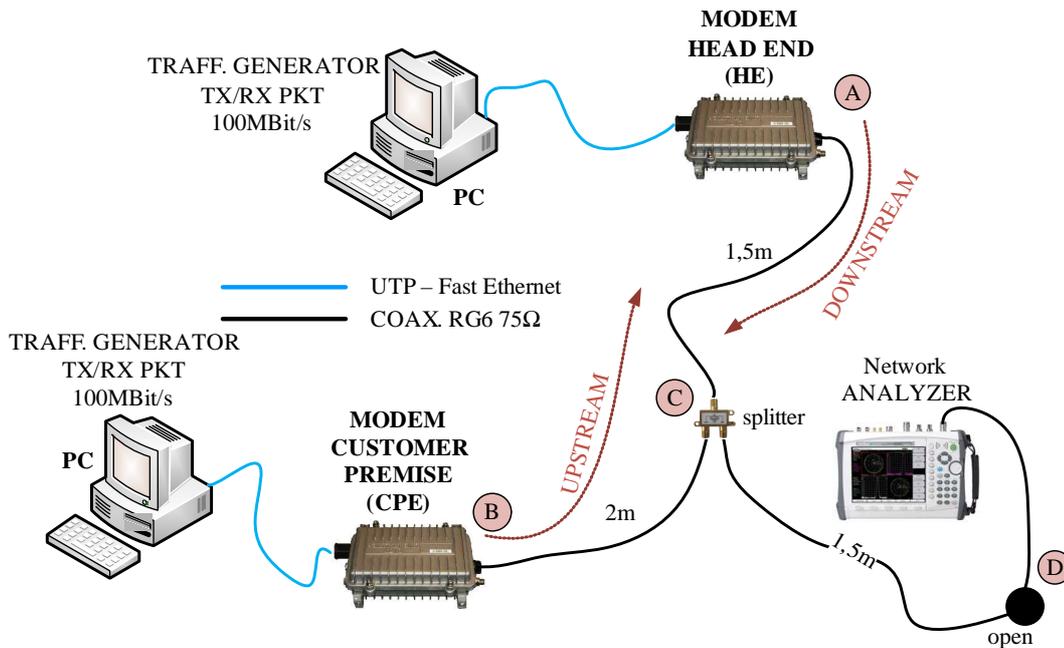


Figura 7 – Topologia para comunicação na configuração back-to-back (B2B) com um cabo coaxial de 3.5 m de comprimento.

Ajustados para se comunicarem com máscara uniforme de potência (*flat*) e operando na frequência central 19.0625 MHz, com largura de banda de 30 MHz e com densidade de potência espectral PSD (*Power Spectral Density*) de -77 dBm/Hz, a taxa nominal máxima de transmissão alcançável deverá ser e 205 Mbps. Nota-se que os computadores conectados às interfaces Ethernet dos modems geram tráfego de dados para comunicação.

Ressalta-se que este cenário representa uma propagação de sinal multipercorso devido ao circuito aberto representado no ponto D quando o analisador não estiver conectado à rede. Entretanto, os efeitos da atenuação normalmente encontrados nas linhas elétricas de baixa tensão, podem ser desconsiderados neste caso. Uma alta taxa de transmissão e uma máxima transferência de potência entre os pontos A e B eram esperadas. Isto realmente foi verificado através de uma configuração inicial do gerador de tráfego, onde um fluxo bidirecional e contínuo de dados com taxa de 100 Mbps foi registrado usando a ferramenta de gerenciamento SNMP.

3.1.2 Comunicação ponto-multiponto na Rede Elétrica de Baixa Tensão

As características de propagação do sinal BPL dependem de propriedades do meio de transmissão tais como a topologia da rede e tipos e materiais dos cabos usados como meio. A Figura 8 mostra o aparato experimental montado para a avaliação do desempenho do sistema PLC operando sobre uma rede de baixa tensão de 180 m. Esta rede representa um cenário com comunicação multipercurso mais severo quando comparado com a configuração B2B, devido essencialmente à quantidade de derivações existentes na linha. Sua topologia tipo árvore é composta por uma derivação de 3.83 m e cinco derivações de 1.1 m, com três circuitos abertos por derivação. O equipamento mestre está localizado no ponto A e o equipamento escravo no ponto B. Os geradores de tráfego estão conectados na interface Ethernet de ambos os modems e um repetidor conectado no ponto C. A chave S3 é empregada nos casos em que uma redução do comprimento da linha é necessária.

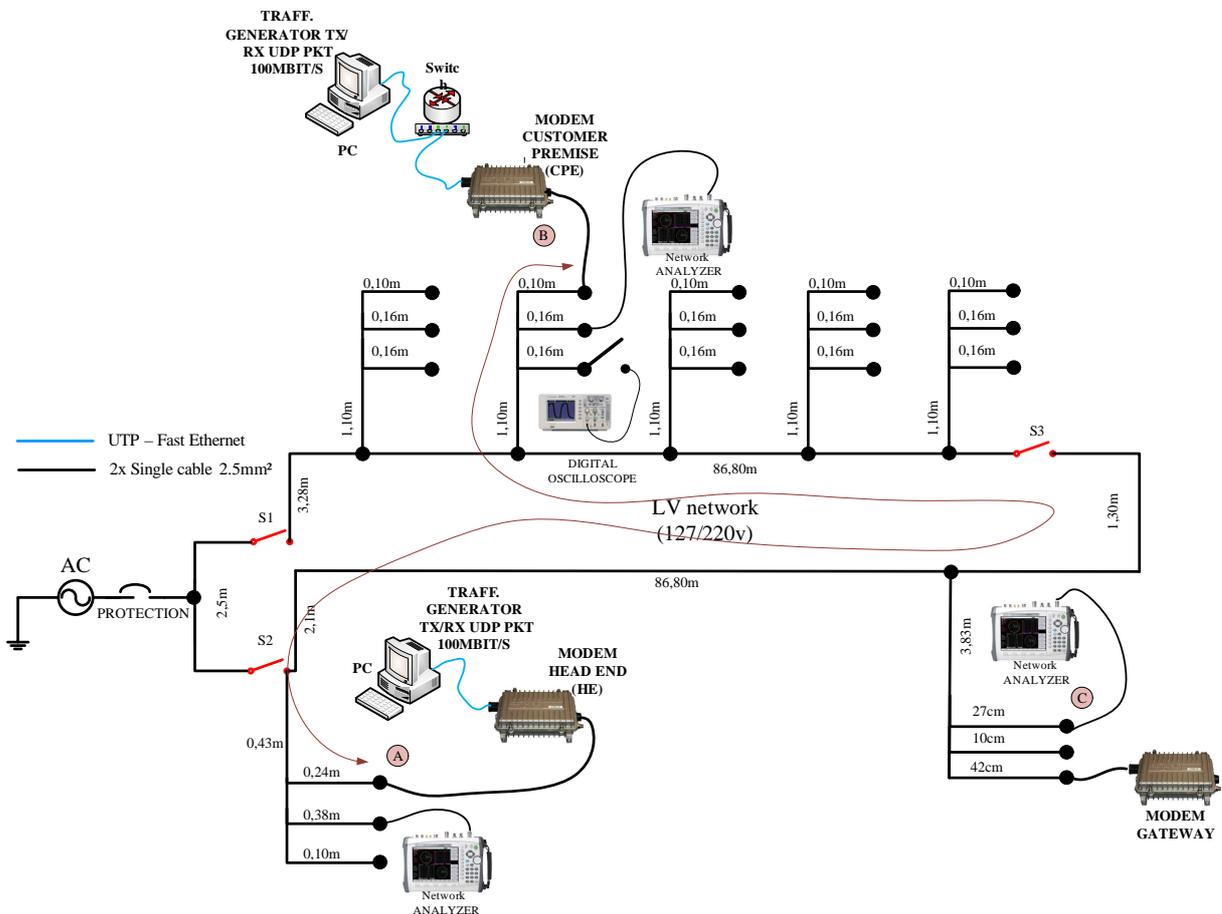


Figura 8 – Rede elétrica de baixa tensão usada nos testes dos equipamentos PLC. O analisador de rede e o osciloscópio digital são usados para capturar o sinal propagado nos domínios da frequência e do tempo, respectivamente.

3.2 Análise das Medidas de Camada Física

Nesta secção entende-se por medida de camada física o espectro do sinal multiportadora e sua correspondente no domínio do tempo, obtidos pelo analisador de redes e pelo osciloscópio digital. A [Figura 9](#) mostra espectros de sinal nos dois diferentes canais e medidos em diferentes cenários e a [Figura 10](#) ilustra a disposição do sinal no domínio do tempo.

Nota-se que o espectro mostrado na [Figura 9.a\)](#), conforme esperado, representa o de um sinal OFDM que obteve uma máxima transferência de potência do transmissor para o receptor. Já no cenário de teste usando a rede de baixa tensão, os efeitos da atenuação e do multipercurso do sinal limitam o desempenho do sistema, conforme pode ser visto na [Figura 9.b\)](#). O uso do modem repetidor é devido à análise de sua capacidade de regeneração do sinal a partir dos 90 m do canal, como pode ser visto na [Figura 9.b\)](#) comparando-se a curva do modem TDR com a do modem CPE.

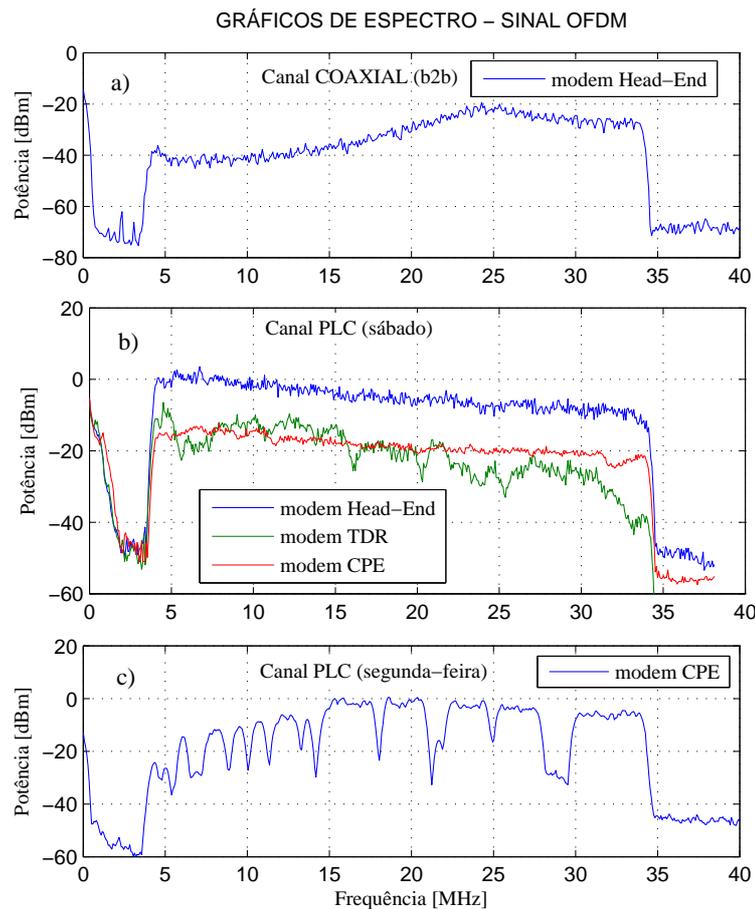


Figura 9 – Espectros do sinal OFDM medidos com o analisador de rede nos cenários a) B2B, b) canal LV na saída do HE, na entrada do repetidor TDR e na entrada do CPE. e c) na entrada do CPE em um horário de uma segunda-feira de maior movimento da semana, em que diversos alunos estavam utilizando a rede elétrica do laboratório.

Uma nítida seletividade de frequência ocorrida no canal PLC é verificada na [Figura 9.c\)](#) cujo espectro foi medido na entrada do modem CPE após propagação por toda a rede de 180 m sem regeneração de sinal. Além do efeito multipercurso inerente, tal seletividade é reforçada por várias interferências eletromagnéticas geradas pelos diferentes dispositivos elétricos conectados à rede.

Apesar da eminente redução da largura de banda do canal oriunda desta seletividade em frequência, ressalta-se aqui a importância dos sofisticados esquemas de reconhecimento e equalização de canal, bem como dos esquemas de mapeamento adaptativo de bit, providos pela modulação/multiplexação OFDM, indispensáveis para se atingir o desempenho desejável na comunicação de dados com altas taxas de transmissão na largura de banda de 30 MHz.

É possível observar, a partir do sinal medido no domínio do tempo sobre a rede LV, mostrado na [Figura 10.a\)](#) que, mesmo sem tráfego no canal de dados, o modem HE mantém uma comunicação de controle com os modems escravos (TDR e CPE) conectados à rede BPL. Neste caso, um tipo de pacote definido como SOT (*Start of Communications*) é transmitido na direção *downlink* (HE para CPE) para gerenciamento do acesso ao meio de todos os modems escravos conectados na rede BPL. Com uma duração de aproximadamente 324 μs , estes SOTs estão espaçados por um período de ≈ 1.3 ms (veja [Figura 10.b\)](#)).

Quando pacotes de dados do tipo PDU (*Protocol Data Unit*) são transmitidos, um tipo de *payload* contendo símbolos de sincronismo e de reconhecimento de canal é observado na camada física conforme mostrado na [Figura 10.c\)](#). Observa-se nesta Figura que os pacotes compostos por SOT e PDUs são espaçados por $\approx 126 \mu\text{s}$ conforme especificação em ([IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010](#)). Separados por $\approx 0.4 \mu\text{s}$ um SOT e um PDU são evidenciados na ampliação feita para a curva mostrada na [Figura 10.d\)](#). De acordo com ([IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010](#)), a duração do SOT, que totaliza 38 μs , é composta por 6 símbolos OFDM. Eles são fundamentais para o mecanismo de controle automático de ganho e são transmitidos antes do símbolo de sincronismo. As especificações descritas em ([IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 2010](#)) também define um máximo de 243 símbolos de dados OFDM em cada *frame*. Devido a variação da quantidade de símbolos estar diretamente associada ao tráfego gerado, o tempo de duração de um PDU medido em nossos experimentos atingiu valores em torno de 386 μs .

3.3 Análise das Medidas nas Interfaces dos Modems PLC

Complementando os experimentos em laboratório, uma avaliação das taxas de transmissão nas interfaces PLC e Ethernet dos modems PLC sob o ponto de vista da camada 2 se faz necessária.

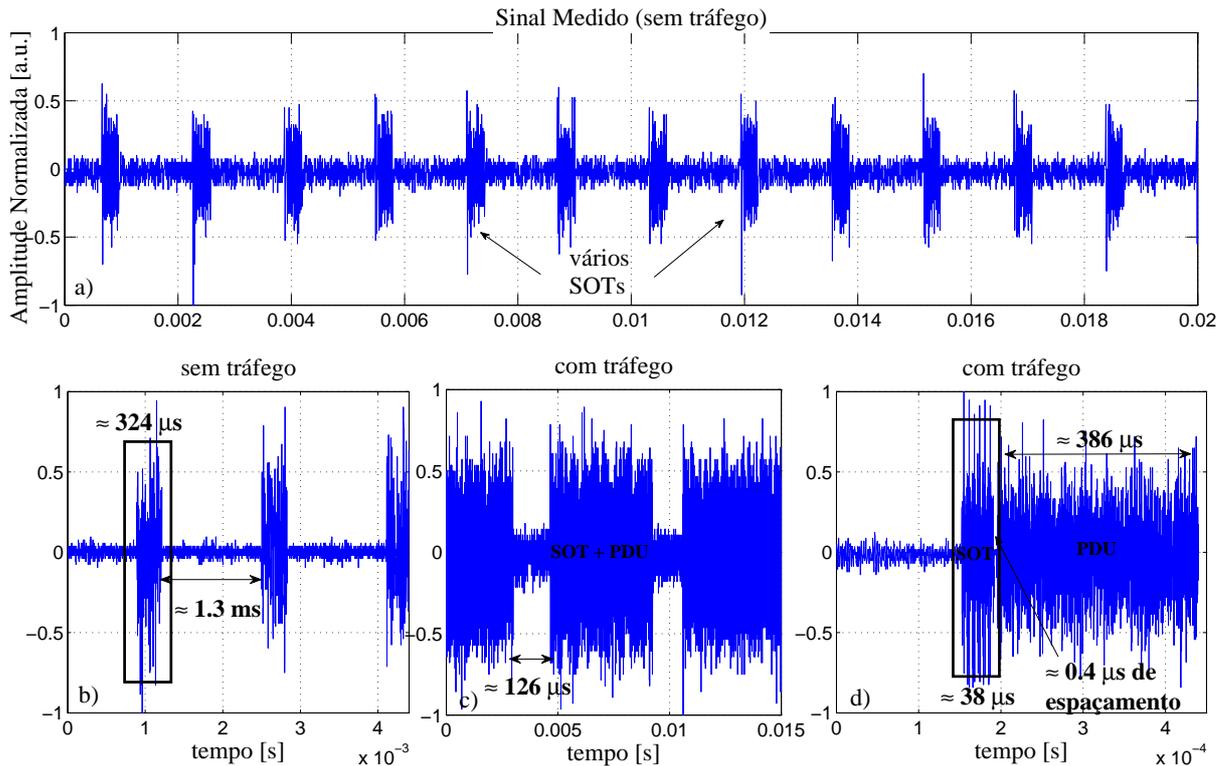


Figura 10 – Sinal no domínio do tempo medido no conector próximo ao modem CPE da rede LV mostrada na Figura 8. As curvas a) e b) foram medidas sem tráfego de dados. As curvas c) and d) foram medidas sob tráfego UDP de 100 Mbps.

Para isso, um tráfego UDP (*User Datagram Protocol*), contínuo e com *throughput* de 100 Mbps, bidirecional foi injetado na interface Ethernet de cada modem através dos computadores conectados às mesmas interfaces, conforme mostrado na Figura 8. Através do protocolo SNMP pôde-se fazer o registro das estatísticas de tráfego nas duas interfaces.

Os resultados medidos em ambas interfaces na configuração B2B nas direções *uplink* e *downlink* são mostrados na Figura 11. Observa-se pela Figura 11.a) (estatísticas de tráfego no modem HE) e b) (estatísticas de tráfego no modem CPE) que a taxa de dados *upstream* de aproximadamente 66 Mbps se mantém constante durante mais de 2 dias de medição. O esquema de adaptação às condições do canal é evidenciado no tráfego *downstream* medido. O degrau registrado no ponto 3000 s da curva *downstream* comprova a extrema importância desta funcionalidade dos modems testados, em que houve um acréscimo da capacidade do canal.

O esquema de adaptação ao canal também é observado nas curvas de tráfego da interface PLC conforme mostram as Figura 11.c) e d). Em ambas direções, a taxa de transmissão é incrementada de 100 Mbps para 140 Mbps, de acordo com as melhores condições do canal registradas no ponto 3000 s. Assim, o máximo *throughput* alcançado na interface física PLC de 280 Mbps e o obtido na camada 2 de 100 Mbps (que corresponde a 80 % da velocidade obtida na interface PLC), confirmam a previsão sobre o bom

desempenho dos modems PLC testados.

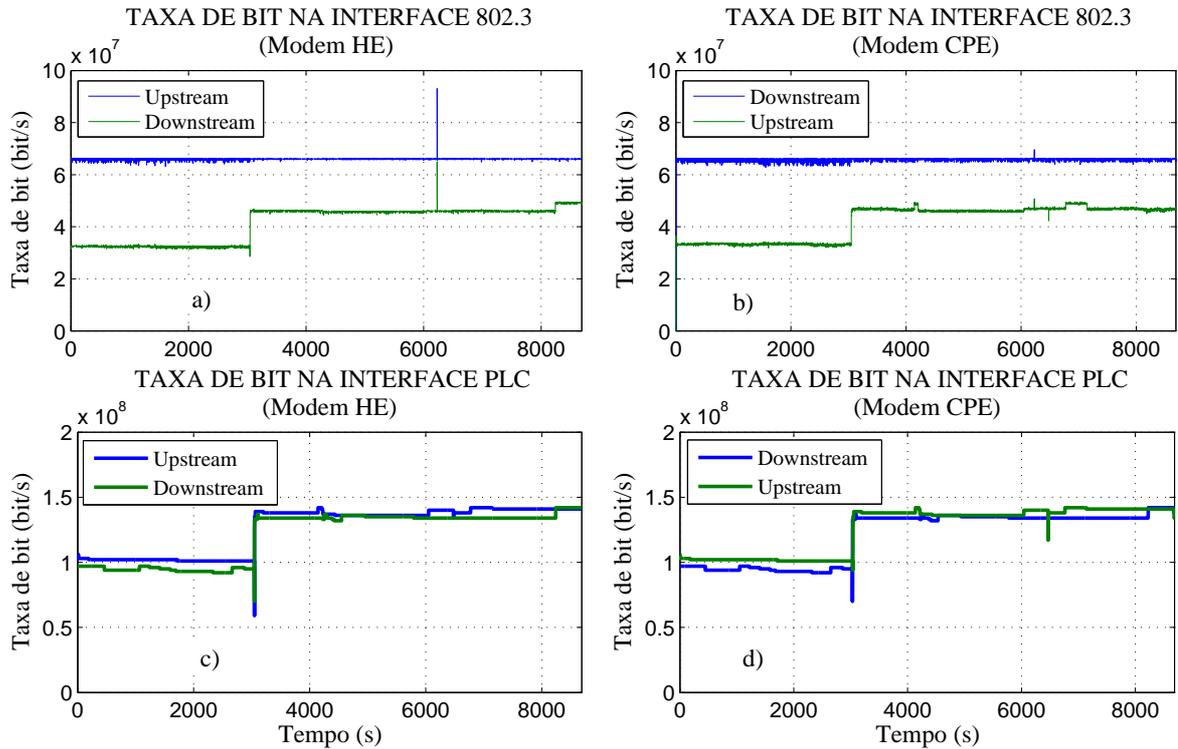


Figura 11 – Medida de tráfego UDP nas direções *downlink* e *uplink* realizada na configuração *back-to-back*. As curvas a) e b) representam o tráfego medido na camada MAC (interface Ethernet). As curvas c) e d) representam o tráfego medido na camada física (PLC).

A Figura 12 mostra o tráfego da rede de testes de baixa tensão em ambos os equipamentos HE e CPE nas mesmas condições de tráfego, com o mestre localizado no ponto A e o escravo localizado no ponto. Nota-se pela Figura 12 que nesta topologia, as variações da taxa são comuns em todas as medições. Isto pode ser explicado pela variação das condições do canal devido à natureza estocástica das fontes de interferência eletromagnética próximas da rede. A adaptação natural presente na técnica de modulação OFDM implementada nos modems é essencial para contrapor os efeitos nocivos deste tipo de canal e garantir que as taxas superem os 100 Mbps na interface PLC.

Os nulos observados nas taxas mostradas na Figura 12 devem ser ignorados porque são provenientes de erros ocorridos no processo de gerenciamento SNMP. Por fim, convém ressaltar que os resultados deste experimento e a metodologia utilizada, mostram que os modems PLC testados podem sim ser empregados nas linhas de média tensão para fins de investigação da capacidade da tecnologia em uma rede inteligente *Smart Grid*.

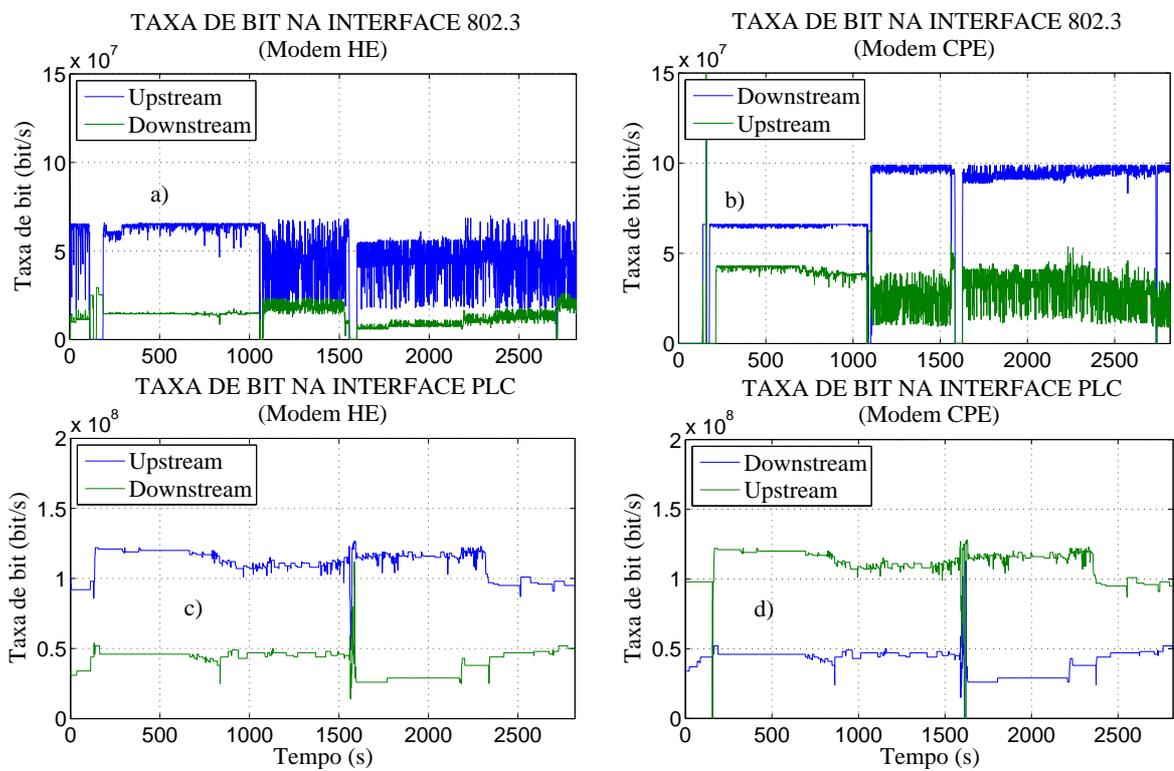


Figura 12 – Medidas de tráfego UDP nas direções *downlink* e *uplink* registradas no cenário de testes envolvendo a rede de testes de baixa tensão.

4 Aplicação da Tecnologia PLC na Rede de Média Tensão

Os procedimentos e os resultados dos testes, realizados com a tecnologia PLC na rede elétrica de média tensão de 13,8 KV da Estação Coletadora SM-8 em São Mateus-ES, são apresentados neste capítulo com o principal objetivo de demonstrar em campo a capacidade deste meio para transporte de dados provenientes, por exemplo, de redes inteligentes *Smart Grid*. Taxas de transmissão de 80 Mbps foram atingidas em distâncias de até 320 m sem repetição de sinal, demonstrando que os equipamentos utilizados possuem recursos técnicos para adequação a este meio de comunicação.

Os testes de campo favoreceram a análise de desempenho do sistema sobre condições reais, ou seja, com a presença de multipercurso, ruídos de variados tipos, interferências eletromagnéticas, entre outros. Nestas condições foi possível verificar:

- se a banda disponível na configuração mestre-escravo é suficiente para garantir, no mínimo, 1 Mbps na interface Ethernet do modem CPE;
- se a velocidade do enlace PLC altera-se significativamente mediante a dinâmica dos efeitos nocivos da linha;
- se a distância influencia fortemente na capacidade de transmissão de dados;
- se a relação sinal-ruído nas subportadoras recebidas diminui drasticamente acima dos 300 m;
- o valor da potência do sinal OFDM na interface de recepção dos modems;
- o desempenho da gerência *in band* SNMP sob tráfego "pesado" no enlace PLC;
- a disponibilidade da rede do ponto de vista de serviços.

4.1 Topologias Física e Lógica da Rede de Testes Preliminares

Testes preliminares de campo foram executados na topologia de rede montada de acordo com a mostrada na [Figura 13](#). Este cenário representa o funcionamento de uma rede PLC com os três elementos de rede HE, CPE e TDR conectados à rede elétrica de média tensão da região de São Mateus utilizada para alimentação de poços de extração de petróleo. O modem HE localizado na estação coletora tem a função de controlar os acessos à rede, assim como faz o equipamento mestre numa rede do tipo ponto-multiponto. O TDR

é utilizado como repetidor de sinal e o CPE o equipamento mais remoto da rede, ou seja, o equipamento escravo localizado junto ao poço de petróleo. Observa-se na [Figura 13](#) que o modem TDR está a 96 m de distância do modem HE e o modem CPE dista 321 m. Ao longo da linha elétrica também é possível identificar derivações variando de 18 a 121 m de comprimento. Os dispositivos elétricos identificados na [Figura 13](#) são utilizados para fornecer energia aos modems PLC em 220 VAC.

