

Hannah Meireles Gouveia

**Sistema de Comunicação para Monitoramento
de Isoladores em Linhas de Transmissão via
Cabo OPGW**

Campina Grande

10 de Abril de 2017

Hannah Meireles Gouveia

Sistema de Comunicação para Monitoramento de Isoladores em Linhas de Transmissão via Cabo OPGW

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Hélder Alves Pereira

Campina Grande
10 de Abril de 2017

Hannah Meireles Gouveia

Sistema de Comunicação para Monitoramento de Isoladores em Linhas de Transmissão via Cabo OPGW

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Campina Grande, 10 de Abril de 2017 :

Prof. Dr. Hélder Alves Pereira
Orientador

Prof. Dr. Alexandre Jean René Serres
Convidado

Campina Grande
10 de Abril de 2017

Agradecimentos

Agradeço a Deus por minha vida, família e amigos. Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Meus agradecimentos aos amigos que fiz durante o curso, que fizeram parte da minha formação que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

Ao Prof. Dr. Hélder Alves Pereira pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, meu muito obrigado.

*"Na vida, nada deve ser temido, apenas compreendido."
(Marie Curie)*

Resumo

Este trabalho apresenta as fases de desenvolvimento de um sistema de comunicação para monitoramento de isoladores, presentes em linhas de transmissão, utilizando cabos de fibra óptica em linhas de transmissão. Sobre o sistema proposto, apresenta-se sua descrição, especificações e implementação, onde primeiramente são discutidos os protocolos de comunicação. Implementou-se o mecanismo de comunicação de modo que amostras de valores utilizados nas conversões das medições analógicas de tensão e corrente foram enviadas em pacotes *Ethernet*. A meta deste trabalho foi de criar uma comunicação que permitisse o envio e leitura de pacotes de mensagens do sistema de comunicação para o computador que recebesse e analisasse as mensagens. Com isso, possibilitando o monitoramento dos isoladores de maneira remota. Para as simulações, foram utilizados *softwares* para desenvolver aplicativos para microcontroladores e processadores embarcados, juntamente com um kit de desenvolvimento da *Texas Instruments*. Também se utilizou o *software Wireshark* para analisar o envio e recebimento das mensagens. Os resultados apresentados validaram a utilização do sistema de comunicação proposto neste trabalho.

1

Palavras-chave: Cabo de fibra óptica, *Ethernet*, Protocolo de comunicação, Sistema de comunicação, *Wireshark*.

¹ Este trabalho foi conduzido no âmbito do projeto TECCON2 - Tecnologia de sensores em fibras ópticas para supervisão, controle e proteção de sistemas de energia elétrica (PD-2651-0011/2015), financiado pelo grupo TBE (Transmissoras Brasileiras de Energia) através da Rede INESC Brasil e dentro do programa de P&D regulado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) do Brasil e com o apoio institucional da Universidade Federal de Campina Grande(UFCG).

Abstract

In this thesis it is presented the steps for the development of a communication system, aiming the monitoring of insulators on transmission lines using fiber optical cable. On the proposed system, presents its description, specifications and implementation, where, first are discussed the communication protocols. The communication mechanism, which are samples of values to be used in the conversion of analog measurements of voltage and current, sent by Ethernet packets, was implemented. The target of this work was to create a communication that allowed sending and reading messages package from the communication system to the computer that receive and analyze the messages. Thus, enabling the remote monitoring of insulators. For the simulations is used the *software* for developing applications for embedded microcontrollers and processors, along with a development kit of *Texas Instruments*. Also is used the *software Wireshark* to analyze the sent and received messages. The results presented validated the use of the communication system proposed in this paper.

2

Key-words: *Communication Protocols, Communication System, Ethernet, Fiber Optical Cable, Wireshark.*

² This work was carried out within the scope of the project TECCON2 - Optical fiber sensor technology for the supervision, control and protection of electric power systems (PD-2651-0011 / 2015), financed by the TBE group (Brazilian Energy Transmitters) through the Network INESC Brasil and within the P&D program regulated by ANEEL (National Electric Energy Agency) of Brazil and with the institutional support of the Federal University of Campina Grande (UFCG).

Lista de siglas

ACK	<i>Acknowledgement</i>	Reconhecimento
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>	Conversor Analógico Digital
ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>	Máquina RISC Avançada
APDU	<i>Application Protocol Data Unit</i>	Unidade de Dados de Aplicação de Protocolo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>	Sociedade Americana para Testes e Materiais
ASDU	<i>Application Service Data Unit</i>	Unidade de Dados de Aplicação de Serviço
CCS	<i>Code Composer Studio</i>	Estúdio para Compor Código
CPU	<i>Central Processing Unit</i>	Unidade Central de Processamento
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detector</i>	Acesso Múltiplo com Sensoriamento da Portadora com Detecção de Colisão
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>	Checagem Cíclica de Redundância
DNP3	<i>Distributed Network Protocol</i>	Protocolo de Rede Distribuída
EMS	<i>Energy Management Systems</i>	Sistema de Manutenção de Energia
FC/PC	<i>Ferule Connector/Physical Contactor</i>	Conector Ferular/Contato Físico
FODP	<i>Fibre Optic Distribution Panels</i>	Painéis de Distribuição de Fibra Óptica
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Events</i>	Eventos Genéricos em Subestações Orientados a Objeto
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>	Comissão Internacional Eletrotécnica
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IED	<i>Intelligent Electronic Devices</i>	Dispositivos Eletrônicos Inteligentes
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IP	<i>Internet Protocol</i>	Protocolo <i>Internet</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>	Rede de Área Local
LT		Linha de Transmissão
MAC	<i>Media Access Control</i>	Controle de Acesso ao Meio
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>	Unidade Microcontroladora
MMS	<i>Manufacturing Message Specification</i>	Especificação de Mensagem da Manufatura

