

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MATHIAS RODRIGUES DA LUZ**

**ESTUDO DO USO DE COMUNICAÇÃO ATRAVÉS DE LINHA DE  
ENERGIA PARA SISTEMA DE MONITORAMENTO DE POÇOS DE  
PETRÓLEO SUBAQUÁTICOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2019**

**MATHIAS RODRIGUES DA LUZ**

**ESTUDO DO USO DE COMUNICAÇÃO ATRAVÉS DE LINHA DE  
ENERGIA PARA SISTEMA DE MONITORAMENTO DE POÇOS DE  
PETRÓLEO SUBAQUÁTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Mezzadri

**PONTA GROSSA**

**2019**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**ESTUDO DO USO DE COMUNICAÇÃO ATRAVÉS DE LINHA DE ENERGIA PARA  
SISTEMA DE MONITORAMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO SUBAQUÁTICOS**

por

**MATHIAS RODRIGUES DA LUZ**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 5 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Felipe Mezzadri  
Orientador

Prof. Dr. Frederic Conrad Janzen  
Membro Titular

Prof. Dr. Murilo Oliveira Leme  
Membro Titular

Prof. Dr. Josmar Ivanqui  
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Sérgio Okida  
Coordenador do Curso

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Felipe Mezzadri, pela orientação, conselhos, apoio, paciência, dedicação e confiança para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso e também pela amizade que foi construída ao longo desse ano.

A minha família, pelo carinho, incentivo e total apoio em todos os momentos da minha vida.

À Marcela, minha namorada e companheira, por todo o carinho, compreensão e suporte nos momentos difíceis.

A todos os professores que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho e principalmente pelo conhecimento passado durante minha graduação.

A todos os colegas, especialmente ao Wladimir Ortiz pelo auxílio em diversos ensaios, pois sem ele este trabalho não seria possível.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pelo apoio financeiro e pelo espaço utilizado para a realização dos ensaios experimentais.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

LUZ, Mathias Rodrigues da. **Estudo do uso de comunicação através de linha de energia para sistema de monitoramento de poços de petróleo subaquáticos.** 2019. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

O monitoramento de operações em poços de petróleo subaquáticos é essencial para a preservação da vida marinha e segurança ambiental, além de auxiliar na otimização da produção por meio do gerenciamento do reservatório, de modo que novas tecnologias de sensoriamento sejam desenvolvidas. Este trabalho apresenta um estudo da viabilidade da utilização da comunicação via linhas de energia (PLC) nos processos de monitoramento contínuo de poços de petróleo subaquáticos para a transmissão dos dados obtidos por sensores ópticos instalados nos poços sem a necessidade de instalação de novas fiações subaquáticas, tendo em vista as dificuldades dessas instalações. O estudo foi realizado por meio de ensaios, simulando condições específicas baseadas nas circunstâncias da região de localização dos poços e variando configurações como características da linha de transmissão, modelos de *modems*, AV1 e AV2, de banda larga através de linhas de energia (BPL) e protocolo de transporte de dados do modelo OSI (TCP e UDP). Os resultados apresentaram taxas de transmissão na ordem de 10 MBps, altas quando comparadas às outras formas de transmissão de dados por fiação elétrica, indicando a possibilidade da utilização de PLC para a aplicação de transmissão de dados de sensoriamento óptico para o monitoramento poços de petróleo subaquáticos.

**Palavras-chave:** Monitoramento. Petróleo. PLC. BPL.

## ABSTRACT

LUZ, Mathias Rodrigues da. **Study of the use of power line communication for underwater oil wells monitoring system**. 2019. 71 p. Final Coursework (Bachelor's Degree in Electrical engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Monitoring of underwater oil wells operations is essential for the preservation of marine life and environmental safety, as well as assisting in optimizing production through reservoir management so that new sensing technologies are developed. This paper presents a study of the feasibility of using power line communication (PLC) in continuous monitoring processes of underwater oil wells for the transmission of data obtained by optical sensors installed in the wells without the need for new underwater wiring, owing to the difficulties of such installations. The study was conducted through tests simulating specific conditions based on the circumstances of the location of the wells and varying configurations such as transmission line characteristics, models, AV1 and AV2, of broadband over power lines modems (BPL) and OSI transport protocol (TCP and UDP). The results showed 10 MBps transmission rates, high when compared to other forms of data transmission by electrical wiring, indicating the possibility of using PLC for the application of optical sensing data transmission in underwater oil wells monitoring.

**Keywords:** Monitoring. Oil. PLC. BPL.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção e consumo de petróleo no mundo. . . . .	17
Figura 2 – Profundidade dos poços de petróleo brasileiros. . . . .	18
Figura 3 – Sistema de extração de petróleo subaquático . . . . .	19
Figura 4 – Centro de poços subaquáticos. . . . .	20
Figura 5 – Duas árvores de natal molhadas produzidas pela TechnipFMC. . . . .	21
Figura 6 – Desempenho do par de cabos flexíveis como linha de transmissão de dados. . . . .	23
Figura 7 – Multiplexação por divisão de frequências. . . . .	25
Figura 8 – Interface do programa JPerf. . . . .	30
Figura 9 – Interface do programa SDR Console. . . . .	32
Figura 10 – <i>Modems</i> PLC da marca TPLink. a) Par de <i>modems</i> AV1 - TL-WPA4220 - Kit AV600. b) Par de <i>modems</i> AV2 - TL-PA7020 - Kit AV1000. . . . .	34
Figura 11 – Configuração utilizada no ensaio. . . . .	35
Figura 12 – Modos de operação do programa JPerf. . . . .	35
Figura 13 – Opções da camada de aplicação do modelo OSI no JPerf. . . . .	36
Figura 14 – Opções da camada de transporte do modelo OSI no JPerf. . . . .	37
Figura 15 – Diagrama de blocos de <i>modems</i> PLC apresentado pela Mouser Electronics. . . . .	40
Figura 16 – Diagrama de parte do circuito elétrico do <i>modem</i> modelo TL-PA7020 feito no programa Proteus. . . . .	41
Figura 17 – Diagrama elétrico com a separação dos circuitos de alimentação e de dados. . . . .	41
Figura 18 – Circuito do <i>modem</i> modelo TL-PA7020 padrão AV2. a) Face frontal da placa. b) Aproximação na trilha rompida na face frontal. . . . .	42
Figura 19 – Circuito do <i>modem</i> modelo TL-PA7020 padrão AV2. a) Face traseira da placa. b) Aproximação na trilha rompida na face traseira. . . . .	43
Figura 20 – Configuração do ensaio com transmissão por circuito de dados isolado do circuito de alimentação. . . . .	44
Figura 21 – Estabilidade de comunicação. . . . .	45
Figura 22 – Configuração do ensaio com medições utilizando o dispositivo SDR. . . . .	46
Figura 23 – <i>Dongle</i> DVB-T+DAB+FM utilizado para a medição do sinal de rádio-frequência da comunicação PLC. . . . .	46
Figura 24 – Interface do programa SDR Console mostrando o fim da banda de frequência do PLC modelo TL-PA7020 padrão AV2 em 86,12 MHz. . . . .	48
Figura 25 – Interface do programa SDR Console. a) Sinal RF durante a transmissão de dados. b) Sinal RF ao encerrar a transmissão de dados. . . . .	48
Figura 26 – Configuração do ensaio com transmissão por um único cabo. . . . .	49
Figura 27 – Configuração do ensaio com transmissão por um cabo e aterramento. . . . .	50
Figura 28 – Resultado da transmissão em ambiente externo com protocolo TCP - Interface JPerf. . . . .	51
Figura 29 – Modelo de circuito elétrico para cálculo de queda de tensão. . . . .	53
Figura 30 – Configuração dos ensaios de variação de comprimento do cabo utilizado como linha de transmissão. . . . .	53

Figura 31 – Variação de velocidade em função do comprimento do cabo 1,5 mm <sup>2</sup> .	54
Figura 32 – Variação de velocidade em função do comprimento do cabo 2,5 mm <sup>2</sup> .	55
Figura 33 – Configuração do ensaio com variações de temperatura com banho térmico. . . . .	56
Figura 34 – Influência da variação de temperatura na velocidade de transmissão.	57
Figura 35 – Configuração do ensaio de comunicação <i>Back-to-Back</i> . . . . .	58
Figura 36 – Configuração do ensaio de transmissão em paralelo. . . . .	60
Figura 37 – Transmissões paralelas dos dois pares de <i>modems</i> e a soma das duas transmissões (em verde). Par 1 em azul e par 2 em vermelho.	61
Figura 38 – Comparativo entre a soma das transmissões paralelas (em azul) e uma transmissão usando um único par de <i>modems</i> (em vermelho).	61
Figura 39 – Configuração do ensaio com transmissão paralela em ambiente externo utilizando um cabo e o aterramento como sistema de transmissão. . . . .	62
Figura 40 – Comparativo entre a soma das transmissões paralelas (em vermelho) e uma transmissão usando um único par de <i>modems</i> (em azul).	63
Figura 41 – Transmissão de um único par (par 2) utilizando toda a banda até os 10 segundos de transmissão, quando é iniciada a transmissão do outro par (par 1) simultaneamente. . . . .	64
Figura 42 – Transmissão do par 1 disputando a banda com o par 2 até os 20 segundos de transmissão, quando é finalizada a transmissão do outro par (par 2), de modo que o par 1 utiliza toda a banda. . . . .	64



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequências de operação - PLC. . . . .	26
Tabela 2 – Nomenclaturas das faixas de frequências. . . . .	26
Tabela 3 – Histórico HomePlug X Taxa de dados. . . . .	27
Tabela 4 – Taxas médias de transmissão. . . . .	38
Tabela 5 – Médias das porcentagens de datagramas perdidos nas transmissões realizadas utilizando o protocolo UDP. . . . .	39
Tabela 6 – Comparativo das médias das velocidades de transmissão com a variação de comprimento dos cabos de 1,5 mm <sup>2</sup> e 2,5 mm <sup>2</sup> . . . . .	55

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### SIGLAS

ANM	Árvore de Natal Molhada
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASI	<i>Actuator Sensor Interface</i>
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
DAS	<i>Distributed Acoustic Sensor - Sensores Acústicos Distribuídos</i>
DTS	<i>Distributed Temperature Sensor - Sensores Distribuídos de Temperatura</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing - Multiplexação por Divisão de Frequências</i>
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading - Unidade Flutuante de Armazenamento e Transferência</i>
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i>
HTHP	<i>High Temperature and High Pressure - Alta Temperatura e Alta Pressão</i>
IEA	<i>International Energy Agency - Agência Internacional de Energia</i>
IP	<i>Internet Protocol - Protocolo de Internet</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization - Organização Internacional de Normalização</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
PLC	<i>Power Line Communication - Comunicação via Linhas de Energia</i>
PVC	<i>Polyvinyl Chloride - Policloreto de Vinila</i>
RF	Rádiofrequência
ROV	<i>Remotely Operated Underwater Vehicle - Veículo Submarino Operado Remotamente</i>
SDR	<i>Software Defined Radio - Rádio Definido por Software</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol - Protocolo de Controle de Transmissão</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol - Protocolo de Datagrama de Usuário</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair - Par Trançado Não Blindado</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	PROBLEMA	13
1.2	HIPÓTESE	13
1.3	OBJETIVOS	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
1.4	JUSTIFICATIVA	15
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
2.1	SETOR PETROLÍFERO BRASILEIRO	17
2.1.1	Região de Localização dos Poços de Petróleo	18
2.1.2	Equipamentos de Sistemas Submarinos	19
2.2	MONITORAMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO SUBAQUÁTICOS	21
2.3	SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE POÇOS COM SENSORES ÓPTICOS	22
2.4	LINHAS DE TRANSMISSÃO	22
2.5	COMUNICAÇÃO VIA LINHAS DE ENERGIA	24
2.5.1	Funcionamento	24
2.5.1.1	Multiplexação por Divisão de Frequências	25
2.5.2	Classificação de sistemas de Comunicação via linhas de energia	25
2.5.3	Espectro de Rádiofrequências no Brasil	26
2.5.4	Normas e Padrões	26
2.5.4.1	Padrão IEEE 1901	27
2.5.4.2	HomePlug AV1	27
2.5.4.3	HomePlug AV2	28
2.6	PROTOCOLOS DE TRANSPORTE DO MODELO OSI	28
2.6.1	Protocolo TCP	28
2.6.2	Protocolo UDP	29
2.7	PROGRAMA JPERF	29
2.8	RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE	31
2.8.1	Programa SDR Console	31
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>33</b>
3.1	COMPARATIVO ENTRE OS PADRÕES AV1 E AV2 DE <i>MODEMS</i> PLC	34
3.1.1	Resultados do Comparativo dos Padrões PLC	38
3.2	SEPARAÇÃO DOS CIRCUITOS DE ALIMENTAÇÃO E DE DADOS	39
3.3	ENSAIO DE ESTABILIDADE DE COMUNICAÇÃO	44
3.4	MEDIÇÃO DOS SINAIS TRANSMITIDOS	45
3.4.1	Análise dos Sinais Recebidos	47
3.5	LINHA DE TRANSMISSÃO COMPOSTA POR UM ÚNICO CABO	49
3.5.1	Linha de Transmissão com um Cabo e Sistema de Aterramento	50
3.5.2	Ensaio dos Impactos da Variação de Comprimento dos Cabos na Velocidade de Transmissão	52

3.5.2.1	Resultados dos Ensaio dos Impactos da Variação de Comprimento dos Cabos na Velocidade de Transmissão . . . . .	54
3.5.3	Ensaio dos Impactos da Variação da Temperatura dos Cabos na Velocidade de Transmissão . . . . .	56
3.5.3.1	Resultados do Ensaio dos Impactos da Variação da Temperatura dos Cabos na Velocidade de Transmissão . . . . .	57
3.6	TENTATIVA DE MELHORIA DA TAXA DE TRANSMISSÃO . . . . .	58
3.6.1	Comunicação Back-to-Back . . . . .	58
3.6.1.1	Resultados Obtidos com a Comunicação Costa-a-Costa . . . . .	59
3.6.2	Comunicação Paralela . . . . .	59
3.6.2.1	Resultados Obtidos com a Comunicação Paralela . . . . .	60
3.6.3	Ensaio com Transmissão Paralela em Ambiente Externo Utilizando um Cabo e o Aterramento como Sistema de Transmissão . . . . .	62
3.6.3.1	Análise dos Resultados Obtidos . . . . .	63
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS . . . . .</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS . . . . .</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor de extração de petróleo pode ser dividido em duas modalidades de atividades: na terra (*onshore*) e no mar (*offshore*). Ambas necessitam de monitoramento de suas condições para garantir segurança e evitar problemas ambientais, como vazamentos de petróleo ou gás para o ambiente (BERGE, 2017). Berge (2017) apresenta algumas formas de monitoramento da integridade dos poços, incluindo técnicas de monitoramento contínuo, como: sensores acústicos; sensores de pressão e; sensores de temperatura dentro dos poços; além de sensores ópticos; químicos e; biológicos fora dos poços para a vigilância de vazamentos subaquáticos.

O monitoramento dos poços é necessário para acompanhar sua integridade de forma a prevenir rupturas que podem levar a vazamentos de petróleo e gás. Para isso, informações como pressão e temperatura devem ser monitoradas dentro dos poços de forma contínua (BERGE, 2017). As consequências de vazamentos de petróleo para o ambiente incluem prejuízos à vida marinha e animal, além da liberação de gases de efeito estufa que podem vir a causar impactos climáticos (BERGE, 2017). No caso de vazamentos de gás podem ocorrer explosões (BERGE, 2017). Além disso, o monitoramento possibilita a otimização da produção e é essencial para o gerenciamento do reservatório (ARANTES, 2018).

Existem normas e padrões relacionados ao setor petrolífero com o objetivo de regular as atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural, incluindo a construção de plataformas e poços subaquáticos (BERGE, 2017). No Brasil, a lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997 (LEI Nº 9.478, 1997), instituiu a criação do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), responsáveis por, entre outras atividades, fiscalizar os processos de extração de petróleo visando a preservação do meio ambiente e a segurança industrial e da população.

Tendo em vista a necessidade de monitoramento das condições dos poços de petróleo subaquáticos e considerando a existência de cabos de fibra óptica instalados como elementos sensores nos poços para a utilização como Sensores Distribuídos de Temperatura (*Distributed Temperature Sensor - Sensores Distribuídos de Temperatura* (DTS)) e Sensores Acústicos Distribuídos (*Distributed Acoustic Sensor - Sensores*

*Acústicos Distribuídos* (DAS)) que geram alta quantidade de dados com informações da integridade dos poços, como apresenta Berge (2017), é necessária a definição de um meio de transmissão dos dados obtidos por estes sensores para as plataformas petrolíferas, visto que essas fibras são utilizadas apenas para sensoriamento e não para telecomunicação. Este meio de transmissão precisa apresentar uma alta taxa de transferência, na ordem de 10MBps (Megabytes por segundo), de modo a ser capaz de transmitir, em pouco tempo, a grande quantidade de dados provenientes dos sensores, para que assim o monitoramento seja contínuo e em tempo real (BERGE, 2017).

As instalações subaquáticas apresentam algumas limitações quanto aos sistemas de alimentação elétrica e comunicação, tornando difícil a adição de cabos específicos para a transmissão dos dados de monitoramento das condições (WEBER, 2018).

Conforme apresentado em (PETROBRAS, 2015), um conjunto de válvulas operadas remotamente que controlam o fluxo dos fluidos produzidos ou injetados no poço, é definido como *Árvore de Natal Molhada* (ANM). Entre a ANM e a cabeça do poço, equipamento localizado sobre o poço de petróleo em que se encontram as bombas responsáveis pela extração dos fluidos do poço, existe um único cabo de energia elétrica

## 1.1 PROBLEMA

Por se tratar de um processo indispensável para o setor petrolífero, o monitoramento dos poços deve ser feito independentemente das dificuldades encontradas no ambiente hostil (WEBER, 2018). Deste modo é possível elevar uma questão problema, servindo de norte para esta pesquisa: como transportar os dados de sensores ópticos instalados em poços de petróleo subaquáticos para a plataforma petrolífera sem a adição de cabos específicos para a transmissão de dados?

## 1.2 HIPÓTESE

Este trabalho tem como premissa transmitir os dados dos sensores ópticos de monitoramento dos poços por meio do cabo de alimentação da cabeça do poço que

sai da ANM, utilizando tecnologias de transmissão de dados via linhas de energia. A tecnologia de comunicação via linhas de energia (*Power Line Communication - Comunicação via Linhas de Energia* (PLC)) permite a transmissão de dados por meio da fiação elétrica previamente instalada (HELD, 2006), de forma que não seria necessária a instalação de novas fiações aquáticas.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade da utilização da tecnologia de comunicação de dados via linhas de energia para a aplicação em poços de petróleo subaquáticos, considerando as condições específicas da região de instalação destes e das instalações já existentes, como é o caso da fiação elétrica única.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Comparar os padrões de *modem* de banda larga através de linhas de energia (AV1 e AV2);
- Isolar o circuito de dados do circuito de alimentação;
- Analisar o espectro de frequência com Rádio Definido por Software (SDR);
- Realizar ensaios simulando as condições elétricas encontradas nas instalações subaquáticas;
- Definir o protocolo de transporte de dados do modelo OSI (TCP e UDP) mais adequado;
- Analisar os impactos da variação das características dos condutores;
- Analisar os impactos de sobretemperatura nos cabos de transmissão;
- Avaliar topologias de comunicação que aumentem as taxas de transmissão.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de um sistema de transmissão de dados de sensores ópticos por meio da rede elétrica, para o monitoramento de poços de petróleo, possibilitará a comunicação entre os equipamentos de medição com sensores ópticos por meio da estrutura já existente nos poços, sem a adição de novos meios de comunicação.

Outro fator importante que motivou a realização deste trabalho foi a redução de custos, que seria gerada para as empresas petrolíferas com a instalação do sistema como um todo, visto que reduziria os custos de instalações de novas fiações.

Entre as formas de comunicação via cabos de alimentação existentes, a PLC se destaca principalmente pelas velocidades obtidas, na ordem de MBps, visto que é um tipo de comunicação que pode ser utilizado até mesmo para a utilização com a *internet* banda larga. Outras alternativas seriam os protocolos *Highway Addressable Remote Transducer* (HART) e *Actuator Sensor Interface* (ASI), que são protocolos de comunicação em campo. Entretanto, o protocolo HART possui limitação na velocidade de comunicação, na ordem de 1,2 kbps (kilo bits por segundo), (HELSON, 1996) e o protocolo ASI atinge velocidades de 167.5 kbps (INTERLINKBT, 2019).

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho se inicia com uma fundamentação teórica, apresentada no capítulo 2. Este capítulo aborda o estado atual dos sistemas de monitoramento de poços de petróleo, as características físicas da região de localização dos poços de petróleo, os conceitos de comunicação via linhas de energia e os protocolos de transporte utilizados em redes de computadores. Ainda neste capítulo são apresentados os programas utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do trabalho, com a metodologia e os materiais utilizados para a realização dos ensaios. Este trabalho pode ser subdividido em 4 subtrabalhos. Sendo eles: comparativo entre os padrões AV1 e AV2 de *modems* PLC; separação do circuito de dados do circuito de alimentação elétrica; análise da qualidade da conexão após as modificações nos circuitos e; simulações das condições apresentadas pela região de localização dos poços de petróleo. Para cada subtrabalho são apresentados os resultados com a metodologia utilizada.