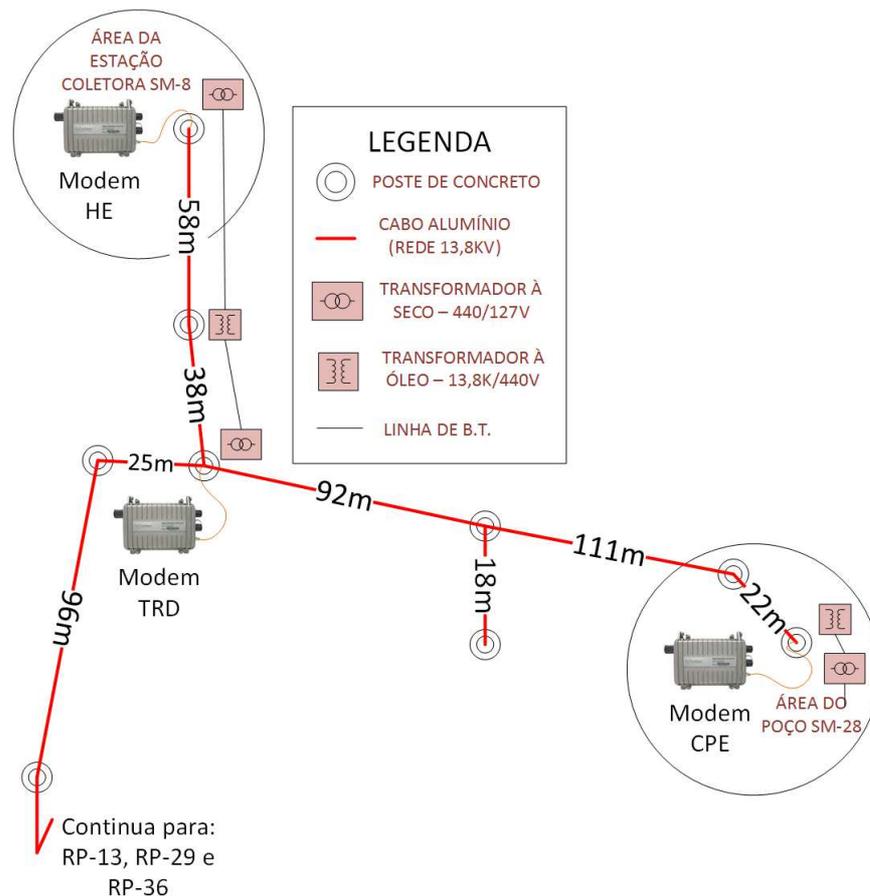


Figura 13 – Topologia física da rede de testes preliminares em SM-8.

A topologia lógica da rede de testes preliminares é mostrada na [Figura 14](#). Nesta configuração os computadores PC1 e PC2 representam os geradores de tráfego usados nos testes. O PRTG Monitor e o SNMP Agent representam as aplicações SNMP rodadas no computador PC2 e nos modems PLC, respectivamente. Nota-se que o serviço SNMP Agent dos modems estão na mesma rede local dos demais serviços (dados e vídeo), sendo que esta condição representou um compartilhamento da banda disponível na rede com todos os serviços ali conectados.

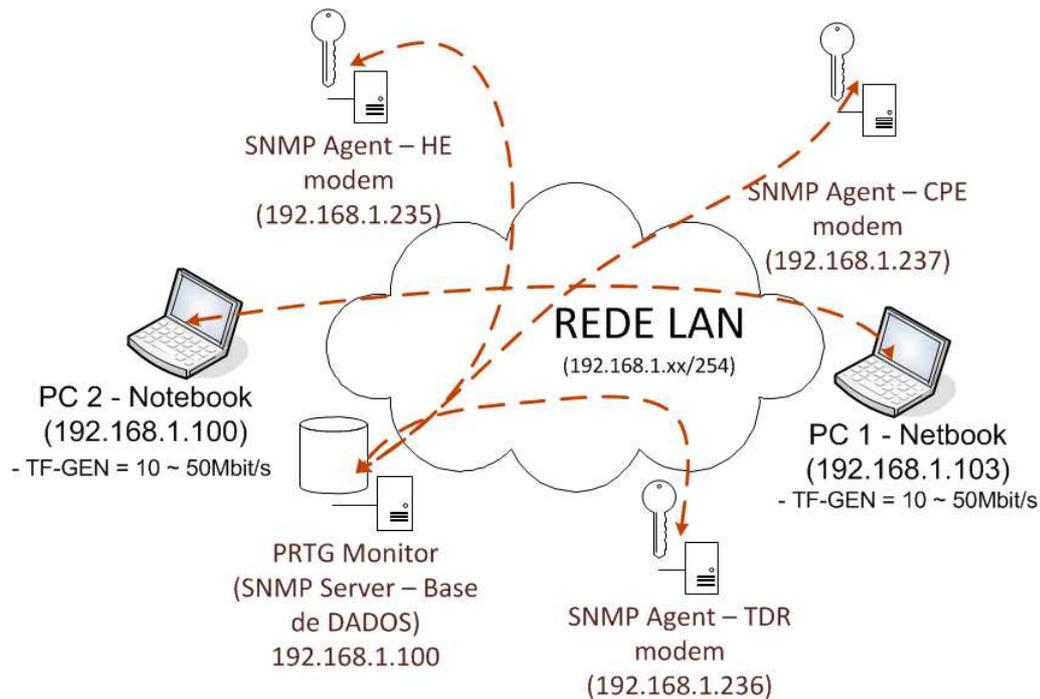


Figura 14 – Topologia lógica da rede de testes preliminares em SM-8.

4.2 A Metodologia dos Testes Preliminares

A metodologia utilizada nestes testes seguiu sistematicamente as etapas de desenvolvimento, de coleta de dados e de procedimento, necessárias ao processo metodológico de pesquisa que o levaram a obtenção dos resultados.

A identificação do perfil de tráfego na rede é de suma importância na etapa de desenvolvimento. A [Tabela 3](#) mostra as características dos tráfegos testados durante a execução destes experimentos.

Tabela 3 – Características do perfil de tráfego das aplicações.

Tráfego	Velocidade	Protocolo	Sensível à Latência
Autom. de poços	100 Kbps	TCP/IP	não
Vídeo SD	384 Kbps	UDP/IP	sim
Alarmes e Controle	100 Kbps	TCP/IP	não

Os comportamentos dos tráfegos de automação e vídeo são bastante conhecidos. Com as atuais técnicas de compressão implementadas nos *codecs* das câmeras (H.264 - MPEG4 - parte 10), valores em torno de 1 Mbps são considerados suficientes para garantir a transmissão de vídeo com qualidade SD (*Standard Definition*) em tempo real. Para o monitoramento e controle de alarmes e também para a transmissão de dados de automação

de poços dentro da janela TCP (*Transmission Control Protocol*) da aplicação, o uso de banda larga nas redes não é necessária.

Tabela 4 – Especificações do modem PLC usado nos testes em campo.

PARÂMETROS	VALOR
Padrões atendidos	IEEE 802.3u, 802.1D, 802.1P, 802.1Q - VLAN e OVLAN, FCC, OPERA, RSTP, SNMPv2, DES/3DES encryption, 8 levels QoS
Velocidade máxima na interface PLC	200 Mbps
Frequência operação	2 - 34MHz
Densidade Espectral de Potência	-50dBm/Hz
Interfaces	Ethernet, COAX, LV (com acoplador)
Endereços MAC	1024
Tensão de alimentação	85 - 265VAC - 50/60Hz
Consumo	7W
Dimensões	230 x 185 x 80mm
Peso	2Kg

O modem utilizado nos testes de campo, denominado *High Density/Low Voltage - HD/LV*, suporta até 64 conexões diretas com TDR ou CPE. Alcança taxas de transmissão nominal de até 205 Mbps, operando em largura de banda de 30 MHz, para distâncias nominais de até 500 m sem a necessidade de repetidor. A [Tabela 4](#) apresenta algumas das principais características deste equipamento ([CORINEX, 2014](#)).

A etapa de coleta de dados, tida como a mais importante etapa do experimento, teve como principais ferramentas, softwares de simulação de tráfego e de gerenciamento SNMP, além de um analisador de espectro. Para simular o tráfego de dados e coletar dados dos modems PLC, foram utilizadas as ferramentas TF-GEN e PRTG Monitor, respectivamente, em um de PC Windows 32 bits.

Para validar os resultados obtidos, foi padronizado um intervalo de medida com duração mínima de 60 minutos e sem qualquer interrupção planejada. As interrupções ocorridas devido à interferências do próprio ambiente de testes (ruídos, falha de energia etc.) e as falhas ocorridas por problemas na gerência de rede via SNMP, como por exemplo *time-out*, foram consideradas parte dos resultados. Além disso, foi garantido que antes de iniciar o registro definitivo de qualquer medida num dado cenário de teste, uma pequena amostra dos resultados (até 15 minutos de medição) foi registrada e analisada para garan-

tir a sua veracidade e integridade. Registros associados à infraestrutura ou maquinários utilizados na instalação dos modems foram feitos por meio de fotografias. Quanto à disponibilidade do serviço fornecido pelo sistema PLC, esta foi mensurada com base em dados empíricos obtidos durante o período de testes. Aspectos tais como a continuidade no fornecimento de energia elétrica para os modems, o rompimento da linha de transmissão, roubo e vandalismo, são exemplos de informações que foram verificadas e analisadas.

No que tange aos procedimentos para a obtenção dos resultados, é importante ressaltar que os equipamentos requerem condições adequadas de instalação para seu perfeito funcionamento em campo. Assim, foi desenvolvido um modelo de abrigo com proteção IP-65 e capacidade para acomodar um modem PLC, um nobreak tipo torre de 600VA, uma régua com quatro tomadas padrão NBR, uma barra de aterramento e um trilho para fixação de três disjuntores monopolares tipo DIN. Detalhes do abrigo são mostrados na Figura 15.



Figura 15 – Fotografia do abrigo do CPE.

Os abrigos foram fixados junto aos postes de concreto, utilizando suporte de ferro galvanizado apropriado. A energização dos abrigos foi feita através de dois processos de abaixamento de tensão sendo que no primeiro utilizou-se um transformador a óleo para baixar a tensão de 13,8 KV para 440 V e o segundo um transformador a seco em cada ponto, para baixar de 440 V para 127 V. Estas duas etapas foram necessárias por não haver rede de baixa tensão disponível no posteamento de SM-8. O modelo de

ligação comumente adotado para as redes de alta tensão é o tipo triângulo, onde não há a presença do condutor Neutro. Para estes casos, a função do cabo Neutro é substituída pelo sistema de aterramento local, onde são criadas malhas de aterramento na base dos postes utilizando barras de cobre, com 2400 mm de comprimento, fincadas ao solo. Um cabo de aterramento é lançado de um ponto à outro para unificar estas malhas. Todos os três abrigos foram conectados à malha de aterramento através de cabos e conectores apropriados.

Por fim, ainda na estapa de procedimentos descreve-se aqui a instalação do conjunto Isolador + Acoplador na linha viva. Este procedimento requer capacitação, habilitação e autorização para a realização de trabalhos em linhas de alta tensão energizadas ou, comumente conhecidas, linhas "vivas". Para o caso específico da rede de testes PLC, a inviabilidade de desligar a rede elétrica em SM-8 estava associada a prejuízos econômicos, o que fez com que a instalação fosse feita com a linha MV energizada e por uma equipe especializada em trabalhos com alta tensão, seguindo todas as recomendações da NR-10 e da PETROBRAS. Foram conectados cinco conjuntos Isolador + Acoplador, sendo dois conjuntos no lado HE - Fase R e T, dois conjuntos no lado TDR - Fase R e T e apenas um conjunto no lado CPE - Fase R. Embora apenas um conjunto é usado por vez, o objetivo de ter dois nos pontos HE e TDR é o de permitir a análise do acoplamento do sinal entre as fases R e T. A função do conjunto Isolador + Acoplador é isolar a média tensão do acoplador e fazer o acoplamento do sinal OFDM ao canal de transmissão. Para isso, utiliza-se um filtro passa-faixa. A [Figura 16](#) representa o conjunto utilizado em campo.

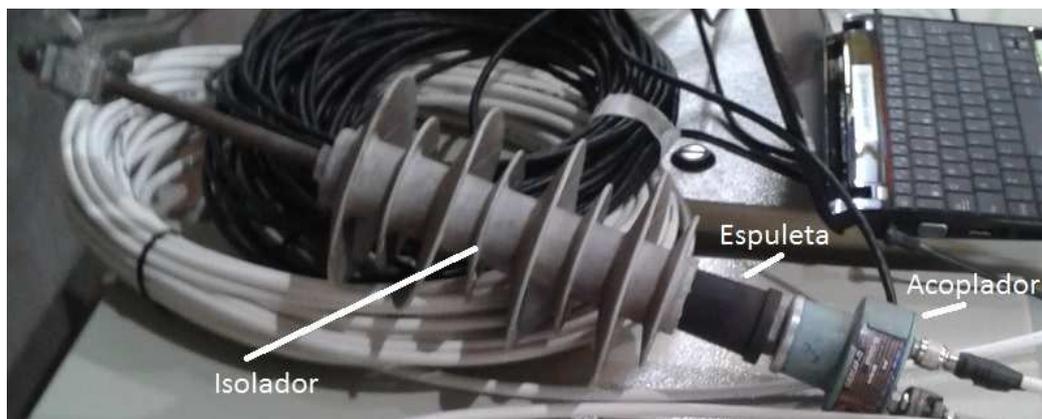


Figura 16 – Conjunto Isolador + Acoplador (15 KV)

O comportamento do isolador utilizado nos testes se assemelha ao de um dispositivo pára-raio, utilizado normalmente nas redes elétricas de alta tensão. Na extremidade onde é conectado o acoplador, existe um dispositivo de segurança, chamado de "espuleta" (parte preta do conjunto), conforme pode ser visto na [Figura 16](#). Esta "espuleta" é condutora e se rompe quando um aumento brusco de temperatura é percebido, interrom-

pendo a passagem de corrente instantaneamente. Dois casos podem acionar o mecanismo de segurança: durante a instalação, quando o material isolante não estiver mais exercendo a sua função (perda da resistência) ou quando uma alta corrente rompe o limite de isolamento do material e flui de uma extremidade à outra (ocorrência de raios na linha). Para ambos os casos, o profissional instalador deverá estar afastado o suficiente do isolador para que não seja atingido com os destroços da "espuleta", quando acionada. No ambiente de testes, utilizou-se primeiramente uma vareta isolada para aproximar o conjunto à linha energizada e em seguida, identificada sua integridade, houve sua fixação. Todo o conjunto foi interligado à malha de aterramento da rede elétrica através de cabos e conectores apropriados.

4.3 Análise dos Resultados dos Testes Preliminares

Para a análise destes testes avaliou-se tanto as velocidades nas interfaces PLC e Ethernet dos modems empregados, bem como as curvas de espectro de sinal nos trechos de interesse, as quais denunciam o comportamento da resposta em frequência da rede nestes referidos trechos.

4.3.1 Testes com o HE Conectado à Fase T, o CPE e o TDR na Fase R

O primeiro teste ocorreu mediante a utilização de três modems PLC, configurados como HE, TDR e CPE, conforme ilustra a [Figura 17](#). Nesta configuração o HE foi conectado na fase T da linha elétrica e os demais na fase R. Dois canais PLC foram estabelecidos neste cenário: HE ↔ TDR e HE ↔ CPE. Como, inesperadamente, o HE estabeleceu uma conexão direta com o CPE, o modem repetidor deixou de ter funcionalidade nesta aplicação. Em seguida, conectou-se dois emuladores de tráfego (TF-GEN no PC), um em cada ponta da rede, na interface Ethernet do modem na configuração, tráfego UDP bidirecional, sobre o canal PLC HE ↔ CPE, taxa de transmissão de 50 Mbps, com padrão constante e contínuo. A coleta das estatísticas das portas Ethernet dos modems foi realizada pela ferramenta PRTG - servidor SNMP, operando na máquina conectada ao modem HE. O tráfego SNMP entre o servidor e o modem CPE compartilhou o mesmo canal de comunicação (gerência *in band*) com os demais tráfegos e sem QoS configurado.

Os gráficos da [Figura 18](#) correspondem aos resultados capturados pela ferramenta SNMP sobre a taxa de transmissão total nas interfaces Ethernet e PLC dos equipamentos HE e CPE. O valor total corresponde à soma do tráfego de entrada (*downstream*) com o tráfego de saída (*upstream*) da interface. Observa-se na [Figura 18](#) que existe uma diferença entre os valores de taxa de transmissão da interface Ethernet e da interface PLC de aproximadamente 2 Mbps.

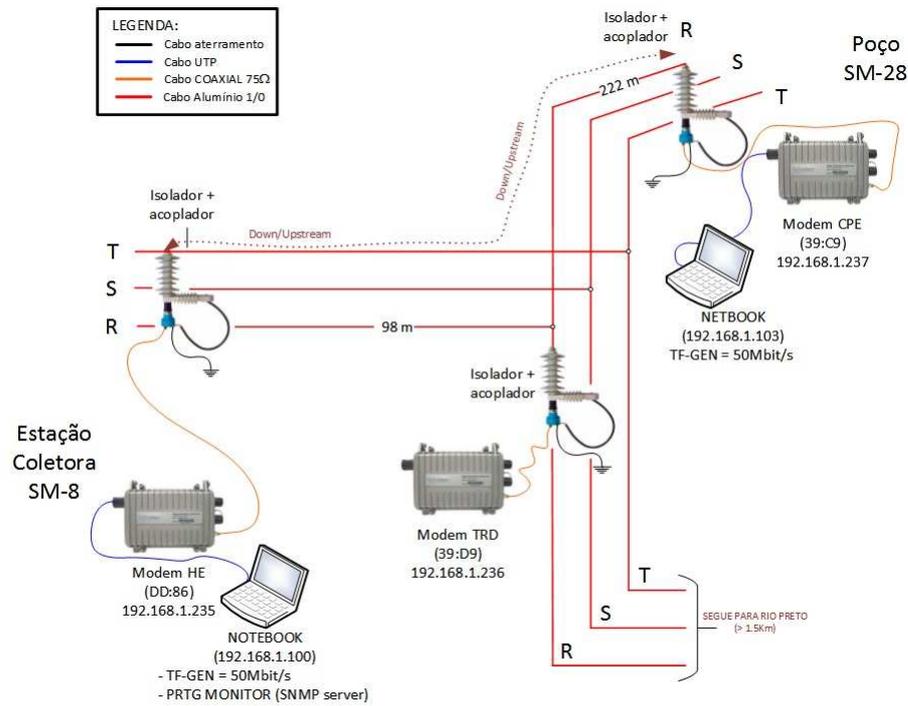


Figura 17 – Topologia de testes ponto-multiponto com acoplamento na Fase T.

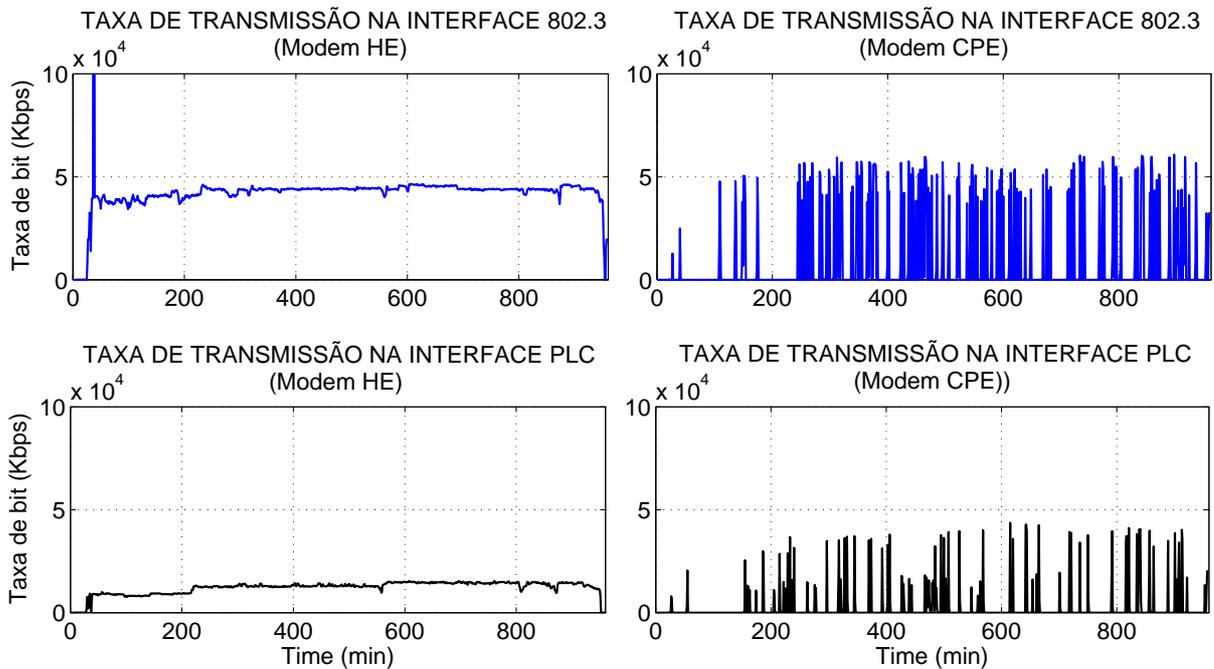


Figura 18 – Taxa de Bit por segundo medida nas interfaces 802.3 e física do modem BPL

Esta diferença é explicada pelo fato da célula BPL aprovisionar dois fluxos de tráfego independentes, mas ocupando a mesma banda no canal de comunicação. Um fluxo estaria destinado ao CPE e o outro ao TDR. As estatísticas das duas interfaces (ETH e PC) mostram que o HE recebe dados de apenas um modem, sendo que a presença do modem TDR nesta topologia é caracterizada como sendo uma função terminal e sem tráfego influente. Outro ponto importante a se destacar é o de que os gráficos do modem CPE apresentam medidas com valores nulos devido as falhas de *time out* ocorridas na comunicação entre a gerência SNMP e o modem gerenciado. Estas falhas foram provocadas pela não priorização do tráfego de gerência em detrimento aos demais tráfegos (*best effort*), haja vista que o tráfego de dados simulado estava ocupando banda próxima ao limiar disponível no canal. Isto pode ser visto na [Figura 19](#) que apresenta o tempo de resposta (*ping*) dos modems. Nota-se neste gráfico que o tempo de resposta do modem CPE é muito mais alto do que o HE, ratificando a hipótese de falha por *time out*.

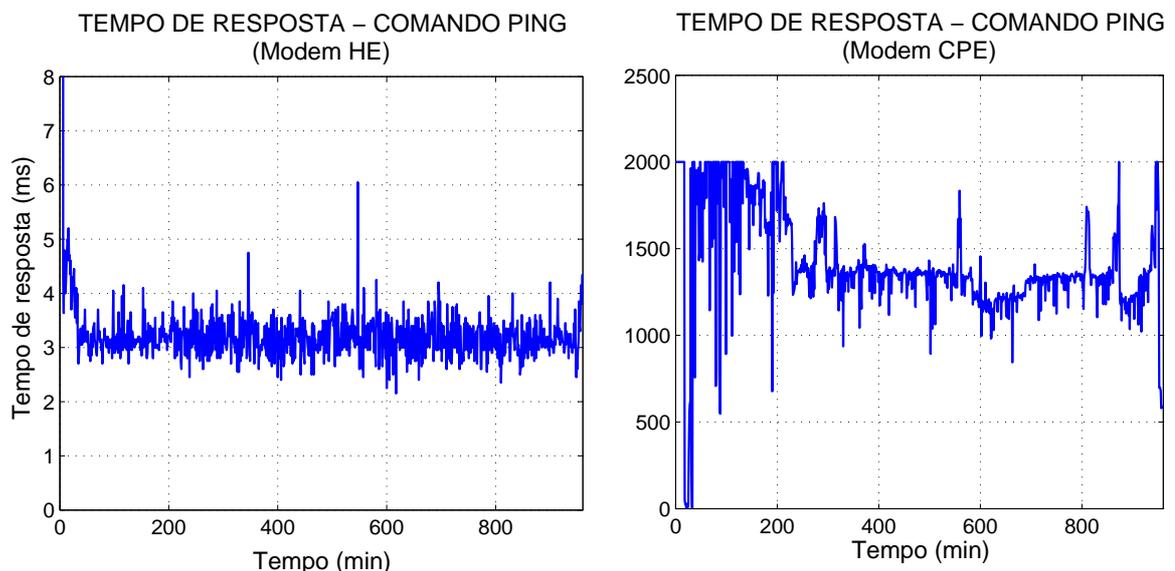


Figura 19 – Curva do tempo de resposta (comando PING) medido na rede PLC na configuração da [Figura 17](#).

A [Figura 20](#) mostra o gráfico de velocidade do canal PLC para este cenário. Neste gráfico são mostradas as curvas de *downstream* e *upstream*, que representam, respectivamente, os sentidos HE \rightarrow CPE e CPE \rightarrow HE. Pode-se afirmar a partir das medições ilustradas na [Figura 20](#) que o comportamento do canal de comunicação da rede elétrica de SM-8 varia ao longo do tempo, podendo ser observado pelas variações da taxa de transmissão. Constata-se ainda pela [Figura 20](#) que o canal de comunicação sofre mais impactos no período diurno (de 0 a 200 minutos), onde a taxa é reduzida em relação ao período noturno (acima dos 200 minutos). Uma hipótese para este fenômeno é a variação da temperatura ambiente.

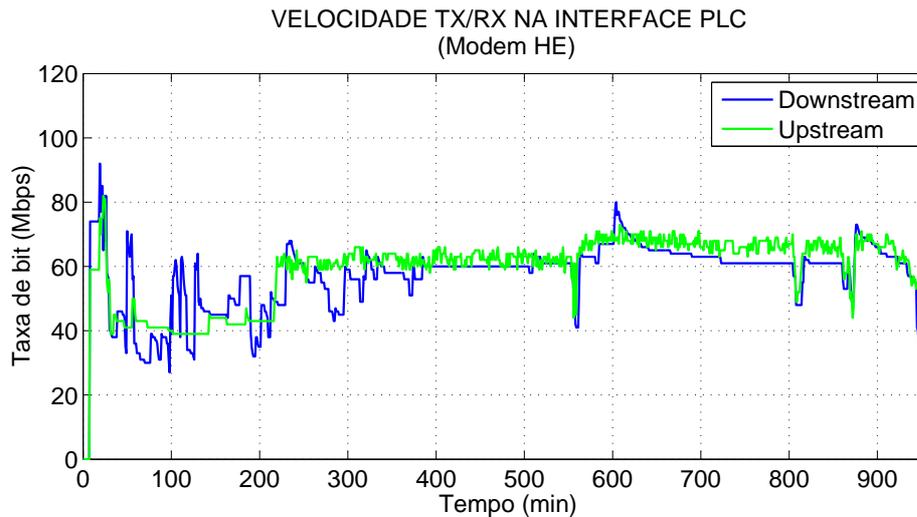


Figura 20 – Velocidade da linha PLC (Mbps) medida na camada física - Teste 1

No período diurno têm-se uma temperatura ambiente elevada (em torno de 35°C), fazendo com que os componentes elétricos (isolador, acoplador, cabo, conectores etc.) sofram alterações de suas propriedades de condutibilidade, piorando assim a impedância característica da linha. A [Tabela 5](#) mostra um resumo dos valores médios obtidos neste cenário de testes.

Tabela 5 – Valores médios de *throughput* obtidos da camada de enlace.

MEDIDA	Modem HE	Modem CPE
Taxa de Bit Total - interface 802.3	42,32 Mbps	9,32 Mbps
Taxa de Bit Total - interface PLC	12,06 Mbps	2,74 Mbps
Volume Total de tráfego - interface 802.3	324,88 Mbyte	72,20 Mbyte
Volume Total de tráfego - interface PLC	184,48 Mbyte	25,48 Mbyte
Tempo de resposta - ping	15,68 ms	1414(ms)
Velocidade PLC - RX	56,8 Mbps	Nulo
Velocidade PLC - TX	58,94 Mbps	Nulo

Após a constatação de que o sistema PLC estava operando com dois enlaces PLC e que os resultados obtidos até o momento foram satisfatórios quanto à disponibilidade de banda, decidiu-se retirar o TDR da topologia de rede e investigar o comportamento da rede. Além disso, o modem HE operou propositalmente em uma fase diferente da usada pelo CPE. Isto significa que os equipamentos comunicaram-se mediante acoplamento de sinal.

Com o objetivo de garantir a coleta dos dados, reduziu-se a taxa de transmissão do gerador de tráfego para 15 Mbps em ambas as pontas para que o *round-trip time* do pacote SNMP com destino e origem ao modem CPE fosse adequado a ponto de não provocar descartes por *time out*. Os resultados de taxa de transmissão para o tráfego das interfaces 802.3 e PLC são mostradas na [Figura 21](#).