MTU	<i>Maximum Transmission Unit</i>	Unidade Máxima de Transmissão
NAK	<i>Not Acknowledgement</i>	Reconhecimento negativo
NBR		Norma Brasileira
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>	Para-raio com Fibras Ópticas
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometer</i>	Refletômetro Óptico no Domínio do Tempo
P2P	<i>Point-to-Point</i>	Ponto-a-Ponto
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>	Computador com Conjunto Reduzido de Instruções
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>	Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>	Hierarquia Síncrona Digital
SSTP	<i>Screened Shielded Twisted Pair</i>	Par Trançado Blindado Coberto
STM	<i>Synchronous Transport Module</i>	Módulo Síncrono de Transporte
STP	<i>Shielded Twisted Pair</i>	Par Trançado Blindado
SV	<i>Sampled Values</i>	Valores Amostrados
TBE		Transmissoras Brasileiras de Energia
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>	Protocolo de Controle de Transmissão
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>	Protocolo de Datagramas de Usuários
USB	<i>Universal Serial Bus</i>	Porta Universal

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Refração da luz.	19
Figura 2.2 – Cabo OPGW.	20
Figura 2.3 – Estrutura de um cabo OPGW.	22
Figura 2.4 – Caixa de emenda OPGW com capacidade de 24 a 96 fibras da marca Enerpel.	25
Figura 2.5 – Esquema de sistema de comunicação baseado em cabo OPGW.	25
Figura 2.6 – Estrutura em camadas do sistema de comunicação e protocolos utilizados.	27
Figura 2.7 – Estrutura de dados para a norma IEC 61850.	28
Figura 3.1 – Algoritmo implementado no interrogador.	31
Figura 3.2 – Composição do pacote de N bytes e informação sobre o armazenamento dos dados nos <i>buffers</i> e do tempo de interrupção.	32
Figura 3.3 – Diagrama de blocos do sistema de comunicação.	34
Figura 3.4 – Conversor de mídia KFSD 1120 A/B da Intelbras.	34
Figura 3.5 – Kit de desenvolvimento TM4C1294XL da <i>Texas Instruments</i>	36
Figura 4.1 – Configuração do APDU.	40
Figura 4.2 – Estrutura usada para a geração e avaliação de mensagens SV.	41
Figura 4.3 – Verificação das saídas na interface <i>Ethernet</i>	42
Figura 4.4 – Gráfico do número de pacotes enviados no tempo.	43
Figura 4.5 – Gráfico da quantidade de bits enviados no tempo.	44
Figura 4.6 – Esquema de implementação dos conversores de mídia.	46

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Especificações do interrogador.	31
Tabela 3.2 – Composição do conjunto de N bytes	32
Tabela 3.3 – Resumo referente ao estado da arte.	38

Lista de símbolos

α	Constante de atenuação da fibra.
B	Taxa de transmissão.
B_{Total}	Taxa de transmissão total.
B_{Tx}	Taxa de transmissão final.
c	Velocidade da luz no vácuo.
d_{km}	Distância do enlace em km.
f_{Max}	Frequência máxima do sinal.
f_s	Frequência de amostragem do sinal.
i	Ângulo de incidência.
M_S	Margem de segurança em dB.
n	Índice de refração do meio.
n_1	Índice de refração do meio 1.
n_2	Índice de refração do meio 2. ‘
$N_{bit/ADC}$	Número de bits utilizados pelo conversor A/D.
N_c	Número de amostras.
N_{canais}	Número de canais que chegam à central de controle.
N_{ADC}	Número de dispositivos conversores A/D.
r'	Ângulo de refração.
P_{TX}	Variação de potência na saída do transmissor em dBm.
P_{RX}	Variação de potência na entrada do receptor em dBm.
T_s	Período para realização de uma amostra.
T_{Tx}	Período para realização de uma transmissão.
v	Velocidade da luz no meio.
V	Tensão.
V_{DC}	Tensão DC.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização do Assunto	15
1.2	Motivação	15
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Geral	16
1.3.2	Específicos	16
1.4	Metodologia	16
1.5	Organização do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Fibra Óptica	18
2.1.1	Propagação pela Fibra Óptica	18
2.1.2	Funcionamento	19
2.1.3	Atenuação e Dispersão	19
2.2	Cabos OPGW	20
2.2.1	Breve Histórico	21
2.2.2	Estrutura	22
2.2.3	Emendas e Instalação	22
2.3	Considerações sobre Comunicações	24
2.4	Sistemas SCADA	26
2.5	Protocolos de Comunicação	26
2.5.1	Norma IEC 61850	27
3	SISTEMA DE COMUNICAÇÃO	30
3.1	Descrição	30
3.1.1	Especificações	30
3.1.2	Diagrama de Blocos	33
3.1.3	Hardware Utilizado	34
3.2	Estado da Arte	36
4	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE COMUNICAÇÃO	39
4.1	Dimensionamento do Pacote de Dados	39
4.2	Implementação do Protocolo de Comunicação	40
4.3	Realização de Testes e Validação dos Dados Transmitidos	41
4.4	Dimensionamento da Transmissão do Sinal Óptico	45

5	CONCLUSÕES	47
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	47
	REFERÊNCIAS	48

1 Introdução

1.1 Contextualização do Assunto

Os sistemas de transmissão de energia elétrica oferecem à população o benefício do transporte da energia entre os centros geradores e os consumidores. As linhas de transmissão são por onde a energia elétrica é conduzida de um ponto transmissor a um terminal receptor. Elas são compostas basicamente de condutores, isoladores, estrutura de suporte e para-raios [1].

Nas linhas de transmissão, os isoladores têm a importante função de isolar o cabo energizado da torre metálica e servir como suporte para o peso dos cabos condutores e cargas mecânicas devido à ação de intempéries [2]. Eles devem também oferecer uma resistência alta para correntes de fuga de superfície e ser espesso o suficiente para não haver ruptura sob condições de tensões elevadas [1]. Eletricamente, um isolador pode ser considerado um capacitor, e sua suportabilidade da tensão de disrupção depende de parâmetros como: distância de caminho entre os condutores elétricos, limpeza, atmosfera envolvida, tipo e integridade do material usado na fabricação [2].