No capítulo 4 são apresentadas as discussões dos resultados obtidos e, por fim, as conclusões e considerações finais são apresentadas no capítulo 5.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

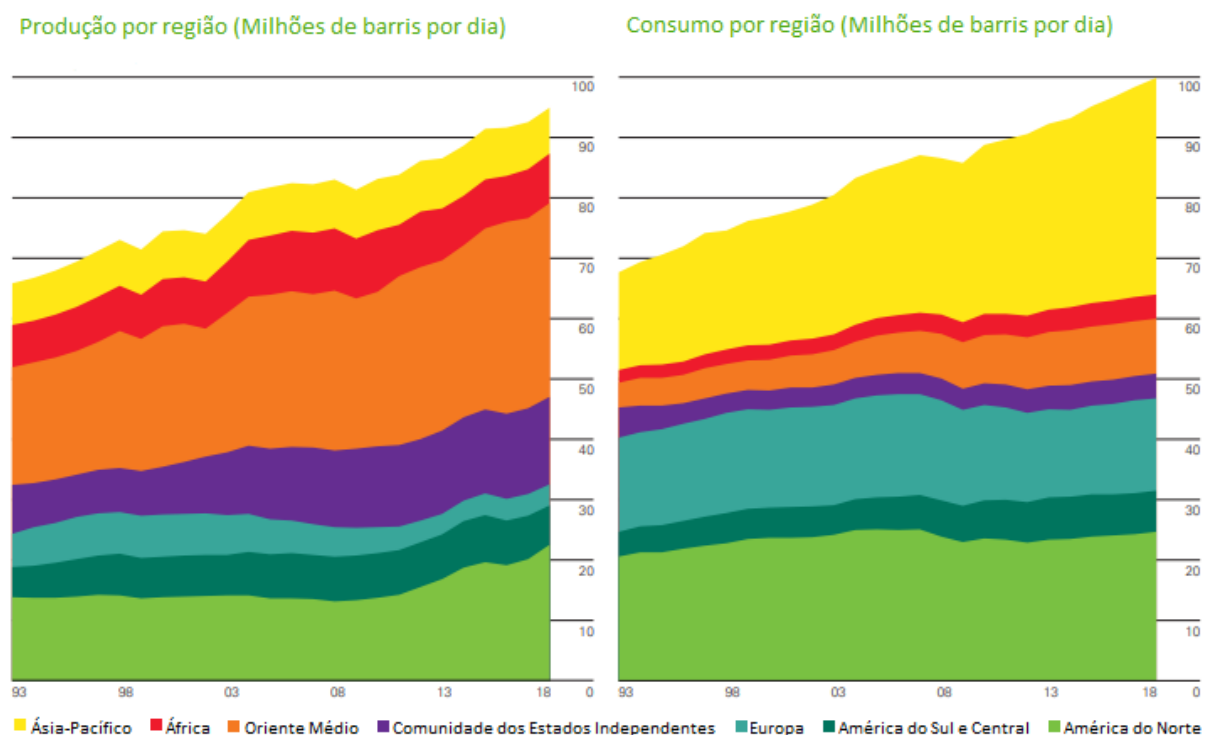
### 2.1 SETOR PETROLÍFERO BRASILEIRO

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency - Agência Internacional de Energia (IEA)*), a demanda por energia teve um aumento de 2,3% no ano de 2018. Esse aumento se deve principalmente pelo crescimento econômico mundial (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019).

O relatório global de energia e *status* de CO<sub>2</sub> (*Global Energy & CO<sub>2</sub> Status Report*) de 2018 apresenta que em relação à demanda de petróleo, houve um aumento de 1,3% e a demanda de gás teve um aumento de 4,6% ao redor do mundo. Os Estados Unidos da América são os principais responsáveis pelo crescimento no consumo dessas duas fontes de energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018).

A Figura 1 apresenta dados da revisão estatística da energia mundial (*Statistical Review of World Energy*) de 2019, da BP, relativos à produção e ao consumo de petróleo ao redor do mundo, desde 1993 até o ano de 2018. É possível perceber que o consumo é maior que a produção e esta diferença tem aumentado significativamente.

**Figura 1 – Produção e consumo de petróleo no mundo.**



Fonte: Adaptado de (BP, 2019).

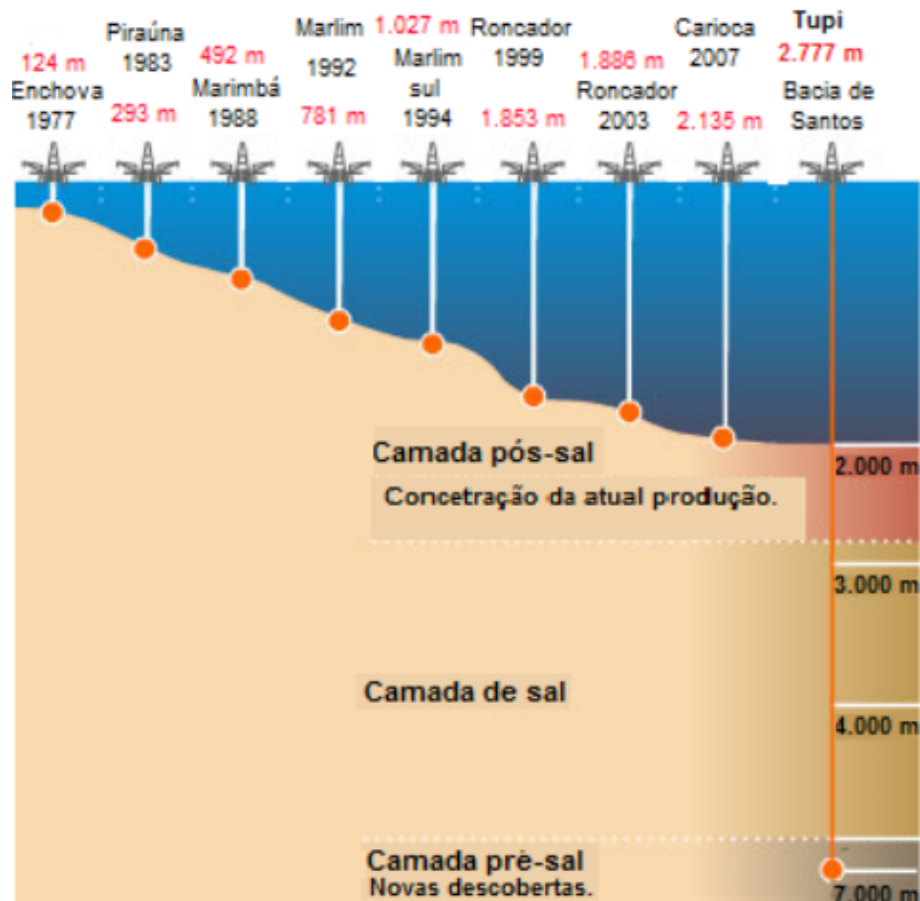
Com o aumento do consumo do petróleo ao redor do mundo, a busca por essa fonte de energia se intensifica, de modo que novas localidades sejam exploradas como é o caso da região do pré-sal, ou outras regiões classificadas como de águas profundas e ultraprofundas (NASCIMENTO, 2010). No Brasil, a produção de petróleo tem aumentado e é, em sua maioria, de atividades marítimas. Essas apresentam maior complexidade tecnológica envolvida, devido às particularidades da região.

### 2.1.1 Região de Localização dos Poços de Petróleo

Os sistemas de monitoramento de poços subaquáticos devem ser condizentes com as regiões de instalações, de modo que possuam capacidade de resistir às características físicas do local. Dessa forma, é essencial o conhecimento de tais características para o desenvolvimento desses sistemas.

A Figura 2 mostra os principais poços de petróleo brasileiros e suas respectivas profundidades.

**Figura 2 – Profundidade dos poços de petróleo brasileiros.**



Fonte: (NASCIMENTO, 2010).

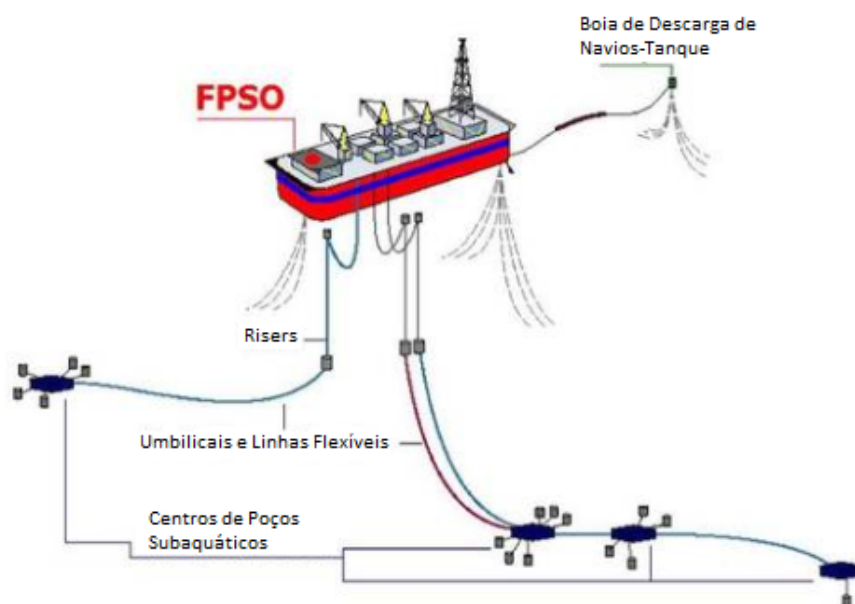
Segundo Nascimento (2010), em sua grande maioria, as reservas brasileiras estão localizadas em águas classificadas como ultraprofundas, de alta temperatura e alta pressão (*High Temperature and High Pressure - Alta Temperatura e Alta Pressão* (HTHP)), que correspondem à temperaturas maiores que 150 °C e pressões acima de 69 MPa (Mega Pascal).

### 2.1.2 Equipamentos de Sistemas Submarinos

Em relação ao desenvolvimento de sistemas de monitoramento subaquáticos, é necessário o conhecimento dos sistemas de exploração e extração de petróleo, assim como dos equipamentos que os compõe.

A Figura 3 apresenta uma visão geral de um sistema de extração de petróleo subaquático. A unidade flutuante de armazenamento e transferência (*Floating Production Storage and Offloading - Unidade Flutuante de Armazenamento e Transferência* (FPSO)) é um navio-plataforma capaz de armazenar e transportar petróleo e gás. A FPSO é o maior componente de todo o sistema de extração e representa a maior parte dos equipamentos sobre a água.

**Figura 3 – Sistema de extração de petróleo subaquático**



**Fonte: Adaptado de (GARDNER, 2016).**

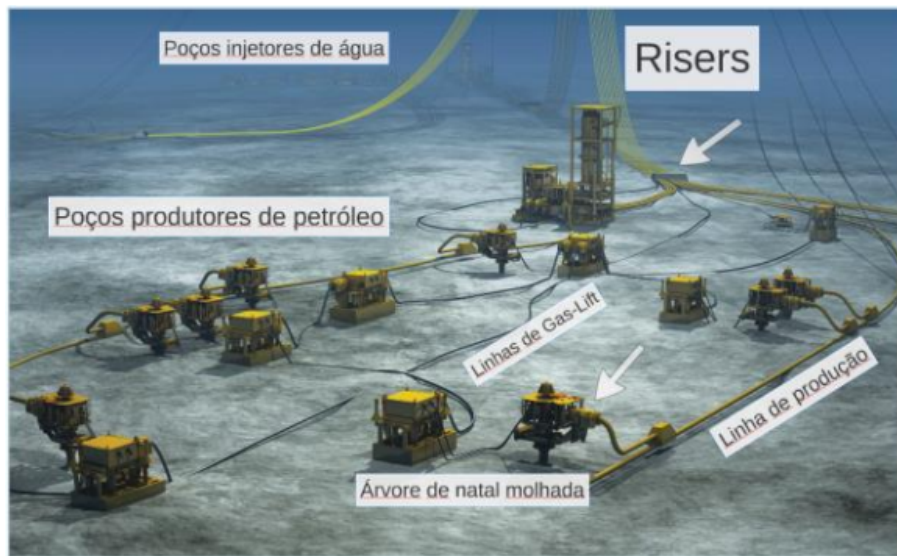
Os *risers* são tubulações que interligam os centros de produção submarinos com as plataformas, que se encontram sobre a água (PETROBRAS, 2015).

Umbilicais são conjuntos de tubulações e cabos elétricos utilizados para controlar os equipamentos subaquáticos (PETROBRAS, 2015).

É por meio das linhas flexíveis que os fluidos da produção são transportados, dos poços para as unidades de produção. Esses equipamentos podem ser utilizados para ligar as ANM aos risers (PETROBRAS, 2015).

Os centro de poços subaquáticos, apresentados na Figura 3, contam com uma série de equipamentos, como é possível observar na Figura 4.

**Figura 4 – Centro de poços subaquáticos.**



**Fonte: (ROLIM, 2014).**

Acima dos poços produtores de petróleo estão localizados os equipamentos denominados cabeças de poço. Esses equipamentos são ligados às ANM, onde se encontram as válvulas que controlam o fluxo de saída e de entrada de fluidos nos poços.

As ANM podem ser localizadas imediatamente sobre os poços ou distantes dos mesmos, de modo que mais de um poço seja conectado em uma única árvore. Esta distância pode ser maior que 50 metros. São equipamentos complexos, com grande volume e peso, ultrapassando 70 toneladas (PETROBRAS, 2016). Esses equipamentos são montados completamente fora da água e são mergulhados prontos devido, principalmente, ao seu tamanho. Após instalados, apenas veículos submarinos operados remotamente (*Remotely Operated Underwater Vehicle - Veículo Submarino Operado Remotamente* (ROV)) podem realizar e supervisionar montagens e reparos devido a profundidade das águas (ZHANG et al., 2013), o que explica a dificuldade de

novas instalações elétricas citada por Weber (2018).

A Figura 5 apresenta duas ANM, produzidas pela TechnipFMC. É possível perceber a magnitude das árvores quando comparadas ao tamanho dos operadores.

**Figura 5 – Duas árvores de natal molhadas produzidas pela TechnipFMC.**



Fonte: (TECHNIPFMC, 2019).

## 2.2 MONITORAMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO SUBAQUÁTICOS

Estima-se que cerca de 5,7 milhões de toneladas de óleo foram lançadas ao mar, ao redor do mundo, entre os anos de 1970 e 2005, porém esse volume têm diminuído nos últimos anos devido aos sistemas de monitoramento e controle nas operações do setor petrolífero (CANTAGALLO; MILANELLI; DIAS-BRITO, 2007).

Com o passar dos anos, novas leis surgiram para regulamentar as atividades relacionadas ao petróleo, como exploração, transporte e armazenamento. Com isso, as exigências em relação aos sistemas de monitoramento aumentaram, de modo a melhorá-los e reduzir, conseqüentemente, os casos de vazamento.

Devido a necessidade de monitoramento de poços de petróleo subaquáticos, por motivos de segurança e preocupação com o meio ambiente, a gama de sistemas de monitoramento de poços subaquáticos vem aumentando.

Os sistemas podem detectar vazamentos e alguns podem até antecipá-los, por meio do monitoramento da integridade dos poços. O monitoramento pode ser contínuo ou não e, além disso, os sistemas podem utilizar sensores de região ou localizados, que, por sua vez, podem ser classificados em físicos, químicos e biológicos

(BERGE, 2017).

Berge (2017) aborda os tipos de vazamentos e os tipos de sensores. Além disso, apresenta as características que devem ser consideradas para a escolha do sistema de monitoramento mais adequado para cada situação.

### 2.3 SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE POÇOS COM SENSORES ÓPTICOS

Inicialmente, o monitoramento contínuo de poços era realizado por meio de dispositivos eletrônicos, porém uma das limitações desse tipo de sensores é a sua confiabilidade em altas temperaturas, visto que isso altera algumas propriedades dos componentes (ARANTES, 2018). Dessa forma, as medições não eram confiáveis e era necessário o desenvolvimento de sistemas de monitoramento contínuo que pudessem ser instalados dentro dos poços e que não fossem afetados pelas altas temperaturas.

Com o avanço das tecnologias de fibra óptica, usadas inicialmente no setor de telecomunicação, as técnicas de sensoriamento ópticas também tiveram melhorias. Os sensores de fibra óptica são resistentes a altas temperaturas e ainda assim, são altamente sensíveis às variações de temperatura. Uma das vantagens deste tipo de sensores é a imunidade a interferência eletromagnética (ARANTES, 2018).

Atualmente, os sensores ópticos também são utilizados na indústria petrolífera como sistemas de monitoramento contínuo. Dentre estes, existem os DTS e os DAS que podem ser utilizados para detecção de vazamentos ou monitoramento da integridade, sendo instalados por toda a extensão dos poços (BERGE, 2017).

### 2.4 LINHAS DE TRANSMISSÃO

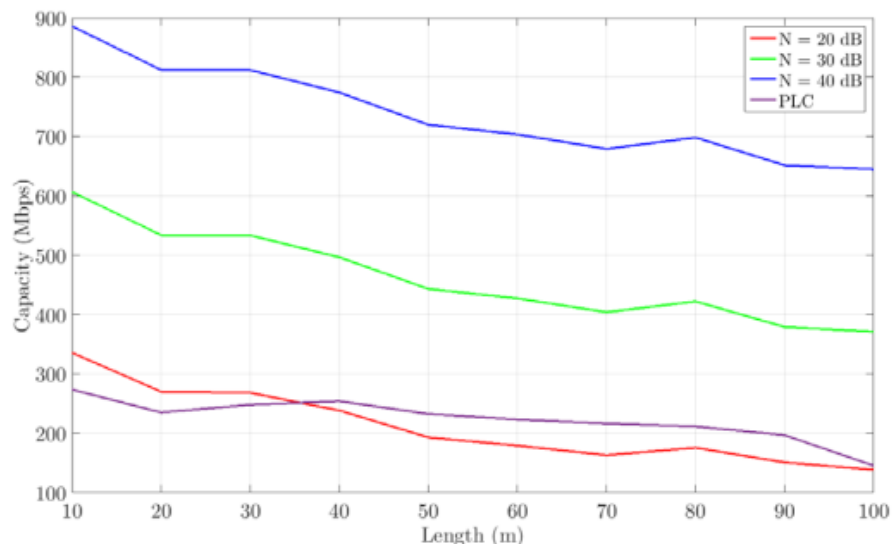
Normalmente, o conceito de linhas de transmissão é associado aos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Entretanto, Weber (2018) descreve linhas de transmissão como estruturas pelas quais energia elétrica e sinais são propagados de uma fonte para uma carga. Desta forma, sistemas de comunicação de dados, como redes de computadores, também utilizam linhas de transmissão. No caso de redes de computadores, as linhas de transmissão mais utilizadas são cabos de pares trançados, conhecidos como cabos de rede. Esses cabos podem ser blindados ou não e são divididos em categorias, padronizadas pelas normas da EIA/TIA

568. Os cabos sem blindagem são os mais utilizados e são chamados de par trançado não blindado (*Unshielded Twisted Pair - Par Trançado Não Blindado (UTP)*).

Weber (2018) apresenta um estudo de caracterização de linhas de transmissão por meio de parâmetros que descrevem as propriedades elétricas em função das características construtivas dos cabos. Além disso, realiza uma comparação do desempenho de duas linhas de transmissão. A primeira utiliza um cabo de par trançado UTP CAT5e, geralmente utilizado em redes de comunicação de dados. A segunda linha de transmissão utiliza um par de cabos de cobre flexíveis de  $1,5 \text{ mm}^2$  com isolamento em policloreto de vinila (*Polyvinyl Chloride - Policloreto de Vinila (PVC)*), cabos geralmente utilizados em instalações elétricas residenciais, mas que devido a comunicação via linhas de energia se tornam atrativos como meios de comunicação.

A Figura 6 apresenta um gráfico com os resultados obtidos por Weber (2018) nas transmissões realizadas utilizando o par de cabos de cobre flexíveis de  $1,5 \text{ mm}^2$  como meio de transmissão. O eixo horizontal se refere ao comprimento do cabo, em metros, e o eixo vertical é relativo à velocidade de transmissão, medida em Mbps (Megabits por segundo). Essa velocidade deve ser dividida por 8 para se obter o valor em MBps.

**Figura 6 – Desempenho do par de cabos flexíveis como linha de transmissão de dados.**



**Fonte: (WEBER, 2018).**

Os dados em roxo, no gráfico da Figura 6, são referentes à transmissão de dados via linha de energia. O desempenho desse sistema de transmissão foi maior ao utilizar 10 metros de cabo, com taxa de transferência de 273,5Mbps (equivalente



a 34,19 MBps) e a menor velocidade foi de 145,3Mbps (equivalente a 18,16MBps), obtida com a utilização de 100 metros de cabo.

## 2.5 COMUNICAÇÃO VIA LINHAS DE ENERGIA

A comunicação de dados via rede elétrica vem sendo utilizada desde o início do século XX, no campo da telefonia, para a transmissão de mensagens de voz, sendo que a primeira operação comercial foi no Japão em 1918 (SCHWARTZ, 2009).

Devido à possibilidade da utilização dos cabos elétricos já instalados, atualmente existem diversas aplicações para PLC, que incluem a telemetria, automação residencial e os conceitos de rede elétrica inteligente e cidades inteligentes (CANO et al., 2016). Além disso, existem novas propostas de uso do PLC, segundo (CANO et al., 2016), aplicações como robótica e sistemas de segurança em minas.

### 2.5.1 Funcionamento

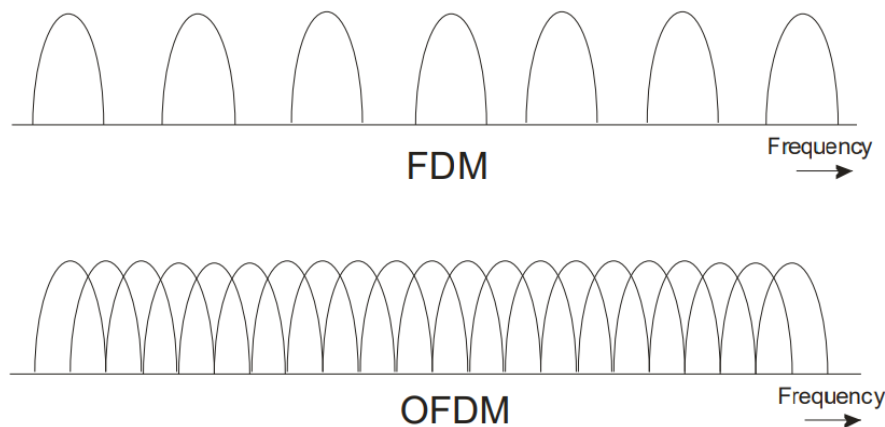
De modo geral a tecnologia PLC em baixa tensão requer a utilização de um *modem* transmissor que modula os dados em frequências, na ordem de MHz, muito elevadas se comparadas com a frequência de 60 Hz da rede elétrica, de forma que os dois sinais podem coexistir no mesmo meio. O sinal modulado é transmitido por meio de cabos de energia já existentes e é demodulado por outro *modem* na extremidade da linha de energia (TANG et al., 2012). Nas transmissões em média ou alta tensão é necessário o uso de repetidores, que ampliam e estabilizam o sinal, nos transformadores, pois os sinais de alta frequência são considerados ruídos na rede elétrica e são filtrados pelos transformadores (HELD, 2006).