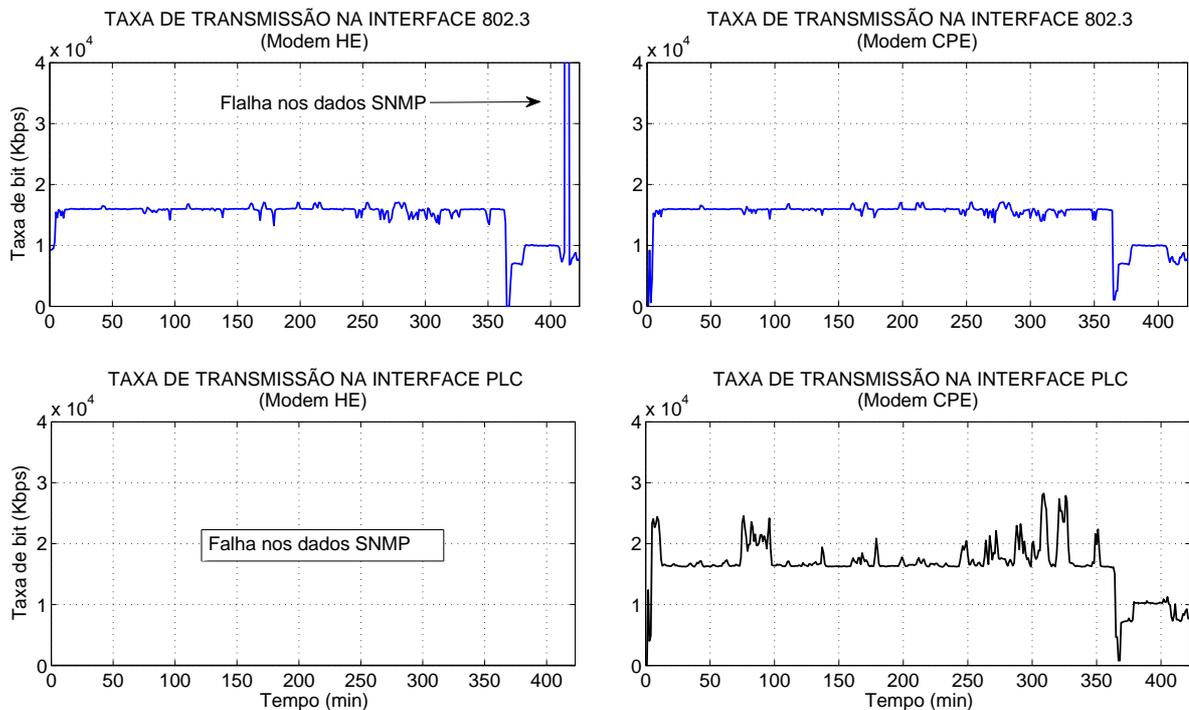


Figura 21 – Taxa de bit medida nas interfaces 802.3 e PLC.

Constata-se na [Figura 21](#) que houve uma falha na coleta de dados do modem HE para a interface PLC, assim como uma amostra dos dados de volume de dados nas interfaces Ethernet. Estas falhas podem ter sido provocadas por mau funcionamento do agente SNMP do modem. Nota-se ainda que houve uma queda dos valores de taxa de transmissão a partir do ponto 365 do gráfico, permanecendo assim até o fim da medida. Isto foi provocado por uma falha no simulador de tráfego do lado CPE (netbook), que parou de transmitir dados, provocando uma redução no tráfego *upstream*.

Se confrontados com os dados do gráfico da [Figura 22](#), que representa o tempo de reposta dos modems, pode-se notar que houve fenômeno semelhante no lado do modem HE. Um aumento repentino do *round-trip time* do pacote PING ocorreu no ponto 365. Isto indica que a falha ocorrida no simulador de tráfego provocou um *delay* no pacote SNMP-PING entre o modem HE e o servidor SNMP. Quanto à curva do tempo de resposta do modem CPE, nota-se que existem pontos acima do valor médio que acompanham a variação da taxa de transmissão mostrada na [Figura 21](#), ou seja, com o aumento da taxa

de transmissão gera-se um atraso no pacote SNMP. Isto mostra que a gerência *in band* precisa de artefatos que a priorizem quando está disputando banda com outros serviços.

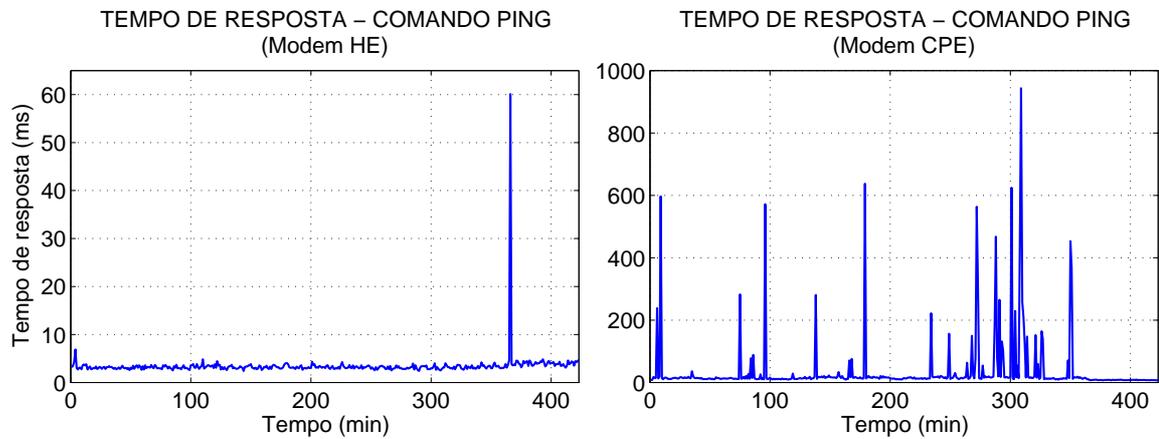


Figura 22 – Curva do tempo de resposta medido (comando PING).

Analisando os resultados medidos na camada física, percebe-se que o canal de comunicação se manteve bastante oscilante até o fim da medição. Como dito anteriormente, a técnica de mapeamento adaptativo de bit do modem BPL é responsável por otimizar ao máximo a carga de bit nas subportadoras OFDM para garantir maior banda no enlace PLC. Assim, verifica-se na [Figura 23](#) o bom desempenho da velocidade das interfaces PLC, comprovando o funcionamento da técnica mencionada. Além disso, percebe-se que a partir do ponto 370 da curva há uma tendência de aumento da taxa reforçando a hipótese de que o canal de comunicação sofre menos interferência à noite. A [Tabela 6](#) mostra um resumo dos valores médios obtidos na camada de enlace neste cenário de testes.

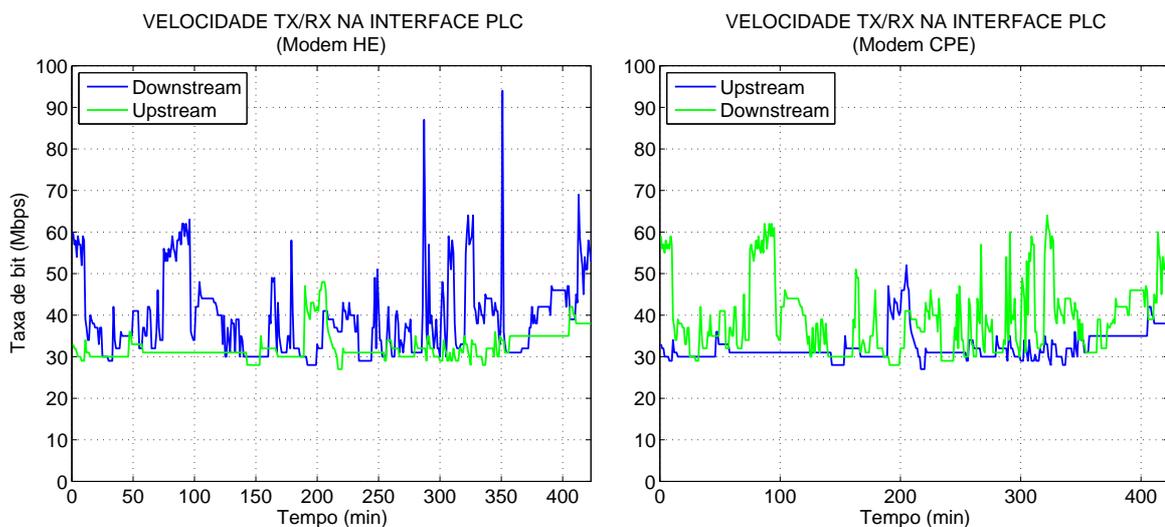


Figura 23 – Taxa de transmissão em Mbps medida na camada física (PLC).

Tabela 6 – Valores médios de *throughput* obtidos da camada de enlace.

MEDIDA	Modem HE	Modem CPE
Taxa de Bit Total - interface 802.3	16,39 Mbps	14,69 Mbps
Taxa de Bit Total - interface PLC	0 Mbps	16,31 Mbps
Volume Total de tráfego - interface 802.3	125,81 Mbyte	112,94 Mbyte
Volume Total de tráfego - interface PLC	0 Mbyte	125,41 Mbyte
Tempo de resposta - ping	3,43 ms	36 ms
Velocidade PLC - RX	39,30 Mbps	32,32 Mbps
Velocidade PLC - TX	32,30 Mbps	39,15 Mbps

4.3.2 Testes com o Modem HE Conectado à Fase R e com Câmera de Vídeo Conectada ao CPE

O cenário preparado para estes testes é mostrado na [Figura 24](#). Diferentemente das duas últimas configurações, neste o modem HE está conectado à mesma fase do CPE. Além disso, uma câmera de vídeo e um *switch* foram inseridos no lado do CPE. O *switch* foi instalado para disponibilizar mais portas Ethernet no lado do CPE, uma vez que o modem possui apenas uma porta. Já a instalação da câmera de vídeo teve por objetivo simular um perfil de tráfego *real time* no fluxo *upstream* para verificar o seu comportamento na rede PLC.

Devido a uma falha ocorrida no *nobreak* do lado HE, provocando a interrupção de energia elétrica, não foi possível completar as medidas de desempenho no período desejado. Desta forma, os gráficos apresentados possuem valores nulos entre os pontos 110 a 872. Os gráficos de taxa mostrados na [Figura 25](#) possuem nulos nas medidas no CPE devido a falhas de *time out* ocorridas na gerência SNMP. Vale destacar que os primeiros 110 minutos de medição (período noturno) apresentaram taxa de transmissão de 60 Mbps (maior que no cenário anterior) pelo fato do modem HE operar na mesma fase do modem CPE.

A [Figura 26](#) mostra o tempo de resposta dos modems. Mais uma vez nota-se que o tráfego de dados do gerenciamento do modem CPE ficou prejudicado com o compartilhamento de banda, o que provocou descarte dos pacotes SNMP devido ao aumento do tempo de resposta.

Em conformidade com os resultados de tempo de resposta estão os de velocidade da interface PLC é mostrados na [Figura 27](#). A [Tabela 7](#) mostra um resumo dos valores médios obtidos na camada de enlace neste cenário de testes.

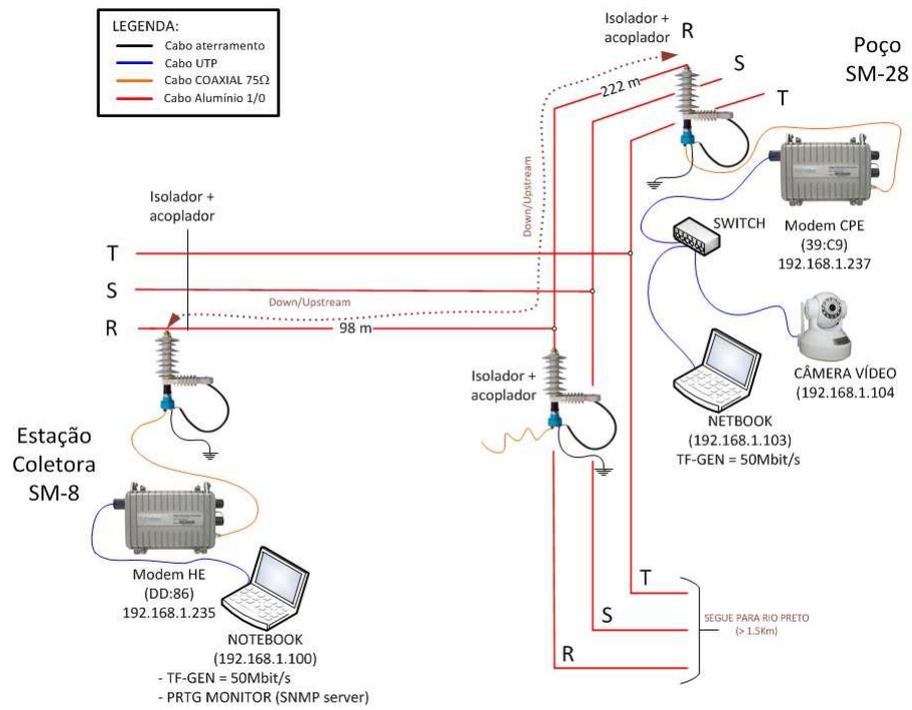


Figura 24 – Topologia ponto-a-ponto na Fase R (sem TDR) - Teste 3

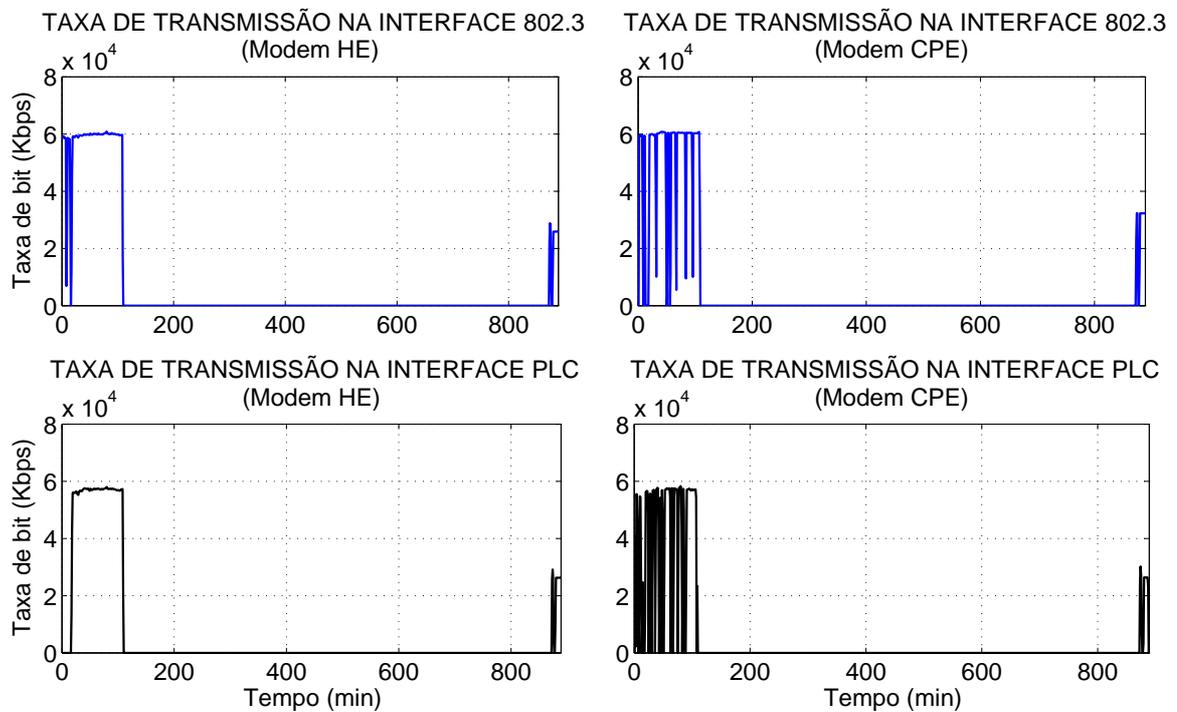


Figura 25 – Taxa de bit medida nas interfaces 802.3 e PLC - Teste 3

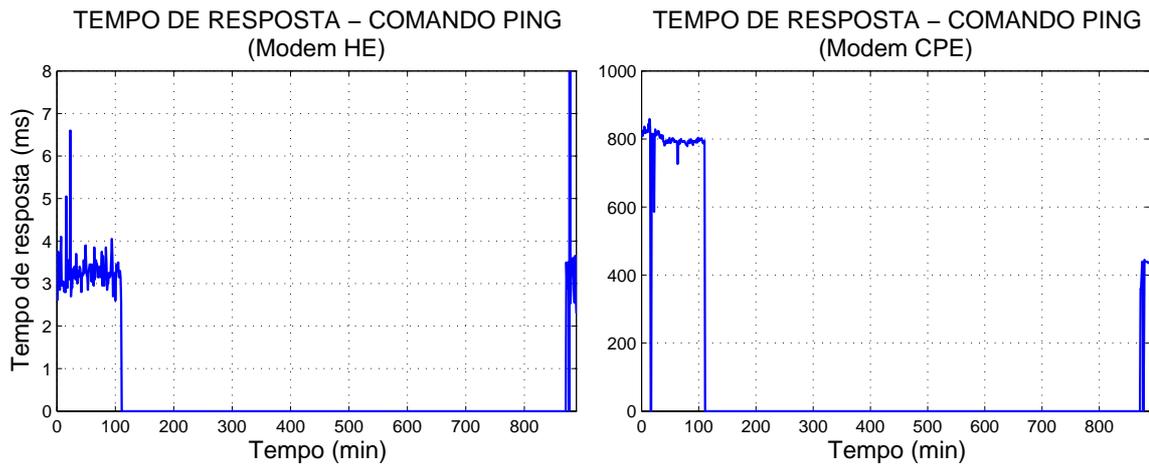


Figura 26 – Curva do tempo de resposta medido (comando PING) - Teste 3

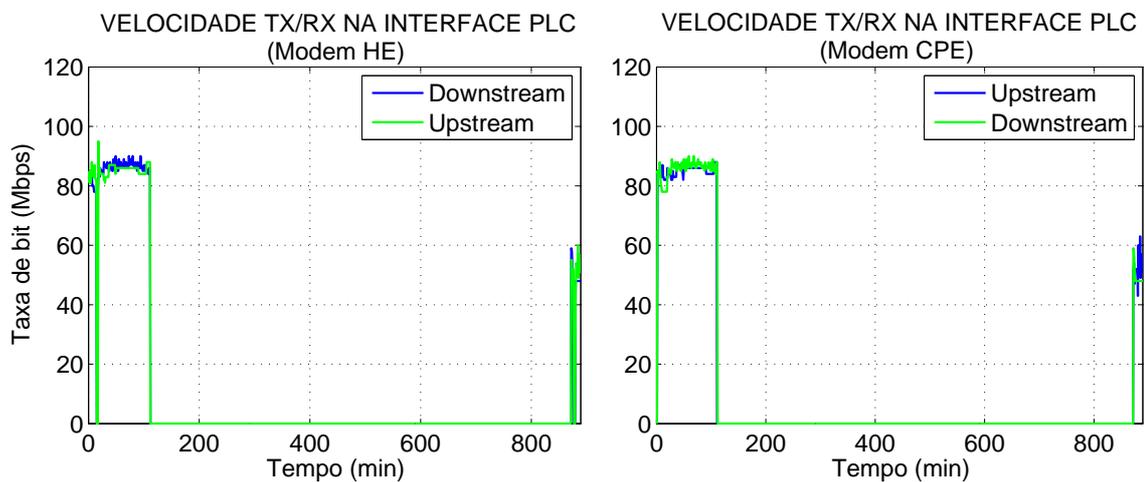


Figura 27 – Velocidade da linha PLC (Mbps) medida na camada física - Teste 3

Tabela 7 – Valores médios de *throughput* obtidos da camada de enlace - Teste 3

MEDIDA	Modem HE	Modem CPE
Taxa de Bit Total - interface 802.3	7,40 Mbps	6,45 Mbps
Taxa de Bit Total - interface PLC	6,26 Mbps	5,10 Mbps
Volume Total de tráfego - interface 802.3	57,23 Mbyte	49,86 Mbyte
Volume Total de tráfego - interface PLC	48,03 Mbyte	42,14 Mbyte
Tempo de resposta - ping	0,56 ms	104,82 ms
Velocidade PLC - RX	11,29 Mbps	11,49 Mbps
Velocidade PLC - TX	11,24 Mbps	11,59 Mbps

Com o objetivo de avaliar o comportamento do tráfego no sentido contrário a este cenário, a câmera e o *switch* foram remanejados para o lado HE. As taxas de bits registradas nas medidas são mostradas na [Figura 28](#).

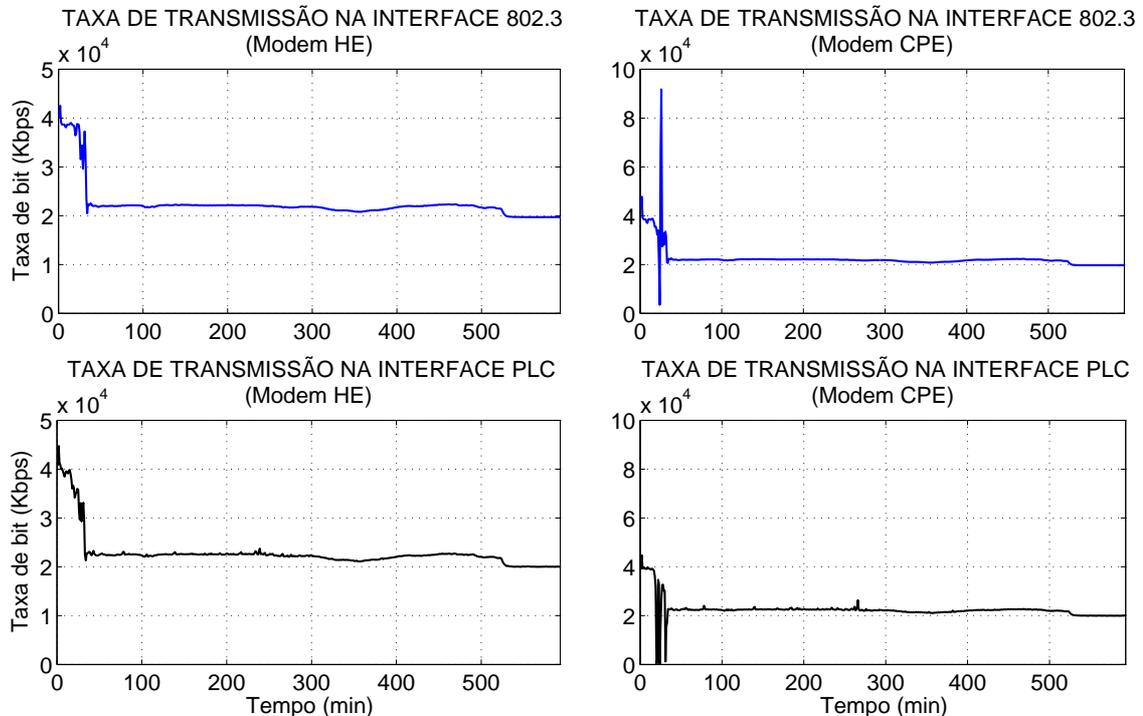


Figura 28 – Taxa de bit medida nas interfaces 802.3 e PLC quando a câmera foi conectada ao HE.

A [Figura 28](#) ilustra um degrau ocorrido nos 20 primeiros minutos de medição devido ao período de ajuste da taxa de transmissão do simulador de tráfego de 40 Mbps para 20 Mbps. Este procedimento foi adotado para que as medidas do lado CPE não fossem prejudicadas por falhas de *time out* da gerência SNMP, como foi percebido no início da medição (degrau). Convém ressaltar que apesar desta alteração em ambos os lados, após este procedimento não ocorreu mais interferência nos resultados coletados pela gerência SNMP.

Os valores alcançados no tempo de resposta dos modems registrados na [Figura 29](#) não são considerados normais para os padrões de gerência atuais, uma vez que busca-se tempos de resposta abaixo da casa dos segundos. Observa-se pela [Figura 29](#) que no ponto 255 da medida no HE houve um pequeno atraso no pacote SNMP entre o modem HE e o servidor, mas que não representa preocupação do ponto de vista da gerência de rede. Os gráficos de velocidade da interface PLC mostrado na [Figura 30](#) ilustram velocidades média em torno de 58.5 Mbps e 62.02 Mbps nos equipamentos HE e CPE respectivamente.

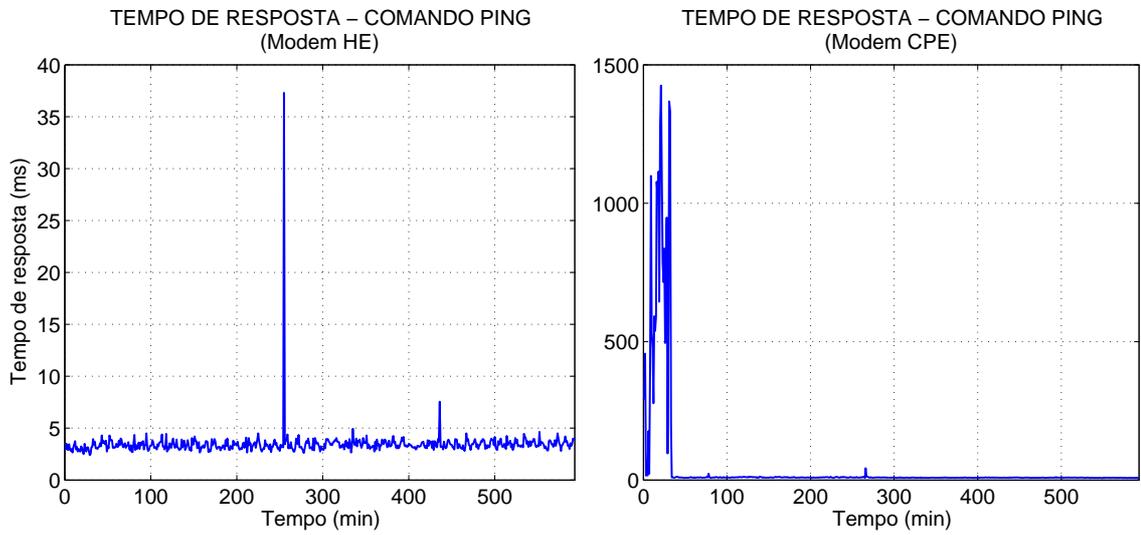


Figura 29 – Curva do tempo de resposta medido quando a câmera foi conectada ao HE.

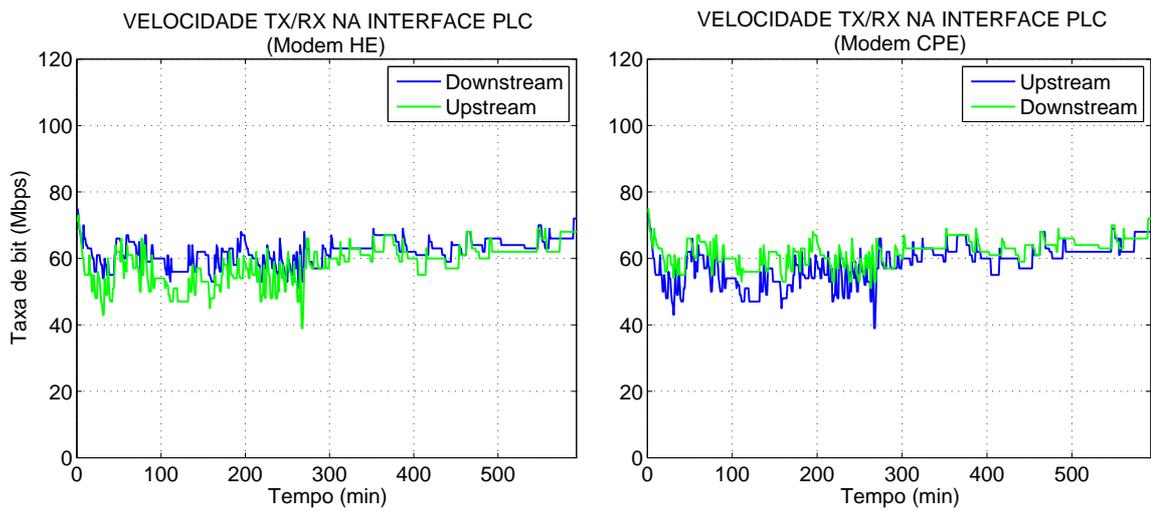


Figura 30 – Velocidade da linha PLC em Mbps medida na camada física quando a câmera foi conectada ao HE.

4.3.3 Testes com o Modem HE Conectado à Fase R e dois Modems CPE na Topologia ponto-multiponto

A topologia ponto-multiponto prevista neste cenário permite a investigação tanto do desempenho da rede, quanto do método de acesso ao meio implementado. A Figura 31 mostra a topologia de rede montado para a realização dos experimentos.