Nas subestações, é de extrema importância monitorar e supervisionar dispositivos remotamente, devido ao fato de que as principais causas de interrupções no fornecimento de energia são por falhas no isolamento elétrico. Desse modo, o desempenho de transmissão de energia elétrica em linhas de transmissão (LT) tem ligação direta com o estado em que se encontra os seus isoladores [3].

O monitoramento dos dispositivos em tempo real, presentes nos sistemas elétricos e de distribuição de energia, pode ser realizado utilizando um meio óptico guiado para transmissão de informações. O cabo para-raios com fibra óptica (OPGW - *Optical Ground Wire*) pode ser usado como uma solução para esse tipo de operação, oferecendo um meio com alta capacidade de transmissão [4]. Com a utilização do cabo OPGW, tem-se uma redução de gastos quando comparado com outras tecnologias de transmissão utilizadas, como por exemplo, fios de cobre e comunicação via satélite.

1.2 Motivação

Um dos maiores problemas encontrados na transmissão e distribuição de energia elétrica é a poluição. Maresia, poluentes industriais e mesmo areia levam à interrupção das linhas de transmissão devido à ocorrência de arco elétrico e disrupção. A corrosão por oxidação do pino metálico, presente nos isoladores, é gerada pelo elevado campo elétrico

e às ações de intempéries. Essa oxidação resulta na perda de massa e, conseqüentemente, a resistência mecânica à carga, que os isoladores estão submetidos, diminui [2].

De maneira a monitorar os isoladores e minimizar essas falhas no sistema de transmissão e distribuição de energia, uma solução é o desenvolvimento de sistemas de controle e supervisão em tempo real para as subestações. Isso permite o monitoramento dos parâmetros para o funcionamento das linhas de transmissão e dos dispositivos que estão presentes nos sistemas elétricos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Implementar um sistema de comunicação que permita a transmissão de dados obtidos por sensores presentes em isoladores nas linhas de transmissão via cabo OPGW.

1.3.2 Específicos

- Projetar o *hardware* do sistema de comunicação.
- Dimensionar a quantidade de dados transmitidos oriundos de sinais relacionados ao estado dos isoladores.
- Especificar a taxa de transmissão do sistema de comunicação.
- Implementar o protocolo de comunicação para monitoramento em tempo real dos isoladores.
- Dimensionar o sistema optoeletrônico para transmissão dos dados via cabo OPGW.

1.4 Metodologia

A metodologia consiste na identificação do estado da arte referente ao desenvolvimento de sistemas de comunicação e aplicações do protocolo IEC 61850 por meio da leitura de artigos e da norma. Será realizada a implementação do protocolo de comunicação em uma placa com microcontrolador. Validação e testes serão feitos em plataformas computacionais.

1.5 Organização do Trabalho

No capítulo 2, será abordada a fundamentação teórica, onde o conceito de cabo OPGW, seu funcionamento, história e instalação serão apresentados, assim como algu-

mas considerações sobre comunicações. No capítulo 3, será apresentada a proposta do sistema de comunicação, bem como sua descrição, protocolo de comunicação utilizado e especificações da transmissão de dados. No capítulo 4, serão descritos a implementação do protocolo de comunicação, dimensionamento do pacote de dados, realização de testes e validação da transmissão dos mesmos, bem como o dimensionamento do sistema optoeletrônico para transmissão dos dados via cabo OPGW. Finalmente, serão apresentadas, no capítulo 5, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo será feito um embasamento teórico sobre a fibra óptica e seu princípio de funcionamento; sobre os cabos OPGW, tratando da sua estrutura, e de como são realizadas as emendas e instalação; sobre comunicações, analisando as especificações, normas e arquitetura do sistema. Apresenta-se ainda o sistema SCADA, que é compatível com o tipo de arquitetura aplicada em sistemas de transmissão de energia elétrica. Por fim, aborda-se o protocolo de comunicação utilizado, o protocolo IEC 61850, e as camadas presentes no sistema de comunicação.

2.1 Fibra Óptica

O uso de sistemas por fibra óptica tem crescido bastante no ramo das comunicações. Cabos submarinos com fibra óptica, que ligam continentes, e cabos OPGW, que interligam subestações entre cidades, são exemplos desses sistemas [5]. Dentre as vantagens de utilizar fibra óptica, é possível destacar [5]:

- Transmissão em grandes distâncias;
- Elevada taxa de transmissão;
- Imunidade a interferências eletromagnéticas;
- Dimensões otimizadas.

2.1.1 Propagação pela Fibra Óptica

A luz percorre um meio uniforme de modo retílineo, admitindo-se que a densidade do meio seja homogênea [6]. Ao passar de um meio para outro, a trajetória da luz é alterada, mas sua propagação permanece uma linha reta. Os efeitos causados pela transição da luz de um meio para outro são conhecidos também como reflexão e refração da luz [5].

A reflexão ocorre quando um raio de luz atinge uma superfície e sofre um desvio para o mesmo meio. Já a refração é caracterizada pela passagem do feixe de luz de um meio para outro [5]. O índice de refração de um meio pode ser calculado da seguinte forma [7]:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

em que n é o índice de refração do meio, c é a velocidade da luz no vácuo e v é a velocidade da luz no meio.

A partir da Figura 2.1 [5], que apresenta a refração da luz de um meio 1 (n_1) para o meio 2 (n_2), com ângulo de refração (r') e ângulo de incidência (i) e da Lei de Snell, r' pode ser determinado por [7]:

$$n_1 \text{sen}(i) = n_2 \text{sen}(r') \quad (2.2)$$

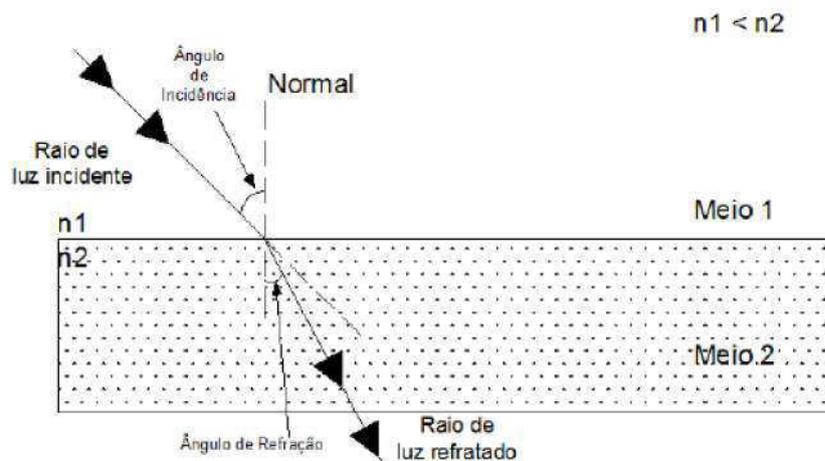


Figura 2.1 – Refração da luz.