A principal forma de multiplexação utilizada pelos *modems* PLC é a Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM)*), o que possibilita a transmissão simultânea de múltiplos sinais em um único *link* de transmissão (HELD, 2006).

### 2.5.1.1 Multiplexação por Divisão de Frequências

A OFDM se baseia na *Frequency Division Multiplexing - Multiplexação por Divisão de Frequências* (FDM), que realiza a transmissão paralela de sinais por meio de múltiplas frequências. A Figura 7 mostra os formatos de onda dos dois métodos de multiplexação.

**Figura 7 – Multiplexação por divisão de frequências.**



**Fonte: (MACH; BESTAK, 2019).**

A principal diferença entre elas é a forma como utilizam a banda, sendo que a OFDM permite melhor aproveitamento da banda disponível ao sobrepor subcanais, enquanto a FDM necessita de uma banda de guarda para minimizar interferências entre canais adjacentes.

### 2.5.2 Classificação de sistemas de Comunicação via linhas de energia

Devido ao grande número de aplicações do PLC, surgiram especificações que devem ser adotadas pelas empresas fabricantes dos equipamentos dessa tecnologia (CANO et al., 2016). Uma dessas especificações diz respeito às faixas de frequência que esses dispositivos podem atuar, de 300 Hz até 250 MHz (GALLI; SCAGLIONE; WANG, 2011), visto que seu uso não deve interferir no funcionamento de outros equipamentos que também operam com a modulação de frequência (CANO et al., 2016). Dessa forma os sistemas de PLC são definidos como: PLC de Banda Ultra Estreita (*UNB - Ultra-Narrowband*); PLC de Banda Estreita (*NB - Narrowband*) e; PLC de Banda Larga (*BB - Broadband*), também chamado de BPL (*Broadband Over Powerline*

- Banda Larga Através de Linhas de Energia) (GALLI; SCAGLIONE; WANG, 2011). As faixas de frequências apresentadas em Galli, Scaglione e Wang (2011) estão dispostas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Frequências de operação - PLC.**

<b>Tipo de PLC</b>	<b>Faixa de frequência</b>
UNB	0,3 - 3 kHz
NB	3 - 500 kHz
BB	1,8 - 250 MHz

**Fonte: Adaptado de (GALLI; SCAGLIONE; WANG, 2011).**

### 2.5.3 Espectro de Rádiofrequências no Brasil

A ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações, é o órgão responsável pela regulação das telecomunicações no Brasil e define as faixas de frequências de acordo com os padrões internacionais e apresenta as mesmas no plano de atribuição, destinação e distribuição de frequências no Brasil (ANATEL, 2019).

A Tabela 2 foi adaptada do quadro de nomenclaturas das faixas de frequências (ANATEL, 2019) de modo a apresentar as traduções de cada nomenclatura.

**Tabela 2 – Nomenclaturas das faixas de frequências.**

<b>Simbolo</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Faixa de frequência</b>
VLF	<i>Very Low Frequency</i> - Frequências Muito Baixas	3 - 30 kHz
LF	<i>Low Frequency</i> - Frequências Baixas	30 - 300 kHz
MF	<i>Medium Frequency</i> - Frequências Médias	300 - 3000 kHz
HF	<i>High Frequency</i> - Frequências Altas	3 - 30 MHz
VHF	<i>Very High Frequency</i> - Frequências Muito Altas	30 - 300 MHz
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> - Frequências Ultra Altas	300 - 3000 MHz
SHF	<i>Super High Frequency</i> - Frequências Super Altas	3 - 30 GHz
EHF	<i>Extremely High Frequency</i> - Frequências Extremamente Altas	30 - 300 GHz

**Fonte: Adaptado de (ANATEL, 2019).**

### 2.5.4 Normas e Padrões

Com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento de aplicações PLC surgiram algumas associações industriais, como é o caso da *HomePlug Powerline Alliance* e a *Universal Powerline Alliance* (CANO et al., 2016).

A *HomePlug Powerline Alliance* surgiu em 2000 para criar especificações e desenvolver programas de certificações para o uso de BPL, voltados, principalmente,

para a utilização de serviços de *internet* em casa (LATCHMAN et al., 2013).

A Tabela 3 foi adaptada de Latchman et al. (2013) e apresenta as datas de criação de algumas dessas especificações, assim como suas taxas de dados suportadas, e de um dos programas de certificação (IEEE 1901).

**Tabela 3 – Histórico HomePlug X Taxa de dados.**

<b>Especificação ou Padrão</b>	<b>Data</b>	<b>Taxa de dados</b>
HomePlug 1.0.1	Dezembro, 2001	14 Mbps
HomePlug AV v1.1	Maio, 2007	200 Mbps
IEEE 1901	Dezembro, 2010	400 Mbps
HomePlug Green PHY v1.0	Agosto, 2010	10 Mbps
HomePlug AV v2.0	Março, 2012	1,5 Gbps

**Fonte: Adaptado de (LATCHMAN et al., 2013).**

#### 2.5.4.1 Padrão IEEE 1901

O padrão IEEE 1901 foi estabelecido para normatizar as especificações de equipamentos de banda larga através de linhas de energia. Foi publicado no ano de 2010 e estabelece que os equipamentos não devem ultrapassar a frequência de 100MHz e ainda define duas técnicas de modulação, FFT-OFDM (*Fast Fourier Transform Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais com Transformada Rápida de Fourier) e Wavelet-OFDM (*Wavelet Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais com Transformada Wavelet) (GALLI; SCAGLIONE; WANG, 2011).

#### 2.5.4.2 HomePlug AV1

O padrão AV1 desenvolvido em 2007 apresenta características como banda de frequência de 1,8 MHz até 30 MHz (predominantemente HF, incluindo o fim da banda MF), modulação OFDM que garante melhor aproveitamento da banda de frequência disponível, criptografia AES (*Advanced Encryption Standard* - Padrão de Criptografia Avançada) de 128 bits que garante a segurança na comunicação e um sistema de correção de erros (HOMEPLUG POWERLINE ALLIANCE, 2013).

### 2.5.4.3 HomePlug AV2

O padrão AV2, possui, além das mesmas características do AV1, uma banda de frequência adicional de 30 MHz à 86 MHz, englobando o fim da banda MF (de 1,8 MHz até 3 MHz), assim como toda a banda de HF e o início da banda de VHF (30 MHz à 86 MHz). Ainda conta com um modo de economia de energia e capacidade de transmissão do tipo MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output* - Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas) utilizando dois transmissores independentes e até quatro receptores (HOMEPLUG POWERLINE ALLIANCE, 2013). Desta forma o padrão AV2 consegue assegurar velocidades de transmissão de duas a cinco vezes às obtidas pelo AV1 (HOMEPLUG POWERLINE ALLIANCE, 2013). Para o funcionamento MIMO, o AV2 utiliza, em um sistema de três cabos (Fase, neutro e terra), qualquer par de cabos para a transmissão e, caso haja apenas dois cabos, muda automaticamente para operação em modo SISO (*Single-Input Single-Output* - Uma Entrada e Uma Saída), que é utilizado pelo padrão AV1 (HOMEPLUG POWERLINE ALLIANCE, 2013).

## 2.6 PROTOCOLOS DE TRANSPORTE DO MODELO OSI

Na década de 70, a *International Organization for Standardization - Organização Internacional de Normalização* (ISO) desenvolveu o modelo *Open Systems Interconnection* (OSI) para servir de padrão para redes de computadores. O modelo OSI é dividido em 7 camadas, sendo elas: física, enlace, rede, transporte, sessão, apresentação e aplicação (LOPES; BENEVENUTO; OLIVEIRA, 2015).

A camada de transporte do modelo OSI possui dois protocolos com características distintas, o Protocolo de Controle de Transmissão (*Transmission Control Protocol - Protocolo de Controle de Transmissão* (TCP)) e o Protocolo de Datagrama de Usuário (*User Datagram Protocol - Protocolo de Datagrama de Usuário* (UDP)).

### 2.6.1 Protocolo TCP

O protocolo TCP, possui um sistema de controle da transmissão que garante que os dados enviados pela origem chegarão ao destino, na mesma ordem que foram enviados, sem erros, perdas e duplicações. Para isso, é criada uma conexão fim a fim

entre a origem e o destino da comunicação (COONJAH; CATHERINE; SOYJAUDAH, 2015). Assim que uma aplicação cliente deseja comunicar dados, uma solicitação de sincronização é enviada para o destino e um sinal de sincronização deve ser respondido pelo destino para a origem. Ao receber a resposta a conexão é criada e a transmissão dos dados inicia.

Após a transmissão de cada mensagem, a origem aguarda uma confirmação do destino. Caso esta confirmação demore a ser recebida, o protocolo TCP considera que houve perda do pacote e o mesmo é retransmitido (PARK; CHUNG, 2010).

### 2.6.2 Protocolo UDP

O protocolo UDP, por sua vez, não cria uma conexão para realizar a transmissão e não tem controle dos dados que são perdidos na transmissão (COONJAH; CATHERINE; SOYJAUDAH, 2015). Os pacotes são enviados apenas uma vez e não necessariamente chegam em ordem.

Por não possuir tantas informações de controle, os pacotes do protocolo UDP são menores, fazendo com que a transmissão seja mais rápida. Outros fatores que contribuem para o aumento da velocidade em relação ao protocolo TCP são: o transporte UDP não aguarda o recebimento da confirmação de entrega dos dados e; não possui retransmissão em caso de perda de informação (BETHEL; SHALF, 2003).

## 2.7 PROGRAMA JPERF

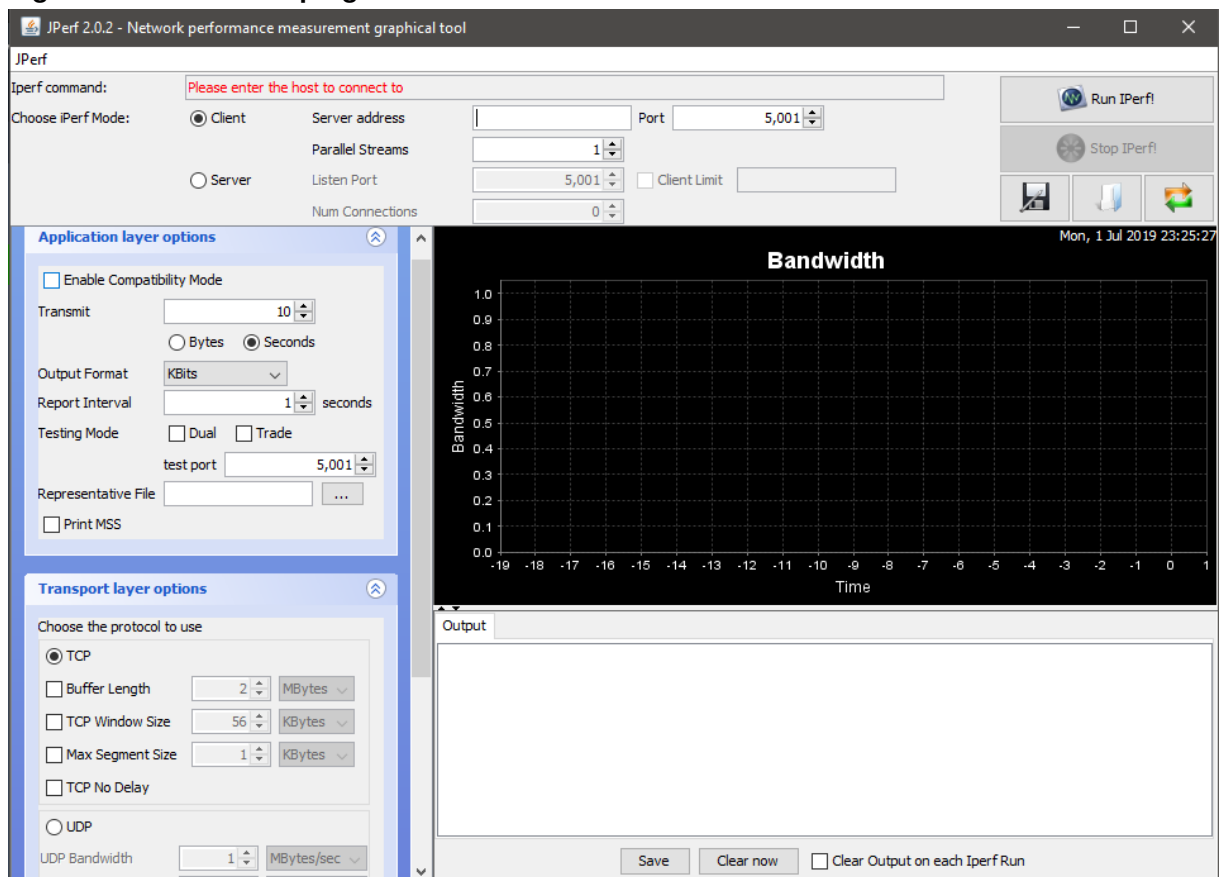
O programa JPerf consiste em uma aplicação com interface gráfica, baseada na linguagem de programação JAVA, que realiza o monitoramento do desempenho de redes de comunicação de computadores, medindo a velocidade de transmissão (MAZALAN et al., 2013).

O JPerf utiliza um comando `lperf` que pode ser utilizado no *prompt* de comandos, que é um interpretador de linhas de comando. Além disso, gera um gráfico com os resultados da transmissão, facilitando a leitura dos dados. No caso da utilização do `lperf` via linha de comando, os dados são exibidos na tela, nas linhas abaixo do comando, e é possível observar as velocidades de transferência e o tempo utilizado na transmissão.

O programa possui dois modos de operação: cliente e servidor. Dessa forma é necessário a utilização de dois computadores, ligados em uma rede, cada um executando um modo. O modo servidor, faz com que o computador aguarde requisições de clientes e o modo cliente funciona por meio da injeção de pacotes na rede, enviando esses para o servidor, como em um *upload* (envio de dados).

A interface do programa, apresentada na Figura 8, conta com a seleção de configurações relacionadas às camadas de aplicação e de transporte. Além disso, conta com a presença de um gráfico que é gerado no momento de execução do programa, quando uma transmissão está sendo realizada, mostrando a velocidade da transmissão. Por fim, o programa possui um espaço de saída, onde apresenta as velocidades de transmissão, semelhante ao formato de resultados exibidos pelo comando *iperf*.

**Figura 8 – Interface do programa JPerf.**



Fonte: Autoria própria.

## 2.8 RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE

Um rádio definido por *software* (*Software Defined Radio - Rádio Definido por Software* (SDR)) é um equipamento de rádio em que a camada física do sistema é definida por *software*, de modo que essa pode ser reprogramada (TATO, 2018). De acordo com Tato (2018), um rádio é um dispositivo capaz de transmitir informação por meio de ondas eletromagnéticas, ou seja, não sendo necessária a utilização de cabos como meio de transmissão.

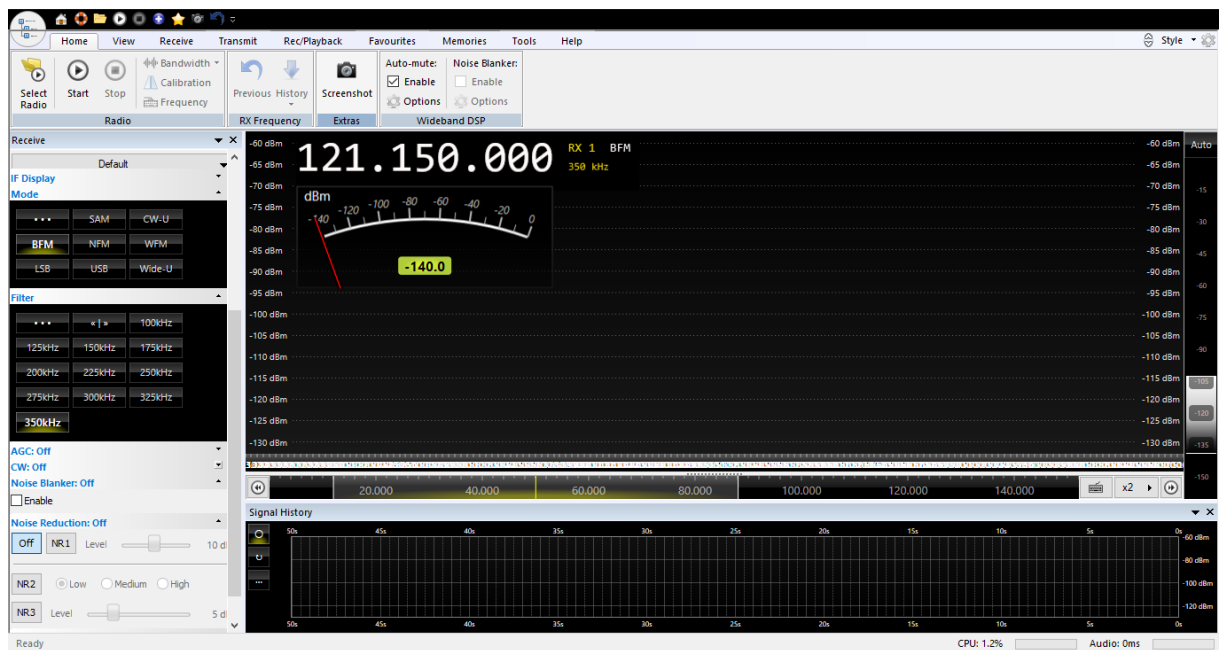
A recepção de sinais pelo SDR é feita por uma antena, o sinal analógico recebido passa por um sistema de filtro e amplificador e depois é convertido por um conversor analógico para digital e enviado para o processador. A transmissão funciona de modo semelhante, no sentido contrário, o sinal digital gerado pelo processador passa por um conversor digital para analógico, depois é filtrado, amplificado, e por fim, transmitido pela antena (TATO, 2018).

### 2.8.1 Programa SDR Console

O dispositivo SDR funciona em conjunto com algum aplicativo de computador de interpretação dos sinais de SDR. O programa SDR Console apresenta uma interface para *Windows*, que funciona com receptores e transceptores SDR. O programa apresenta diversas configurações para recepção e transmissão de sinais de rádio, como seleção do dispositivo SDR que será utilizado, modos de operação relacionados às bandas de frequência e a seleção de filtros para redução de ruídos no sinal recebido. A Figura 9 apresenta a interface do programa SDR Console com algumas configurações de recepção de sinais Rádiofrequência (RF).



**Figura 9 – Interface do programa SDR Console.**



Fonte: Autoria própria.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Como apresentado nos capítulos anteriores, os sistemas de monitoramento de poços de petróleo são extremamente essenciais para preservação da vida marinha, segurança e inclusive auxiliam na gestão da produção por meio do monitoramento da quantidade produzida, possibilitando a otimização da produção. A partir das informações a respeito do monitoramento de poços, região de localização de poços subaquáticos, transmissão via linhas de energia e protocolos de comunicação de dados apresentadas até aqui, elaborou-se um estudo exploratório e explicativo, com abordagem quali-quantitativa com o estudo da taxa de transferência de dados, com cenários e contextos predefinidos que consistem nos poços de petróleo subaquáticos, com alvo de investigação em sistemas de telecomunicação, utilizando instrumentos específicos de medição de dados, e instrumentos específicos para análise dos dados coletados.

O estudo teve foco em abordar a viabilidade do uso da tecnologia de transmissão de dados via linhas de energia, com ênfase em equipamentos de banda larga, para a utilização destes como meio de comunicação de dados obtidos por sensores ópticos instalados em poços de petróleo subaquáticos. A pesquisa foi dividida em três etapas: Pesquisa bibliográfica; Ensaios em laboratório; Ensaios em campo.

A pesquisa bibliográfica serviu como base para os ensaios e apresentou os diferentes padrões de equipamentos de comunicação via linhas de energia existentes no mercado, assim como os diferentes protocolos de transporte utilizados em protocolos de comunicação de dados. Ainda, levantou aspectos físicos, como temperatura e pressão, da região subaquática, onde os poços de petróleo se encontram localizados.

Nos ensaios em laboratório foram analisados diferentes padrões de *modems* PLC, objetivando comparar as taxas de transmissão de dados, utilizando diferentes protocolos de transporte do modelo OSI. Para a análise dos dados coletados foram utilizados softwares e instrumentos específicos de medição de dados.

Já para os ensaios em campo, foram simulados cenários visando à aplicação em poços de petróleo subaquáticos, levando em consideração variações de temperatura, utilização de um único condutor e um sistema de aterramento como linhas de transmissão e também considerando a distância que pode existir entre a cabeça de poço e a árvore de natal.

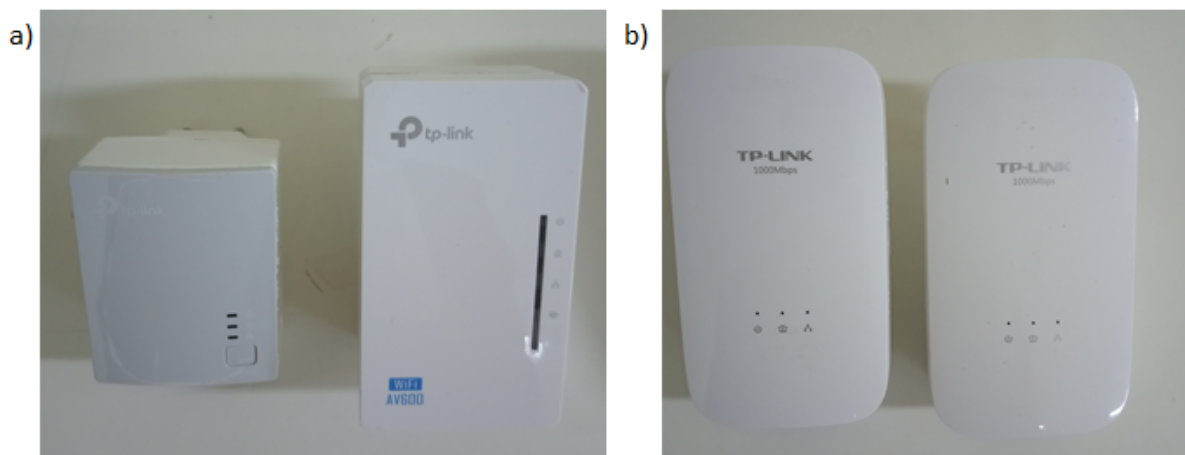
### 3.1 COMPARATIVO ENTRE OS PADRÕES AV1 E AV2 DE *MODEMS* PLC

Foram realizados ensaios utilizando um par de *modems* no padrão AV1 e depois com padrão AV2, com o objetivo de avaliar as taxas de transferências obtidas com cada padrão, variando o comprimento do cabo de energia ligado entre os dois *modems* e também variando o protocolo de transporte de dados (UDP e TCP).