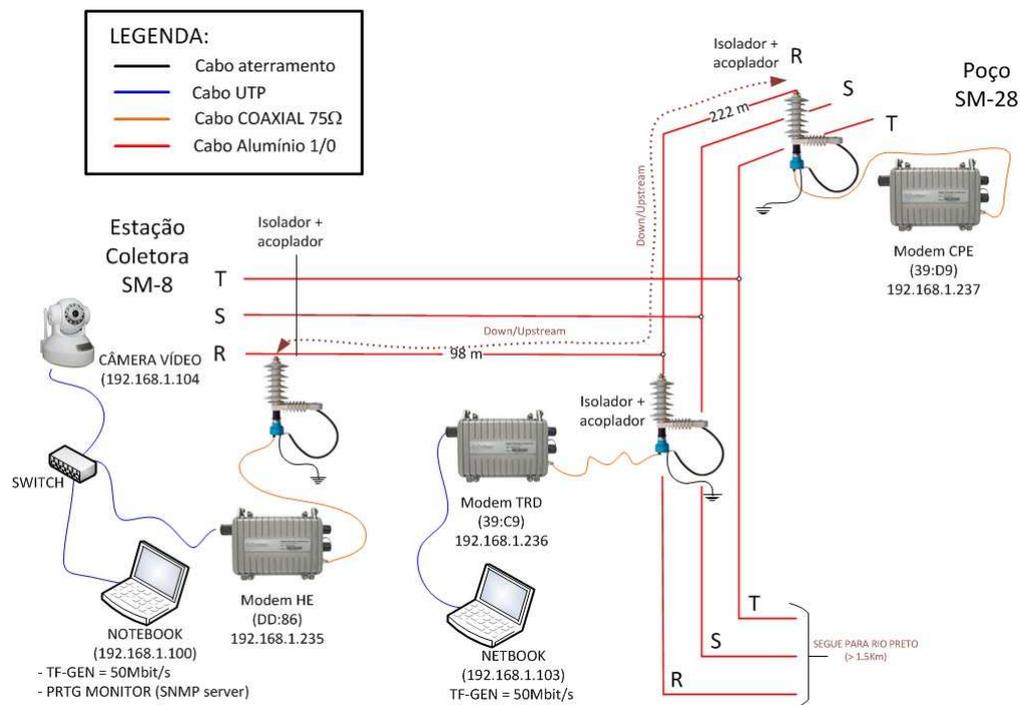


Figura 31 – Topologia ponto-multiponto na Fase R e sem repetidora TDR.

Neste cenário de testes, o modem HE controla o acesso ao canal de comunicação por meio de um *token* transmitido para o modem destino, contendo a identificação e o intervalo de tempo de uso do canal. Ao identificar este *token*, o destino com suas credenciais, responde ao HE transmitindo dados na janela de tempo liberada para tal. Esta topologia de rede pode provocar um aumento do tempo de resposta conforme aumenta-se a quantidade de modems controlados numa rede. Os equipamentos utilizados nos testes em SM8 possuem capacidade máxima de gerenciamento de até 64 modems remotos podendo ser CPEs e/ou TDRs.

Os gráficos de volume e taxa são mostrados na Figura 32 e Figura 33. Nota-se nestes gráficos que há uma variação no início da medição, mas que não representa qualquer anormalidade ou fenômeno provocado pelo canal. Trata-se apenas de ajustes feitos no simulador de tráfego pelo operador já no início da medição. Observa-se ainda que não há volume de tráfego expressivo conectado à interface 802.3 do modem CPE-2 (a 320 m), porém o tráfego residual representa os dados da gerência SNMP trocados com o modem HE.

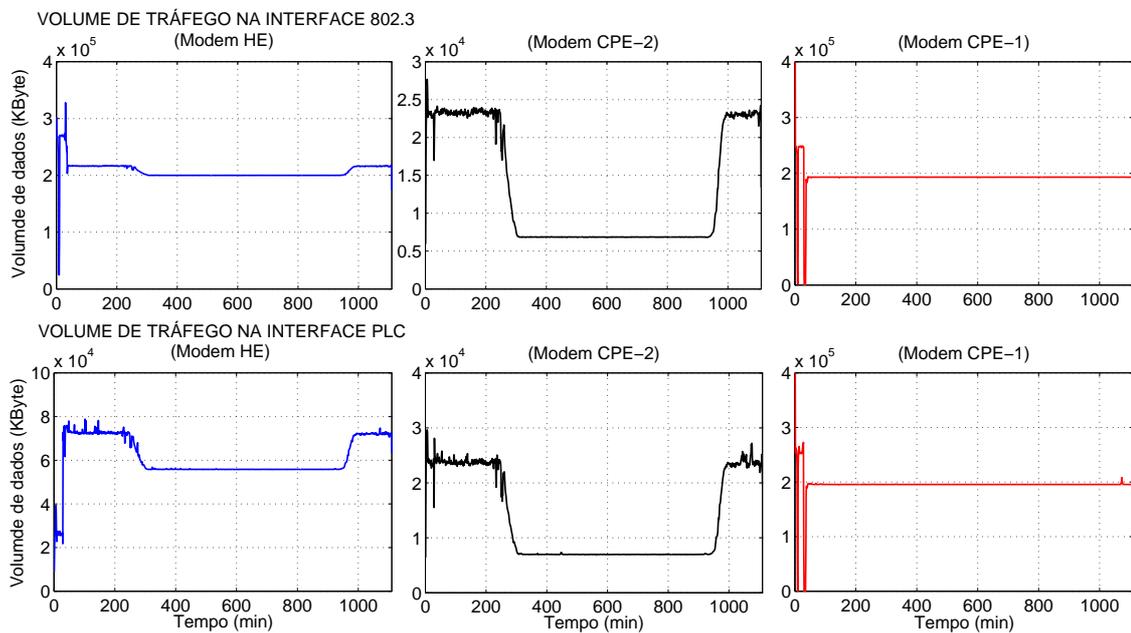


Figura 32 – Volume de tráfego nas interfaces 802.3 e PLC para o cenário da Figura 31.

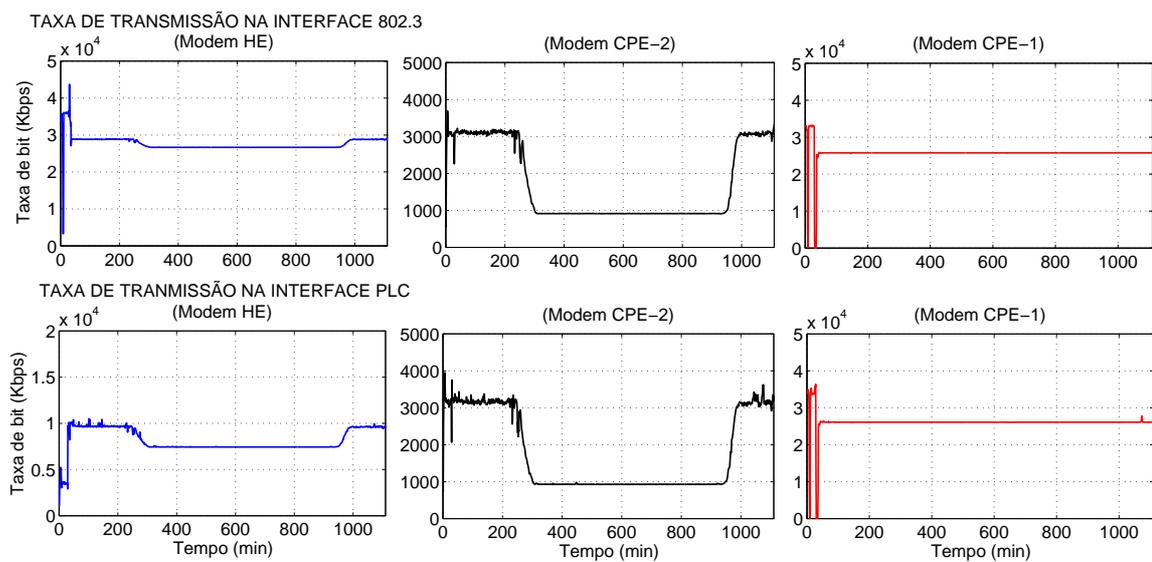


Figura 33 – Taxa de Bit das interfaces 802.3 e PLC para o cenário da Figura 31.

Com relação ao tempo de resposta mostrado na [Figura 34](#), nota-se que os valores medidos são considerados normais, além de ser idênticos para ambos os modems. Este cenário não apresentou problemas de *time out* na gerência SNMP, uma vez que o tráfego gerado (25 Mbps) está bem abaixo da capacidade do canal PLC (em torno de 100 Mbps).

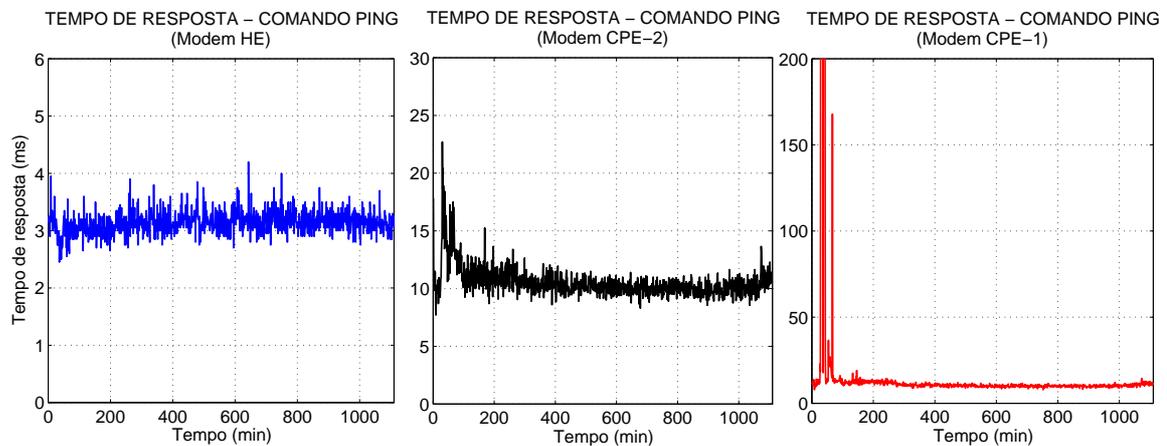


Figura 34 – Gráfico do tempo de resposta (comando PING) para o cenário da [Figura 31](#).

O gráfico de velocidade da interface PLC é mostrado na [Figura 35](#). Mais uma vez é possível notar nos gráficos de velocidade que o canal de comunicação tem menos interferência no período noturno. Entre os pontos 100 e 400 do gráfico, nota-se uma curva ascendente e a partir do ponto 400, esta curva se estabiliza, permanecendo neste estado até o final da medição. A [Tabela 8](#) mostra um resumo dos valores médios obtidos na camada de enlace neste cenário de testes.

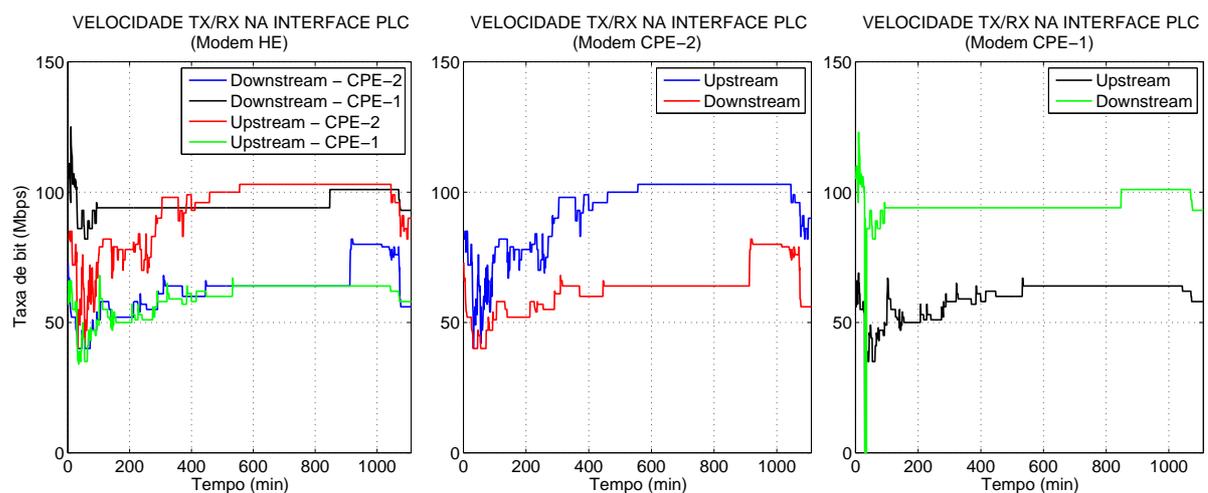


Figura 35 – Velocidade da linha PLC (Mbps) na camada física para o cenário da [Figura 31](#).

Tabela 8 – Valores médios de *throughput* obtidos da camada de enlace para o cenário da Figura 31.

MEDIDA	Modem HE	Modem CPE-1	Modem CPE-2
Taxa de Bit Total - int. 802.3	27,61 Mbps	1,72 Mbps	25,71 Mbps
Taxa de Bit Total - int. PLC	10,51 Mbps	1,76 Mbps	26,05 Mbps
Vol. Total de tráfego - int. 802.3	207,08 Mbyte	12,88 Mbyte	192,90 Mbyte
Vol. Total de tráfego - int. PLC	60,83 Mbyte	13,19 Mbyte	195,41 Mbyte
Tempo de resposta - ping	3,14 ms	10,54 ms	23,07 ms
Velocidade PLC - RX	95,33/62,49 Mbps	93,26 Mbps	59,19 Mbps
Velocidade PLC - TX	93,26/59,19 Mbps	62,49 Mbps	95,08 Mbps

4.3.4 Medidas de Espectro dos Sinais OFDM do Sistemas PLC Investigados

Além das medidas de desempenho e de tempo de resposta, foram realizadas algumas medições no domínio da frequência na camada física através da captura de valores de relação sinal-ruído nas interfaces PLC dos equipamentos utilizados. Estas medidas de espectro do sinal OFDM, que também apresentam o perfil da resposta em frequência do canal de comunicação em determinado trecho da rede, foram capturadas utilizando o instrumento Anritsu - MS2038C na função Analisador de Espectro. A Figura 36 ilustra os procedimentos adotados para cada medição de espectro realizada nos testes.

Na configuração denominada de "MEDIDA A" utiliza-se um acoplador direcional (*splitter*) na saída do modem com conexão ao instrumento de medida e o conjunto Isolador-Acoplador. Este acoplador possui largura de banda de 1 – 1000 MHz e atenuação de 3.5 dB na saída de cada porta. O resultado da medida é mostrado na Figura 37. O perfil de de atenuação plano registrado é esperado uma vez que a medida é capturada logo na saída do HE, com o sinal em sua inetensidade máxima.

Na Figura 38, a curva "Medida B" representa o sinal OFDM medido na recepção do modem HE, na fase R, conforme esquema de ligação mostrado na Figura 36 - "MEDIDA B". Observa-se nesta curva a presença de *fade* multipercurso em 12 MHz e 24 MHz, apesar do nível de potência de sinal ser considerado adequado.

A curva "Medida C" presente na Figura 38 representa o sinal OFDM acoplado na FASE T. Nota-se que o sinal medido é muito semelhante ao sinal da FASE R, mostrando que há acoplamento de sinal entre as fases da linha MV. A título de ilustração apresenta-se aqui também as curvas D e E que representam, respectivamente, os níveis de ruído medidos nas fases R e T conforme descritos nas medidas "D e E" da Figura 36.

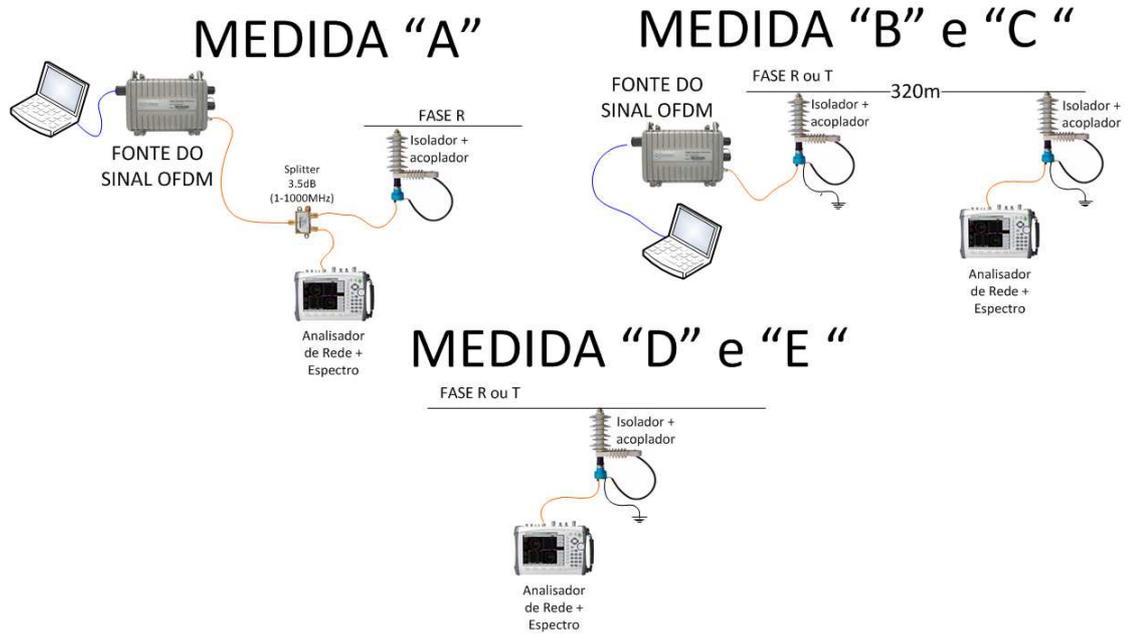


Figura 36 – Aparatos experimentais utilizados de medidas do espectro nas Fases R e T.

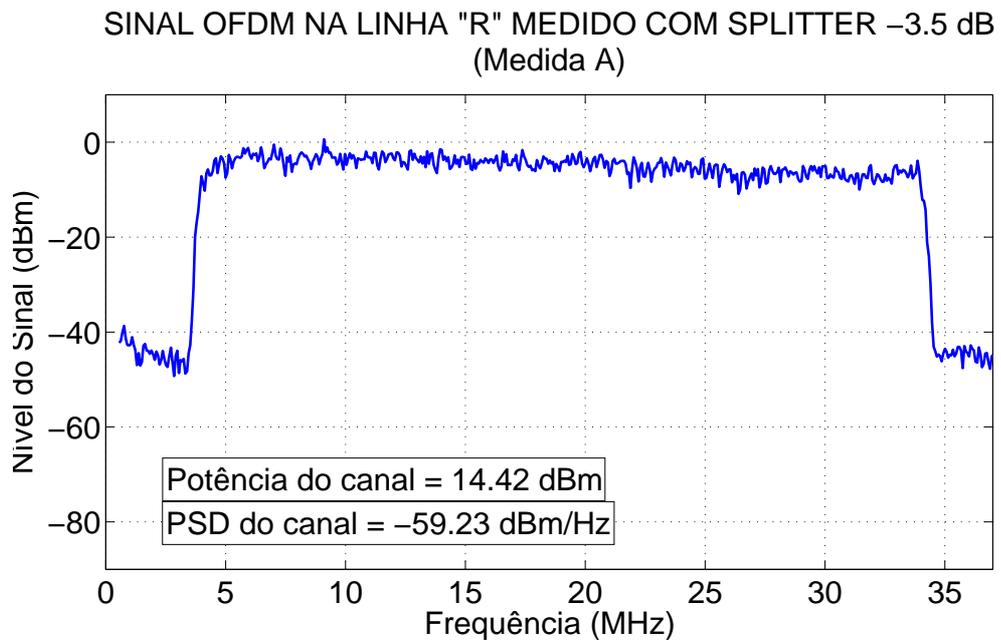


Figura 37 – Espectros OFDM saída modem HE - Medida A

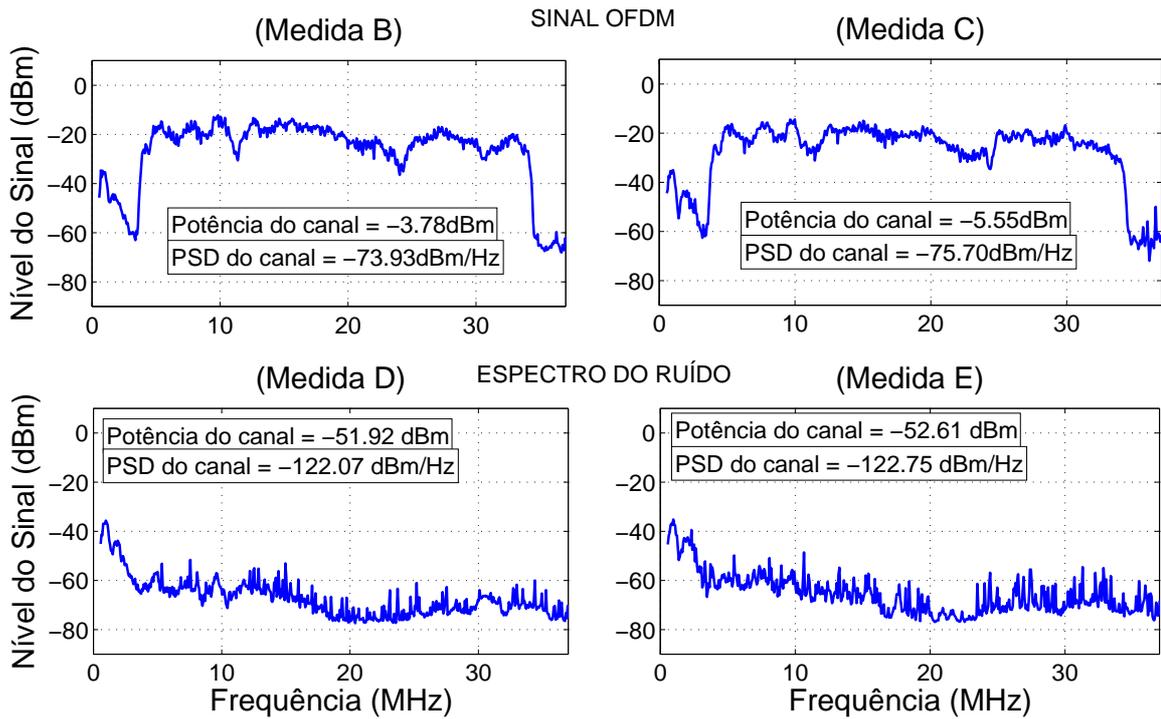


Figura 38 – Espectros do Sinal OFDM e Ruído medidos nas Fase R e T

De forma semelhante, algumas medidas foram repetidas no lado do poço (modem CPE). A Figura 39 mostra os resultados obtidos na medição do espectro do lado CPE. Conforme esperado, o mesmo comportamento foi observado como mostram a curva A do sinal OFDM na saída do CPE e a curva B do sinal OFDM na recepção deste mesmo modem.

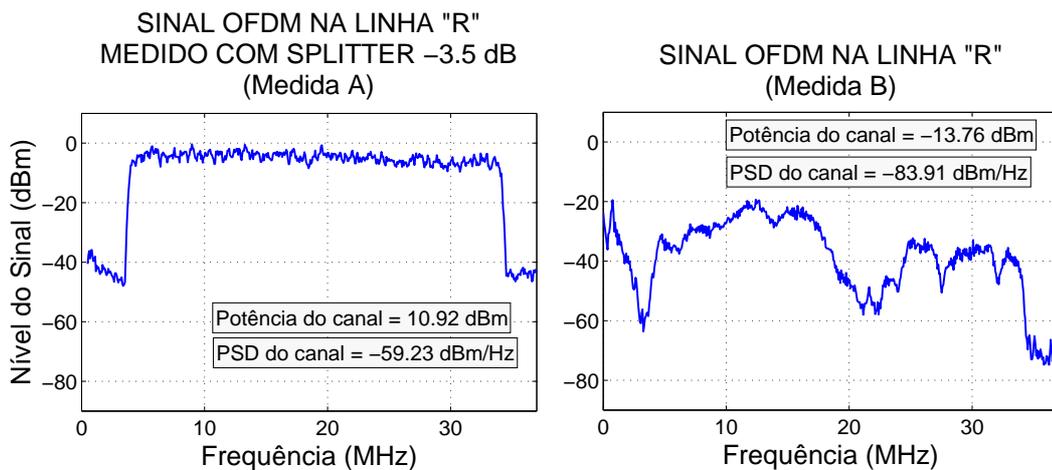


Figura 39 – Espectros OFDM lado modem CPE

5 A METODOLOGIA PROPOSTA PARA PROJETO DE SISTEMAS PLC EM REDES ELÉTRICAS DE MÉDIA TENSÃO

A predição de sinais para certas redes de comunicação sem fio é uma atividade comum e fundamental. A cobertura do sinal, seja ela em ambientes internos ou externos, depende da geometria do local. Por isso, simular a propagação do sinal nestes ambientes, previamente à implantação dos equipamentos, ajuda o projetista a verificar se os critérios de rede adotados serão atendidos pelo projeto. Atualmente, existem diferentes ferramentas disponíveis no mercado que executam complexos cálculos matemáticos para obtenção destas previsões.

De forma semelhante, pode-se afirmar que a implantação de uma rede de comunicação em banda larga via rede elétrica também deve requerer uma avaliação prognóstica para determinar se os critérios de rede tais como taxa de transmissão, alcance do sinal, latência, entre outros, serão atendidos pelo projeto. Todavia, a caracterização deste canal é de extrema importância apesar da sua obtenção tornar-se trabalhosa e complexa, uma vez que a rede elétrica não foi projetada para a transmissão de dados. Variação da topologia ao longo de sua extensão, variação da impedância ao longo do tempo, interferências provenientes de ruídos impulsivos, variação de cargas, geometria dos cabos, entre outros, são variáveis de difícil equacionamento matemático.

Assim, apresenta-se neste trabalho uma metodologia simples, prática e de fácil implementação, doravante denominada de *SmartMethPLC*, para a elaboração de projetos de redes de comunicação de dados utilizando a tecnologia PLC sobre linhas elétricas de média tensão, baseando-se nos procedimentos sequenciais ilustrados na [Figura 40](#).

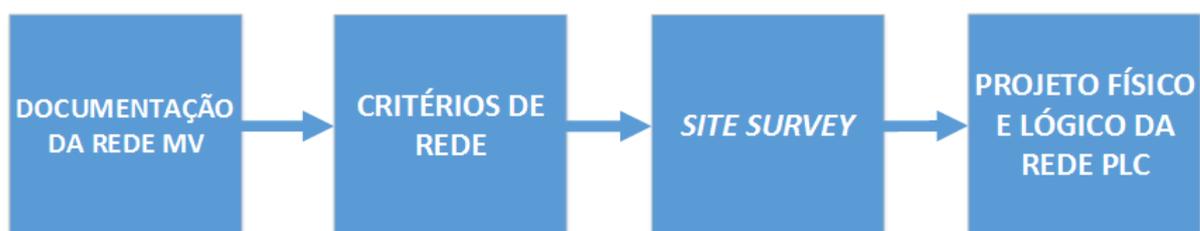


Figura 40 – Proposta de procedimentos para elaboração de projetos de comunicação de dados via rede elétrica conforme tecnologia PLC.

A metodologia *SmartMethPLC* baseia-se na execução sequencial de procedimentos que tornarão a implantação de projetos de sistemas PLC mais simples e prática por

aproveitar-se das experiências e dos resultados obtidos a partir das implementações descritas nos Capítulos 3 e 4. Esta tem como principais objetivos a redução das incertezas de um projeto PLC, o aumento das chances deste atingir os requisitos de prazo, custo e escopo, bem como a provisão da Telecomunicação em redes inteligentes do tipo *Smart Grid*.

5.1 A Documentação Técnica Necessária

A documentação técnica da linha elétrica em que se pretende implementar a comunicação deve estar disponível antes de iniciar-se o desenvolvimento do projeto. Esta deverá fornecer as seguintes informações:

- I. topologia física de toda a extensão da rede elétrica;
- II. distâncias entre os postes;
- III. identificação das estruturas instaladas em cada posteamento;
- IV. identificação dos dispositivos elétricos "pendurados" na rede;
- V. e detalhe do aterramento da rede elétrica.

A topologia física da rede permitirá identificar a quantidade e a localização das derivações existentes na linha, bem como a localização dos pontos de interesse a serem cobertos pela célula PLC. As derivações impõem os efeitos de multipercurso na linha de transmissão, podendo interferir de maneira destrutiva no sinal PLC e conseqüentemente decrementar a capacidade do canal. Identificando estas derivações, é possível determinar se haverá necessidade de reforço do sinal PLC em determinado trecho, podendo vir a ser instalado um equipamento repetidor.