2.1.2 Funcionamento

Sabe-se que a estrutura básica da fibra óptica é composta pelo núcleo, a casca, que envolve o núcleo, e a proteção externa da fibra, conhecida como cobertura. A luz se propaga pelo núcleo quando um raio luminoso com um ângulo de incidência maior ou igual ao ângulo crítico atinge a superfície da casca, o que ocasiona a reflexão total e o retorno do feixe de luz para o núcleo [7].

A comunicação óptica apresenta três fases: transmissão, onde o sinal elétrico é transformado em óptico, canal, meio onde a luz é guiada, e recepção, que faz o inverso da transmissão [7].

2.1.3 Atenuação e Dispersão

Atenuação é o que define a distância máxima, o alcance, que um sistema de transmissão óptico pode ter entre emissor e receptor [8]. Ela significa quanto da potência do sinal que percorre pela fibra é perdida de acordo com o comprimento de onda da luz emitida. A atenuação pode ser causada pela absorção da luz que passa do núcleo para a casca, pelo espalhamento do feixe luminoso em várias direções e pelas deformações mecânicas [5].

Dispersão é o fenômeno que acontece na propagação de campos eletromagnéticos em meios materiais que causa atraso na propagação desses campos [9]. Na transmissão digital, a dispersão dificulta a recepção do sinal e sua decodificação. Ela está relacionada diretamente com a distância percorrida pela luz e é medida em ns/km. A dispersão pode ser do tipo modal, causada pela geometria do guia de onda e das diferenças dos índices de refração, e do tipo cromática, resultado da relação entre o índice de refração do material da fibra com o comprimento de onda [5].

2.2 Cabos OPGW

O cabo OPGW é utilizado em linhas de transmissão e tem como principais funções [10].

- Proteger o sistema elétrico contra descargas atmosféricas;
- Prover um retorno para correntes de curto-circuito envolvendo a terra;
- Servir como meio de comunicação;
- Conter e proteger as fibras ópticas.

Um cabo OPGW, comumente usado, é mostrado na Figura 2.2 [11]:



Figura 2.2 – Cabo OPGW.

O sistema elétrico brasileiro apresenta algumas características próprias. Os circuitos de transmissão normalmente atravessam regiões de alto índice de densidade de descargas atmosféricas. Portanto, os cabos para-raios são expostos a uma contínua incidência de altas correntes provenientes de descargas atmosféricas. As linhas de transmissão com apenas cabos para-raios convencionais sofrem o mesmo tipo de exposição, porém devido às características construtivas dos cabos OPGW, esses apresentam maior facilidade de serem afetados pela incidência de descargas atmosféricas. Além disso, a sua função de comunicação lhe concede um requisito de maior confiabilidade [12].

2.2.1 Breve Histórico

Na década de 90 se iniciou a instalação de cabos OPGW no Brasil. Por não existir produtores nacionais, os cabos eram importados do Japão e Estados Unidos, por exemplo. Por esse motivo, foi preciso se adequar a algumas normas técnicas internacionais existentes e criar outras normas para que o cabo OPGW pudesse ser usado nas condições climáticas do Brasil [10]. Desde esse início até os dias atuais, as empresas do setor elétrico enfrentam problemas com os cabos OPGW, esses são [10]:

- Rompimento de fios e rompimento total do cabo devido às descargas atmosféricas;
- Rompimento dos fios devido ao cerol das pipas;
- Atenuação nas fibras devido a problemas de instalação;
- Projetos de cabos com curto circuito super estimado para as características dos materiais empregados;
- Corrosão nos fios e tubo;
- Deslocamento das fibras dentro das caixas de emendas;
- Fios componentes do cabo não conforme as normas técnicas existentes.

No Brasil, atualmente, todas as concessionárias que formam a rede básica possuem no mínimo um circuito acima de 230 kV dotado de cabos OPGW, constituindo aproximadamente mais que 15000 km de cabos instalados [13]. A evolução dessa tecnologia nos últimos anos resultou na dissipação de tais cabos em vários países [12]. Destacam-se as seguintes vantagens e desvantagens de utilizar esse tipo de cabo [14]:

- Instalação em um sistema novo é relativamente simples;
- Instalação em um sistema existente é bastante complexa, especialmente se efetuada em linha energizada;
- A manutenção do cabo é complexa e seu custo é relativamente elevado;
- A transferência de esforços para a fibra é pequena;
- Sua vida útil é elevada;
- O tempo de execução dos serviços pode ser longo;
- São menos susceptíveis a acidentes, em comparação com cabos enterrados;
- São fontes de receita adicional para concessionárias de energia elétrica.

Diversas empresas, dentre elas a Eletronorte, viabilizaram em 2001 a instalação de cabos OPGW em suas novas linhas de transmissão [14].