Para a realização desse ensaio foram utilizados:

- *Modems* marca TP-Link modelos TL-WPA4220 (Kit AV600 - padrão AV1 - Figura 10a) e TL-PA7020 (Kit AV1000 - padrão AV2 - Figura 10b);
- Extensão elétrica de 25 metros de comprimento;
- Dois cabos de rede CAT5e (4 pares / 24AWG);
- Dois microcomputadores com adaptadores de rede padrão Gigabit Ethernet (1000Mbps).

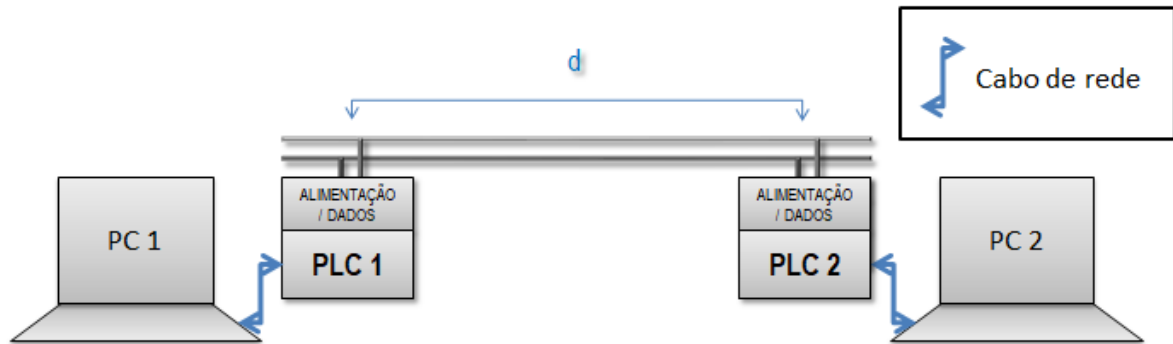
**Figura 10 – *Modems* PLC da marca TPLink. a) Par de *modems* AV1 - TL-WPA4220 - Kit AV600. b) Par de *modems* AV2 - TL-PA7020 - Kit AV1000.**



**Fonte: Autoria própria.**

A configuração dos ensaios consistiu na ligação de cada microcomputador a um *modem* PLC por meio de um cabo de rede (representado pela seta azul) e os *modems* ligados à rede elétrica como mostra a Figura 11. Para o pareamento físico dos *modems*, os modelos apresentam um botão específico, que foi pressionado após a ligação do par na tomada.

Figura 11 – Configuração utilizada no ensaio.



Fonte: Autoria própria.

Foram realizados ensaios com o par de *modems* conectado no mesmo ponto de tomada ( $d = 0$  metros), de modo que não houvesse fiação elétrica entre eles e que esta tivesse mínima influência nos resultados. Em seguida foram realizados ensaios com cada *modem* conectado em uma extremidade da extensão de 25 metros ( $d = 25$  metros) para avaliar os impactos desta distância de cabos de energia sobre as velocidades de transmissão.

Para a realização dos ensaios foi utilizada a ferramenta JPerf. A Figura 12 mostra as configurações relacionadas ao modo de operação disponíveis no programa: modo cliente e modo servidor. Foram usados dois computadores, cada um operando em um dos modos.

No computador cliente o modo de operação foi habilitado o modo *client* e em seguida inseriu-se o endereço de Protocolo de Internet (*Internet Protocol - Protocolo de Internet* (IP)) do servidor. Já a configuração do computador operando em modo servidor consistiu em selecionar a opção *server* no modo de operação.

Figura 12 – Modos de operação do programa JPerf.

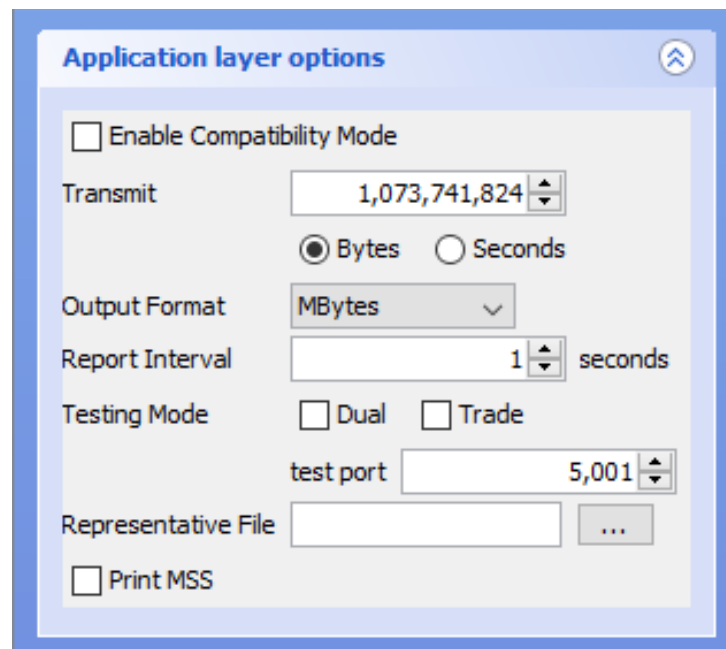
<input checked="" type="radio"/> Client	Server address	192.168.0.100
	Parallel Streams	1
<input type="radio"/> Server	Listen Port	5,001
	Num Connections	0

Fonte: Autoria própria.

A Figura 13 apresenta as opções relacionadas à camada de aplicação do mo-

delo OSI como: tempo da transmissão em segundos ou quantidade de dados transmitidos em bytes; unidade dos valores obtidos para exibição nos gráficos (de bits até Gigabytes) e; intervalo de exibição dos valores medidos no gráfico em segundos. Para o computador cliente foi selecionada a opção de transmissão de um número fixo de bytes correspondente a 1GB (um Gigabyte), foi selecionado a exibição de valores em Megabytes a cada 1 segundo de modo a estimar a taxa de transmissão em cada caso na unidade de MBps. Para o servidor foi selecionado o mesmo formato de saída, em Megabytes a cada 1 segundo.

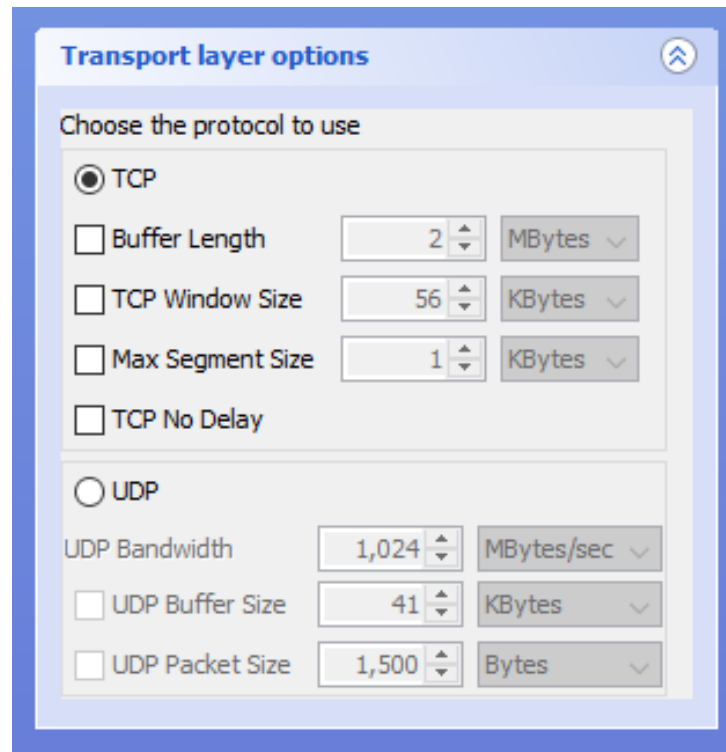
**Figura 13 – Opções da camada de aplicação do modelo OSI no JPerf.**



**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 14 mostra as opções da camada de transporte do modelo OSI, relacionadas aos protocolos UDP e TCP. A configuração do cliente encerra com a seleção do protocolo da camada de transporte utilizado, TCP ou UDP. Para a utilização do protocolo TCP, foi selecionado a opção TCP (padrão desta tela de opções) e nenhuma outra alteração foi feita. Para o uso de UDP foi selecionado a opção UDP e utilizada a largura de banda de 1024 MBps (equivalente a 1GBps). Para o computador servidor escolheu-se o protocolo de transporte, de acordo com o escolhido no cliente.

**Figura 14 – Opções da camada de transporte do modelo OSI no JPerf.**



**Fonte: Autoria própria.**

O programa também conta com opções da camada IP, que permaneceram inalteradas, em seus valores padrão, durante os ensaios.

As principais diferenças nas configurações entre o computador servidor e o cliente foram que no servidor não foi necessário digitar o endereço IP do cliente, visto que o servidor aguarda requisições de computadores clientes e não foi necessário especificar a quantidade de dados transmitidos, visto que este tipo de comunicação é semelhante a um *upload* (envio de dados), em que o cliente envia dados para o servidor.

O botão *Run IPerf!* no canto superior direito foi pressionado no servidor e este ficou aguardando requisições de computadores clientes. A comunicação iniciou quando o mesmo botão foi pressionado no cliente, mostrando nos gráficos a velocidade da transmissão.

Todos os ensaios foram realizados no mínimo três vezes, com o objetivo de garantir que não ocorreram instabilidades no momento da medição causando, assim, um valor que não representa o desempenho real da rede. Caso os ensaios realizados nas mesmas situações, tanto em relação ao meio físico quanto às configurações do ensaio, resultassem em valores muito diferentes, mais dois ensaios com os mesmos

parâmetros eram realizados. Sendo assim, se tornou possível determinar se o sistema estava instável ou se apenas ocorreu uma instabilidade durante um dos ensaios.

### 3.1.1 Resultados do Comparativo dos Padrões PLC

Os resultados dos primeiros ensaios em laboratório foram apresentados pela Tabela 4 e por meio desses resultados obtidos foi possível definir o padrão *HomePlug* mais adequado para ser utilizado nos demais ensaios.

**Tabela 4 – Taxas médias de transmissão.**

Protocolo/Distância	AV1	AV2
TCP / 0 metros	9,20 MBps	41,65 MBps
TCP / 25 metros	9,10 MBps	40,48 MBps
UDP / 0 metros	10,70 MBps	42,20 MBps
UDP / 25 metros	10,70 MBps	42,10 MBps

**Fonte: Autoria Própria**

Nos ensaios com AV1 utilizando o protocolo de transporte TCP, não houve diferenças significativas de velocidade de transmissão com a variação do comprimento do cabo entre os *modems* (no mesmo ponto de tomada e com a extensão de 25 metros). A velocidade média ficou em torno de 9,15 MBps, sendo assim a transferência de 1 Gigabyte levou aproximadamente 110 segundos. A utilização do protocolo UDP resultou em uma transmissão mais rápida, em cerca de 95 segundos. A velocidade média nesse caso foi de 10,7 MBps e também não apresentou diferenças com a variação de comprimento.

Já nos ensaios com o padrão AV2 as velocidades obtidas foram superiores, aproximadamente quatro vezes acima das velocidades obtidas com o AV1, como apresentado por HOMEPLUG POWERLINE ALLIANCE (2013). Utilizando o protocolo TCP, com os plugues no mesmo ponto de tomada, houve variações nos tempos de transmissão, com o tempo mínimo obtido de 22,2 segundos e o máximo foi de 27,1 segundos. A velocidade média com essa configuração foi de 41,65 MBps. Com a utilização da extensão de 25 metros também foi notado essa variação nas taxas de transmissão e o valor médio dos resultados foi de 40,48 MBps, apresentando certa instabilidade nos valores medidos. Utilizando o protocolo de transporte UDP, não houve diferenças de velocidade com a variação do comprimento do cabo e a média obtida foi de 42,15 MBps, transmitindo a informação (1GB) em aproximadamente 24 segundos.

O aumento da distância não influenciou significativamente a transmissão de dados entre equipamentos PLC comerciais sem modificações, porém é possível perceber uma redução nas taxas de transmissão.

Os ensaios com UDP apresentavam a quantidade de datagramas (unidades básicas de dados) perdidos e a porcentagem relativa ao total de datagramas enviados, mostrados na Tabela 5

**Tabela 5 – Médias das porcentagens de datagramas perdidos nas transmissões realizadas utilizando o protocolo UDP.**

<b>Padrão HomePlug</b>	<b>0 metros</b>	<b>25 metros</b>
AV1	0,15%	0,25%
AV2	0,41%	0,34%

**Fonte: Autoria Própria**

Por meio dos resultados obtidos, foi definido que o melhor padrão para a aplicação de transmissão de dados de sensores ópticos instalados em poços de petróleo é o padrão AV2. Por esse motivo, esse foi o padrão de *modem* utilizado nos demais ensaios deste trabalho.

### 3.2 SEPARAÇÃO DOS CIRCUITOS DE ALIMENTAÇÃO E DE DADOS

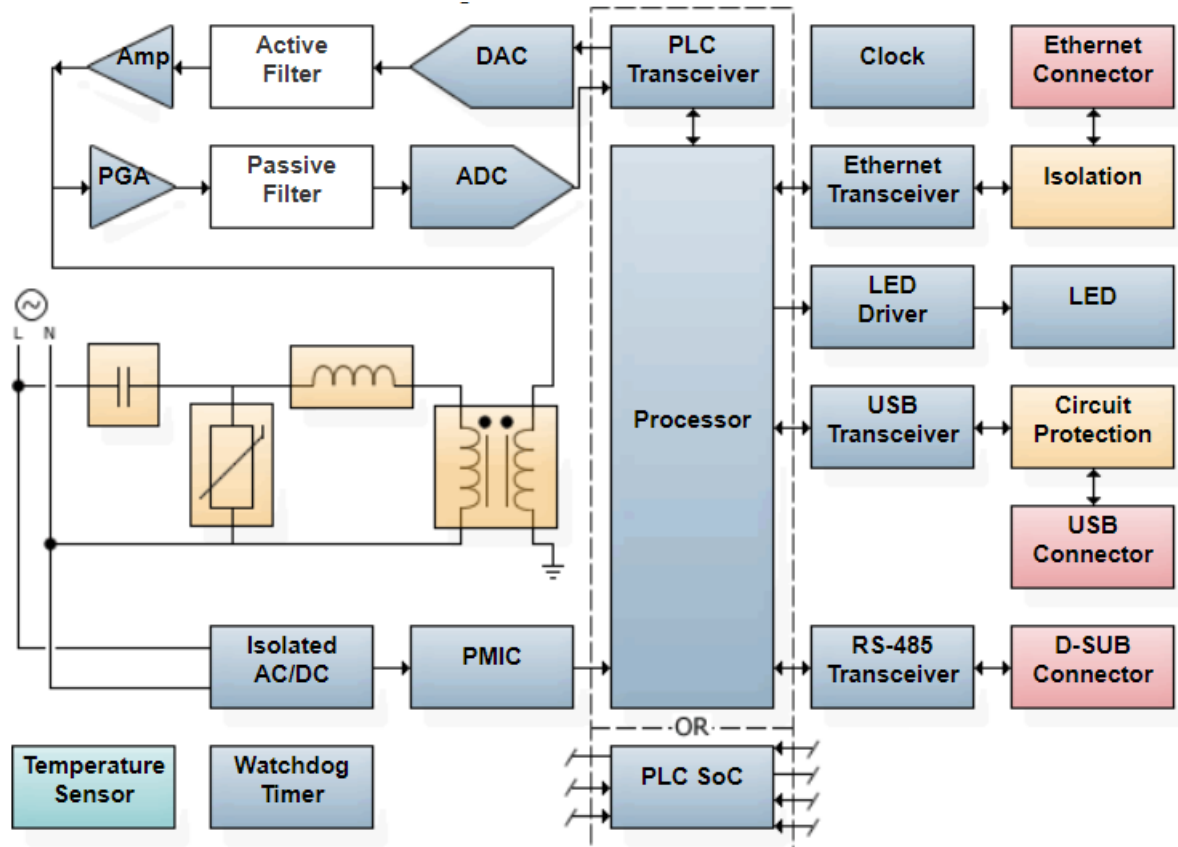
Para a realização dos demais ensaios foi necessário separar o circuito de dados do circuito de alimentação, com o intuito de isolar a linha de transmissão de dados da rede de alimentação elétrica, de forma que ruídos na rede não causem interferência na transmissão de dados.

A separação dos circuitos era necessária para a realização dos ensaios posteriores, em ambiente externo, simulando condições específicas para a aplicação em poços de petróleo subaquáticos como a transmissão utilizando apenas um cabo como linha de transmissão ou um cabo em conjunto com o sistema de aterramento.

A análise do circuito foi realizada com o auxílio do diagrama de blocos de circuitos de comunicação via linhas de energia apresentado pela empresa Mouser Electronics, distribuidora de componentes eletrônicos. O diagrama de blocos é apresentado na Figura 15.



Figura 15 – Diagrama de blocos de *modems* PLC apresentado pela Mouser Electronics.

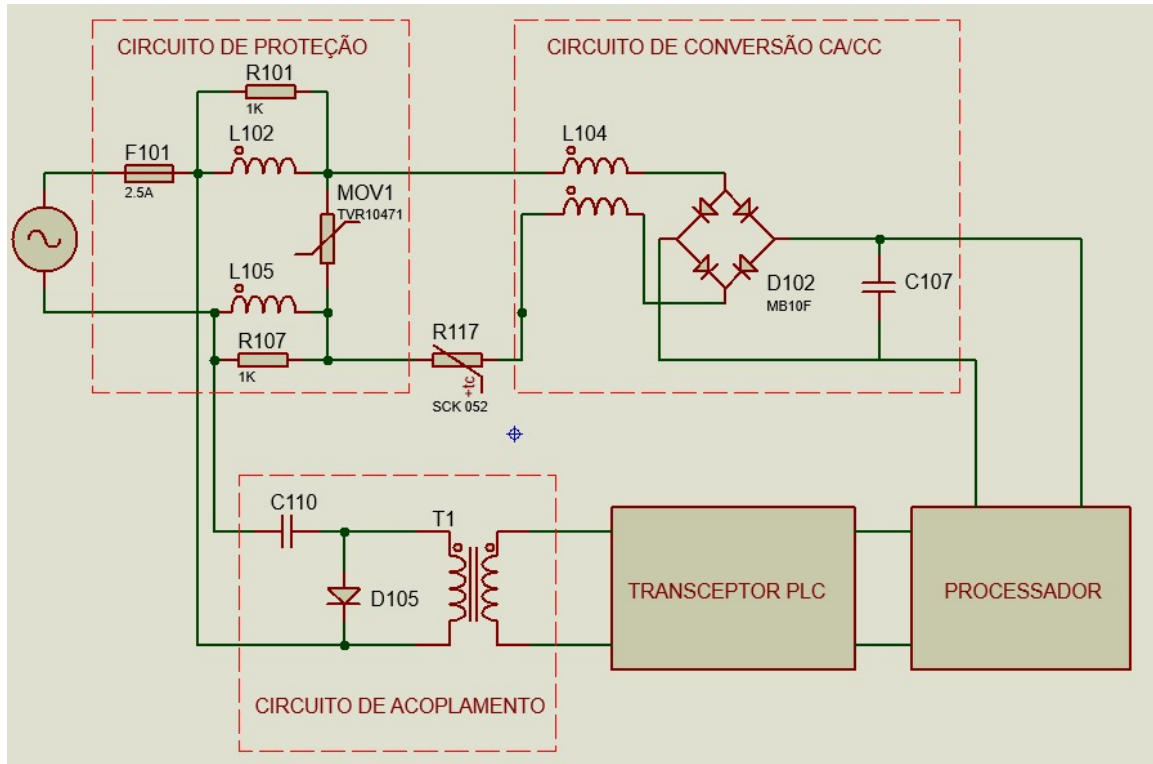


Fonte: (MOUSER ELECTRONICS, 2019).

Inicialmente foram identificados os principais componentes do circuito do *modem*, como o processador, o circuito de proteção elétrica (fusível e varistor), o circuito de isolamento e conversão CA/CC, o circuito de acoplamento e o transceptor PLC. Além desses componentes, o circuito é composto por dois conectores Ethernet, resistores, capacitores, diodos, transistores, indutores, cristais osciladores e ainda alguns outros circuitos integrados (CIs), como memória flash e transceptor gigabit ethernet 10/100/1000BASE-T.

Por meio de observação das trilhas e de testes de continuidade utilizando um multímetro, um diagrama elétrico de parte do circuito do *modem* modelo TL-PA7020 foi feito no programa Proteus, que é utilizado para criação de esquemáticos elétricos e eletrônicos, bem como simulações e desenvolvimento de Placa de Circuito Impresso (PCI). A Figura 16 apresenta esse diagrama elétrico com os principais circuitos e componentes.