A atenuação de sinal ao longo da linha está diretamente relacionada com o comprimento do trecho principal (sem derivações) e com a faixa de frequências escolhida para operação. Conhecer previamente as distâncias entre os postes, contribui para uma pré-análise da determinação da quantidade e localização de equipamentos repetidores ao longo do posteamento da rede elétrica MV. A análise definitiva deve ser subsidiada mediante a realização de testes e/ou medidas de intensidade de sinal em campo (*site survey*).

A acomodação dos equipamentos PLC e seus acessórios no posteamento pode seguir variados padrões de instalação (CORINEX, 2014), (CASTOR; SILVA; SEGATTO, 2015). O esquema proposto neste trabalho para organização e fixação dos equipamentos e seus dispositivos de acoplamento é seguro, eficiente e de fácil manutenção, conforme pode ser visto nas Figura 41, Figura 42 e Figura 43. Porém, o modelo proposto traz a necessidade de se conhecer previamente as estruturas existentes na rede elétrica para que

as interferências de instalação sejam identificadas e as ações corretivas sejam tomadas. Por exemplo, ao se detectar excesso de estruturas que impossibilitem a instalação do modem num determinado poste de interesse, deve-se imediatamente realocá-lo para um outro ponto que esteja livre. Esta premissa vai evitar que ocorra a identificação tardia das interferências, levando a instalação do modem BPL para uma posição física não ideal às condições de propagação do sinal PLC. Complementando a avaliação dos dispositivos, deve-se verificar a inexistência de banco de capacitores ao longo da linha para evitar que o sinal PLC seja drenado para terra.

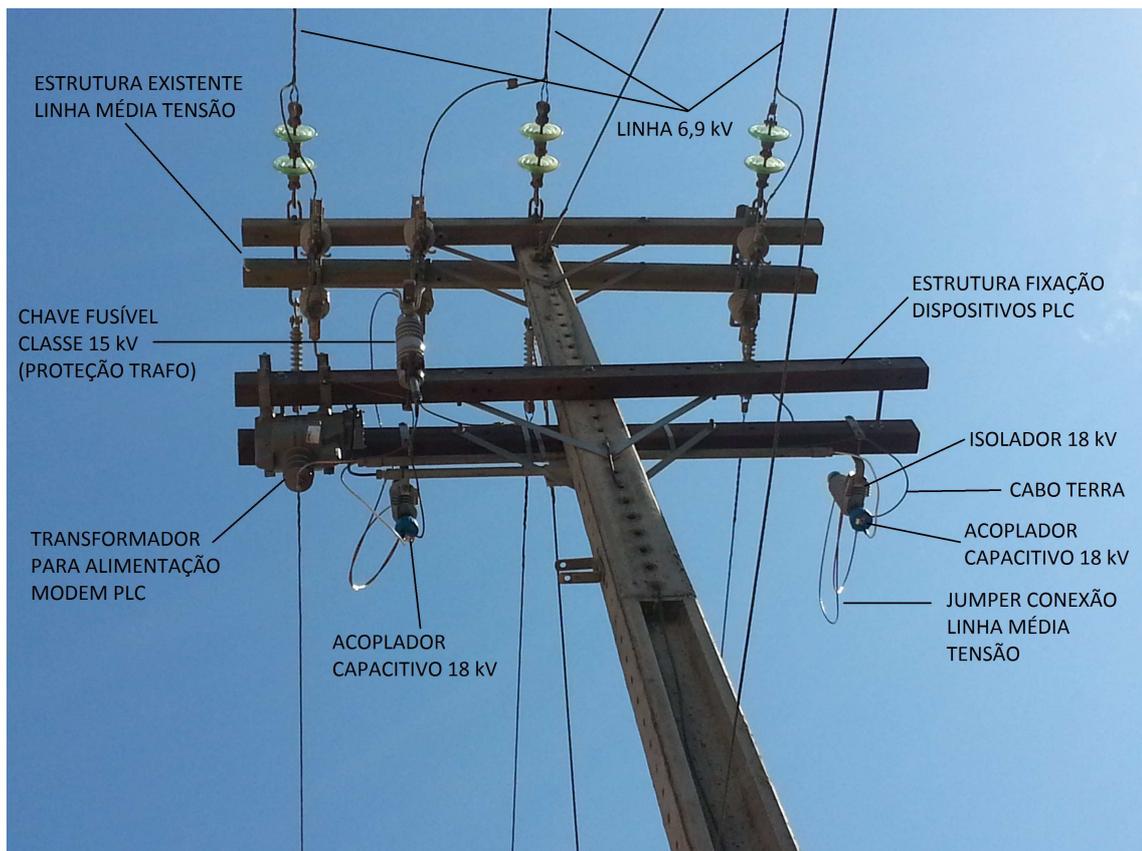


Figura 41 – Foto ilustrativa da estrutura de suporte ao Trafo de alimentação do modem, Isolador, Acoplador e chave de proteção.

A Figura 44 ilustra uma rede MV contendo derivações, estruturas, detalhes de aterramento e posteamento ao longo da linha.

Outro ponto a ser verificado na documentação é o detalhamento da estrutura de aterramento da linha. O acoplamento do sinal PLC na linha e a proteção contra alta tensão utilizam o sistema de aterramento da rede elétrica como referência para funcionamento adequado. Verificar a existência destas estruturas antecipadamente à instalação dos equipamentos evita atrasos na implantação do projeto.



Figura 42 – Caixa hermética, fixada no poste e utilizada para acomodação dos cabos, acopladores direcionais e do sistema de proteção da alimentação (DPS e Disjuntor).



Figura 43 – Visão frontal da caixa hermética e suporte de fixação do modem BPL no posteamento.

5.2 Requisitos e Premissas da Rede de Comunicação

Os critérios e premissas de uma rede de comunicação de dados são definidos pelo(s) tipo(s) de serviço(s) que esta rede suportará (TANENBAUM, 2011). Por exemplo, serviços de videomonitoramento em tempo real exigem baixa latência de rede, assim como o serviço de acesso à internet exigem altas taxas de transmissão. Já os serviços do tipo cliente-servidor podem funcionar com baixa taxa de transmissão e alta latência, mas podem

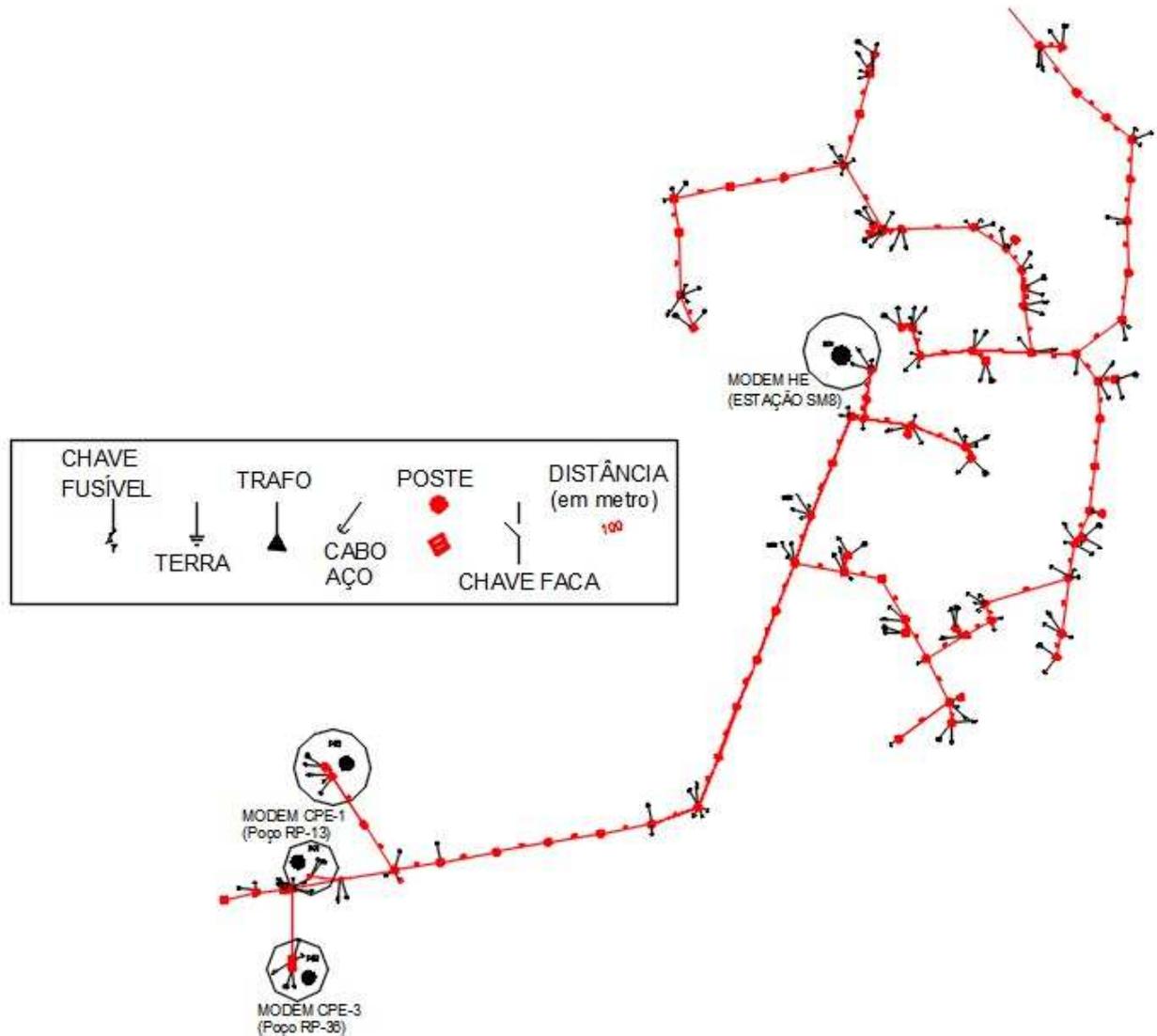


Figura 44 – Diagrama ilustrativo contendo informações técnicas necessárias para o projeto de comunicação PLC nas redes elétricas de média tensão.

exigir alta confiabilidade e disponibilidade da rede. Neste sentido, recomenda-se que o projeto leve em consideração o requisitos e/ou premissas abaixo itemizados.

- I. **Taxa de transmissão:** Deve-se definir a taxa mínima de transmissão, em de bits por segundo, necessária para a operação do serviço a ser transportado pela rede BPL.
- II. **Latência da Rede:** Deve-se verificar se os serviços sobre a rede PLC são sensíveis à latência. Uma rede PLC com grande número de nós interligados pode inserir atrasos na transmissão dos pacotes acima do limite permitido. Neste caso, conhecendo-se este limite pode-se inserir algumas células PLC ao longo da rede para diminuir estes atrasos. Através de equipamentos repetidores FDR (*Frequency Division Repeater* é possível mudar a faixa de frequência do enlace, objetivando a criação de uma nova célula PLC naquele trecho. Uma nova função HE é criada, otimizando o controle

do acesso ao meio daquela célula. Pode-se tomar como referência a inclusão de um modem FDR a cada 4 TDR ligados em série. A latência de uma rede PLC pode ser medida seguindo os procedimentos da RFC2544 ([IETF NETWORK WORKING GROUP, 2015](#)).

- III. **Disponibilidade da rede BPL:** Diferentemente da disponibilidade de serviços, onde a análise é feita fim-a-fim, ou seja, do usuário até a nuvem de processamento, a disponibilidade de rede deve ter sua análise restrita à rede de acesso. Neste caso deve-se identificar os aspectos que podem interferir na operação normal da rede e definir as ações de contorno. Por exemplo, a alimentação dos equipamentos PLC operando sobre uma rede de média tensão pode ocorrer de três formas, quais sejam, individualmente utilizando transformadores de potencial de baixa potência; coletivamente através de uma rede secundária de baixa tensão, fornecida através de um transformador de maior potência ou; individualmente através de painel solar, inversor e baterias. Cada um destes casos influencia de maneira diferente na disponibilidade da rede. Para os testes apresentados na subseção 6, seguiu-se o modelo individual utilizando transformadores de potencial de baixa potência. Outra forma de aumentar a disponibilidade da rede PLC é diminuir a distância entre os equipamentos PLC de forma que quando um falhar, o outro ainda terá condições de se conectar com o modem PLC mais próximo.
- IV. **Tempo de reparo.** Neste caso deve-se definir a quantidade de equipamentos sobressalentes assim como onde os mesmos ficarão guardados. Uma vantagem da rede PLC, segundo o padrão OPERA, é que a substituição de um modem na rede pode ocorrer sem a necessidade de configuração prévia do modem substituto ([CORINEX, 2014](#)). Ao se conectar à célula PLC, o modem substituto receberá do equipamento mestre os arquivos de configuração automaticamente.
- V. **Modelo de operação da rede PLC.** Este requisito define o modelo de operação da rede de banda larga com vistas a atender as expectativas de disponibilidade por parte do usuário (cliente) e de quem a mantém. Um dos aspectos importantes deste requisito é definir o tipo de canal de gerência dos equipamentos PLC, ou seja, se o tráfego de gerência ocorrerá dentro da banda (*in band*) ou fora da banda (*out of band*). A escolha do tipo de canal influencia diretamente no tempo de resposta às falhas na rede. Adotando-se o canal *in band*, por exemplo, corre-se o risco de perder a gerência de parte ou de toda a rede caso um dos elementos apresente falhas graves (por exemplo, falha na alimentação do modem) ou haja aumento do tráfego Ethernet (elevação do nível de compartilhamento do canal). Isto provocaria um aumento do tempo de resposta da equipe de manutenção. Por outro lado, o canal de gerência segregado do tráfego de dados permite que o monitoramento da célula PLC seja feita isoladamente por elemento de rede, o que torna essa opção

a mais confiável. Em contrapartida, implementar uma rede de gerência fora da banda eleva os custos do projeto a ponto de torná-lo inviável. Atualmente, alguns equipamentos BPL suportam o protocolo de gerenciamento SNMP (*Single Network Managment Protocol*) v1 e v2 e podem ser monitorados tanto por ferramentas de gerência abertas quanto proprietárias. Os testes realizados em campo utilizaram como padrão o canal de gerência *in band*. Os resultados obtidos mostraram que esta configuração de gerência tem baixo desempenho quando há aumento do tráfego Ethernet no canal PLC.

VI. Marco Regulatório. A utilização de equipamentos PLC sobre redes elétricas de média tensão por setores privados é regulamentada pelas agências nacionais ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) e ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através de normas, leis e diretrizes. O descumprimento deste conjunto de orientações é passível de penalidades jurídicas e econômicas. Com o objetivo de garantir a legalidade da rede PLC proposta, a análise destas normas, leis e diretrizes deve ocorrer durante a fase de levantamento de requisitos para que as ações de regularização e/ou autorização sejam tomadas antes da instalação dos equipamentos PLC.

A [Tabela 9](#) exemplifica alguns requisitos de rede que deverão ser considerados no planejamento de um projeto de comunicação de dados via rede elétrica de média tensão.

Tabela 9 – Exemplos de critérios para o planejamento de redes de comunicação de dados utilizando a tecnologia PLC.

Critério	Serviço	Disponibilidade	CPE	QoS
100 Mbps	Acesso à Internet	98.5%	CPE-1	7
500 kbps	Automação	99.9%	CPE-1	1
Latência de 2 s	Automação	99.9%	CPE-1	1
Latência de 50 ms	Video	99.9%	CPE-2	0

Além dos critérios aqui mencionados, a quantidade de pontos a serem cobertos pela célula PLC deve ser definida. Com base na topologia física da rede, obtida através da documentação técnica, deve-se mapear todos os pontos que receberão os equipamentos do tipo CPE para o provimento dos serviços.

5.3 Levantamento da Resposta em Frequência

A resposta em frequência do canal PLC representa uma das principais medidas para a análise do uso de uma rede elétrica de média tensão como canal de comunicação de

dados. Este meio é caracterizado pela seletividade em frequência provocada pelo fenômeno multipercursos oriundo das derivações e descasamentos de impedância. Esta seletividade pode ser constatada mediante a medição da relação entre a potência e a potência do ruído SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) ao longo da faixa de frequência utilizada para comunicação. Isso torna a implementação da tecnologia PLC mais eficiente, uma vez que facilita a escolha da melhor banda para transmissão.

Para os equipamentos BPL com o padrão OPERA, é possível configurar até três diferentes larguras de banda: 10 MHz, 20 MHz ou 30 MHz. A faixa de frequência que compreende os três modos de operação vai de 2 MHz até 34 MHz. Para a execução de um *site survey* são necessários dois modems BPL (um HE e um CPE) e dois conjuntos isolador + acoplador (capacitivo), ambos de classe 18 KV ou acima. A Figura 45 ilustra a medição da resposta em frequência entre os pontos A e D realizada em campo.

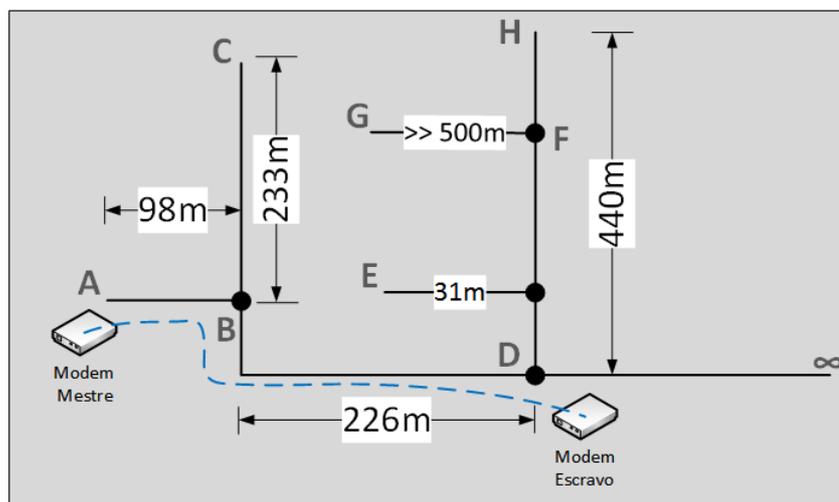


Figura 45 – Medição de resposta em frequência em uma topologia do *site survey* realizado em campo com dois modems BPL padrão OPERA, sobre uma rede elétrica MV.

As variáveis de SNR do sinal podem ser coletadas com o uso de ferramenta SNMP, onde cada valor em dB representa uma subportadora do sinal OFDM (CORINEX, 2014). A medida só pode ser gerada quando os dois equipamentos estão conectados e a curva completa é composta por 1536 subportadoras, representando assim o comportamento da resposta em frequência do canal MV. Esta medida pode ser obtida individualmente por trecho da linha em que se pretende transmitir dados e para cada uma das três larguras de banda. Assim, é possível obter resultados em diferentes modos de operação do equipamento e prever em qual deles o sistema terá melhor desempenho. A Figura 46 mostra um exemplo de curva SNR obtida em um teste de campo configurado de acordo com a Figura 45.

Uma opção para melhorar a capacidade do canal consiste em alterar a sua máscara de potência, onde ajusta-se a potência de uma determinada subportadora de acordo com

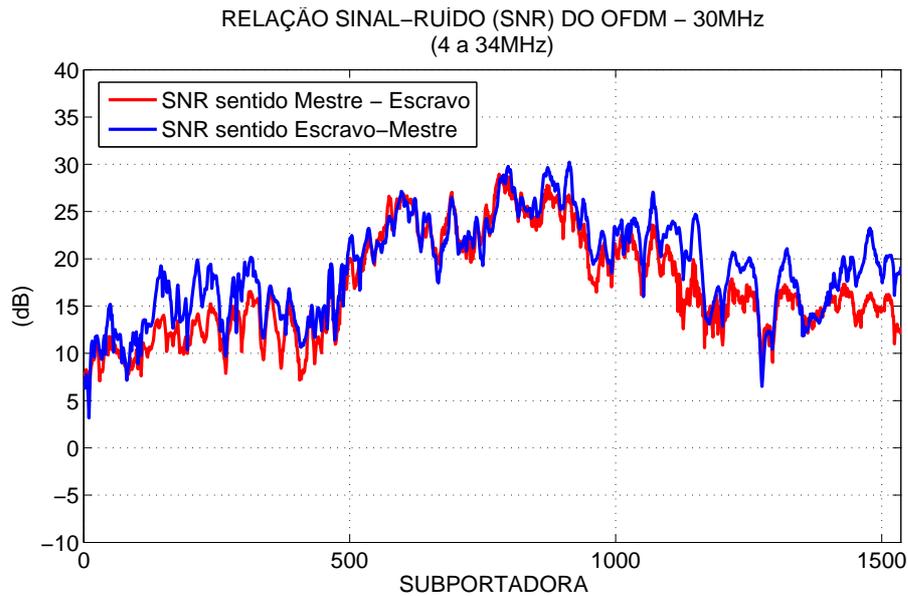


Figura 46 – Curva SNR versus Subportadora do sinal OFDM obtida com o *site survey* realizado em campo num trecho de 424 m e largura de banda de 30 MHz.

os resultados obtidos. Esta opção só deve ser usada nos casos em que a resposta em frequência apresente intensos nulos. Normalmente os equipamentos operam com máscara uniforme, ou seja, mantém o mesmo nível de potência para todas as portadoras do sinal OFDM.

A máxima distância alcançada pelo enlace PLC ponto a ponto, também pode ser obtida durante os testes de campo. Ao analisar a capacidade do enlace ativo, expressa em bit por segundo, pode-se determinar o ponto da linha MV em que haverá o reforço do sinal com o uso de repetidores TDR. Estes resultados permitirão especificar a topologia física e lógica da célula PLC, indicando a quantidade e a localização dos repetidores assim como estimar a máxima distância entre eles.

Em complemento ao cenário anterior, pode-se utilizar um analisador de espectro portátil para obter a referida resposta em frequência, conforme o comportamento do sinal OFDM na banda apresentada na [Figura 47](#). O analisador de espectro deve ser conectado ao conjunto isolador + acoplador do equipamento escravo por meio de um divisor de sinal.

5.4 Definição das Arquiteturas Física e Lógica da Célula PLC

Esta é a última etapa da metodologia proposta neste trabalho e é a responsável pela integração dos resultados obtidos nas etapas anteriores. Os parâmetros de transmissão obtidos no *site survey* somados aos requisitos de rede definidos para o projeto, além dos pontos identificados para receber o modem escravo, são informações suficientes para a conclusão do planejamento adequado da rede PLC e a sua implantação em linhas de

média tensão.

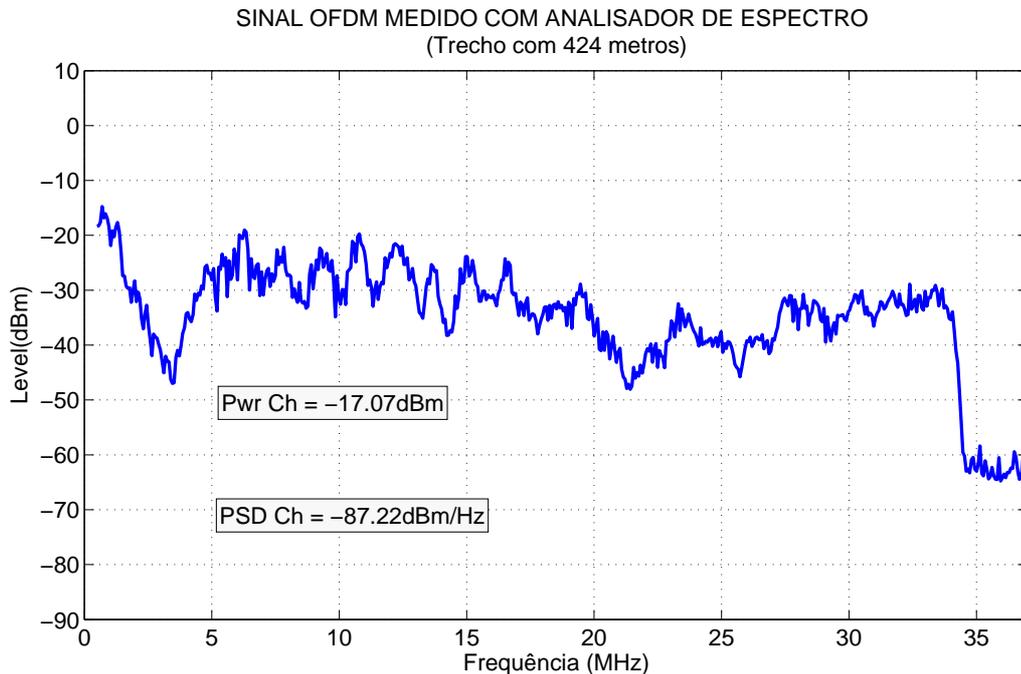


Figura 47 – Sinal OFDM medido no domínio da frequência com o analisador de espectro diretamente na linha elétrica MV, com a mesma configuração apresentada na Figura 45.

A área de cobertura da célula PLC que advém da análise feita sobre a linha elétrica mediante a documentação técnica, representa uma das principais informações para início do referido planejamento. Com base na área de cobertura pode-se avaliar o número de elementos escravos que serão utilizados para atender aos usuários e, de posse dos parâmetros da camada física dos equipamentos PLC, obtidos nos testes de campo, definir os pontos de reforço do sinal. Com isso, é possível determinar o tamanho e a topologia da célula com base na quantidade de elementos de rede (mestre, escravo e repetidor) e nas localizações dos repetidores de sinal.

De um modo geral, a distância média entre dois equipamentos PLC sem a necessidade de repetição do sinal pode atingir valores próximos dos 500 m (CORINEX, 2014), (CASTOR et al., 2014a), (CASTOR; SILVA; SEGATTO, 2015). A localização dos repetidores vai depender também da capacidade que o poste escolhido tem para instalação de estruturas tipo cruzeta onde serão fixados os dispositivos de acoplamento e conexão do equipamento. Se não houver espaço disponível, o repetidor deve ser instalado na posição mais próxima do equipamento mestre.

Outra análise importante advém da identificação das derivações existentes na linha. Caso estas derivações representem comprimentos na ordem de 10% em relação ao trecho principal da linha elétrica, procura-se instalar o modem repetidor mais próximo da

menor derivação. Esta tem maior influência destrutiva no sinal PLC por apresentar menor atenuação ao sinal refletido (ANATORY; THEETHAY, 2010). Derivações com comprimentos acima de 1,5 vezes maior em relação ao trecho principal influenciam de maneira irrelevante no sinal principal (CASTOR; SILVA; SEGATTO, 2015). Outros mecanismos tais como utilização de filtros passa-faixa também podem ser utilizados para minimizar os efeitos dos ruídos da linha.

Em relação à topologia lógica da rede, ressalta-se que a rede PLC se comporta como um barramento Ethernet (*bridge*) onde todos os elementos conectados a ela estão inicialmente sob o mesmo domínio lógico (domínio de *broadcast*). Em contrapartida, pode-se segregar os domínios utilizando a técnica 802.1Q - VLAN (*Virtual Local Access Network*) ou de maneira mais custosa instalando roteadores pela rede. Com isso, aumenta-se o desempenho no processamento dos pacotes, cria-se privacidade entre as redes e melhora o controle dos endereços IP (*Internet Protocol*). As redes virtuais devem ser criadas de acordo com cada serviço suportado, ou seja, deve-se criar uma VLAN para serviços de automação, outra para videomonitoramento, outra para gerência PLC, entre outras. O diagrama mostrado na Figura 48 representa a topologia lógica de uma rede PLC para aplicação em Smart Grids conforme a solução aqui proposta.

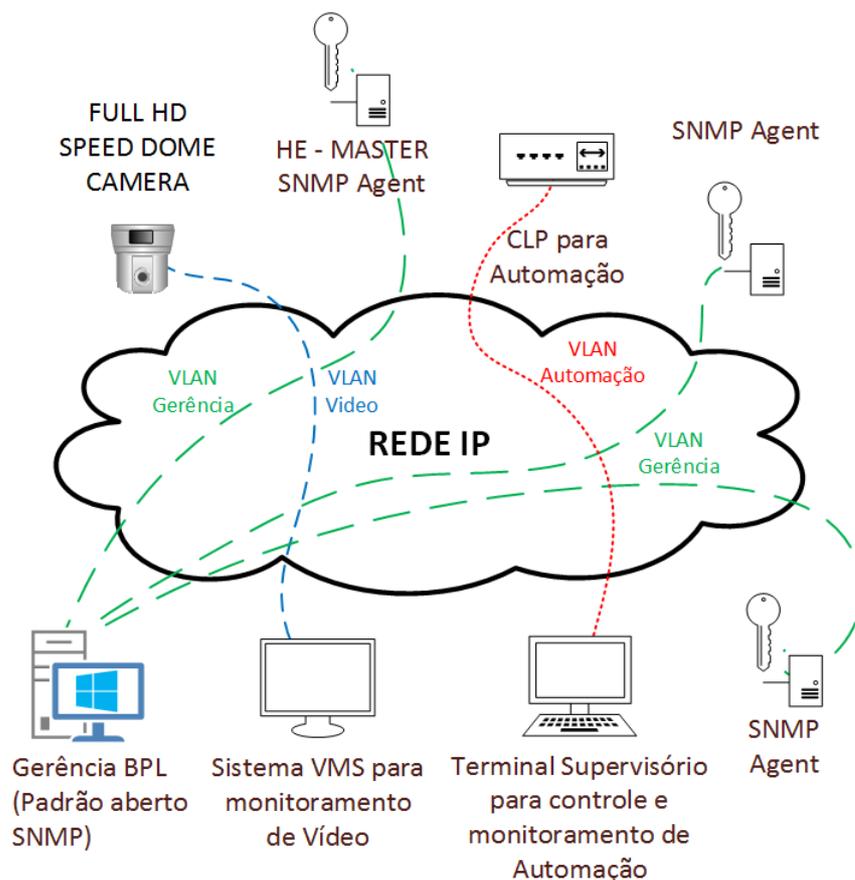


Figura 48 – Diagrama da topologia lógica para uma rede PLC segregada por VLANs de acordo com a proposta.