2.2.2 Estrutura

O cabo OPGW é constituído por um núcleo dielétrico, onde as fibras ópticas são inseridas, um tubo para proteger o conjunto de fibras, que pode ser de aço inoxidável, alumínio ou plástico, e uma armação do cabo formada por fios condutores. A armação possui geralmente fios metálicos que podem ser de aço aluminizado, liga de alumínio ou aço galvanizado. As fibras ópticas são colocadas em um tubo de aço inoxidável com uma camada de alumínio para sua proteção contra torção, quebra, tensão e umidade. O conjunto de fios metálicos deve servir para proteger as fibras contra vibração, cargas devido a vento e gelo, grandes variações de temperatura, raios e outros efeitos ambientais, que afetam a transparência da fibra [15]. Pelo fato de que nenhuma área de aço pode ter contato direto, ou indireto, com umidade, contaminações, protusões, etc, a cobertura de alumínio deve cobrir totalmente o tubo de aço inoxidável.

A estrutura de um cabo OPGW pode variar bastante. O número de fibras normalmente varia entre 6, 12, 24, 48 ou 96 [15]. A estrutura dos cabos OPGW está representada na Figura 2.3.

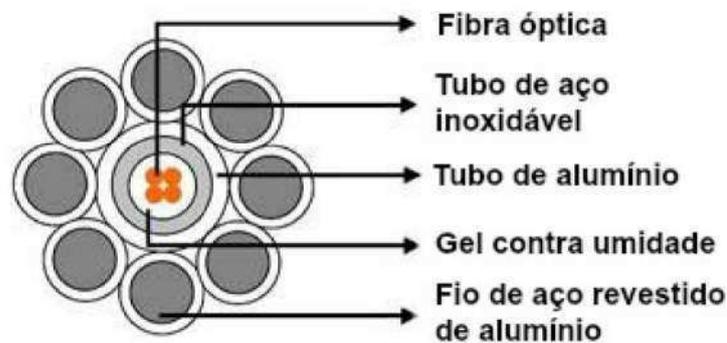


Figura 2.3 – Estrutura de um cabo OPGW.

Por existir uma dificuldade na instalação de cabos OPGW, seu projeto é geralmente realizado para durar o máximo de tempo possível. Um exemplo comum é que dure pelo menos 25 anos.

2.2.3 Emendas e Instalação

A norma IEEE 1138 de 2009 apresenta especificações para testes e desempenho de cabos OPGW para uso em redes elétricas [15], porém não cita as restrições que são aplicadas à emenda e instalação do cabo OPGW, já que essa norma se dedica mais propriamente aos testes aos quais o cabo OPGW tem de obedecer. Esses detalhes, que

incluem o uso que é feito da fibra óptica, são dependentes de cada empresa. A empresa indiana *Odisha Power Transmission Corp. Limited* publicou uma especificação técnica para os seus cabamentos OPGW [16]. Essa norma será usada como base para os tópicos tratados nesse trabalho.

A instalação de um cabo OPGW pode ser realizada com a linha de transmissão ativa, isto quer dizer, com todos os circuitos carregados para sua tensão nominal. Certas partes do cabejamento podem ser instaladas desativando a linha de transmissão mas a instalação com a linha ativa é mais eficiente economicamente [16].

O peso e a fragilidade da fibra devem ser levados em consideração na hora de instalar os cabos OPGW [17]. Esses cabos apresentam uma resistência pequena às solicitações mecânicas devido à fragilidade das fibras ópticas em seu interior, por este motivo, eles não podem ficar muito tensionados. Isso implica que suas flechas são maiores que àquelas obtidas com cabos para-raios tradicionais, influenciando diretamente o modelo de proteção contra descargas atmosféricas da estrutura associada [17]. As flechas são definidas como a diferença entre o valor da altura do cabo na torre e a altura do mesmo no meio do vão [18].

A quantidade de emendas feitas no cabo OPGW deve ser a menor possível [16]. Não é permitida a existência de emendas entre torres e todas as emendas devem ser planejadas para ocorrer em estruturas de torres. As emendas devem ser realizadas por fusão [16] e a perda de cada emenda não pode ultrapassar 0,1 dB, quando medida em 1550 nm. O processo de emenda de fibras é realizado da seguinte maneira [19]:

1. Inicialmente deve ser identificado o tipo de fibra óptica a ser emendada, seja monomodo ou multimodo;
2. Prosseguir com processo de decapagem e limpeza nas extremidades dos cabos ópticos. Os comprimentos de decapagem irão variar de acordo com o acessório utilizado para a instalação das emendas;
3. Inserir os protetores de emendas em uma das extremidades de uma das fibras. O protetor é constituído de um tubo contrátil e de uma haste metálica que proporcionam uma proteção mecânica às emendas;
4. Decapar as fibras e limpar as extremidades das fibras ópticas através de gazes embebidas em álcool (anidro ou isopropílico) e, em seguida, proceder com o processo de clivagem das fibras;
5. Inserir as fibras ópticas nas ranhuras dos dispositivos alinhadores da máquina e aproximar as fibras até próximo à região de formação do arco voltaico;

6. Inspeccionar as condições das fibras. Se as mesmas não se encontram limpas, bem clivadas e alinhadas (verticalmente e horizontalmente), repetir os passos anteriores;
7. Posicionar as fibras para a fusão, através da aproximação das mesmas e, no caso da máquina ser manual, utilizar as divisões do visor (microscópio);
8. Executar a fusão efetiva das fibras;
9. No caso de máquinas manuais, efetuar o teste de tração através do afastamento dos alinhadores. Caso a emenda se rompa, isso indica que a emenda não foi bem sucedida;
10. Posicionar o protetor de emenda no ponto central da emenda e inserir a fibra e o protetor no interior da câmara de aquecimento para o processo de contração do protetor;
11. Aguardar o resfriamento do protetor e acomodar a emenda nas bandejas ou qualquer outro acessório de fixação de emenda.

2.3 Considerações sobre Comunicações

A norma IEEE 1138 [15] também não especifica os detalhes de como as fibras ópticas no interior do cabo OPGW são utilizadas. A arquitetura do sistema de comunicação deve ser aberta, de maneira que não imponha restrições a ampliações da rede básica ou à integração de sistemas e protocolos de outros fabricantes. As especificações técnicas da empresa indiana *Odisha Power Transmission Corp. Limited* [16] serão seguidas. As terminações dos cabos de fibra óptica devem ser instaladas em painéis de distribuição (FODP - *Fibre Optic Distribution Panels*), desenhados para dar proteção às emendas e para acomodar os conectores instalados nas terminações das fibras. As fibras ópticas devem, de preferência, ser conectadas com conectores do tipo FC/PC, que têm maior imunidade à vibração.