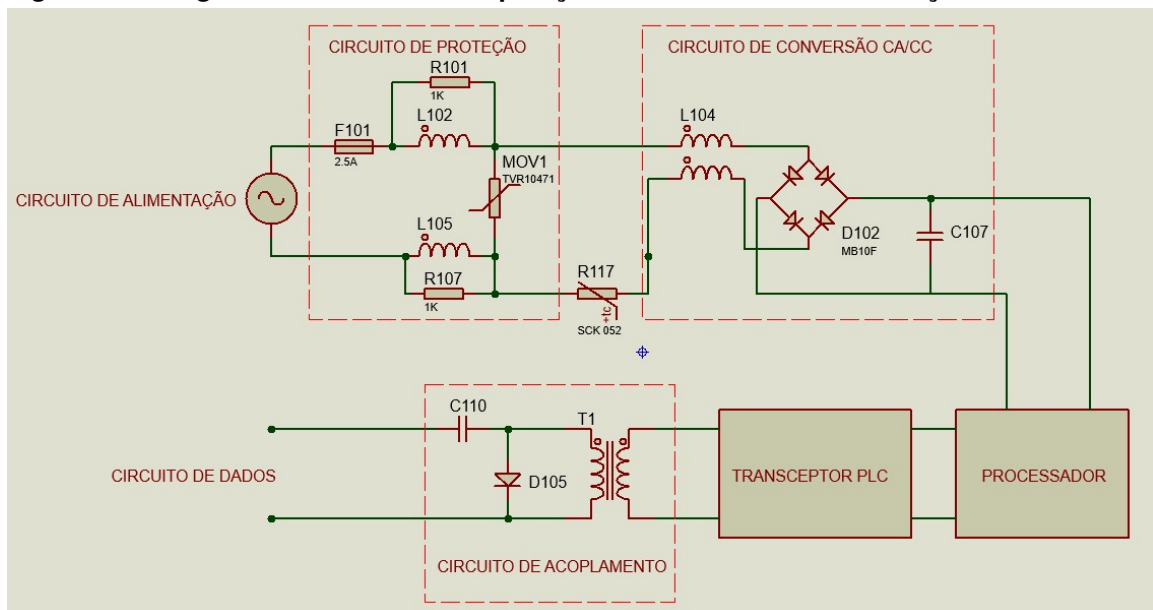
**Figura 16 – Diagrama de parte do circuito elétrico do *modem* modelo TL-PA7020 feito no programa Proteus.**



Fonte: Autoria própria.

As trilhas que ligavam o circuito de dados ao circuito de alimentação, no circuito de acoplamento, foram identificadas por meio do diagrama elétrico e em seguida foram rompidas como mostra o diagrama da Figura 17.

**Figura 17 – Diagrama elétrico com a separação dos circuitos de alimentação e de dados.**

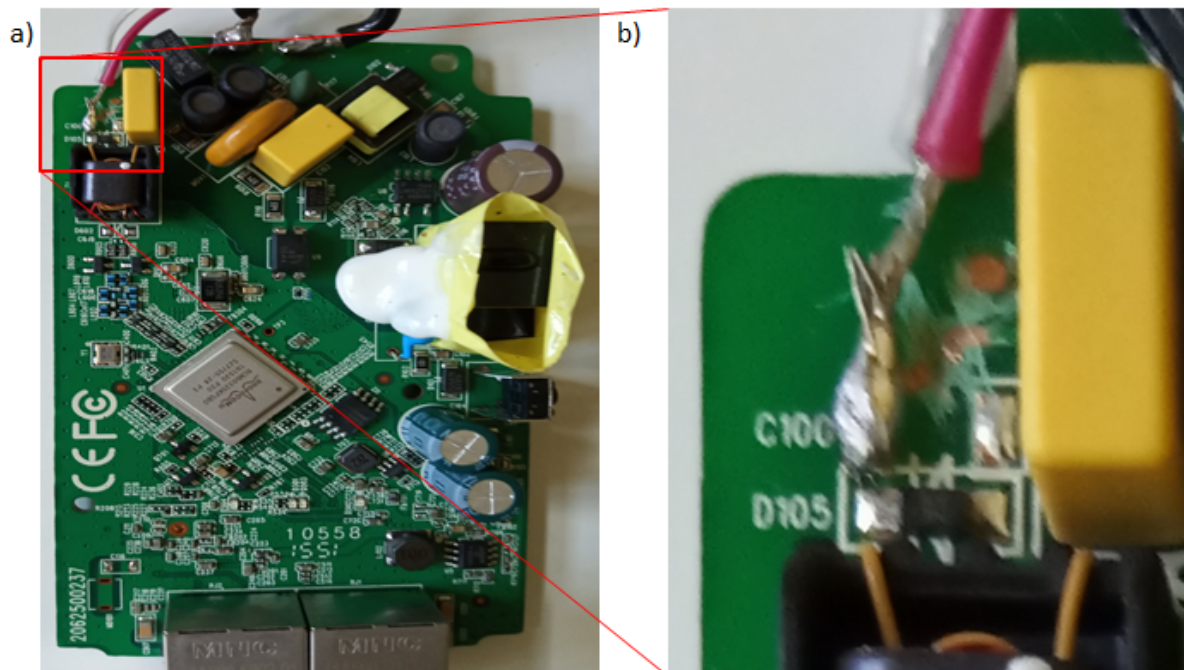


Fonte: Autoria própria.

O *modem* foi desenvolvido em uma PCI dupla face. As trilhas rompidas para a separação dos circuitos são apresentadas na Figura 18 e na Figura 19. A face frontal da PCI é mostrada na Figura 18a e a aproximação na trilha rompida na face frontal pode ser visualizada na Figura 18b. De forma semelhante, a Figura 19a mostra a face traseira e a aproximação na trilha rompida na face traseira é apresentada na Figura 19b.

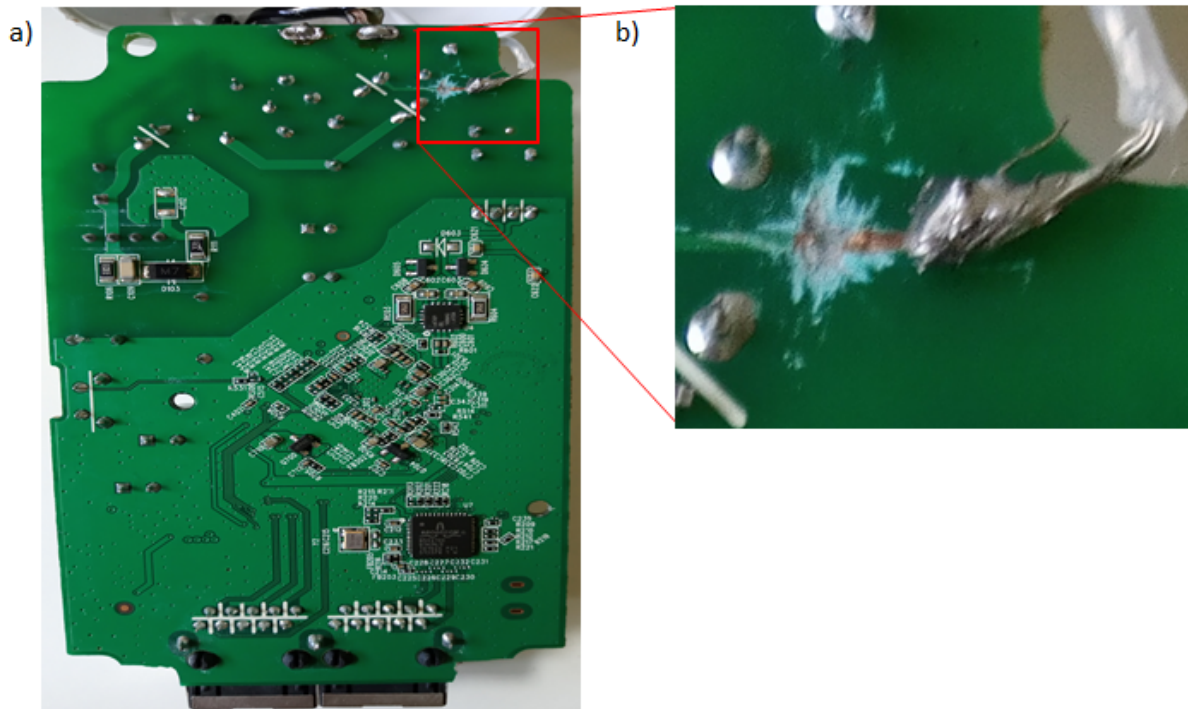
Para facilitar a ligação do circuito de dados com a linha de transmissão, dois cabos foram soldados ao circuito de dados (cabo vermelho mostrado na Figura 18b e cabo branco mostrado na Figura 19b).

**Figura 18 – Circuito do *modem* modelo TL-PA7020 padrão AV2. a) Face frontal da placa. b) Aproximação na trilha rompida na face frontal.**



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Circuito do *modem* modelo TL-PA7020 padrão AV2. a) Face traseira da placa. b) Aproximação na trilha rompida na face traseira.

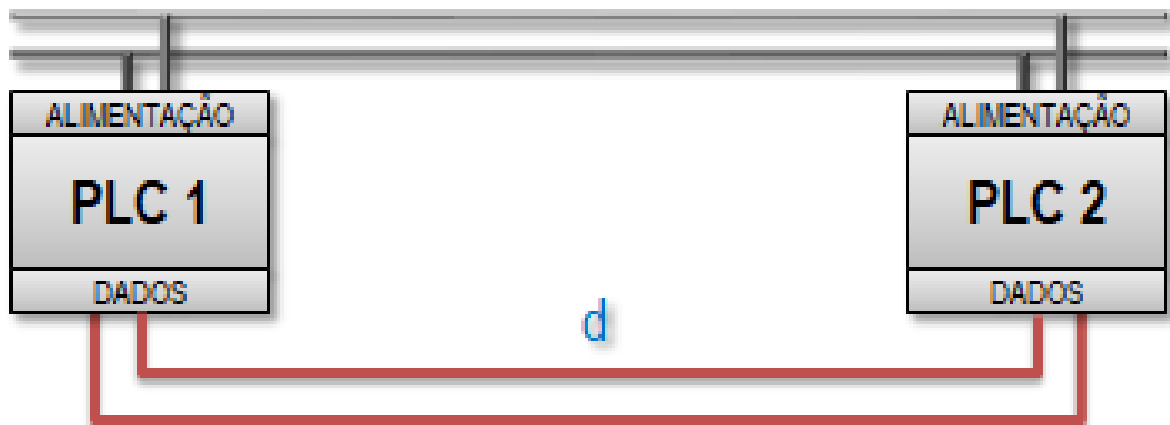


Fonte: Autoria própria.

Com o objetivo de verificar a isolação dos circuitos elétricos, foi realizado o teste de continuidade entre os cabos de dados e o conector de tomada (cabo de alimentação elétrica). O teste não apresentou continuidade entre os cabos, de forma a validar a isolação.

Por fim foi realizado um ensaio de transmissão de dados utilizando a configuração apresentada na Figura 20, com distância  $d = 0$  metros e as mesmas configurações no programa JPerf utilizadas na seção 3.1. As taxas de transmissão obtidas foram semelhantes às apresentadas pelo par de *modems* padrão AV2 antes da isolação dos circuitos.

**Figura 20 – Configuração do ensaio com transmissão por circuito de dados isolado do circuito de alimentação.**



Fonte: Autoria própria.

### 3.3 ENSAIO DE ESTABILIDADE DE COMUNICAÇÃO

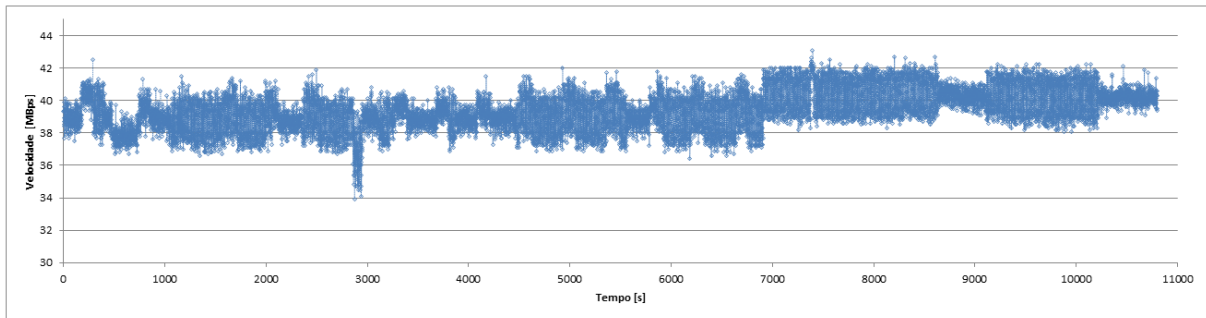
Para determinar a confiabilidade do equipamento de comunicação proposto para a aplicação, em poços de petróleo subaquáticos, o mesmo deve ser capaz de permanecer transmitindo dados sem interrupções. Para verificar essa condição de operação foi realizado um ensaio com a mesma configuração apresentada na Figura 20, considerando um período de 3 horas para assegurar que a transmissão não sofre quedas de velocidade e nem desconexões em longos períodos.

A escolha do protocolo de transporte para essa transmissão foi visando verificar a qualidade e confiabilidade da comunicação, sem objetivo de obter as maiores taxas de transmissão. Dessa forma, foi utilizado o protocolo TCP, que estabelece uma conexão antes de iniciar a transmissão dos dados e a mesma permanece ativa até o fim da transmissão.

Na janela de opções da camada de aplicação do modelo OSI presentes no programa JPerf, foi definida a transmissão por 10800 segundos, correspondente a três horas.

A Figura 21 mostra o resultado da transmissão contínua utilizando os *modems* modelo TL-PA7020, durante 3 horas.

**Figura 21 – Estabilidade de comunicação.**



**Fonte: Autoria própria.**

Pode-se afirmar que a conexão foi estável durante toda a transmissão de dados. Além disso, é possível perceber que, mesmo após a separação dos circuitos de dados e de alimentação, a velocidade de transmissão se manteve a mesma apresentada nas transmissões com os *modems* sem modificações.

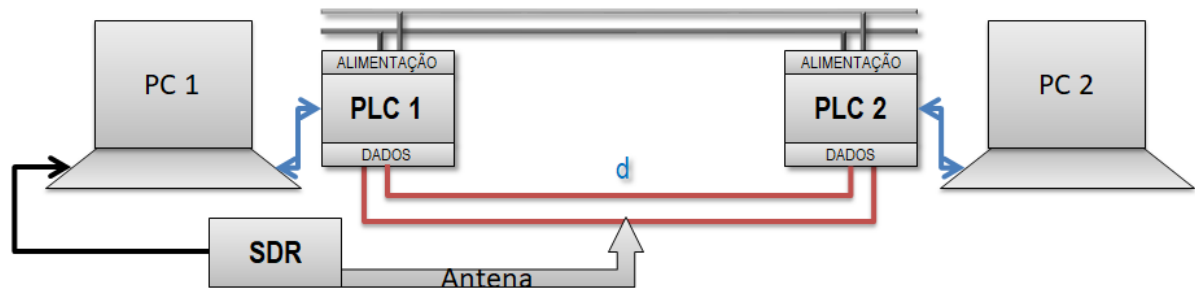
### 3.4 MEDIÇÃO DOS SINAIS TRANSMITIDOS

O sinal transmitido pelos *modems* PLC modelo TL-PA7020 é modulado em frequências de 2MHz até 86MHz segundo a folha de dados do mesmo (TP-LINK, 2019). Essa faixa de frequências está de acordo com a banda de operação definida pelo padrão *HomePlug AV2* ao qual esse modelo pertence.

Como apresentado na subseção 2.5.3, essa banda de frequência é definida como uma RF e, dessa forma, pode ser analisada por meio de um equipamento de rádio definido por software (SDR).

Para medir os sinais de RF a configuração utilizada foi como é apresentado na Figura 22 com  $d = 0$  metros. O SDR foi conectado na porta USB do computador e a sua antena foi posicionada próxima da ligação do circuito de dados dos *modems* PLC.

Figura 22 – Configuração do ensaio com medições utilizando o dispositivo SDR.



Fonte: Autoria própria.

O SDR utilizado foi um *dongle* modelo DVB-T+DAB+FM, apresentado na Figura 23, que possui um receptor R820T da marca Rafael Micro, com faixa de operação de 24 à 1766 MHz, e conta com um digitalizador RTL2832U fabricado pela Realtek.

A faixa de operação do SDR cobre a maior parte da banda de frequência do *modem* PLC modelo TL-PA7020 utilizado na transmissão de dados, de forma que foi possível observar seu funcionamento através da interface do programa SDR Console no computador.

Figura 23 – *Dongle* DVB-T+DAB+FM utilizado para a medição do sinal de rádiofrequência da comunicação PLC.



Fonte: Autoria própria.

Após a instalação dos *drivers* do SDR, o programa SDR Console foi configurado para a utilização em conjunto com o *dongle*. Na primeira execução do programa foi necessário selecionar o *dongle* RTL através de uma sequência de configurações.

Ao abrir o programa, uma janela intitulada *Select Radio*, é exibida solicitando a seleção de uma rádio. Para essa seleção, com o dispositivo conectado ao computador, foi pressionado o botão *Definitions* no canto inferior direito, em seguida pressionou-se *Search* no canto superior esquerdo da nova janela, intitulada *Radio Definitions*, e depois foi encontrado a opção *RTL Dongle* na lista. Assim que selecionado na lista, o dispositivo *RTL Dongle - R820T* é exibido na tela e, após a seleção do mesmo, a configuração foi salva através do botão *Save*, fechando essa janela. Dessa forma, o dispositivo *RTL Dongle - R820T* é exibido na lista da janela *Select Radio*. A configuração do programa *SDR Console* foi finalizada com a seleção do *dongle* na lista e pressionando o botão *Start*.

Assim, o SDR estava configurado e exibindo na tela do programa os sinais de rádiofrequência captados pela antena.

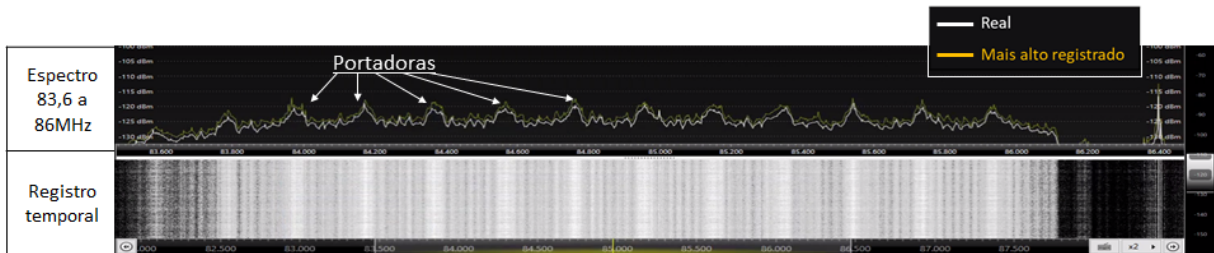
#### 3.4.1 Análise dos Sinais Recebidos

O sinal transmitido é uma rádiofrequência e, dessa forma, pode ser transmitido inclusive sem a conexão física entre os circuitos de dados do par de *modems* PLC de modo que os cabos de transmissão de dados funcionam como antenas utilizando o ar como meio de transmissão. Porém no meio subaquático, onde os poços de petróleo estão localizados, existe grande atenuação nos sinais de rádio e, além disso, mesmo no ar as taxas de transmissão foram inferiores a 5 MBps em distâncias menores que 50 centímetros. Com um metro de distância entre os *modems* a comunicação se perdia.

A banda de frequência utilizada pelo modelo TL-PA7020 é de 2 MHz até 86MHz, segundo o catálogo do fabricante (TP-LINK, 2019). Por meio da Figura 24 é possível perceber o fim da faixa de frequência, medida pelo SDR e apresentada pelo programa *SDR Console*, em 86,12MHz, muito próximo do valor definido pelo fabricante e do valor estabelecida pelo padrão AV2 (HOMEPLUG POWERLINE ALLIANCE, 2013).



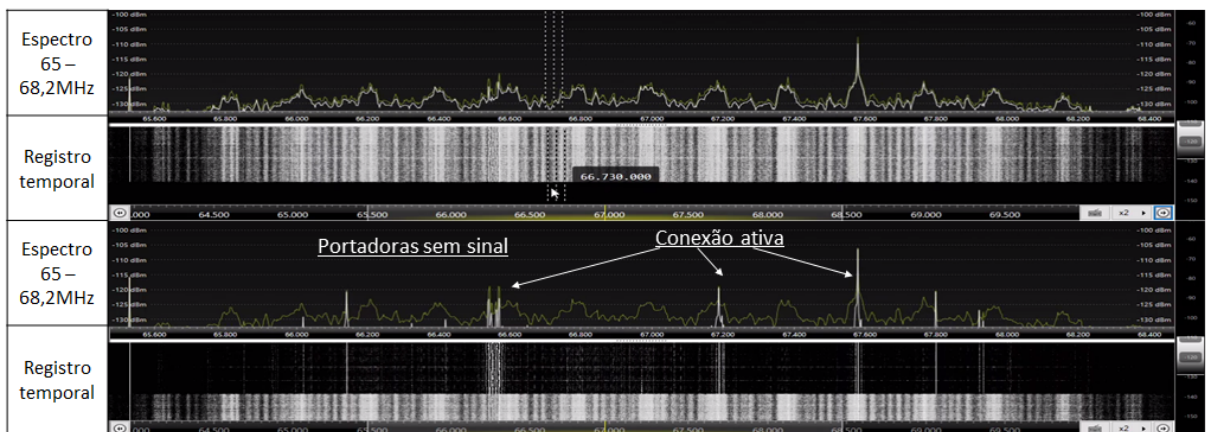
**Figura 24 – Interface do programa SDR Console mostrando o fim da banda de frequência do PLC modelo TL-PA7020 padrão AV2 em 86,12 MHz.**



Fonte: Autoria própria.

Ao ligar a transmissão de dados é possível perceber na interface do programa SDR Console o sinal RF que está sendo medido pela antena, localizada entre a ligação dos circuitos de dados do *modem 1* e do *modem 2*, como mostra a Figura 25a. Ao interromper a transmissão de dados no programa JPerf, o sinal RF diminui a intensidade em quase toda a faixa de frequências analisada (de 65,46 MHz à 68,46 MHz). A Figura 25b mostra a interface do programa SDR Console, momentos depois da transmissão de dados ser interrompida.

**Figura 25 – Interface do programa SDR Console. a) Sinal RF durante a transmissão de dados. b) Sinal RF ao encerrar a transmissão de dados.**



Fonte: Autoria própria.