A [Figura 49](#) ilustra o fluxograma da metodologia *SmartMethPLC* para a implementação de uma rede de acesso utilizando como canal de comunicação a rede elétrica de média tensão num ambiente de rede inteligentes *Smart Grid*.

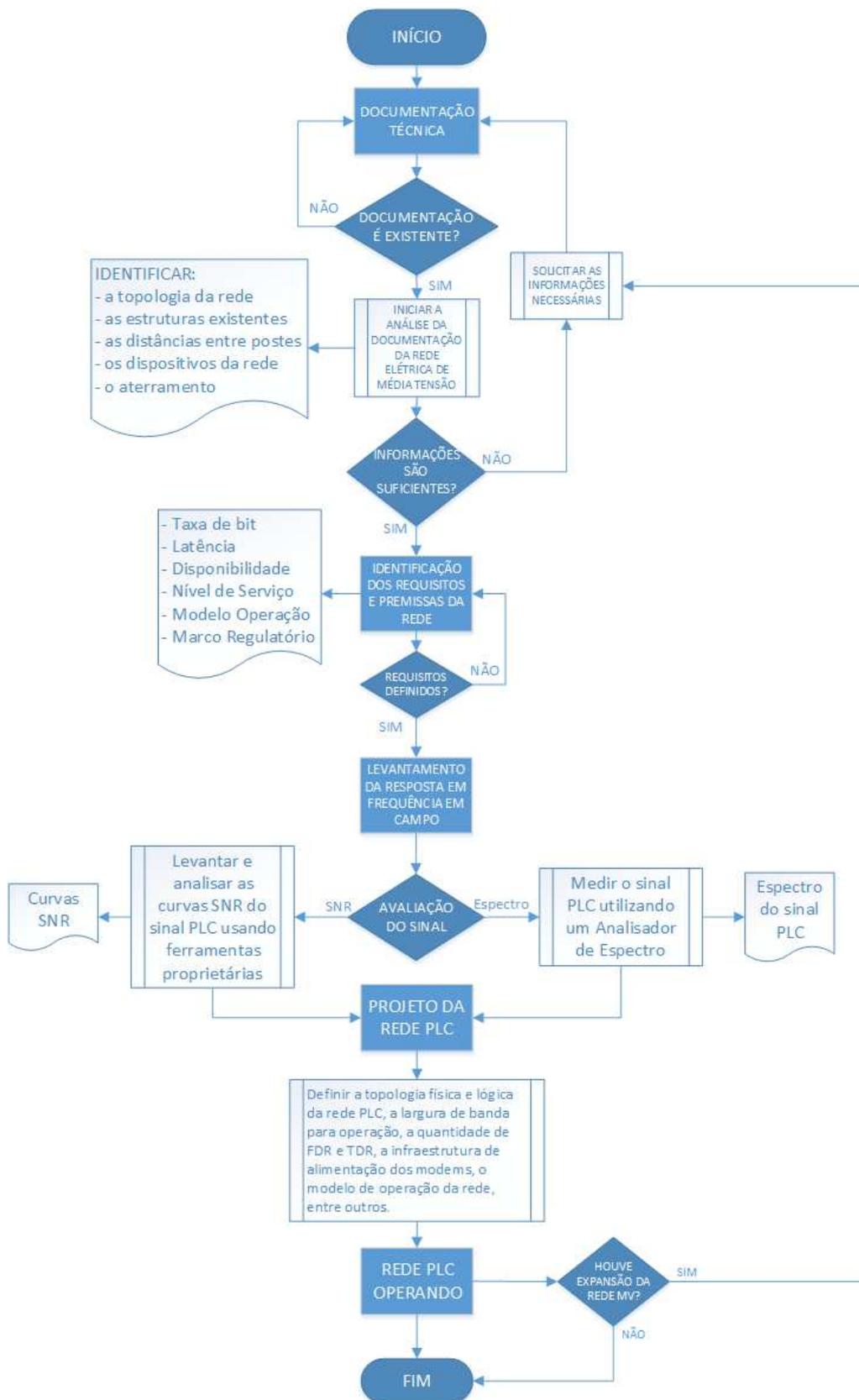


Figura 49 – Fluxograma da Metodologia de implementação de redes de acesso utilizando a tecnologia PLC sobre redes elétricas MV

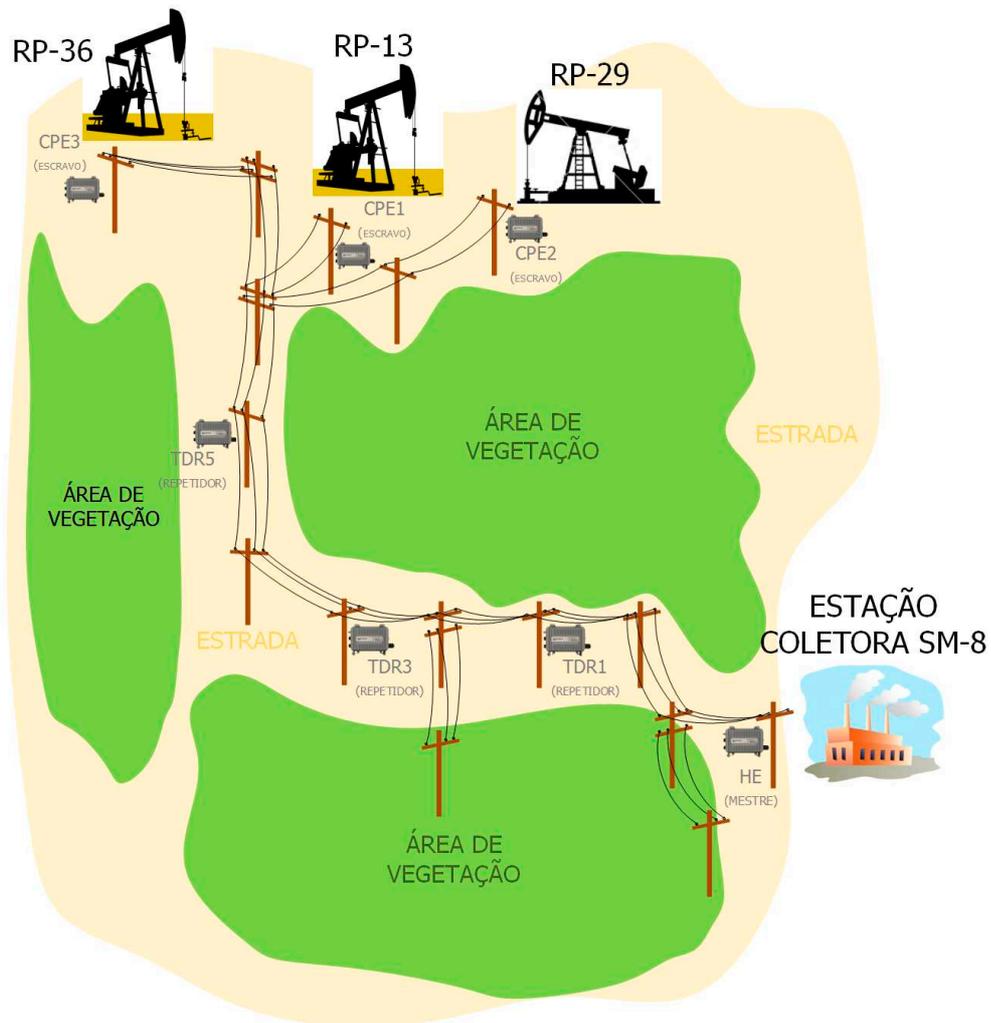
6 Validação da Metodologia em uma Rede Elétrica MV de 1.6 km: Estudo de Caso

Com o objetivo de validar a metodologia proposta neste trabalho, esta foi aplicada em uma rede elétrica de média tensão em 13.8 kV e de 1.63 km de extensão. Pertencente à PETROBRAS e localizada na região do Rio Preto, município de São Mateus no Norte do Espírito Santo, a rede interliga três poços produtores de petróleo à estação coletora SM-8, conforme ilustra a [Figura 50](#). Assim, como estudo de caso, experimentos foram realizados com base na metodologia proposta para a aplicação da tecnologia PLC como solução de comunicação de dados nos ativos de produção terrestre da petrolífera.

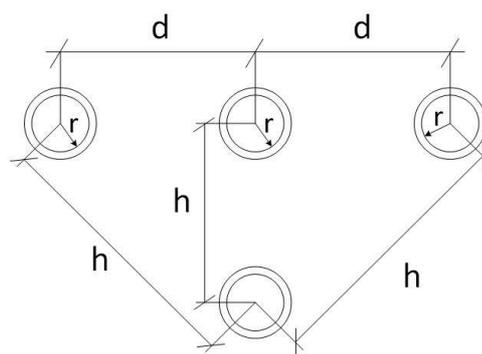
Nos experimentos realizados na rede da [Figura 50](#) intensificou-se a investigação da operação de uma célula PLC composta por 7 elementos de rede, focando-se na distância de cobertura e no desempenho dos modems frente às derivações existentes ao longo da linha de transmissão, conforme designação da metodologia. Outros aspectos relacionados a Operação & Manutenção tais como sistema de gerência dos modems, facilidade de configuração, inserção de novos elementos na rede, entre outros, também foram analisados. Os dois modos de operação baseados na banda de frequência (10 MHz ou 30 MHz) foram testados.

Os poços produtores são equipados com sistemas de automação interligados aos processos de produção, e dispositivos eletrônicos tais como câmera de videomonitoramento pertencentes ao sistema integrado da segurança patrimonial (SISP) da PETROBRAS. Do lado da estação de processamento SM-8 estão as aplicações de monitoramento e controle desses sistemas, para a demanda de tráfego da rede composta pelos dados de automação e da câmera.

As medições realizadas neste cenário de testes apresentaram resultados relativos à taxa de transmissão de dados, à latência da rede, à resposta em frequência do canal obtida da relação sinal-ruído e a variação da velocidade física da interface PLC dos equipamentos BPL empregados. A infraestrutura de instalação dos equipamentos e a composição das estruturas montadas no posteamento da rede MV, também foram avaliadas como procedimentos embasados na metodologia de dimensionamento da rede PLC proposta no capítulo anterior. Uma visão geral da topologia lógica da rede investigada é mostrada na [Figura 51](#). Todos os dispositivos associados a célula PLC estão conectados na mesma rede IP e o tráfego de dados tais como pacotes SNMP, pacotes da gerência proprietária dos modems e os pacotes de vídeo fluindo pela rede, compartilham a mesma banda, sendo que não há perfil de QoS associado a serviço (*best effort*).



(a)



d – distância entre fios
 h – distância entre fases e o fio Neutro
 r – raio

(b)

Figura 50 – (a) Rede de média tensão em (13.8 kV) e 1.63 km de extensão utilizada com estudo de caso para validação da metodologia de aplicação da tecnologia PLC. (b) Disposição dos cabos de energia usados no transporte de dados.

Neste cenário, aplicações sensíveis à latência tais como video *streaming* ou gerência *in-band* podem apresentar baixo desempenho nos casos em que um tráfego de usuário incrementar seu valor de *throughput* acima do limite da rede. Nesta investigação, a gerência de rede dos modems (SGNetman e SNMP) funcionam no modo *in-band* e, portanto, estão susceptíveis ao baixo desempenho supracitado.

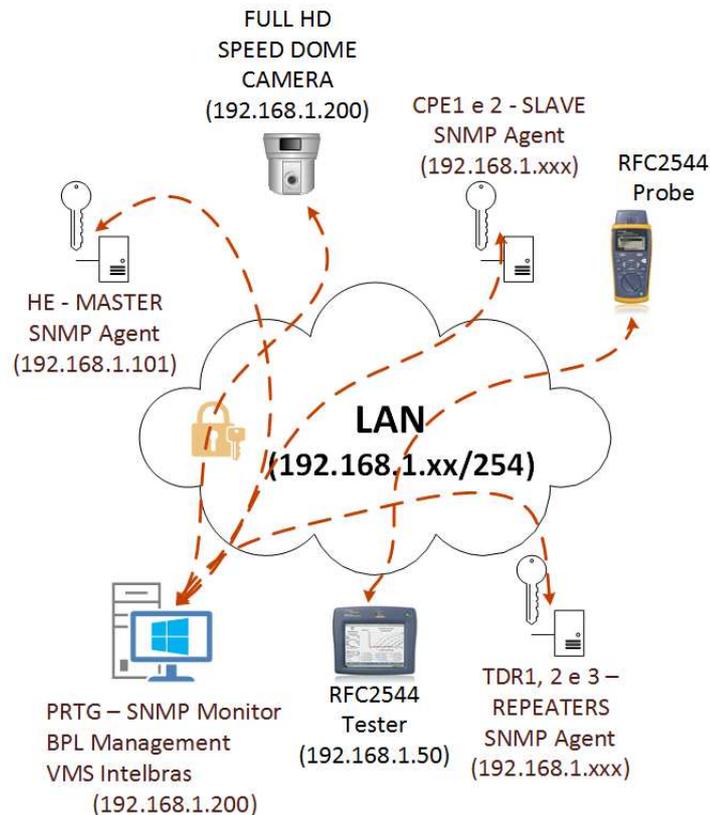


Figura 51 – Topologia lógica implementada na rede de teste da Figura 50.

6.1 Averiguação da Documentação Técnica Necessária

Uma rede elétrica é denominada pública por permitir que qualquer pessoa possa ser assinante e obter energia elétrica da companhia local de distribuição de energia. Neste caso, o meio é compartilhado entre vários assinantes, onde medidores de energia, transformadores, dispositivos de proteção, entre outros elementos são conectados à mesma rede física. Uma rede pública possui diversas derivações e comprimentos de dezenas de quilômetros, mas que podem alterar suas características conforme novas conexões de assinante são estabelecidas. Um consequência disso são as interferências eletromagnéticas provocadas pelo funcionamento dos dispositivos, a atenuação provocada pela distância e a variação em função do tempo da impedância característica da linha. Esses e outros fenômenos prejudicam diretamente a propagação do sinal PLC sobre a rede elétrica.

Por outro lado, uma rede elétrica privada é definida como aquela rede que se localiza por trás do medidor de energia e é controlada por um número restrito de usuários que estão dentro da área de atendimento. Diferentemente da rede pública, a topologia da rede privada altera-se pouco ao longo do tempo, mas ainda assim permanecem as interferências eletromagnéticas e alterações da impedância.

A rede de distribuição de média tensão utilizada neste experimento pode ser considerada um misto dos dois tipos de rede. Embora a gestão da rede (operação e manutenção) seja feita estritamente pela PETROBRAS, não havendo qualquer outro usuário externo conectado à ela, o seu funcionamento se assemelha as de uma rede pública. Novas cargas podem surgir na linha acarretando em uma alteração na topologia da rede de distribuição. Motores são constantemente acionados devido ao processo de produção e sua extensão alcança dezenas de quilômetros. As cargas são compostas basicamente por motores de grande potência utilizados no bombeio do petróleo e por motores utilizados nas plantas de processo, onde a classe de tensão definida é de 440 V, ou seja, baixa tensão. Transformadores são utilizados para baixar a tensão de 13,8 KV para 440 V. Outra característica desta rede é que não há banco de capacitores ou indutores instalados ao longo da linha para compensação do fator de potência. De acordo com as características mencionadas, a rede MV da PETROBRAS representa um ambiente favorável aos experimentos, pois o sistema PLC está menos susceptível às interferências implusivas presentes na baixa tensão.

A [Figura 52](#) apresenta a topologia física e completa da rede MV de presente na documentação técnica disponibilizada na validação da metodologia proposta.

Os modems BPL foram instalados diretamente no posteamento da linha de transmissão de média tensão. Uma estrutura definida como cruzeta foi fixada no topo do poste para a fixação dos isoladores, acopladores, transformadores e chaves fusível, todos necessários ao funcionamento da célula PLC. Os detalhes de instalação do conjunto-tipo podem ser vistos nas [Figura 65](#) e ??, anexo A deste documento.

Os testes realizados neste experimento foram divididos em duas partes: modo de operação 1 (10 MHz de banda) para avaliar o desempenho do sistema em menor largura de banda e modo de operação 2 (30 MHz) para avaliar o desempenho em largura de banda máxima.

6.2 Testes Realizados no Modo de Operação 1: Largura de Banda de 10 MHz

A estação coletora SM8, representada na [Figura 50](#), indica o ponto de concentração das informações de dados de automação e vídeo monitoramento enviadas pelos poços produtores de petróleo.

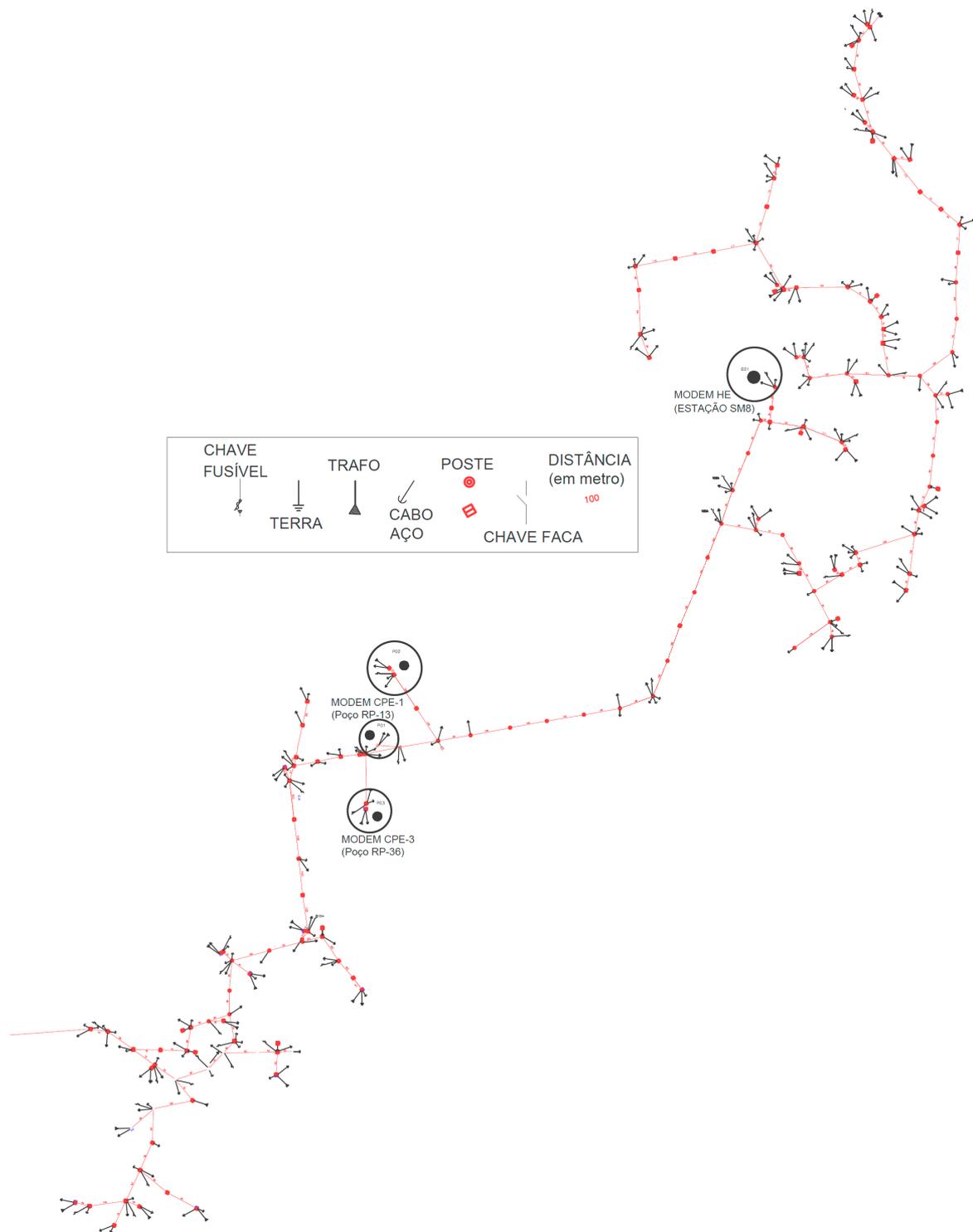


Figura 52 – Desenho da topologia física, constante na documentação técnica da Rede MV investigada em campo para validação da metodologia proposta.

Nesta estação são recebidos e tratados os volumes de hidrocarbonetos produzidos nos campos terrestres e onde se encontra a sala de supervisão responsável pelo monitoramento e controle dos processos de produção da região. Afim de simular um ambiente de testes próximo da realidade, o Servidor de aplicações foi instalado nesta localidade juntamente com o modem mestre HE.

Para cada poço produtor foi disponibilizado um modem escravo CPE e ao longo do percurso foram instalados os repetidores TDR. Seguindo-se a metodologia desenvolvida, estabeleceu-se uma distância média de 500 m entre os elementos da rede (PETROBRAS, 2014), (CASTOR et al., 2014a). Além disso, optou-se por iniciar os testes operando-se em uma largura de banda de 10 MHz, na frequência central de 7,96 MHz, com densidade espectral de potência constante, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros PLC na banda de operação de 10 MHz.

Freq. Central	Largura de Banda	PSD	Taxa Máxima
7.968.750 Hz	10 MHz	-72 dBm/Hz	84 Mbps

6.2.1 Topologia da Rede Conforme a Ferramenta de Gerência

A topologia da rede projetada para os testes é mostrada na Figura 53. Observa-se pela Figura 53 que a conexão entre o HE e o Servidor de aplicações é feita através de uma rede de comunicação sem fio conforme padrão IEEE 802.11n em complemento à dificuldade encontrada na infraestrutura de encaminhamento entre eles. A câmera IP utilizada no poço RP-13 é de alta resolução e atende aos requisitos de vídeo MPEG4-Part10, que representa um padrão de compressão de dados de áudio e vídeo digitais. Os CPEs instalados nos poços RP-29 e RP-36 são livres para conexão de outros serviços, tais como gerador de tráfego, visualização de imagens em tempo real e testes conforme RFC-2544.

6.2.2 Resultados Obtidos

Os resultados provenientes da aplicação da metodologia proposta foram obtidos mediante o uso de ferramentas capazes de coletar e armazenar variáveis, utilizando o protocolo SNMP que representam os objetos gerenciáveis dos elementos de rede. Foram utilizadas as ferramentas PRTG (padrão aberto) e SNetman (customizada para os modems PLC), ambas representadas pelo Servidor de aplicações. Para a captura de imagens e consequente geração do tráfego de vídeo foi utilizada a ferramenta VMS (*Video Management Software*) da Intelbras.

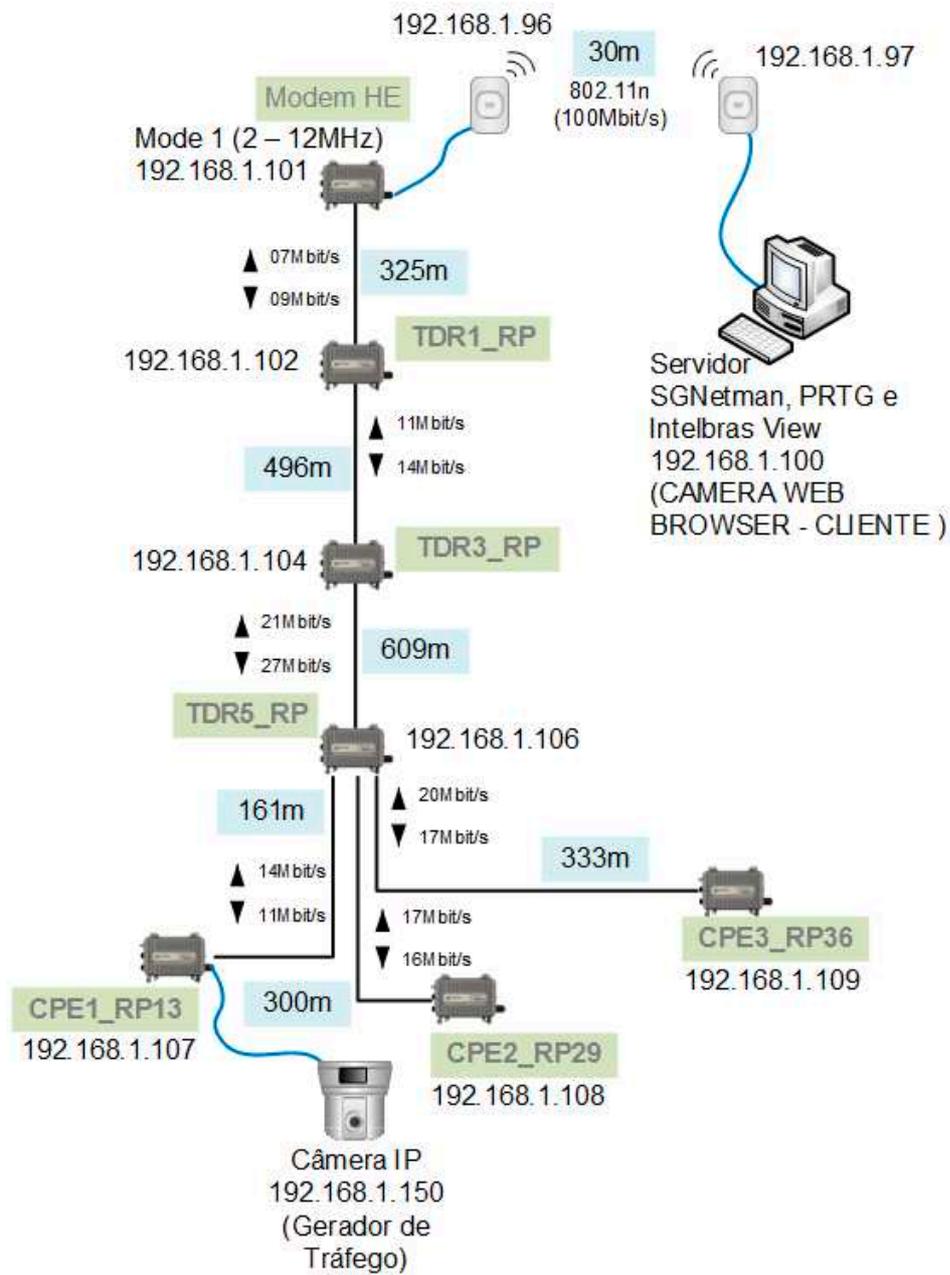


Figura 53 – Topologia da rede PLC no modo de operação 1 (largura de banda de 10 MHz). As distâncias entre os equipamentos e as taxas da interface PLC também são mostradas.

6.2.2.1 Medidas de *throughput* na interface Ethernet

A Figura 54 apresenta a curva de *throughput* da interface Ethernet dos elementos HE e CPE1. Nota-se na Figura 54 que as curvas apresentam uma simetria entre o fluxo de saída do modem HE com o fluxo de entrada do modem CPE1, indicando funcionamento satisfatório e esperado para o sistema implementado conforme a metodologia.