As emendas entre cabos devem ser posicionadas em caixas de emenda instaladas em estruturas de torres ao longo da linha de transmissão, como o objetivo de um ambiente com proteção contra umidade e poeira, assim garantindo a durabilidade das conexões. A Figura 2.4 mostra um exemplo de caixa de emenda [20].

Por virtude de percorrer possíveis longas distâncias, uma regeneração do sinal óptico deve ser feita antes de se atingir uma central de controle. Portanto, estruturas contendo regeneradores devem estar presentes ao longo das linhas de transmissão. As conexões entre os cabos OPGW, provindos das torres, e as centrais de controle se dão pelos *Optical Approach Cables*, que fazem a interligação até a última caixa de emendas, denominada de *Terminal Box*, e a estrutura física da central de controle. Esses cabos



Figura 2.4 – Caixa de emenda OPGW com capacidade de 24 a 96 fibras da marca Enerpel.

normalmente são instalados subterraneamente e protegem as fibras pelo percurso até a estrutura final. O esquema de um sistema de comunicação baseado em cabos OPGW pode ser visto na Figura 2.5.

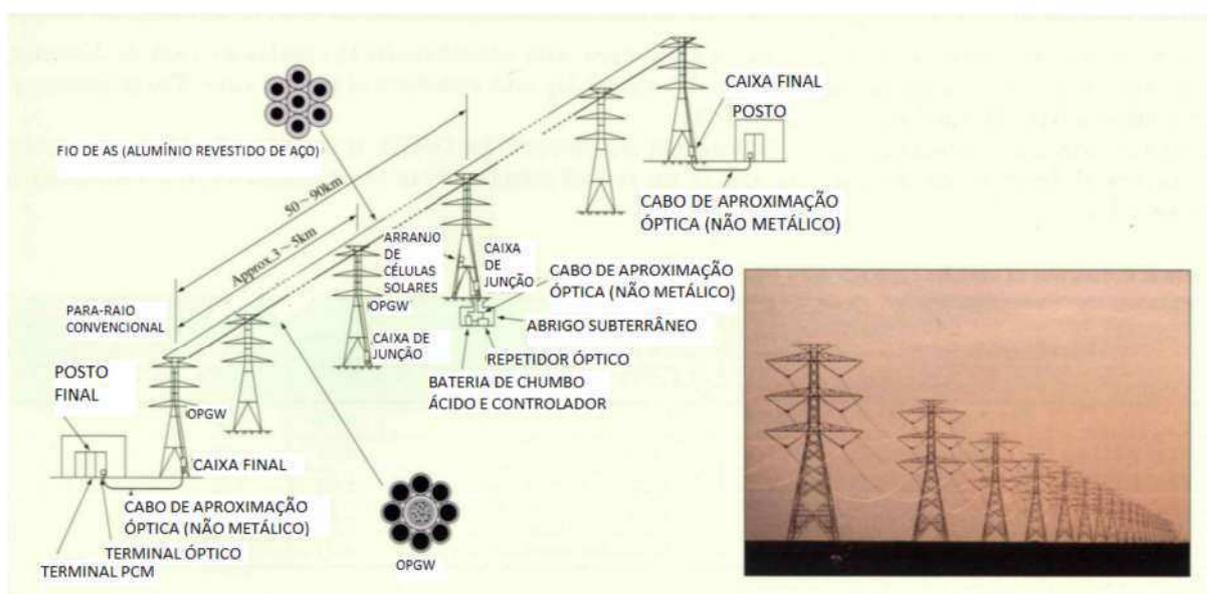


Figura 2.5 – Esquema de sistema de comunicação baseado em cabo OPGW.

O sistema de transmissão por fibra óptica é baseado na tecnologia de hierarquia digital síncrona (SDH - *Synchronous Digital Hierarchy*). A taxa de transmissão mínima é a do módulo de transporte síncrono (STM1 - *Synchronous Transport Module 1*), e o equipamento de comunicação deve incluir no mínimo duas placas cada uma com 16 portas E1 (G.703) e no mínimo uma placa com 4 portas *Ethernet* (IEEE 802.3). A empresa responsável por instalar os cabos OPGW também é responsável por instalar conexões desde o FODP até o equipamento de comunicação supracitado, além de conexões entre os equipamentos de comunicação.

Um estudo de caso, realizado na Índia, foi feito sobre a implementação de um

sistema de *software* que controlava e supervisionava sistemas industriais através da aquisição de dados e envio de comandos para o sistema (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*) [21]. Esse estudo mostrou que algumas torres de transmissão (como as localizadas dentro de cidades) não suportavam a instalação de cabos OPGW. A solução encontrada foi, nesses casos, instalar um canal de comunicação sem fio, na faixa de frequência de micro-ondas, que supostamente era mais barata que a solução com fibra óptica. Entretanto, utilizar o espectro eletromagnético significa que taxas de utilização (normalmente bastante caras) têm de ser pagas à agência reguladora, de forma que a solução sem fio foi restringida tanto quanto possível [21].

2.4 Sistemas SCADA

Desde a década de 1960, os sistemas SCADA são utilizados, mas só começaram a ser implantados no Brasil em meados dos anos 80, quando diversas empresas estrangeiras começaram a atuar no mercado nacional [22]. Sistemas SCADA têm ampla utilização no controle de processos e atividades industriais, bem como geração, transmissão, distribuição de energia elétrica, monitoramento de centrais de dados (*data centers*), controle de máquinas, equipamentos e edifícios [22].

É de grande importância que as empresas de transmissão de energia elétrica possam coletar dados sobre o estado de suas linhas. Parâmetros como a tensão das linhas, sua frequência, potência transmitida, quantidade dessa potência que é eficaz, etc. são informações valiosas [21]. Sistemas SCADA têm como base uma arquitetura distribuída que permite expansão modular em termos de *hardware* e *software*, tendo em vista que os sistemas de transmissão de energia elétrica estão sempre em expansão [22].