Foi possível identificar as portadoras e o comportamento da comunicação PLC, que consiste na transmissão de sinais de RF pelo condutor elétrico. Na Figura 25b é possível observar que a conexão entre o par permanece ativa, mesmo quando não há dados sendo transmitidos. O sinal na cor branca, na parte superior da tela, representa o valor atual sendo medido e a cor amarela representa o maior valor nos últimos segundos. Dessa forma é possível observar a queda do sinal RF após o fim da transmissão entre os *modems* PLC. A parte inferior da tela apresenta o regis-

tro temporal do espectro de frequências em que, quanto maior a intensidade do sinal, mais claro ele será representado, com variação do branco ao preto, sendo possível ajustar o limiar através da barra deslizante localizada a direita da tela.

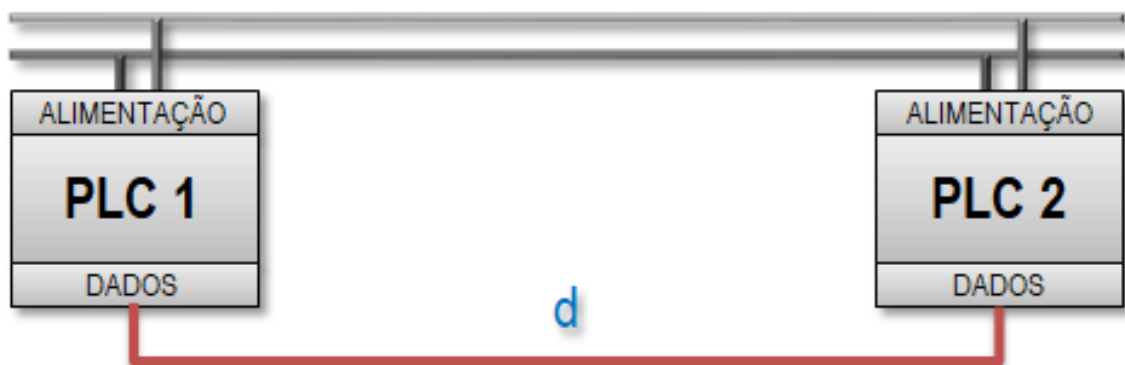
### 3.5 LINHA DE TRANSMISSÃO COMPOSTA POR UM ÚNICO CABO

O sistema de alimentação elétrica da central de poços subaquáticos, apresentada na Figura 4 presente na subseção 2.1.2, conta com um cabo de corrente contínua (CC) de 1,5 mm<sup>2</sup> e um sistema de aterramento, que liga os equipamentos na cabeça do poço à ANM.

Tendo em vista essa configuração, foram realizados ensaios utilizando apenas um cabo como linha de transmissão e depois com o uso de um sistema de aterramento para verificar se a transmissão com o aterramento apresentava melhorias em relação à configuração com apenas um cabo e posteriormente foram realizados ensaio com apenas um cabo variando o comprimento, bitola e a temperatura do cabo para analisar os impactos dessas variáveis na velocidade de transmissão.

O primeiro ensaio com apenas um cabo foi realizado conforme mostra a Figura 26, considerando  $d = 0$  metros, de modo que um cabo de transmissão de dados do PLC 1 fosse ligado diretamente a um cabo de transmissão de dados do PLC 2. Esse ensaio foi desenvolvido para assegurar que a transmissão por meio de um único condutor elétrico era possível e apresentou resultados semelhantes aos obtidos na transmissão utilizando os dois cabos de dados dos *modems* PLC, devido a pequena distância entre os equipamentos.

**Figura 26 – Configuração do ensaio com transmissão por um único cabo.**



Fonte: Autoria própria.

### 3.5.1 Linha de Transmissão com um Cabo e Sistema de Aterramento

Para a realização do ensaio considerando o sistema de aterramento e um cabo como linha de transmissão foi definida uma distância de 60 metros entre os *modems*, simulando o posicionamento de um *modem* na cabeça do poço e outro na ANM, considerando a distância que pode existir entre esses dois equipamentos subaquáticos. Foram utilizados os seguintes materiais para a realização desse ensaio:

- *Modems* marca TP-Link modelo TL-PA7020 (Kit AV1000 - padrão AV2);
- Cabo de cobre flexível de  $1,5 \text{ mm}^2$  com isolamento em PVC - 60 metros de comprimento;
- Duas barras de cobre para aterramento de 1,2 metros;
- Dois cabos de rede CAT5e (4 pares / 24AWG);
- Dois microcomputadores com adaptadores de rede padrão Gigabit Ethernet (1000Mbps).

Inicialmente as barras de cobre foram enterradas com uma distância de 60 metros uma da outra e em seguida os equipamentos foram ligados conforme a Figura 27.

Figura 27 – Configuração do ensaio com transmissão por um cabo e aterramento.

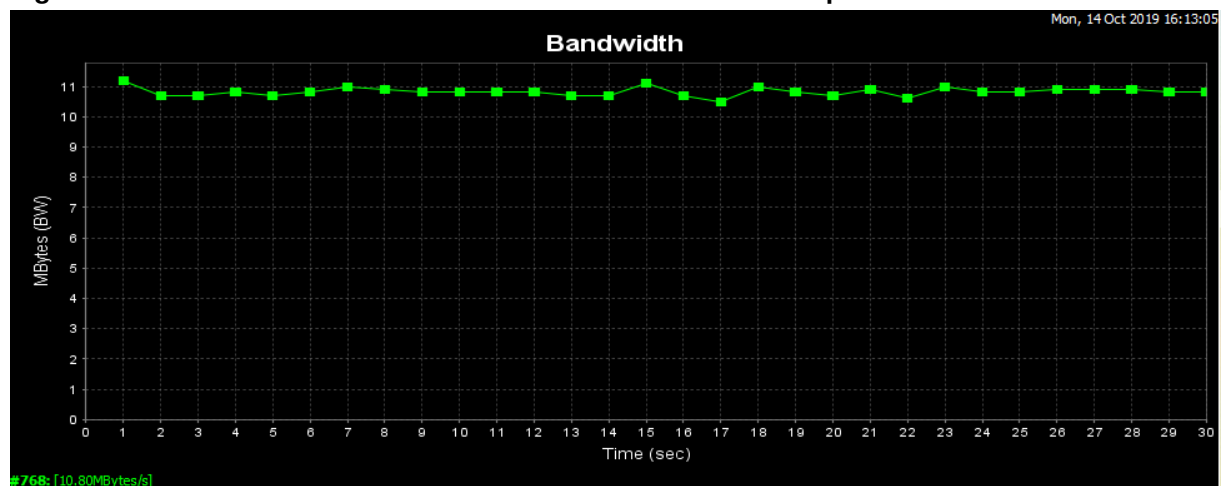


Fonte: Autoria própria.

Foram realizadas três transmissões, de 30 segundos cada, utilizando o protocolo de transporte UDP e três com TCP de forma a determinar o protocolo mais adequado para a aplicação em poços de petróleo subaquáticos através da média das taxas de transmissão e também levando em consideração as vantagens oferecidas pelo protocolo TCP em relação a confiabilidade de transporte dos dados. As comunicações com protocolo TCP apresentaram uma média maior das taxas de transmissão e por isso foi definido esse protocolo de transporte como ideal para a aplicação.

A transmissão no ambiente externo, utilizando apenas um cabo 1,5 mm<sup>2</sup> de 60 metros e o aterramento, apresentou transmissões com velocidades semelhantes utilizando os 2 protocolos de transporte de dados, TCP e UDP. Com o protocolo UDP, que apresentou taxas mais altas nos ensaios iniciais em laboratório, a velocidade média foi de 9,73 MBps com perda de 0,65 % dos dados transmitidos. Já com o protocolo TCP, a velocidade média foi de 10,8 MBps, com a vantagem da confiabilidade deste protocolo, que assegura a transmissão de todos os dados enviados. A Figura 28 apresenta a interface do programa JPerf durante uma transmissão no ambiente externo, utilizando o protocolo TCP, na qual é possível perceber estabilidade durante o ensaio.

**Figura 28 – Resultado da transmissão em ambiente externo com protocolo TCP - Interface JPerf.**



Fonte: Aatoria própria.

Dessa forma foi definida a utilização do protocolo TCP para todos os demais ensaios, juntamente com a utilização do padrão mais atualizado de *modems Home-Plug*, o AV2. Além de apresentar velocidades de transmissão próximas, até superiores, das apresentadas com a utilização do protocolo UDP, o protocolo TCP garante a recebimento de todos os dados na ordem em que foram transmitidos, sendo mais

adequado para aplicações de monitoramento contínuo, onde nenhum dado deve ser perdido ou recebido fora de ordem, para evitar más interpretações das informações.

### 3.5.2 Ensaio dos Impactos da Variação de Comprimento dos Cabos na Velocidade de Transmissão

Com o aumento da distância entre os *modems*, sem ligação dos cabos de dados, a velocidade de transmissão diminuiu e a comunicação foi perdida a partir de uma certa distância, visto que os sinais de rádio perdem sua intensidade devido a atenuação. De modo semelhante, ao utilizar um cabo como meio de transmissão, o sinal é atenuado reduzindo as taxas conforme o comprimento do cabo aumenta.

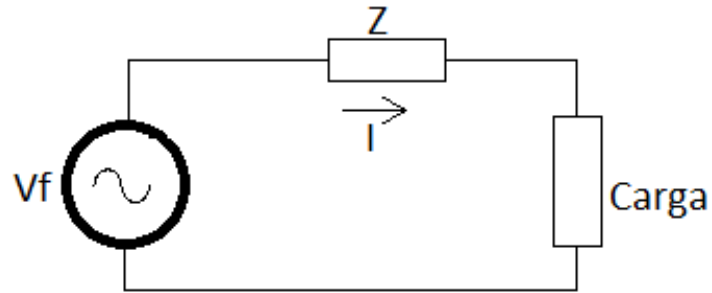
Diferentemente dos resultados apresentados com a variação de comprimentos, utilizando os *modems* sem modificações, com a extensão elétrica de 25 metros, ao utilizar apenas um cabo como meio de transmissão a variação de comprimento impactou consideravelmente nas velocidades obtidas. Ao utilizar um cabo de 60 metros e o sistema de aterramento a velocidade reduziu de aproximadamente 40 MBps para 10 MBps. Assim, foi possível perceber que o comprimento do cabo podia influenciar consideravelmente nas taxas de transmissão de dados ao utilizar um único cabo.

O aumento do comprimento faz com que a impedância do cabo aumente proporcionalmente, conforme a Equação (1), onde  $Z$  é a impedância do cabo [ $\Omega$ ],  $d$  é o comprimento [m] e  $\bar{Z}$  representa a impedância relativa [ $\Omega / m$ ].

$$Z = d * \bar{Z} \quad (1)$$

Com o aumento do comprimento ocorre maior queda de tensão e, conseqüentemente, atenuação do sinal transmitido, que é a perda de intensidade do sinal. Para o circuito apresentado na Figura 29, a queda de tensão se relaciona com a impedância do cabo por meio da Equação (2), onde  $\Delta V\%$  representa a queda de tensão percentual,  $I$  é a corrente elétrica que passa pelo circuito,  $Z$  é a impedância do cabo que, depende entre outros fatores do comprimento do cabo e  $V_f$  é a tensão da fonte.

**Figura 29 – Modelo de circuito elétrico para cálculo de queda de tensão.**

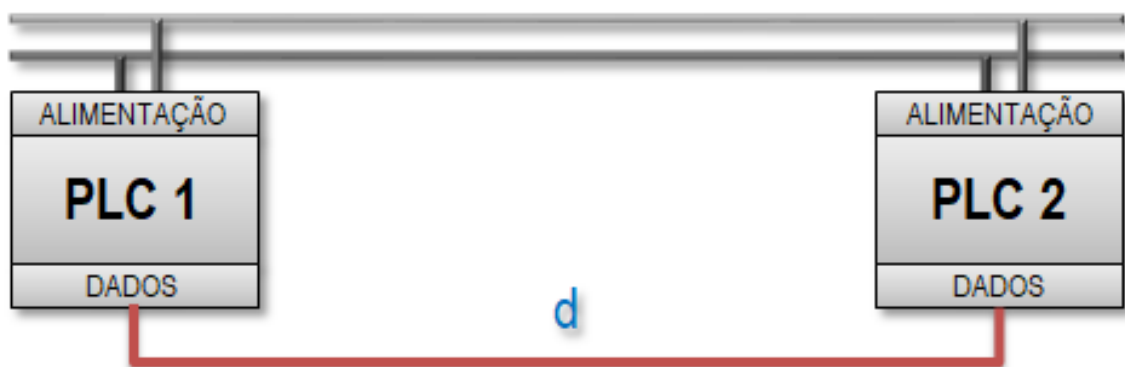


**Fonte: Autoria própria.**

$$\Delta V_{\%} = \frac{I * Z * 100}{V_f} \quad (2)$$

A Figura 30 mostra a configuração utilizada para esse ensaio. Foram usados dois rolos de 100 metros de cabos de cobre flexíveis com isolamento em PVC, com bitolas diferentes, um com 1,5 mm<sup>2</sup> e outro com 2,5 mm<sup>2</sup>, visto que a bitola do cabo também altera a impedância do mesmo de modo inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a bitola, menor é a impedância.

**Figura 30 – Configuração dos ensaios de variação de comprimento do cabo utilizado como linha de transmissão.**



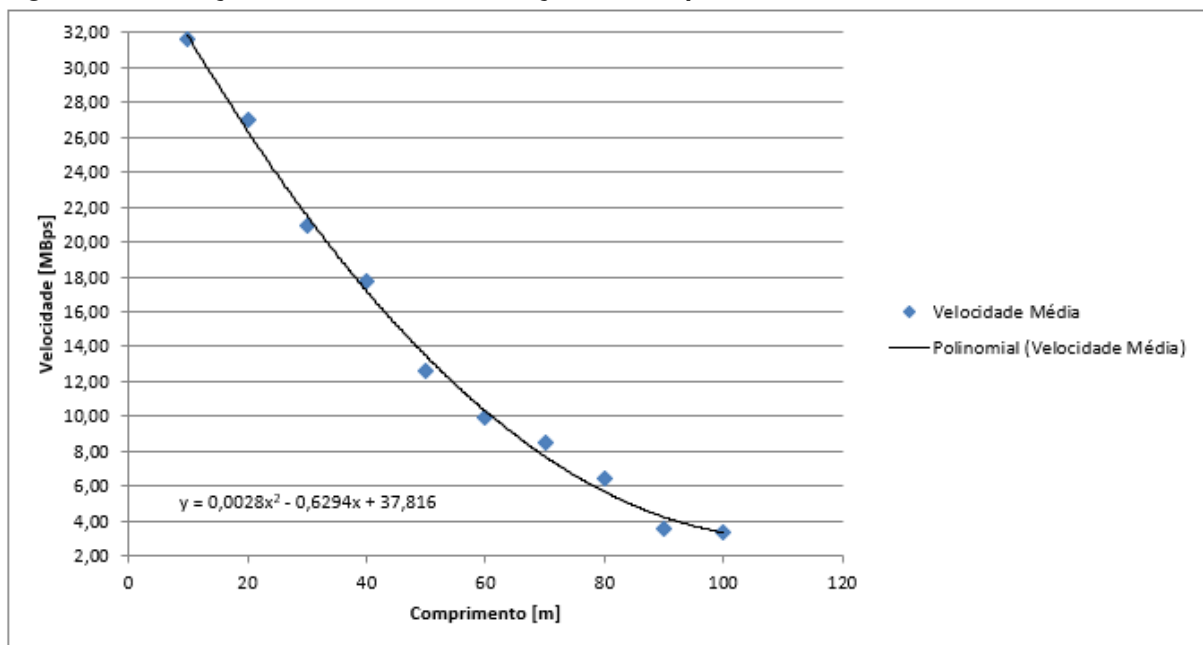
**Fonte: Autoria própria.**

O ensaio começou com a transmissão de dados utilizando o cabo de 1,5 mm<sup>2</sup> com comprimento de 100 metros ( $d = 100$  metros) e após três transmissões com essa configuração o cabo foi cortado, reduzindo 10 metros do seu comprimento. Essa metodologia foi utilizada até sobrar apenas 10 metros de cabo. Em seguida, o mesmo foi realizado para o cabo de 2,5 mm<sup>2</sup>.

### 3.5.2.1 Resultados dos Ensaio dos Impactos da Variação de Comprimento dos Cabos na Velocidade de Transmissão

A Figura 31 mostra o gráfico obtido por meio dos resultados das médias de velocidades de transmissão com a variação do comprimento do cabo único de 1,5 mm<sup>2</sup>.

**Figura 31 – Variação de velocidade em função do comprimento do cabo 1,5 mm<sup>2</sup>.**



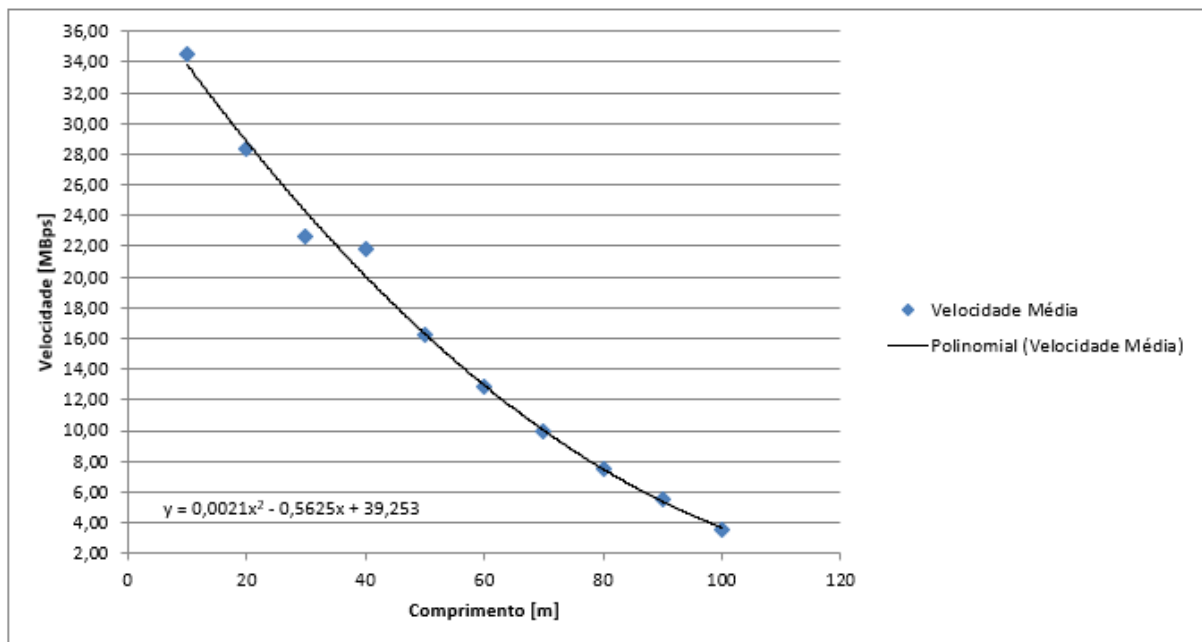
**Fonte: Autoria própria.**

O decaimento da velocidade em função do comprimento do cabo único de 1,5 mm<sup>2</sup> foi aproximado pela equação  $y = 0,2847x^2 - 6,2937x + 37,816$ , onde y representa a velocidade e x o comprimento do cabo.

Utilizando o comprimento de 60 metros com o cabo de 1,5 mm<sup>2</sup>, a média foi de 9,89 MBps, inferior a média obtida pela transmissão com esse mesmo cabo e o sistema de aterramento, que foi de 10,8 MBps.

A Figura 32 mostra o gráfico obtido por meio dos resultados das médias de velocidades de transmissão com a variação do comprimento do cabo único de 2,5 mm<sup>2</sup>.

**Figura 32 – Variação de velocidade em função do comprimento do cabo 2,5 mm<sup>2</sup>.**



Fonte: Autoria própria.

O decaimento da velocidade em função do comprimento do cabo único de 2,5 mm<sup>2</sup> foi aproximado pela equação  $y = 0,2068x^2 - 5,6253x + 39,253$ , onde y representa a velocidade e x o comprimento do cabo.

Ao utilizar o cabo com a bitola maior, de 2,5 mm<sup>2</sup>, as médias das velocidades foram superiores, como é possível perceber pela Tabela 6.

**Tabela 6 – Comparativo das médias das velocidades de transmissão com a variação de comprimento dos cabos de 1,5 mm<sup>2</sup> e 2,5 mm<sup>2</sup>.**

Comprimento [m]	Média com o cabo 1,5 mm <sup>2</sup> [MBps]	Média com o cabo 2,5 mm <sup>2</sup> [MBps]
10	31,63	34,50
20	27,03	28,33
30	20,93	22,60
40	17,70	21,77
50	12,60	16,27
60	9,89	12,83
70	8,49	9,92
80	6,41	7,46
90	3,61	5,50
100	3,33	3,58

Fonte: Autoria Própria



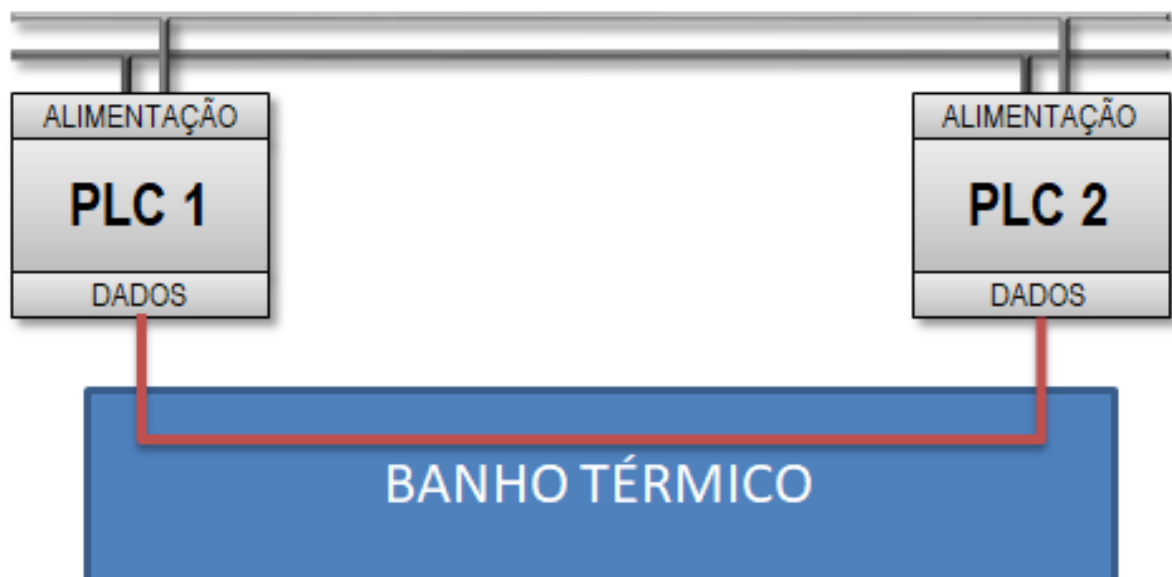
### 3.5.3 Ensaio dos Impactos da Variação da Temperatura dos Cabos na Velocidade de Transmissão

Assim como a variação do comprimento e bitola dos cabos, a variação de temperatura também impacta diretamente na impedância, aumentando a componente resistiva com o aumento da temperatura. Para cabos de cobre, a variação de resistência com a temperatura é dada pela Equação (3), onde  $R_T$  é a resistência na temperatura atual,  $T$  é a temperatura atual,  $T_0$  é a temperatura inicial, cuja resistência é conhecida e  $R_{T_0}$  é a resistência na temperatura inicial ( $T_0$ ).

$$R_T = (1 + 0,00393(T - T_0)) * R_{T_0} \quad (3)$$

A Figura 33 apresenta a configuração utilizada para a realização do ensaio com variação de temperatura. O cabo de transmissão de dados foi mergulhado em um banho térmico e, com o esse equipamento ainda desligado, foram realizadas três transmissões. Em sequência, o equipamento foi ligado para começar a aquecer o cabo. Três medições foram realizadas a cada 5 °C.