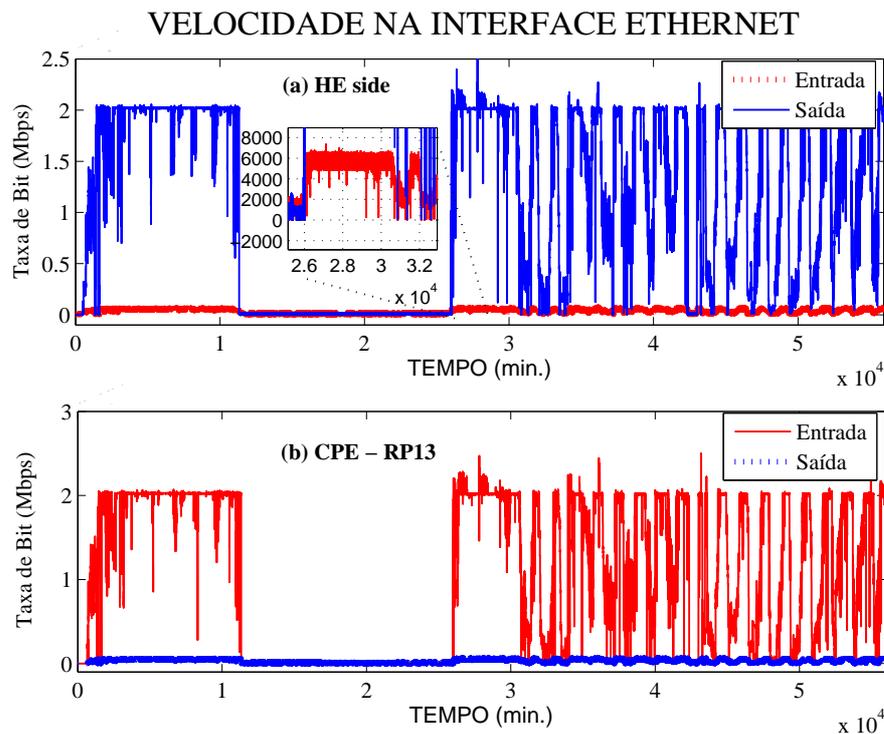


Figura 54 – Taxa de transmissão medida na interface Ethernet na largura de banda de 10 MHz. (a) Tráfego de entrada e saída no modem HE e (b) no modem CPE em RP13.

Observa-se na Figura 54 que os primeiros 10.000 minutos do teste indicam um fluxo de vídeo constante o que de fato corresponde ao perfil CBR (*Constant Bit Rate*) configurado no *codec* da câmera. O trecho de taxa nula representa uma interrupção na operação da rede BPL devido a uma falha no VMS e portanto, deve ser desconsiderado da análise. No trecho seguinte a câmera foi reconfigurada para operar com fluxo de vídeo variável VBR (*Variable Bit Rate*) obtendo-se assim variação na taxa de bit observada na curva.

6.2.2.2 Medidas de Velocidade na Interface PLC

As curvas da Figura 55 representam a velocidade medida na interface PLC dos modems CPE1 e CPE2 (em Mbps). Nota-se que os trechos destas curvas acompanham o perfil constante ou variável do fluxo de vídeo da câmera, evidenciando assim o controle de recursos na célula PLC coordenada pelo HE. O modem CPE2 só foi instalado e in-

corporado pela célula após 25.000 minutos decorridos do início dos testes, o que pode ser identificado no trecho de taxa nula da curva do modem CPE2. Os valores alcançados pelos modems na interface PLC são satisfatórios considerando-se que a rede foi configurada para operar com largura de banda de 10 MHz.

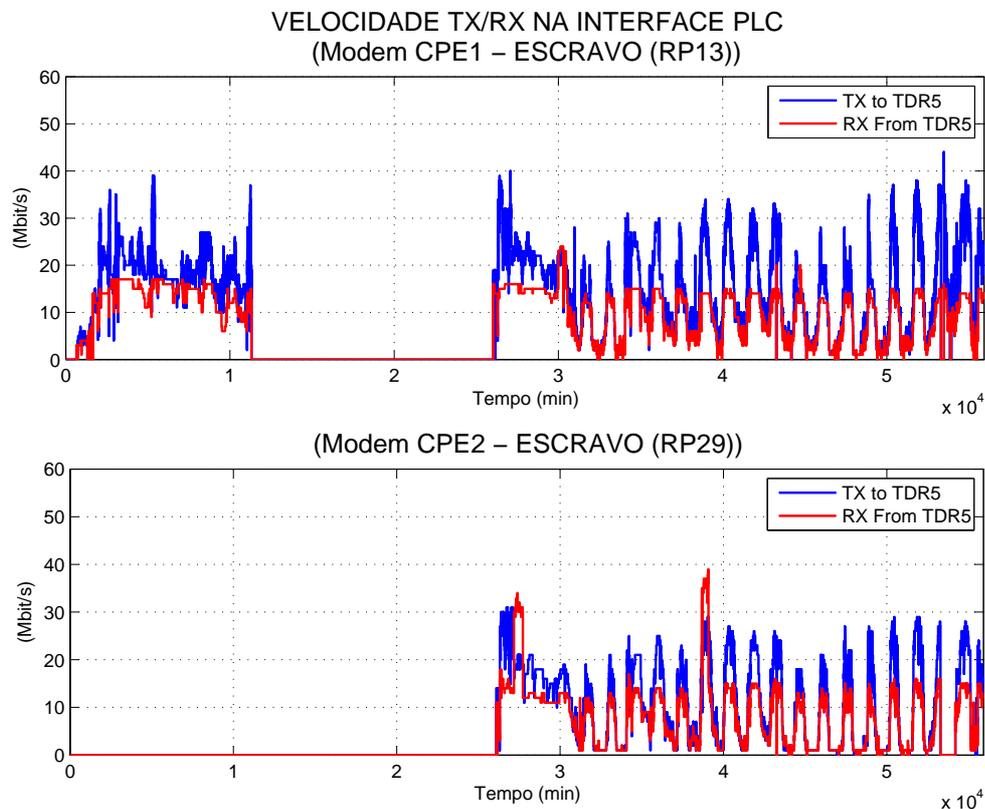


Figura 55 – Desempenho do sistema em termos de velocidade na camada física (interface PLC), no modo de operação da largura de banda de 10 MHz.

6.2.2.3 Medidas de Espectro dos Sinais OFDM

A Figura 56 mostra a seletividade em frequência dos sinais OFDM medida nos equipamentos desde o HE até o CPE1. Para ambas as medidas é possível notar que as frequências baixas sofrem mais atenuação no canal em relação as altas frequências. A presença dos nulos nos espectros pode estar associada às derivações do meio presentes no trecho HE - TDR1, conforme mostrado na Figura 50. Os efeitos de *fading* provocados pelos sinais multipercursos e pelas reflexões sofridas pelo sinal principal devido ao descaçamento de impedância, também levam ao aparecimento destes nulos (CLAYTON, 2008) (CARCELLE, 2006) (DOSTERT, 2001).

A escala no eixo X representa as 1536 subportadoras dos sinais OFDM padronizados nos equipamentos PLC utilizados. A modulação adaptativa, presente nos modems define a quantidade de bit que uma subportadora pode transportar e um dos parâmetros de referência utilizado para isto é o valor do SNR de cada subportadora.

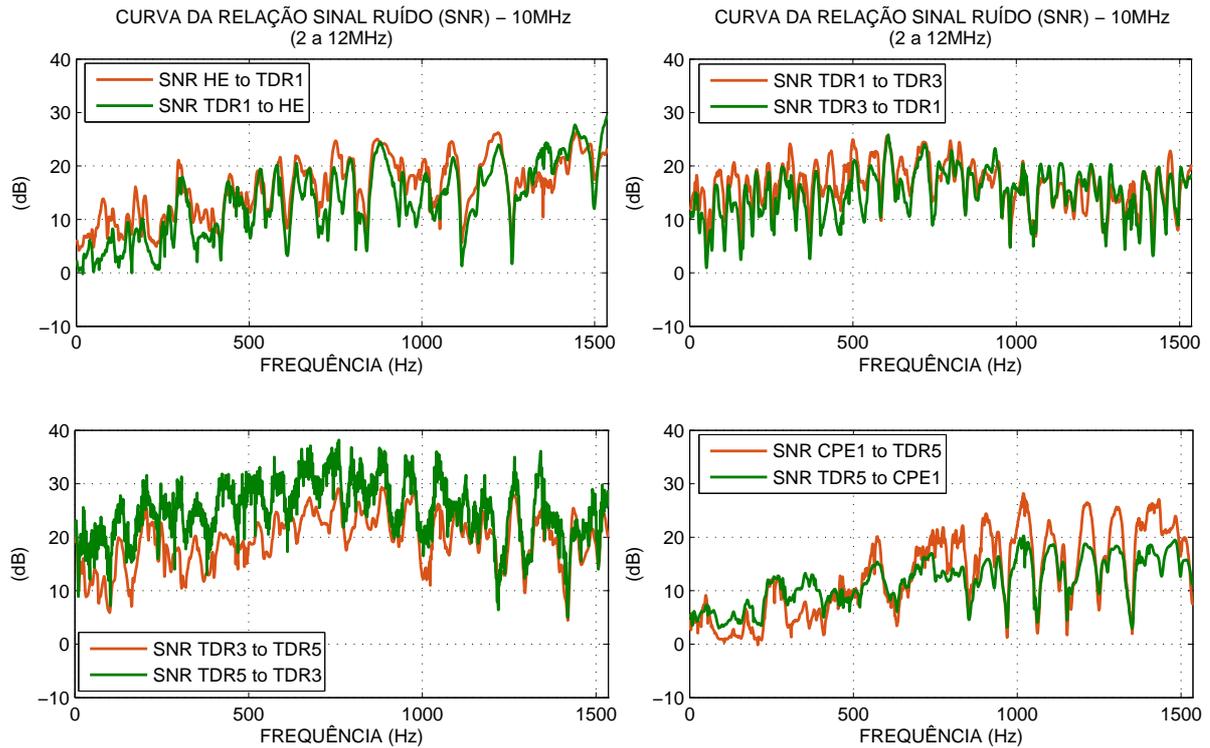


Figura 56 – Medidas de SNR obtidas na interface PLC dos modems HE ao CPE1 no modo 10 MHz.

Quanto maior o SNR, mais bits serão transportados por esta subportadora e vice-versa. Esta afirmativa pode ser verificada na [Figura 53](#), onde a taxa de transmissão atingida por cada trecho depende dos valores de SNR presentes no sinal OFDM. Nota-se que no primeiro trecho (HE < - > TDR1) a taxa de bit por segundo é menor se comparada com o restante da rede BPL o que pode ser explicado pelas derivações existentes no meio físico da rede elétrica, provocando atenuações no sinal OFDM. Os valores de SNR deste trecho são mostrados na [Figura 56](#).

6.2.2.4 Medidas de Tempo de Resposta

Outro parâmetro medido na rede PLC foi o tempo de resposta dos modems empregados na rede. Os resultados foram registrados pela ferramenta PRTG e mostrados na [Figura 57](#). Ressalta-se que o tempo de resposta representa o tempo que cada elemento SNMP levou para responder a uma solicitação ICMP (PING). A [Figura 57](#) mostra que na primeira metade da curva (até 30.000 min) obteve-se um tempo de resposta relativamente baixo, com exceção do CPE2-RP29 que não teve medição, se comparado aos valores mostrados na segunda metade da curva. Percebe-se que com a inclusão deste modem na rede, o tempo de resposta total aumentou. Este aumento é esperado porque o mecanismo de acesso ao canal utilizado pela rede foi baseado na divisão do tempo. Nota-se ainda que as curvas dos repetidores e dos escravos apresentam semelhança, seguindo o perfil de

tráfego VBR configurado para a câmera e evidenciado na [Figura 54](#). Esta característica leva a conclusão de que o tempo de resposta apurado não representa a latência da rede PLC. O mecanismo de gerência SNMP implementado nos modems influencia diretamente nos resultados porque o tráfego e a gerência disputam o mesmo canal de comunicação, fazendo com que os pacotes SNMP sofram atrasos. Em complemento a isto, convém informar que o Servidor SNMP (PRTG) foi instalado na mesma máquina que roda a gerência dos modems, o VMS da câmera e o gerador de tráfego, o que também provoca atrasos no processamento dos pacotes.

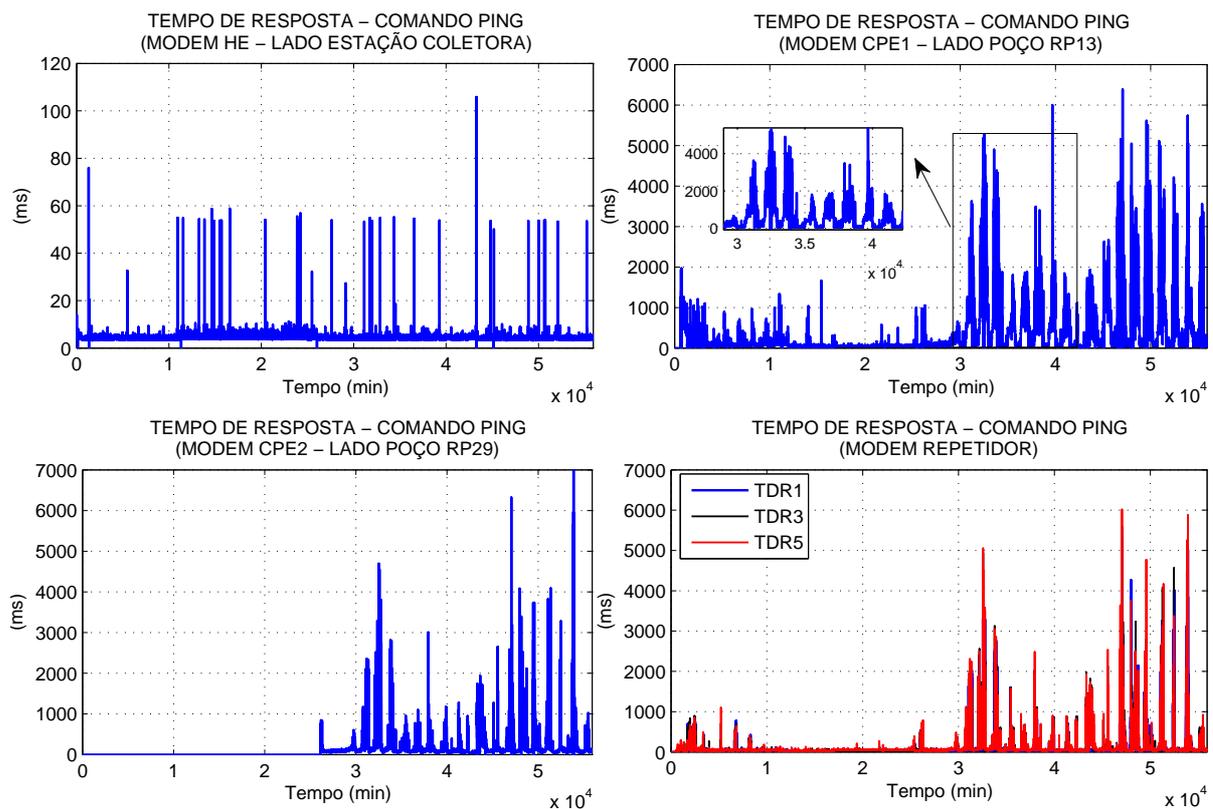


Figura 57 – Tempo de Resposta dos modems BPL - Modo 10 MHz.

6.3 Testes Realizados no Modo de Operação 3: Largura de Banda de 30 MHz

A topologia de rede utilizada na realização dos testes no modo 30 MHz é bastante semelhante a aplicada na da rede de 10 MHz. Seguindo-se a metodologia desenvolvida, aqui também estabeleceu-se uma distância média de 500 m entre os elementos da rede ([PETROBRAS, 2014](#)), ([CASTOR et al., 2014a](#)). Operando-se em uma largura de banda de 30 MHz, a frequência central configurada foi a mostrada na [Tabela 11](#).

Tabela 11 – Parâmetros BPL - Banda de operação 30 MHz.

Freq. Central	Largura de Banda	PSD	Maxima Taxa
19.062.500 Hz	30 MHz	-77 dBm/Hz	205 Mbps

6.3.1 Topologia da Rede Conforme a Ferramenta de Gerência

Para as averiguações em 30 MHz decidiu-se acrescentar os testes recomendados no padrão na RFC-2544, que trata do desempenho das redes Ethernet. A Figura 58 mostra o esquema de ligação dos equipamentos e instrumentos utilizados nestes testes. Nota-se que um switch foi inserido na rede apenas para aumentar o número de portas Ethernet disponível. Para analisar a latência, o *Jitter* e a Taxa de Erro na rede PLC, foi utilizado o instrumento *Metro Scope Fluke* e uma unidade Refletora, a qual foi conectada ao HE.

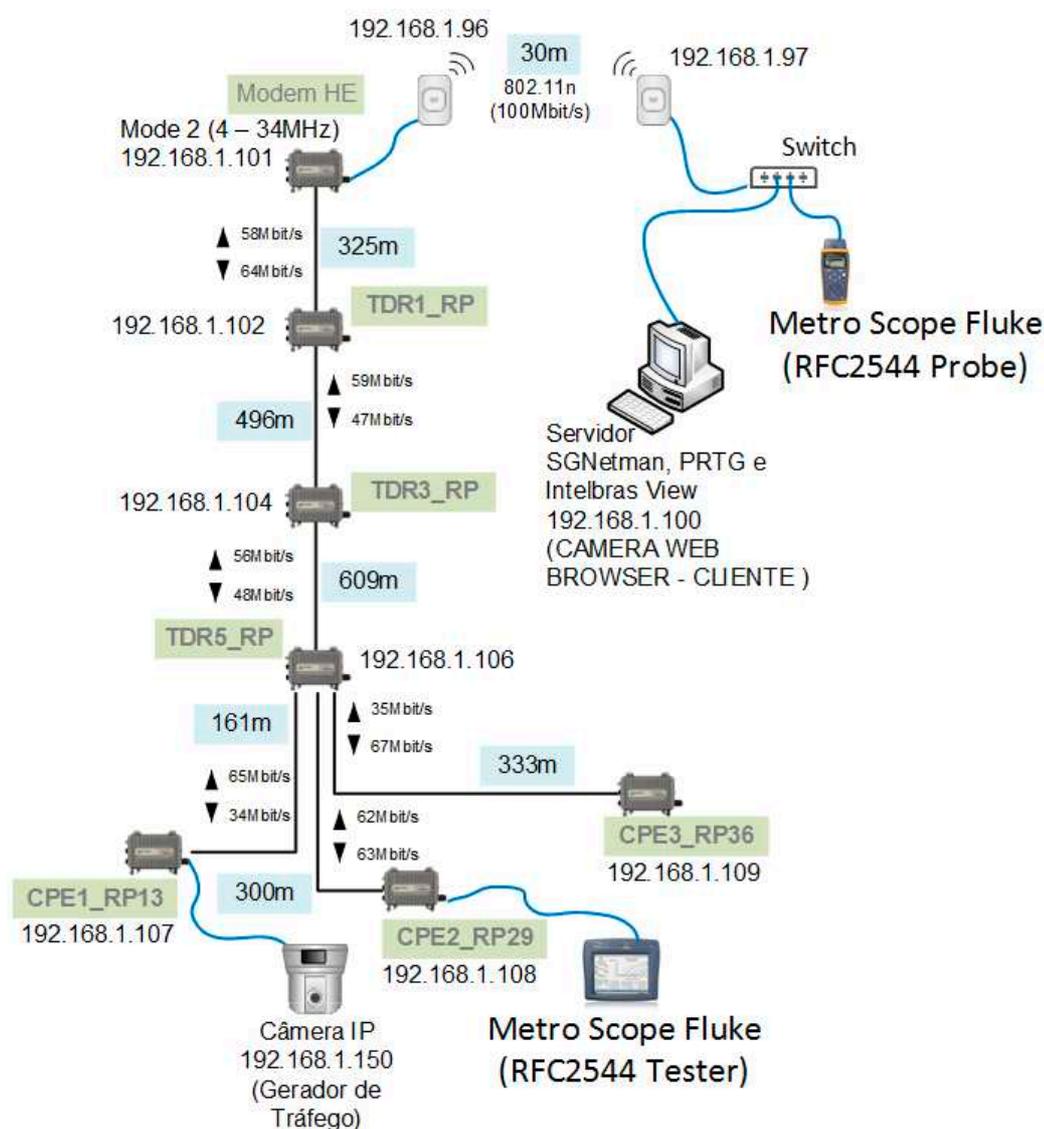


Figura 58 – Topologia utilizada nos testes de modo de operação com banda de 30 MHz e com testes RFC-2544.

6.3.2 Resultados Obtidos

Os resultados provenientes da aplicação da metodologia proposta na banda de 30 MHz foram obtidos mediante o uso das mesmas ferramentas SNMP utilizadas nas medidas do modo de operação 1, além das sinalizações do *Metro Scope Fluke* e da unidade Refletora.

6.3.2.1 Medidas de *throughput* na interface Ethernet

As estatísticas coletadas na interface Ethernet dos modems HE, CPE1 e CPE2 podem ser visualizadas na [Figura 59](#). Nota-se que os resultados obtidos na interface Ethernet para o modo 30 MHz são semelhantes aos resultados obtidos no modo 10 MHz. A média da taxa de transmissão entre o modem HE e CPE1 permaneceu em 2 Mbps, o que já era esperado. As oscilações ocorridas no modem CPE2 são justificadas pela execução dos testes da RFC-2544. Nota-se na curva que há três picos iniciais que representam pré-testes realizados na rede. O objetivo desses foi assegurar a melhor configuração para os instrumentos frente ao cenário da rede avaliada.

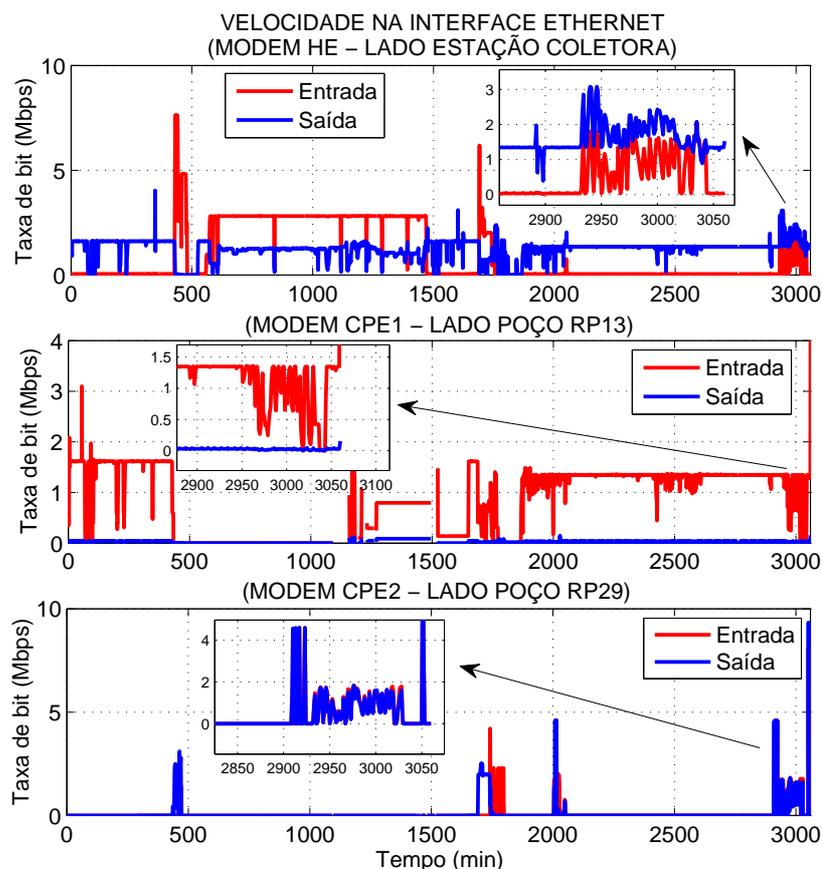


Figura 59 – Velocidade na interface *Ethernet* no modo com largura de banda de 30 MHz.

Todavia, o último período de oscilação representa o tráfego gerado pelos instrumentos *Metro Scope Fluke* e Refletor já na configuração definitiva e marca a execução

dos testes RFC-2544 na rede PLC. Uma visão detalhada das estatísticas da interface Ethernet mostrada neste período é mostrada em cada curva da [Figura 59](#). Nota-se que a taxa de bits da câmera instalada no poço RP13 (tráfego de entrada no modem CPE1) se adapta automaticamente ao compartilhamento de banda ocorrido com o modem CPE2 na rede BPL. A curva mostra uma variação desta taxa indicando a ação do algoritmo de compressão MPEG4-Part10, presente no codificador digital do dispositivo. A imagem reproduzida pelo VMS da Intelbras manteve-se normal. Com isso, é possível deduzir que o impacto provocado pelo compartilhamento de banda na rede sobre as aplicações sensíveis a latência é menor do que se esperava.

6.3.2.2 Medidas de Velocidade na Interface PLC

As estatísticas coletadas na interface PLC dos modems HE, CPE1 e CPE2 podem ser visualizadas na [Figura 60](#). As estatísticas das interfaces PLC dos modems BPL, mostradas na [Figura 60](#), indicam um avanço significativo em termos de capacidade de transmissão com relação ao obtido no modo 10 MHz. Naturalmente, espera-se esta melhora devido a banda atual ser três vezes maior do que a mencionada anteriormente porém, aspectos relacionados a propagação do sinal no meio podem reduzir drasticamente a capacidade do canal.

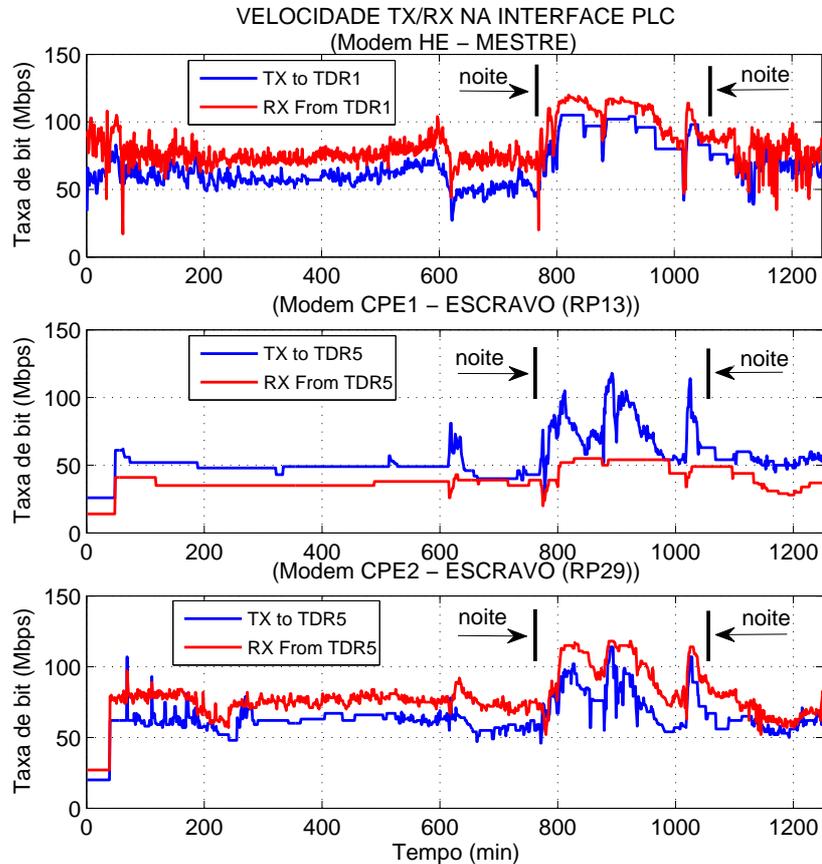


Figura 60 – Velocidade na interface PLC no modo com largura de banda de 30 MHz.

Nota-se pela [Figura 60](#) que a velocidade adquirida pelos modems varia de acordo com o trecho da rede física MV onde se encontram. Assim, a seletividade em frequência do trecho HE< – >TDR1 apresenta favorabilidade para a faixa 4 - 34 MHz, elevando com isso a velocidade média deste trecho para próximo dos 70 Mbps. E assim ocorre com cada um dos trechos mostrados. Um aspecto notado e analisado durante os testes é que no período noturno (indicado pelas setas nas curvas da [Figura 60](#)) há um incremento na velocidade média das interfaces PLC para os três trechos. Duas hipóteses foram analisadas e que podem responder a esta variação: processo produtivo e Temperatura. Na primeira hipótese investigou-se a possibilidade de algum processo produtivo alterar seu *status* de operação (iniciar ou parar) durante o período noturno, alterando também a resposta em frequência da linha. Foi informado pelo supervisor de produção que a planta de produção opera, sistematicamente, 24 horas por dia, 7 dias por semana, sem particularidades de horário. Na hipótese relacionada com a temperatura ressalta-se que por ficarem expostos ao sol durante muito tempo, a linha de transmissão e seus componentes sofrem alteração nas características construtivas (alterando parâmetros de condutibilidade, por exemplo) podendo provocar aumento na atenuação do sinal propagado. Com a temperatura diminui durante o período noturno, um aumento na relação sinal-ruído é esperado.

6.3.2.3 Medidas de Espectro dos Sinais OFDM

As curvas de SNR obtidas nos testes são mostradas na [Figura 61](#). Os resultados mostram que a rede BPL tem melhor desempenho na linha MV quando operando na banda de 30 MHz. Além disso, os valores mínimos de SNR das curvas são superiores aos encontrados no modo 10 MHz, indicando que o espectro não apresenta nullos significativos nos trechos desta linha.