2.5 Protocolos de Comunicação

Uma rede de computadores é um sistema complexo, de forma que é difícil tratá-la como um único sistema. Para simplificar a sua análise, geralmente, dividi-se uma rede de computadores em camadas, de maneira que cada uma seja responsável por uma atividade distinta, e as complexidades específicas de cada camada podem ser abstraídas pelas outras.

As camadas são: aplicação, transporte, rede, enlace e física [23]. O mecanismo do protocolo utilizado neste trabalho abstrai camadas e estabelece uma comunicação direta com a camada de enlace para reduzir a sobrecarga de protocolos e aumentar o desempenho levando em consideração o tempo como questão crítica para execução [24]. No sistema de comunicação é aplicada a estrutura em camadas mostrada na Figura 2.6.

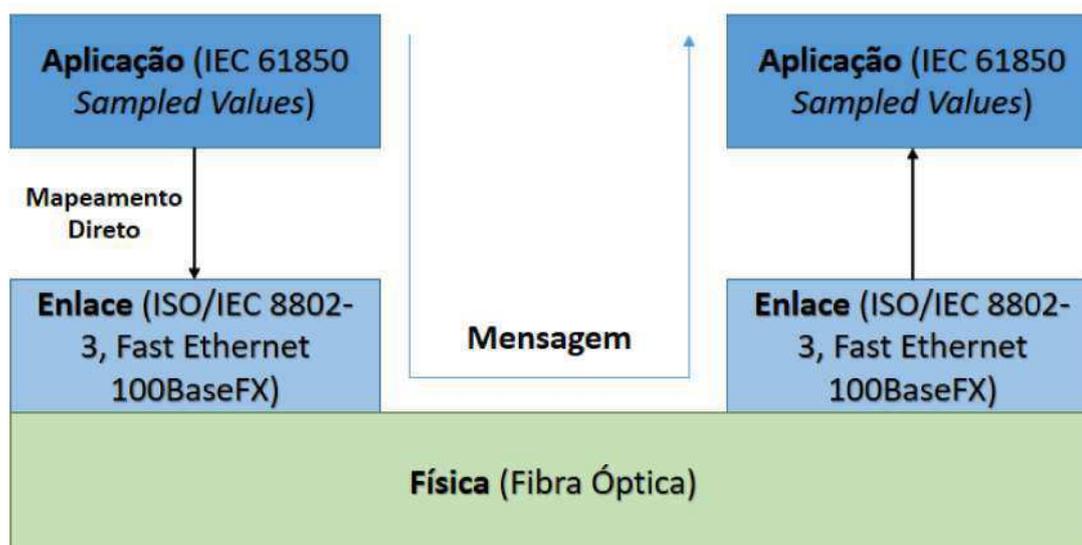


Figura 2.6 – Estrutura em camadas do sistema de comunicação e protocolos utilizados.

2.5.1 Norma IEC 61850

A norma IEC 61850, para redes de comunicações e sistemas em subestações, propõe uma arquitetura de comunicação única entre todos os dispositivos, independente da sua função exercida na subestação ou do seu fabricante. Publicada em 2004, essa norma é resultado dos esforços do comitê técnico TC57, pela comissão internacional eletrotécnica (IEC - *International Electrotechnical Commission*), a denominando IEC 61850 [23]. A norma tem grande aceitação nas Américas, Europa e Ásia e se firma como um padrão mundial, justificando uma real avaliação pelas empresas sobre o propósito de seu uso [25]. A norma é dividida em dez partes, com algumas subdivisões, onde cada uma fornece diretrizes para um projeto geral de uma rede de comunicação para automação de sistemas de manejo energético [26]. A IEC 61850 é, por padrão, compatível com a tecnologia *Ethernet*, e aplica todos os demais conceitos de redes de computadores tradicionais, diferenciando-se na modelagem de dispositivos em subestações por meio do método de orientação a objetos [25].

O modelo de dados, proposto pela norma IEC 61850, não objetiva apenas um método para encapsular informações, e sim um meio de organizá-las eficientemente, descrevendo um modelo de dispositivos lógicos (*logical devices*), que representam cada dispositivo em contato com a rede, e constituídos por nós lógicos (*logical nodes*), conjuntos de unidades de informações denominados *function units* pela norma. Essas pequenas unidades de informação são atribuídas a cada funcionalidade realizada pelo dispositivo, contendo informações de valores como correntes e tensões [25].

O caminho para encontrar uma variável analógica ocorre da seguinte maneira: Primeiro acessa-se o dispositivo físico, ou dispositivo inteligente eletrônico (IED - *Intelligent Electronic Device*), através do seu endereço de rede, tendo acesso em princípio ao

dispositivo lógico. Esse, uma vez acessado, disponibiliza a localização de vários tipos de dispositivos lógicos, podendo ser proteções, comandos, retornos digitais, configurações do próprio IED. Em seu interior estão os nós lógicos. É possível visualizar o conteúdo de cada uma das classes que compõe o nó lógico, para em seguida, encontrar o dado que se está procurando [27]. A Figura 2.7 apresenta de forma esquemática o acesso à cada dispositivo presente na estrutura de dados para a norma IEC 61850.