**Figura 33 – Configuração do ensaio com variações de temperatura com banho térmico.**



**Fonte: Autoria própria.**

O ensaio iniciou em temperatura ambiente, porém nas primeiras medições não houveram variações significativas na velocidade de transmissão e, a partir dos 50 °C, a queda de velocidade ficou perceptível.

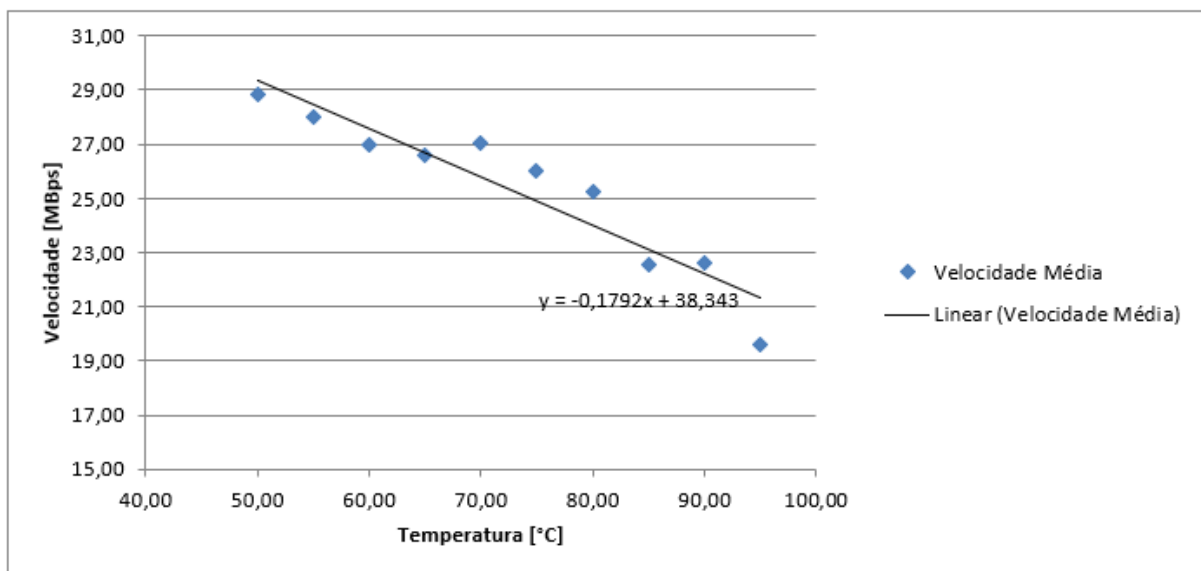
De acordo com a fabricante de cabos, Nambei Fios e Cabos, a temperatura limite de carga de cabos com isolamento em PVC é de 100 °C, portanto o ensaio foi realizado dentro dessa limitação, sendo que a temperatura máxima utilizada foi de 95 °C.

Desse modo, os resultados apresentados são as médias das velocidades de transmissão, medidas a cada 5 °C, de 50 °C à 95 °C. Fica notável a redução nas taxas de transmissão com o aumento da temperatura, sendo mais um fator para ser considerado na aplicação em poços de petróleo subaquáticos.

### 3.5.3.1 Resultados do Ensaio dos Impactos da Variação da Temperatura dos Cabos na Velocidade de Transmissão

Com o aumento da temperatura dos cabos, assim como com o aumento do comprimento e a redução da bitola dos mesmos, houve aumento de impedância e, conseqüentemente, redução das taxas de transmissão como mostra a Figura 34.

**Figura 34 – Influência da variação de temperatura na velocidade de transmissão.**



Fonte: Autoria própria.

Assim como para a análise dos impactos da variação do comprimento, a redução da velocidade de transmissão com o aumento da temperatura no cabo de 1,5 mm<sup>2</sup> pôde ser analisada por meio da Equação 4.

$$y = -0,1792x + 38,343 \quad (4)$$

Substituindo a temperatura de 150 °C na Equação 4 foi estimada uma velocidade de transmissão de 11,463 MBps para essa temperatura, o equivalente a 32,76% da velocidade obtida em temperatura ambiente.

### 3.6 TENTATIVA DE MELHORIA DA TAXA DE TRANSMISSÃO

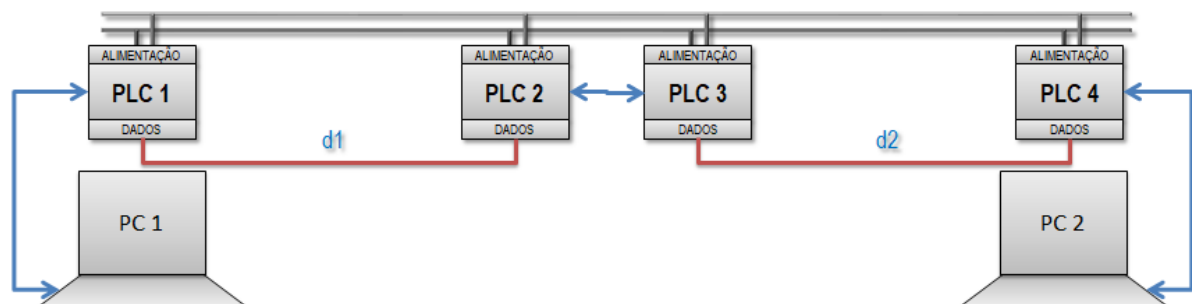
Levando em consideração as condições da linha de transmissão em ambiente externo (60 metros, com cabo 1,5 mm<sup>2</sup> e sistema de aterramento), juntamente com as altas temperaturas das regiões HTHP, característica da localização dos poços de petróleo subaquáticos, que diminuem consideravelmente as taxas de transmissão dos *modems* PLC, é necessário a utilização de técnicas de comunicação visando o aumento da velocidade.

Dessa forma foram realizados dois ensaios em laboratório, objetivando determinar uma topologia utilizando mais de um par de *modems* para aumentar a velocidade de transmissão: com comunicação "costa-a-costa" e "paralela".

#### 3.6.1 Comunicação Back-to-Back

A comunicação *Back-to-Back* consiste no pareamento físico dos dois *modems* do par 1 (PLC 1 e PLC 2), dos dois *modems* do par 2 (PLC 3 e PLC 4) e na ligação de um par ao outro por meio do cabo de rede, de modo que os pares fiquem costa-a-costa, como mostra a Figura 35.

**Figura 35 – Configuração do ensaio de comunicação *Back-to-Back*.**



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma a distância total é dividida na metade, ou seja, para a distância  $d = 60$  metros,  $d_1$  e  $d_2$  equivalem a 30 metros ( $d_1 = d_2 = 30$  metros). Como a velocidade de transmissão com um cabo de 30 metros é superior em relação à transmissão com

cabo de 60 metros, esperou-se um desempenho melhor da rede.

No ensaio foram utilizados cabos de 10 metros ( $d_1 = d_2 = 10$  metros). O computador PC 1 enviou dados para o PLC 1, que por sua vez modulou os dados e os transmitiu por meio do cabo de cobre até o PLC 2. O PLC 2 demodulou o sinal e enviou pelo cabo Ethernet para o PLC 3, que novamente modulou os dados para transmitir ao PLC 4. Por fim o PLC 4 demodulou os dados e transmitiu para o PC 2.

#### 3.6.1.1 Resultados Obtidos com a Comunicação Costa-a-Costa

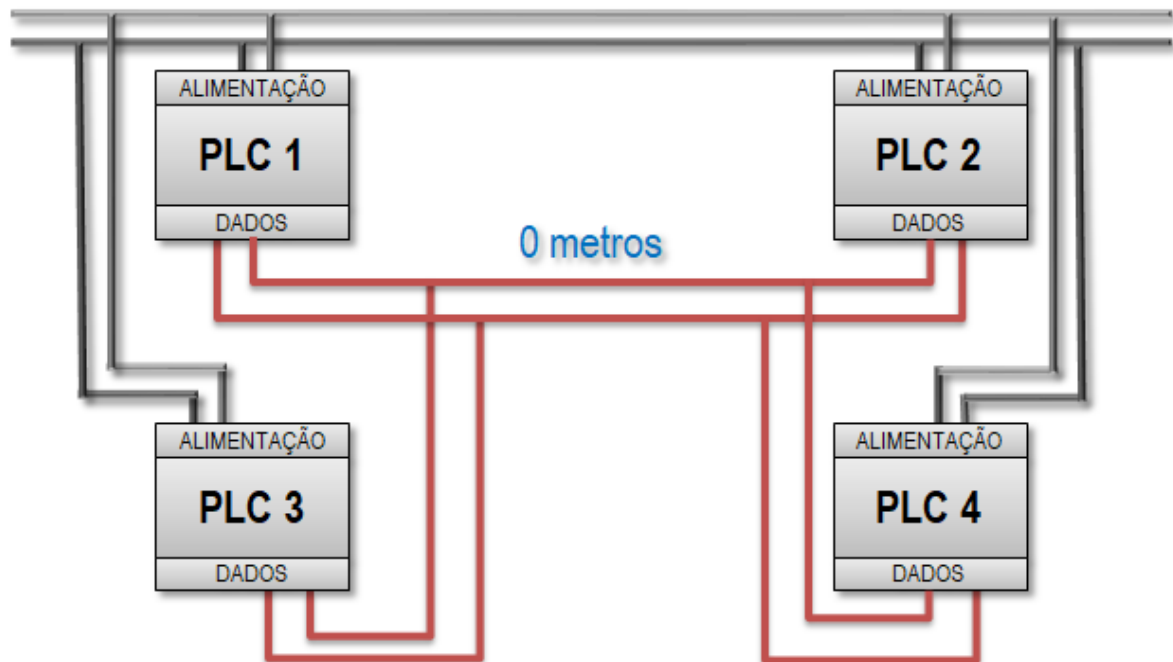
Na transmissão com um cabo de 20 metros de comprimento, a velocidade média foi de 27,37 MBps e com um cabo de 10 metros a média foi de 32,87 MBps. Dessa forma, o resultado esperado era que, mesmo com as reduções de velocidade causadas pelo tempo levado com modulações e demodulações, essa transmissão com dois cabos de 10 metros fosse mais veloz que a com um único cabo de 20 metros, alcançando aproximadamente 30 MBps, superior à transmissão com um cabo de 20 metros. Entretanto, o valor obtido foi de 8,96 MBps.

Devido a isso, esse ensaio só foi realizado em laboratório, visto que, para o exemplo citado anteriormente, considerando dois cabos de 30 metros, esperava-se a mesma ineficiência da topologia proposta.

#### 3.6.2 Comunicação Paralela

A outra topologia proposta com o objetivo de melhorar o desempenho da rede, foi utilizando os pares em paralelo, com a mesma linha de transmissão, visto a limitação de possuir apenas um cabo e um sistema de aterramento. A topologia é apresentada na Figura 36 e consiste no pareamento físico de cada par (PLC 1 com PLC 2 e PLC 3 com PLC 4), assim como na topologia anterior, e na conexão de cada PLC a um computador.

**Figura 36 – Configuração do ensaio de transmissão em paralelo.**



**Fonte: Autoria própria.**

Inicialmente foi utilizada a conexão direta dos cabos de dados dos *modems*. O PC 1 enviou informações para o PC 2 por meio do par 1 transmitindo pelo par de cabos e simultaneamente o PC 3 enviou informações para o PC 4 por meio do par 2 de PLCs através do mesmo par de cabos utilizado.

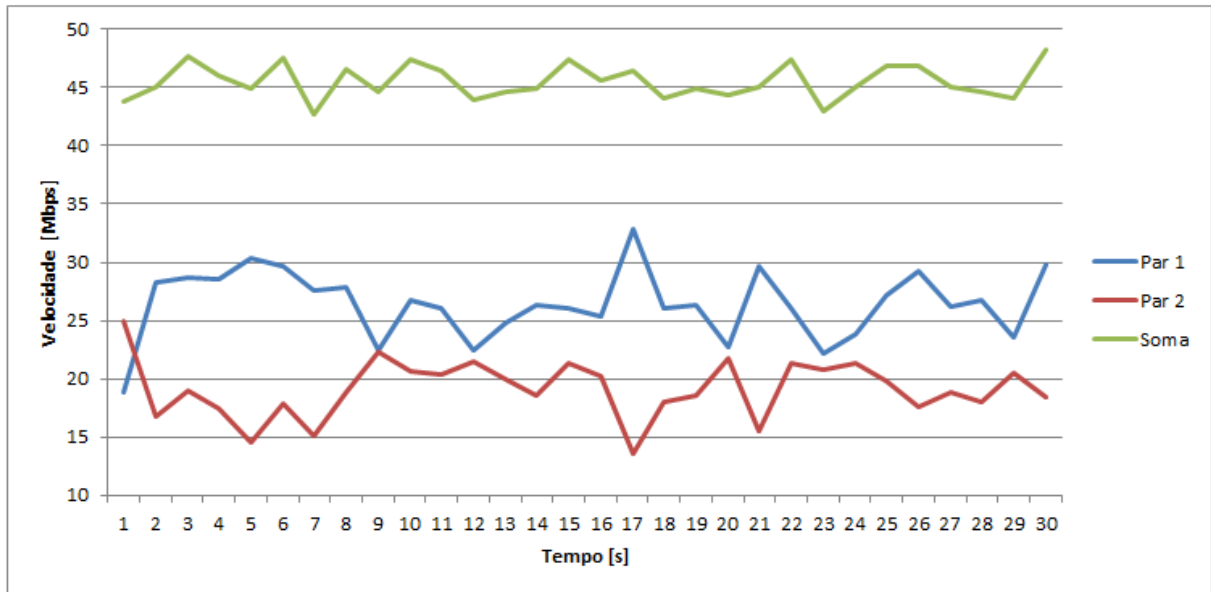
Foram realizadas transmissões de 30 segundos com um par de *modems* e depois com os dois pares operando simultaneamente.

O resultado esperado na transmissão simultânea era que cada par de *modems* utilizasse uma banda diferente de frequências, dividindo a banda total de 84 MHz (de 2 MHz à 86 MHz) de forma que a velocidade de cada par fosse reduzida, porém a soma das taxas de transmissão fosse maior que a média apresentada nos ensaios iniciais com a utilização de um único par com toda a banda disponível.

### 3.6.2.1 Resultados Obtidos com a Comunicação Paralela

A Figura 37 apresenta os resultados obtidos por cada par, com médias de 26,41 MBps e 19,12 MBps, e a soma das velocidades obtidas com média de 45,53 MBps.

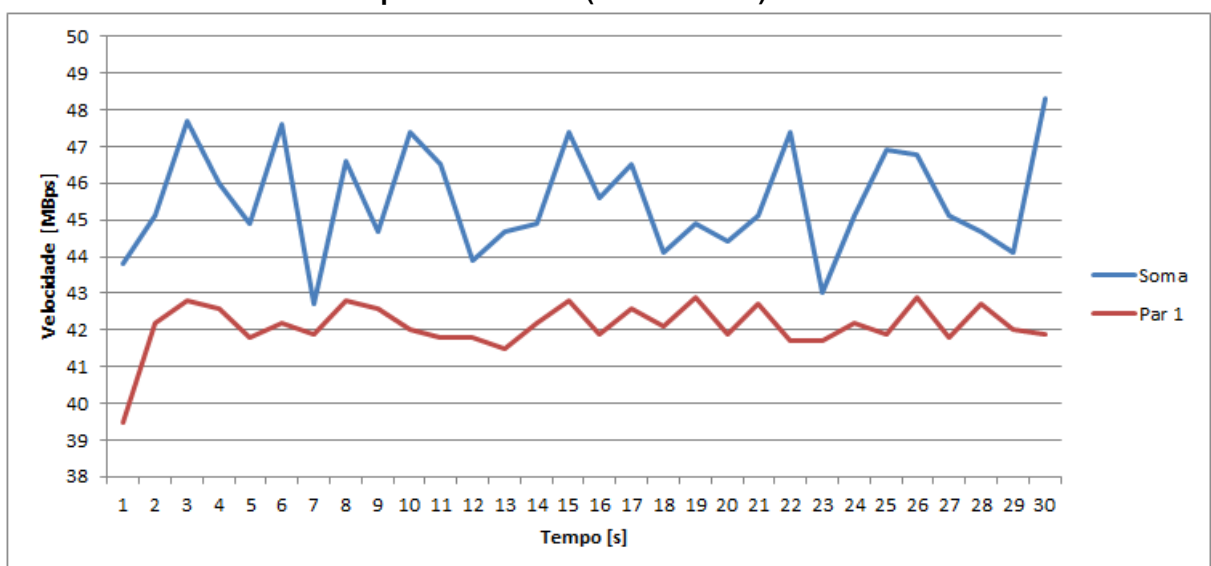
**Figura 37 – Transmissões paralelas dos dois pares de *modems* e a soma das duas transmissões (em verde). Par 1 em azul e par 2 em vermelho.**



Fonte: Autoria própria.

Visto que a soma das velocidades (média de 45,53 MBps) foi maior que a velocidade apresentada por um único par no ensaio em laboratório (média de 41,65 MBps), como mostra a Figura 38, o mesmo foi replicado para a transmissão em ambiente externo, utilizando um cabo de 1,5 mm<sup>2</sup> de 60 metros de comprimento e o sistema de aterramento.

**Figura 38 – Comparativo entre a soma das transmissões paralelas (em azul) e uma transmissão usando um único par de *modems* (em vermelho).**



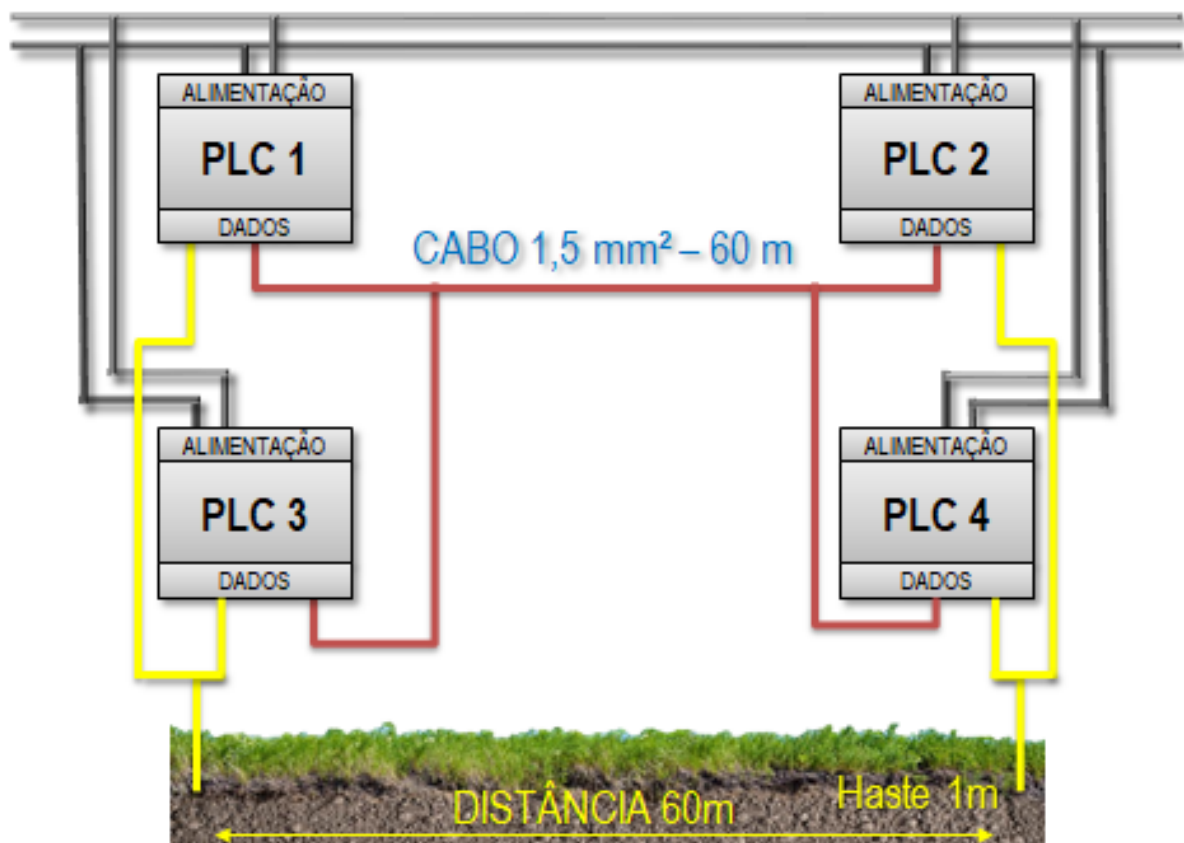
Fonte: Autoria própria.