6.3.2.4 Medidas de Tempo de Resposta

O tempo de resposta medido utilizando o comando *PING* é mostrado na [Figura 62](#). Observa-se que os tempos de respostas médio neste cenário são menores do que os registrados no modo 1. Isso indica, mais uma vez, o bom desempenho da rede PLC operando com banda de 30 MHz na linha MV.

6.3.2.5 Medidas de Latência e *Jitter*

Os objetivos dos testes de Latência e *Jitter* são avaliar o tempo de propagação do sinal PLC na rede e o mecanismo de acesso ao canal, onde um quadro Ethernet é transmitido do modem CPE com destino ao nó HE e retorna ao CPE. Este teste visa avaliar o chamado *round-trip time (RTT)* entre o CPE e HE. Vale lembrar que alta latência na rede pode degradar os serviços de tempo real e também as aplicações cliente-servidor tais como sistemas de monitoramento de automação.

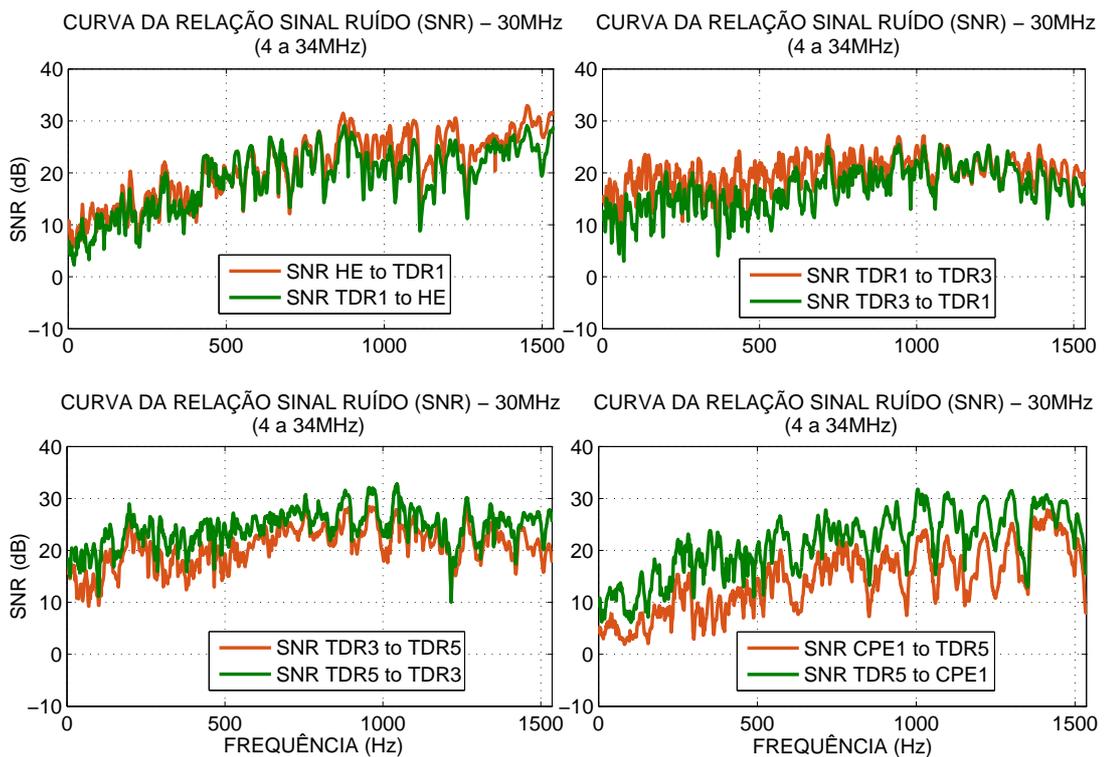


Figura 61 – Curvas de SNR obtidas no modo de operação com largura de banda de 30 MHz.

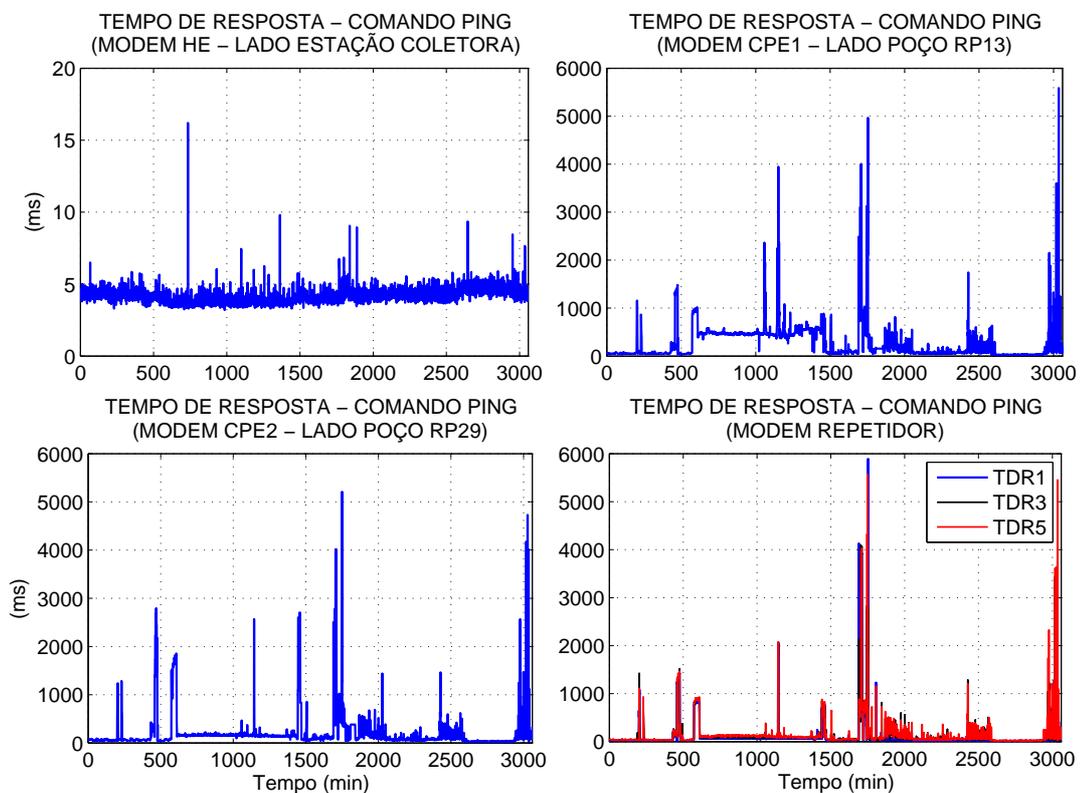


Figura 62 – Tempo de resposta obtido com o comando PING no modo de operação com largura de banda de 30 MHz.

De modo similar, a variação da latência entre quadros Ethernet e *jitter*) também causam sérios problemas com serviços *real-time*.

O procedimento para executar os testes segue a recomendação do padrão RFC-2544. Primeiro, o instrumento avalia as condições de *throughput* da rede para garantir que não ocorrerá descartes de pacotes. O objetivo é preencher completamente os *buffers* dos dispositivos PLC, garantindo que a medição da latência da rede seja feita sob condições de estresse. Isto é feito enviando pacotes ao Refletor com tamanhos de quadro variados (de 64 a 1528) até que se obtenha as condições ideais. Em seguida, o instrumento *Metro Scope Fluke* inicia os testes enviando informações de tráfego ao Refletor durante 120 segundos e no meio da transmissão, um quadro é marcado com o *time-stamp*. Quando este quadro é recebido de volta ao *Metro Scope Fluke* a latência é medida. A transmissão continua até o final do período.

A Figura 63 mostra a latência medida na rede, sendo que uma latência próxima a 2.8 s para quadros de 512 *bytes* é considerada alta para aplicações de tempo real e cliente-servidor. Como a aplicação de vídeo envia o tráfego num único sentido CPE1- >HE, o serviço de vídeo do poço RP13 se manteve normal, incluindo o envio de comandos de movimentação para a camera no sentido oposto (HE- >CPE1). Desta forma, conclui-se que a latência da rede PLC não interfere nas aplicações de automação por essa não ser sensível a latências. Parâmetros de QoS podem ser configurados nos modems para atenuar os efeitos de atrasos, e será investigado em trabalhos futuros.

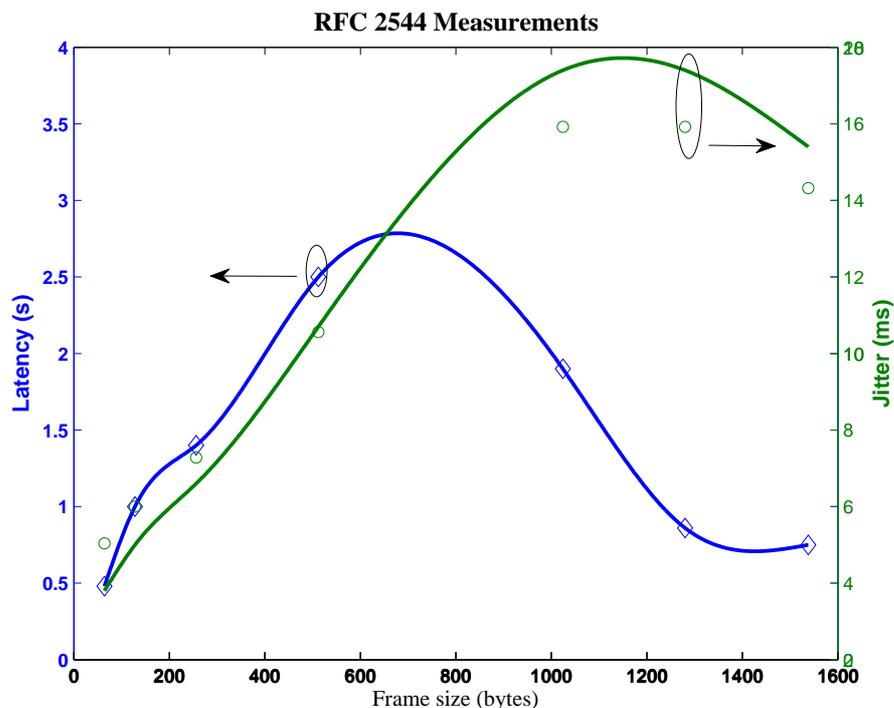


Figura 63 – Valores de Latência e *Jitter* da rede PLC medidos de acordo com a RFC-2544.

A Figura 63 também mostra o *jitter* como uma medida complementar. Variações excessivas da latência podem causar falhas em serviços de tempo real como *stream* de vídeo, onde são observadas imagens *pixelated*. Um valor de *jitter* próximo a 16 ms mostrado na Figura 63 não representa problemas para a comunicação via a rede elétrica experimentada.

6.3.2.6 Medida de Taxa de Erro

Para que um teste de taxa de erro seja executado conforme RFC-2544, é necessário a transmissão de um padrão específico através de quadros de dados padronizados e customizados num formato específico de *frame* e taxa de bit. O *payload* dos quadros recebidos são analisados em detalhes para detectar e monitorar erros. Assim o principal objetivo deste teste é identificar qualquer falha na rede PLC que possa provocar erros na transmissão de dados. O instrumento RFC-2544 inicia enviando ao Refletor um quadro contendo uma palavra padrão específica como *payload* e a compara com os dados contidos nos quadros recebidos. Os bits errados são quantificados e uma taxa de erro de bit é calculada. Este procedimento é repetido para cada tamanho de frame.

A Figura 64 mostra o resultado para quadros de tamanho 64, 128, 256, 512, 1024, 1280 e 1518 bytes. É possível verificar na Figura 64 que valores aceitáveis de taxa de erro de bits ocorrem em quadros largos, sem no entanto afetar a comunicação dos dados BNPLC e BPL transportados na rede elétrica de média tensão.

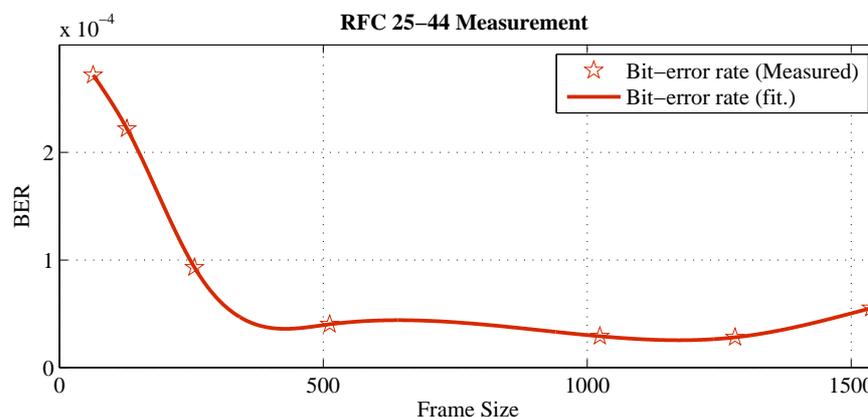


Figura 64 – Valores de taxa de erro de bits medidos na rede PLC, através do instrumento Metro Scope Fluke.

6.4 Comentários Finais

Os trabalhos e resultados apresentados anteriormente mostraram a eficácia da metodologia *SmartMethPLC* na elaboração de projetos de sistemas PLC sobre redes elétricas

de média tensão. A sequência de atividades proposta, somada a definição dos pontos de interesse que devem ser analisados no projeto, permitem ao projetista desenvolver soluções para transporte de informações utilizando a rede elétrica de média tensão como canal de comunicação, de maneira simplificada, segura e reduzindo as incertezas que tornam o projeto mais custoso e demorado.

7 CONCLUSÕES

Uma metodologia de aplicação da tecnologia de comunicação via rede elétrica de média tensão foi apresentada, desenvolvida e validada neste trabalho. Denominada de *SmartMethPLC* esta tem como objetivo principal o projeto e a implantação da tecnologia PLC para rede MV como meio de transporte de dados de automação e videomonitoramento ou qualquer outro tipo de dado proveniente das futuras redes inteligentes *Smart Grid*.

Para tal, testes de comunicação foram realizados utilizando equipamentos PLC com capacidade de 205 Mbps em uma rede MV (1.63 km) de 1,63 km da PETROBRAS, localizada em São Mateus-ES e usada para extração de petróleo em terra. Dados de automação largura de banda estreita (NBPLC) e vídeo com banda larga (BPL) gerados em poços de extração de petróleo foram transportados nesta rede até uma estação coletora para avaliação de *throughput*, taxa de transferência, tempo de resposta e resposta em frequência.

Os resultados obtidos mostraram a viabilidade técnica do uso da tecnologia PLC como solução alternativa às tecnologias atualmente existentes (fibra, rádio) na transmissão de dados para aplicações de automação industrial e videomonitoramento de poços de produção de petróleo *onshore*. O projeto de rede utilizando a *SmartMethPLC* mostrou-se tecnicamente viável, mediante a avaliação feita sobre o estudo de caso na rede supracitada. O conceito do projeto baseou-se na interligação de redes *Smart Grid*, onde a penetração em larga escala e a medição remota são princípios fundamentais para o ganho esperado.

Em conclusão, constatou-se que aliado ao bom projeto de rede delineado pela metodologia proposta está a robustez dos equipamentos PLC empregados, designada pela máscara de espectro e o esquema adaptativo de mapeamento de bits suportados pela técnica de modulação de multiportadora OFDM implementada nos equipamentos. Ambas as funcionalidades são essenciais para maximizar a capacidade do canal e, portanto, garantir um *throughput* mínimo para o transporte dos tipos de dados abordados.

Como trabalho futuro, propõe-se uma investigação mais apurada sobre a funcionalidade de QoS e priorização de acesso, já disponíveis nos equipamentos BPL, para combater ou mesmo minimizar a latência, cujos resultados preliminares executados no âmbito desta Dissertação, mostraram-se sensíveis em aplicações como vídeo em tempo real ou cliente-servidor com baixo tempo de resposta. Além disso, atualizações na *SmartMethPLC* serão necessárias para quantificar o impacto da latência quando extensões de rede e/ou atualizações de topologia se fizerem presentes.

Referências

- AHOLA, J. *Applicability of Power-Line Communications to Data Transfer of On-Line Condition Monitoring of Electrical Drives* — Lappeenranta University of Technology, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 157, Finlândia, Agosto 2003. Citado na página 29.
- ANATEL. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br>>. Citado na página 24.
- ANATORY, J.; THEETHAY, N. *Broadband Power-line Communication Systems - Theory & Applications*. 25 Bridge Street, Billerica, MA 01821, USA: WIT Press, 2010. ISBN 978-1-84564-416-1. Citado 10 vezes nas páginas 22, 23, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 37 e 84.
- ANATORY, J. et al. Broadband power line communications: The factors influencing wave propagations in the medium voltage lines. *IEEE*, 2012. Citado na página 32.
- ANEEL. Agência nacional de energia elétrica. Informações técnicas para consumidores. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/index.cfm>. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- CARCELLE, X. *Power Line Communications in Practice*. Boston, London: Artech House, 2006. ISBN 978-1-59693-335-4. Citado 5 vezes nas páginas 22, 28, 35, 41 e 95.
- CASTOR, L. R. M. et al. Aplicação da tecnologia de comunicação de dados via rede elétrica para automação de poços de petróleo onshore usando a rede de média tensão. *16º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica*, Agosto 2014. Citado 3 vezes nas páginas 83, 92 e 97.
- CASTOR, L. R. M. et al. Experimental investigation of broadband power line communication modems for onshore oil & gas industry: A preliminary analysis. *18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Abril 2014. Citado 5 vezes nas páginas 28, 29, 30, 35 e 42.
- CASTOR, L. R. M.; SILVA, J. A.; SEGATTO, M. E. V. Medium voltage overhead power-line as a smart distribution grid for onshore oil & gas industries automation and broadband data transport. *18th IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Outubro 2015. Citado 6 vezes nas páginas 28, 35, 42, 75, 83 e 84.
- CENELEC. European committee for standardization. Norma Européia para PLC. Disponível em <http://www.cen.eu/Pages/default.aspx>. 2015. Citado na página 30.
- CLAYTON, R. P. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons Ltd, 2008. ISBN 978-0-470-13154-1. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 95.
- CORINEX. User guide. Manual Técnico do modem CXP-HDA-GWYC. 2014. Citado 12 vezes nas páginas 23, 24, 30, 35, 36, 37, 38, 54, 75, 79, 81 e 83.
- DOSTERT, K. *Powerline Communications*. Freiburger, Germany: Prentice Hall, Inc., 2001. ISBN 3-7723-4423-2. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 95.

DOSTERT, K. Possibilities and limitations of using electrical power distribution grids for communication purposes - from an european point of view. Material apresentado pelo Prof. Dr. Klaus Dostert em um Workshop da ANEEL em Brasília. 2007. Citado na página 31.

GÖTZ, M.; RAPP, M.; DOSTERT, K. Power line channel characteristics and their effect on communication system design. *IEEE Communications Magazine*, Abril 2004. Citado na página 22.

HOMEPLUG. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.homeplug.org/alliance/alliance-overview/>>. Citado na página 23.

HRASNICA, H.; HAIDINE, A.; LEHNERT, R. *Broadband Power-line Communication Systems - Network Design*. West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley and Sons Ltd, 2004. ISBN 0-470-85741-2. Citado 4 vezes nas páginas 23, 28, 32 e 35.

IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY. *IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications*. [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/findstds/standard/1901-2010.html>>. Citado 6 vezes nas páginas 23, 30, 35, 36, 37 e 47.

IEEE COMPUTER SOCIETY. *IEEE Standard 802.11 - 2012 / Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. [S.l.], 2012. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf>>. Citado na página 21.

IEEE COMPUTER SOCIETY. *IEEE Standard for Ethernet - Amendment 3: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 40 Gb/s and 100 Gb/s Operation over Fiber Optic Cables*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.3bm-2015.html>>. Citado na página 21.

IETF NETWORK WORKING GROUP. *Benchmarking Metodology for Network Interconnect Devices*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://tools.ietf.org/pdf/rfc2544.pdf>>. Citado na página 79.

KLENNER, P. Communications technology laboratory, the ofdm multi carrier system. Notas de aula não publicadas. Disponível em <http://www.ant.uni-bremen.de/whomes/klenner/>. 2004. Citado na página 22.

LYS, S. G. e T. Next generation narrowband (under 500 khz power line communications (plc) standards. *Smart Grid Communications*, Março 2015. Citado 4 vezes nas páginas 35, 39, 40 e 41.

PAPADOPOULOS ANDREAS I. CHRYSOCHOS, G. K. P. T. A. Narrowband power line communication: Medium voltage cable modeling and laboratory experimental results. *International Journal by ELSIEVER*, Abril 2013. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 39.

PAPADOPOULOS, T. A. et al. Application of narrowband power-line communication in medium-voltage smart distribution grids. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, v. 28, p. 981-988, Abril 2013. Citado na página 35.

PAVLIDOU, N. et al. Power line communications: State of the art and future trends. *IEEE Communications Magazine*, Abril 2003. Citado na página 29.

PETROBRAS. *Aplicação da Tecnologia Broadband Powerline Communication para Transmissão de Dados de Automação, Supervisão e Vídeo em Poços de Petróleo On Shore*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www.labtel.ele.ufes.br>>. Citado 2 vezes nas páginas 92 e 97.

SILVA, J. A. L. *ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA OFDM PARA COMUNICAÇÃO VIA REDE ELÉTRICA* — UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, Vitória, Espírito Santo - Brasil, Abril 2006. Citado 6 vezes nas páginas 21, 22, 28, 29, 35 e 37.

SILVA, J. L. et al. Técnica ofdm aplicada a power line communications. *II Citenel.*, v. 2, p. 1071–1074, Novembro 2003. Citado na página 22.

SOUKAL, F. H. e P. A proposed broadband power line communication system for smart grid applications in a typical egyptian network. *17th Telecommunications forum TELFOR*, Novembro 2009. Citado 3 vezes nas páginas 31, 35 e 39.

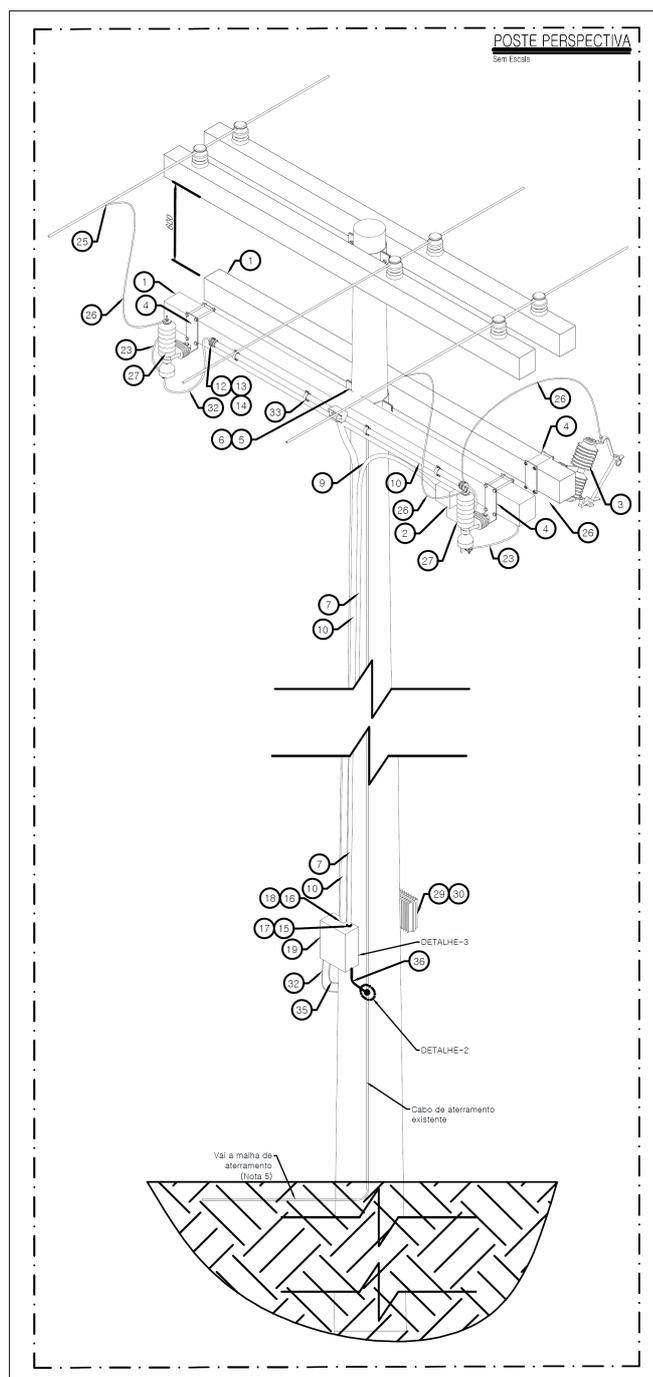
TANENBAUM, D. J. W. A. S. *Redes de Computadores Quinta edicao*. Sao Paulo, Brasil: Pearson Education - Br, 2011. ISBN 9788576059240. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 77.

TENGDIN, J. Distribution line carrier communications - an historical perspective. *IEEE Trans. Power Delivery*, p. 321 – 326, 1998. Citado na página 29.

Anexos

ANEXO A – Detalhes da instalação dos Modems PLC na rede MV da PETROBRAS

Figura 65 – Detalhes da instalação dos modems BPL (Rede MV PETROBRAS).



Fonte: Própria

Figura 66 – Lista de Materiais.

ITEM	DESCRIÇÃO
1	Cruzeta de Madeira 90 x 115 x 2400mm
2	Transformador potencial (13800/ $\sqrt{3}$) / 115V - 400 VA
3	Chave Seccionadora Elo Fusível Classe 15kV-100 A
4	Suporte "L" Fixação de Chave Fusível e Para Raios com parafusos
5	Sela para cruzeta em aço carbono
6	CINTA CIRCULAR diametro 190 mm em aço carbono
7	Eletroduto Rígido PVC Antichama 3/4" x 3000mm de comprimento.
8	Caixa de Ligação "Condutele tipo C" 3/4" , com corpo e Tampa em liga de Alumínio Silício de alta resistência mecânica e à corrosão.
9	Eletroduto flexível corrugado 3/4" x 1000mm de comprimento, fornecido com conector macho fixo e um macho giratório montado nas extremidades.
10	Eletroduto Rígido PVC Antichama 1" x 3000mm de comprimento.
11	Caixa de Ligação "Condutele tipo T" 1" , com corpo e Tampa em liga de Alumínio Silício de alta resistência mecânica e à corrosão.
12	Luva roscavel em PVC 1"
13	Bucha de redução em PVC de 1" para 3/8"
14	Prensa Cabo fabricado em Nylon-6 (Poliamida-6), com grau de proteção IP-68. Com rosca BSP 1/2" para cabos diametro 5 a 10mm.
15	Arruela de acabamento em PVC 3/4"
16	Arruela de acabamento em PVC 1"
17	Bucha de acabamento em PVC 3/4"
18	Bucha de acabamento em PVC 1"
19	Caixa hermética em termoplástico, dimensões 234 X 174 X 90 mm, fabricada em material Termo-Plástico auto-extinguível grau de proteção IP56. Fab.: HYPERSAT
20	Triho padrãoDIN para disjuntores comprimento de 60 mm
21	Disjuntor termomagnético monoppolar padrão DIN, In: 1A corrente de ruptura 5kA
22	Dispositivo de Proteção de Surto de Tensão DPS, máxima tensão de operação 275 V e Corrente máxima de descarga, onda 8/20 μ s Imáx 12kA
23	Fio de cobre nú seção 35mm ²
24	Conector de derivação tipo Split Bolt
25	Conector média tensão (Ver com Ricardo)
26	Fio de cobre Isolação Classe 1kV seção 25mm ²
27	Conjunto Acoplador aéreo de Média Tensão (Corinex)
28	Acopaldor Diferencial (Corinex)
29	Filtro de Entrada Modem (Corinex)
30	Modem para média tensão (Corinex)
31	Suporte para Painel e Modem a desenvolver.
32	Cabo coaxial RG 6 90% malha
33	Braçadeira circular tipo copo fornecida com parafuso rosca suberba para eletroduto 1".
34	Cabo múltiplo 1x2c#2,5mm ² classe de encordoamento 5 isolação 1kV
35	Cabo múltiplo 1x3c#1,5mm ² classe de encordoamento 5 isolação 1kV
36	Cabo singelo 1x1c#4,0mm ² classe de encordoamento 5 isolação 1 kV na cor verde

ANEXO B – Detalhes dos testes realizados na PETROBRAS, em bancada

Foram realizados alguns testes em bancada afim de verificar as condições de energização dos modems, configuração e *start-up*, alinhamento de canal (PLC) e por fim, transmissão de dados entre eles. O resultado esperado ao final dos testes era estabelecer um canal de comunicação de dados entre dois PCs, ambos conectados ao HE e CPE, a uma velocidade acima de 40 Mbps, o que foi alcançado com sucesso. A [Figura 67](#) mostra o *setup* criado no laboratório da PETROBRAS, em São Mateus/ES.

Figura 67 – *Setup* montado em bancada na PETROBRAS



Fonte: Própria