### 3.6.3 Ensaio com Transmissão Paralela em Ambiente Externo Utilizando um Cabo e o Aterramento como Sistema de Transmissão

A Figura 39 mostra a configuração utilizada no ensaio. A principal diferença desse ensaio para o anterior, foi a conexão de um cabo de dados dos *modems* ao cabo flexível de cobre e o outro cabo de dados às barras de cobre aterradas, sendo que o PLC 1 e 3 ficaram conectados em uma barra e o PLC 2 e 4 na outra, com 60 metros de distância entre as mesmas.

Foram realizadas transmissões de 30 segundos com um par de *modems* e depois com os dois pares operando simultaneamente. Além disso, foi analisado como os *modems* se comportam quando um par começa a transmitir dados durante a transmissão de outro par, após 10 segundos de transmissão.

**Figura 39 – Configuração do ensaio com transmissão paralela em ambiente externo utilizando um cabo e o aterramento como sistema de transmissão.**



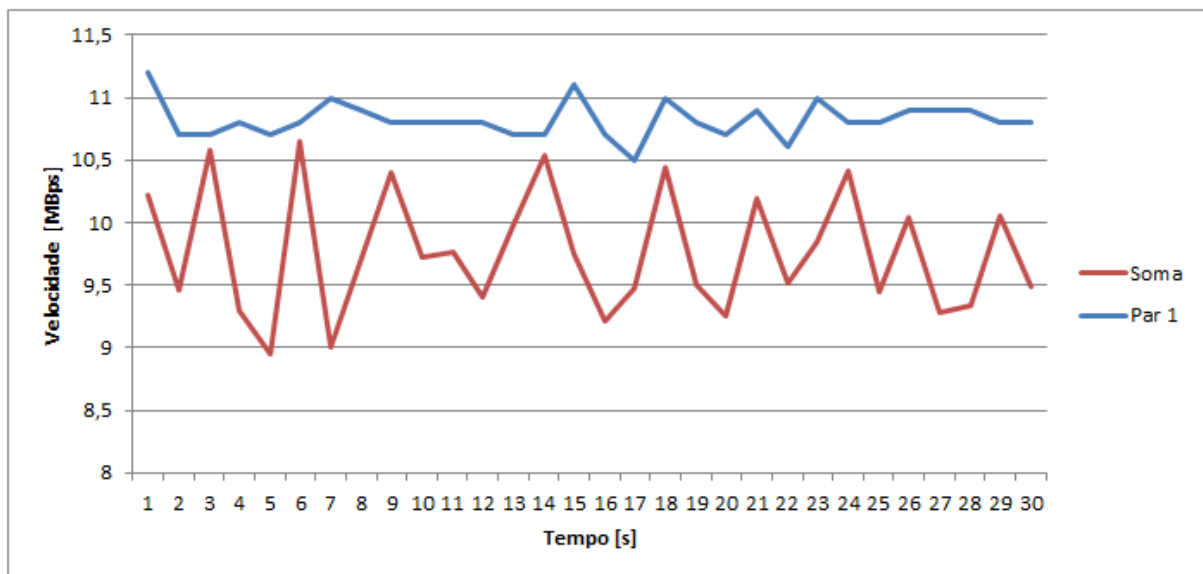
Fonte: Autoria própria.

### 3.6.3.1 Análise dos Resultados Obtidos

No ensaio de comunicação em paralelo em ambiente externo, a soma das velocidades de transmissão foi inferior a velocidade ao utilizar um único par como mostra a Figura 40. Dessa forma as tentativas de melhoria das taxas de transmissão foram falhas e o sistema de transmissão com um cabo e sistema de aterramento foi limitado a transmissões de aproximadamente 10 MBps.

Em primeiro momento essa velocidade é suficiente para a transmissão dos dados do DAS e do DTS em tempo real, mas deve ser levado em consideração o efeito da temperatura, que causa redução nas taxas de transferência, além de outros fatores que possam vir a influenciar negativamente na transmissão.

**Figura 40 – Comparativo entre a soma das transmissões paralelas (em vermelho) e uma transmissão usando um único par de *modems* (em azul).**

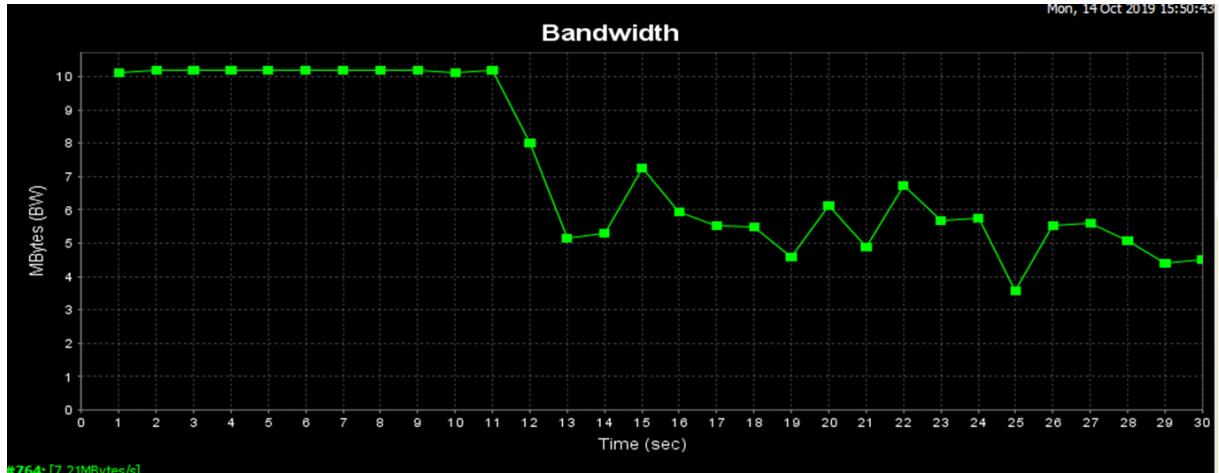


Fonte: Autoria própria.

Quanto ao ensaio para analisar o comportamento dos *modems* ao iniciar a transmissão de dados de um par durante a transmissão do outro par, o par que inicia a transferência utiliza toda a banda de frequências, obtendo velocidades próximas de 10 MBps, como nos ensaios anteriores com essa mesma configuração. Ao iniciar a comunicação do segundo par, aos 10 segundos da transmissão, o valor cai diretamente para cerca de 5 ou 6 MBps, como apresenta a Figura 41.



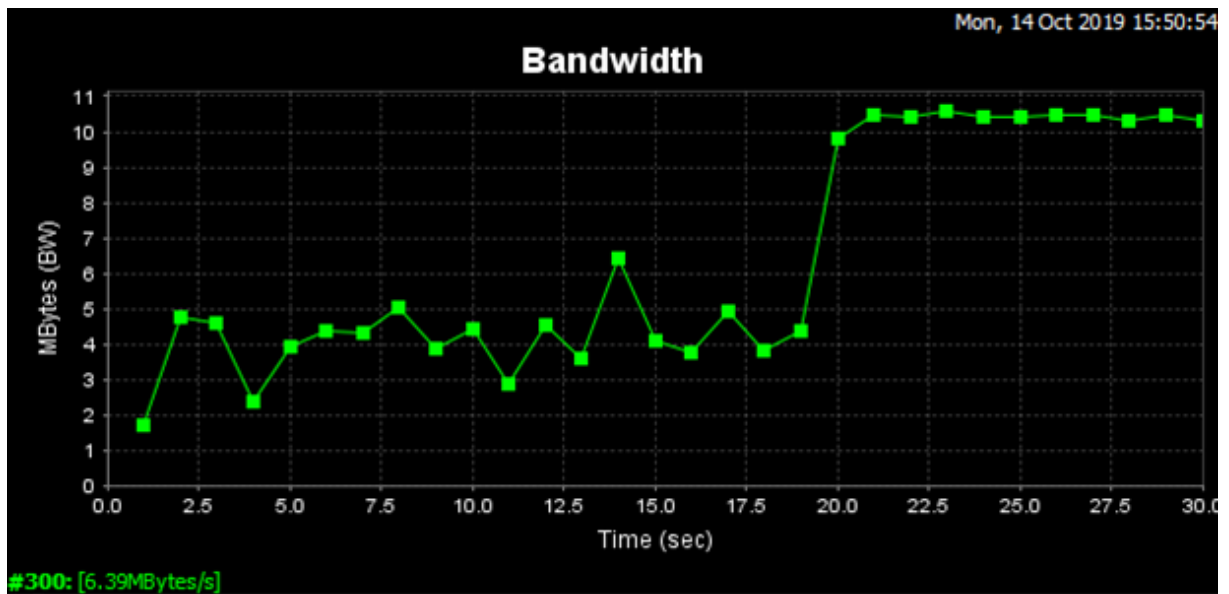
Figura 41 – Transmissão de um único par (par 2) utilizando toda a banda até os 10 segundos de transmissão, quando é iniciada a transmissão do outro par (par 1) simultaneamente.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 mostra a transmissão do segundo par, que inicia a transmissão durante a transmissão do primeiro. Aos 20 segundos, quando acaba a transmissão do primeiro par, a velocidade sobe de aproximadamente 4 MBps para 10 MBps. Isso ocorre pois os pares disputam a banda de frequências, visto que ambos utilizam a mesma faixa (de 2 MHz à 86 MHz).

Figura 42 – Transmissão do par 1 disputando a banda com o par 2 até os 20 segundos de transmissão, quando é finalizada a transmissão do outro par (par 2), de modo que o par 1 utiliza toda a banda.



Fonte: Autoria própria.

## 4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O estudo realizado foi composto por diversos ensaios, como apresentado no Capítulo 3, divididos em etapas. Na primeira etapa, foram realizados comparativos entre os padrões de *modems* PLC, AV1 e AV2, em laboratório, visando definir o mais adequado para a realização dos demais ensaios. A segunda etapa consistiu na separação do circuito de dados do circuito de alimentação elétrica. A terceira etapa foi em laboratório, com transmissões com os *modems* modificados durante um grande período de tempo para analisar a qualidade da conexão e com a medição dos sinais emitidos pelos *modems*. Por fim, a quarta etapa de ensaios foi simulando situações adversas baseadas nas condições apresentadas pela região de instalação dos poços de petróleo, para analisar a viabilidade da utilização de um sistema de transmissão de dados PLC para o monitoramento dos poços subaquáticos.

Entre os padrões AV1 e AV2, o padrão *HomePlug* mais adequado para a transmissão de dados dos sensores ópticos (DAS e DTS) instalados em poços de petróleo é o AV2, pois esse apresentou taxas de transmissão mais elevadas nos ensaios em laboratório com *modems* comerciais e aproximadamente 10 MBps quando consideradas as condições apresentadas pela fiação elétrica do sistema de extração de petróleo subaquático.

A separação dos circuitos de transmissão dados e alimentação elétrica foi necessária para a continuidade do trabalho e não afetou a taxa de transmissão do par de *modems* modelo TL-PA7020, de padrão AV2, que manteve-se em aproximadamente 40 MBps nas condições simuladas nos ensaios em laboratório.

A comunicação dos *modems* PLC foi estável durante longas transmissões, se mostrando uma alternativa robusta para ser utilizada em um sistema de monitoramento contínuo.

O protocolo de transporte de dados do modelo OSI mais adequado para a transmissão contínua das informações obtidas pelos sensores ópticos do sistema de monitoramento é o TCP, devido a sua alta confiabilidade por assegurar a transmissão de todos os dados e também à taxa de transmissão apresentada no ensaio em ambiente externo, alcançando cerca de 11 MBps e sendo superior às taxas obtida nas transmissões com o protocolo UDP.

Devido aos ensaios com variação de comprimento e bitola do cabo utilizado para a transmissão dos dados, foi percebido que o ideal seria a utilização de um cabo elétrico com bitola maior e o mais curto possível para a ligação da cabeça do poço à ANM, visto que isso aumentaria consideravelmente a velocidade da transmissão dos dados. Além disso, foi observado um aumento de 9,2% na velocidade ao utilizar o sistema de aterramento juntamente com o cabo de 1,5 mm<sup>2</sup> e 60 metros de comprimento.

Outro fator relevante para a análise dos dados foi a temperatura dos condutores, que deve ser considerada devido à localização dos sistemas de extração de petróleo (região HTHP). Os ensaios em ambiente externo foram realizados em temperatura ambiente e a média das transmissões foi de 10,8 MBps. Por meio da Equação 4 foi estimado que, para a temperatura de 150 °C no cabo, a velocidade seria de 32,76% da velocidade em temperatura ambiente, de modo que, no ambiente externo seria alcançada uma velocidade de aproximadamente 3,54 MBps.

Essa velocidade seria limitante na quantidade de dados que poderia ser transmitida pelo sistema de monitoramento, visto que as topologias abordadas para aumentar a velocidade não apresentaram bons resultados. Desse modo, são necessárias melhorias que serão propostas no Capítulo 5, além de outros ensaios e adaptações nos equipamentos, visando a definição das melhores configurações para o futuro desenvolvimento de um produto, pronto para a utilização em um sistema de monitoramento contínuo de poços de petróleo subaquáticos com a utilização de sensoriamento óptico.

## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo da viabilidade da utilização de equipamentos de transmissão de dados via linhas de energia, em condições semelhantes às apresentadas em instalações subaquáticas de extração de petróleo, para a transmissão de grandes quantidades de dados como as obtidas por sistemas de monitoramento óptico.

Para o desenvolvimento do estudo, foram realizados diversos ensaios, como apresentado no Capítulo 3, visando simular o ambiente em que o sistema de monitoramento deve ser instalado. Os resultados obtidos foram conforme o esperado e foram levantadas as condições que podem vir a prejudicar o sistema de transmissão de dados.

A maior dificuldade encontrada foi na tentativa de aumentar a velocidade limitada, que foi estimada através da análise dos resultados obtidos nos ensaios. Entretanto, mesmo sem sucesso no aumento das taxas de transmissão, o uso de banda larga através de linhas de energia se mostrou como a melhor alternativa para a transmissão dos dados dos sensores ópticos em uma aplicação de monitoramento contínuo considerando a inviabilidade da alteração da estrutura apresentada no sistema de extração petrolífera, visto que a velocidade obtida nos ensaios com PLC ainda supera as velocidades de outros protocolos de transmissão de dados por fiação elétrica.

Tem-se como perspectiva para trabalhos futuros, o desenvolvimento de um produto capaz de ser acoplado diretamente aos sistemas de sensoriamento óptico (DAS e DTS), alimentado em corrente contínua, capaz de modular os dados recebidos por um conector óptico em altas frequências, com funcionamento semelhante aos *modems* de banda larga PLC estudados neste trabalho. Para a construção do mesmo seria necessário o estudo de componentes eletrônicos militares que suportem as altas temperaturas da região HTHP, com encapsulamento resistente às altas pressões e a prova d'água.

## REFERÊNCIAS

ANATEL. **Plano De Atribuição, Destinação E Distribuição De Frequências No Brasil**. 2019. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=349400>>. Acesso em: 18.11.2019. Citado na página 26.

ARANTES, Luiza Mercadante. **Projeto De Sensor De Fibra Óptica De Pressão E Temperatura Para Poços De Petróleo**. 2018. Trabalho de conclusão de curso, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 22.

BERGE, Unni Marina. **Integrity Monitoring Methods for Producing and Plugged Wells**. 2017. Dissertação (Mestrado) — University of Stavanger, Norway, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 12, 13 e 22.

BETHEL, E. Wes; SHALF, John. Grid-distributed visualizations using connectionless protocols. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 23, n. 2, p. 51–59, March 2003. ISSN 0272-1716. Citado na página 29.

BP. **BP Statistical Review of World Energy**. 2019. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>>. Acesso em: 18.11.2019. Citado na página 17.

CANO, Cristina et al. State of the art in power line communications: From the applications to the medium. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 34, n. 7, p. 1935–1952, July 2016. ISSN 0733-8716. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.

CANTAGALLO, Camila; MILANELLI, João; DIAS-BRITO, Dimas. Limpeza de ambientes costeiros brasileiros contaminados por petróleo: Uma revisão. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 2, p. 1–12, Janeiro 2007. Citado na página 21.

COONJAH, Irfaan; CATHERINE, Pierre Clarel; SOYJAUDAH, K. M. S. Experimental performance comparison between tcp vs udp tunnel using openvpn. In: **2015 International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5. Citado na página 29.

GALLI, Stefano; SCAGLIONE, Anna; WANG, Zhifang. For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid. **Proceedings of the IEEE**, v. 99, n. 6, p. 998–1027, June 2011. ISSN 0018-9219. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.

GARDNER, Therry N. **The Challenge Of Maintaining Deepwater Wells**. 2016. Disponível em: <<https://www.controleng.com/articles/the-challenge-of-maintaining-deepwater-wells/>>. Acesso em: 18.11.2019. Citado na página 19.

HELD, Gilbert. **Understanding broadband over power line**. [S.l.]: Auerbach Publ., 2006. 1-5,43-60 p. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 24.

HELSON, Ronald B. The hart® protocol an enabler for improved plant performance. **ISA Transactions**, v. 35, n. 2, p. 159 – 164, 1996. ISSN 0019-0578. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0019057896000237>>. Acesso em: 18.11.2019. Citado na página 15.

HOMEPLUG POWERLINE ALLIANCE. **HomePlug AV2 Technology - Technical Report**. 2013. Citado 4 vezes nas páginas 27, 28, 38 e 47.

INTERLINKBT. **AS-interface Tutorial, Rev 1.0**. 2019. Disponível em: <<https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/31/31119/asitutorial.pdf>>. Acesso em: 18.11.2019. Citado na página 15.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy and CO2 Status Report 2018**. 2018. Citado na página 17.

\_\_\_\_\_. **Global energy demand rose by 2.3% in 2018, its fastest pace in the last decade**. 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/newsroom/news/2019/march/global-energy-demand-rose-by-23-in-2018-its-fastest-pace-in-the-last-decade.html>>. Acesso em: 18.11.2019. Citado na página 17.

LATCHMAN, Haniph A. et al. **Homeplug AV and IEEE 1901: A Handbook for PLC Designers and Users**. 1st. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2013. 1-6 p. ISBN 0470410736, 9780470410738. Citado na página 27.

LEI Nº 9.478. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o conselho nacional de política energética e a agência nacional do petróleo e dá outras providências. 1997. Citado na página 12.

LOPES, Isabella Martins; BENEVENUTO, Fernanda Mauri; OLIVEIRA, Fabio Machado. As Camadas Do Modelo Osi: Revisitando Suas Funcionalidades E Respective Protocolos. **REINPEC - Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico**, v. 1, n. 2, p. 268 – 280, Julho/Dezembro 2015. Citado na página 28.

MACH, Pavel; BESTAK, Robert. **Implementation of OFDM into Broadband Wireless Networks**. 2019. Disponível em: <[https://www.academia.edu/28234064/Implementation\\_of\\_OFDM\\_into\\_broadband\\_wireless\\_networks](https://www.academia.edu/28234064/Implementation_of_OFDM_into_broadband_wireless_networks)>. Acesso em: 18.11.2019. Citado na página 25.

MAZALAN, Lucyantie et al. Throughput analysis of lan and wan network based on socket buffer length using jperf. In: **2013 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 621–625. Citado na página 29.

MOUSER ELECTRONICS. **Industrial Application - Power Line Communications**. 2019. Disponível em: <[https://br.mouser.com/applications/industrial\\_application\\_power\\_communications/](https://br.mouser.com/applications/industrial_application_power_communications/)>. Acesso em: 18.11.2019. Citado na página 40.

NASCIMENTO, Andreas. **Exploração De Petróleo Em Camadas Do Pré-Sal No Brasil: Um Estudo De Caso No Poço 1-Sps-50**. 2010. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

PARK, Mi-Young; CHUNG, Sang-Hwa. Distinguishing the cause of tcp retransmission timeouts in multi-hop wireless networks. In: **2010 IEEE 12th International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC)**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 329–336. Citado na página 29.

PETROBRAS. **Conheça curiosidades sobre equipamentos de nossos sistemas submarinos**. 2015. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>>. Acesso em: 18.11.2019. Citado 3 vezes nas páginas 13, 19 e 20.

\_\_\_\_\_. **Somos a maior operadora mundial de equipamentos submarinos para águas profundas e ultraprofundas**. 2016. Disponível em: <<http://bit.ly/>

maior-operadora-mundial>. Acesso em: 18.11.2019. Citado na página 20.

ROLIM, Leonardo Mattos. **Controle Antigolfadas Na Produção De Petróleo Por Gas-Lift**. 2014. Trabalho de conclusão de curso, 2014. Citado na página 20.

SCHWARTZ, Mischa. Carrier-wave telephony over power lines: Early history [history of communications]. **IEEE Communications Magazine**, v. 47, n. 1, p. 14–18, January 2009. Citado na página 24.

TANG, Shensheng et al. A Comparative Study of Power Line Communication Networks With and Without Buffer. **IJCNIS**, v. 4, 2012. Citado na página 24.

TATO, Anxo. Software Defined Radio: A Brief Introduction. **Proceedings**, v. 2, p. 1196, 09 2018. Citado na página 31.

TECHNIPFMC. **Subsea Trees**. 2019. Disponível em: <<https://www.technipfmc.com/en/what-we-do/subsea/subsea-systems/Well-control/Subsea-trees>>. Acesso em: 18.11.2019. Citado na página 21.

TP-LINK. **TL-PA7020 KIT**. 2019. Disponível em: <[https://static.tp-link.com/res/download/doc/TL-PA7020\\_KIT\(EU\)\\_1.0.pdf](https://static.tp-link.com/res/download/doc/TL-PA7020_KIT(EU)_1.0.pdf)>. Acesso em: 18.11.2019. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 47.

WEBER, Guilherme Heim. **Characterization Of Transmission Lines Based On Frequency-Domain And Time-Domain Measurement Techniques**. 2018. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná - Brasil, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 13, 21, 22 e 23.

ZHANG, Jin Gan et al. The Application of ROV for the Subsea Christmas Tree Installation in the LiWan3-1 Deepwater Oilfield. **Applied Mechanics and Materials**, Trans Tech Publications Inc., v. 331, 7 2013. Citado na página 20.