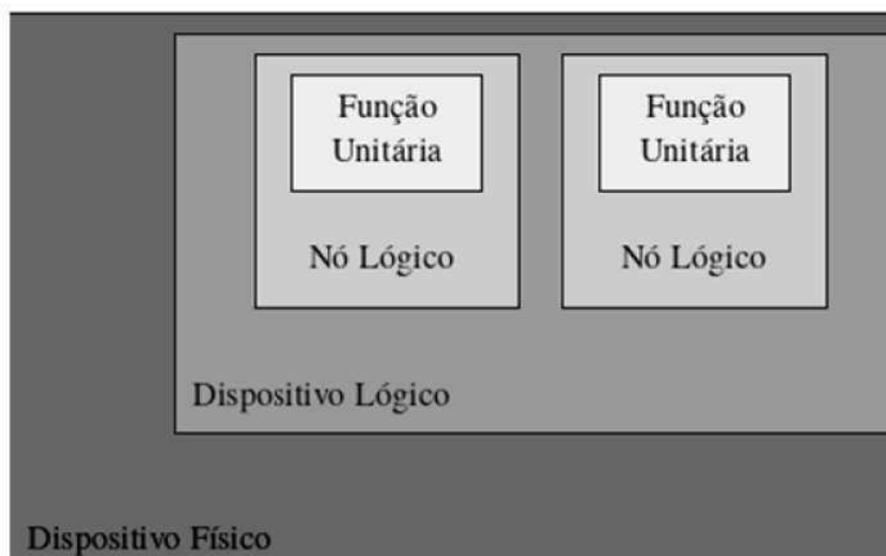


Figura 2.7 – Estrutura de dados para a norma IEC 61850.

A norma IEC 61850 apresenta suporte aos meios físicos com elevadas taxas de transmissão considerando o uso da tecnologia *Ethernet*, padrão 100BaseFx, para a camada de enlace. Quanto à sua implementação em sistemas embarcados, a biblioteca libIEC61850 pode ser implementada em C para os mecanismos de comunicação descritos pela norma. A sua aplicabilidade em sistemas embarcados foi registrada para microcontroladores com arquitetura de máquina RISC avançada (ARM - *Advanced RISC Machine*), porém não são disponibilizadas as especificações de otimização [43].

Em termos de aplicabilidade ao sistema de comunicação proposto neste trabalho, a norma define quatro mecanismos de comunicação para elaboração de pacotes de informação em função do conteúdo destes, em particular, os mecanismos de especificações de fabricação de mensagens cliente-servidor (MMS - *Client-Server Manufacturing Message Specification*) e de valores amostrados (SV - *Sampled Values*). O MMS descreve a comunicação de mensagens de supervisão e controle, sendo integrado com os protocolos de controle de transmissão e de *internet* (TCP/IP - *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*). É aplicado em comunicações rotineiras onde o tempo não é um fator decisivo. O SV foca no desempenho da transmissão, com o menor tempo possível, sendo aplicado ao manuseio de dados analógicos de corrente e tensão destinados a processamento para tomada rápida de decisões [24].

A norma IEC 61850 é vista como um novo modelo para redes de comunicação. Por definir parâmetros de configuração para toda uma subestação, ela apresenta um relativo auto grau de complexidade. A falta de implementações disponíveis para estudo da norma, e o considerável maior conteúdo em sua descrição, a torna uma escolha arriscada para ser empregada, mas que também é uma boa opção para uso na transmissão dos dados [25].

Foram apresentados neste capítulo os conceitos que formam a base do desenvolvimento do sistema de comunicação. Eles são necessários para o entendimento de como o sistema funciona e escolher a melhor opção de implementação no sistema para realizar a comunicação entre linha de transmissão e subestação de maneira mais objetiva e viável. O próximo capítulo apresenta os dispositivos e especificações utilizados no sistema e o estado da arte, resumindo o que já foi realizado nessa área.

3 Sistema de Comunicação

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do sistema de comunicação que servirá como transmissor dos dados obtidos dos isoladores para o cabo OPGW em tempo real.

3.1 Descrição

O sistema de comunicação deve ser capaz de encapsular os dados de sensores em mensagens do tipo SV. além de controlar o transmissor óptico para realizar a transmissão via cabo OPGW. O SV, como supracitado, é um mecanismo de comunicação de mensagem que pertence à norma IEC 61850, que atua em operações de rede, como endereçamento e roteamento.

Bastante associado ao sistema de comunicação, o interrogador compreende o desenvolvimento de sistemas de sensores para monitoramento em tempo real da corrente, temperatura e tração da linha de transmissão. O sistemas de sensores, chamado módulo 4, faz parte do mesmo projeto Inesc/TBE e foi desenvolvido em paralelo ao sistema de comunicação abordado neste trabalho. Por meio de processamento digital, os dados tratados são repassados ao sistema de comunicação para transmissão das leituras obtidas até a subestação para eventual análise, e uma possível leitura de comandos do sistema computacional é esperada.

3.1.1 Especificações

Os parâmetros fornecidos pelo interrogador se encontram na Tabela 3.1, em que: N_{Canais} representa o número de canais recebidos pela central de controle e processamento de sinais, N_{ADC} o número de dispositivos conversores analógico/digital (ADC - *Analog to Digital Converter*) do microcontrolador (MCU - *Microcontroller Unit*) utilizados, $N_{bit/ADC}$ o número de bits utilizados pelo respectivo dispositivo ADC, f_{Max} a frequência máxima do sinal, f_S a frequência de amostragem do sinal, B a taxa de transmissão de bit por conjunto de canais e B_{Total} a taxa de transmissão total correspondente aos 10 canais envolvidos pela central de controle e processamento de sinais presente no interrogador.

A taxa de transmissão de bit total estimada pode ser calculada por

$$B_{Total} = \sum_{i=1}^{N_{canais}} = f_{s_i \cdot N_{ADC_i}} \cdot N_{Bit/ADC_i} \quad (3.1)$$

Tabela 3.1 – Especificações do interrogador.

Canal	N_{Canais}	N_{ADC}	$N_{bit/ADC}$	f_{Max} (Hz)	f_s (Hz)	B (bps)	B (Bps)
1 a 8	8	1	12	8	16	1536	192
9 a 10	2	1	18	7680	15360	552960	69120
B_{Total}						554496	69312

A taxa de transmissão de bit total equivale a 554496 bits ou 69312 Bps. A taxa de transmissão final (B_{Tx}), após o conversor de mídia, definida no projeto é de 1 Mbps, ou seja, 2^{20} bps. Dessa forma, $B_{Tx} = 1048576 \text{ bps} = 131072 \text{ Bps}$.

A Figura 3.1 ilustra o algoritmo implementado no interrogador.

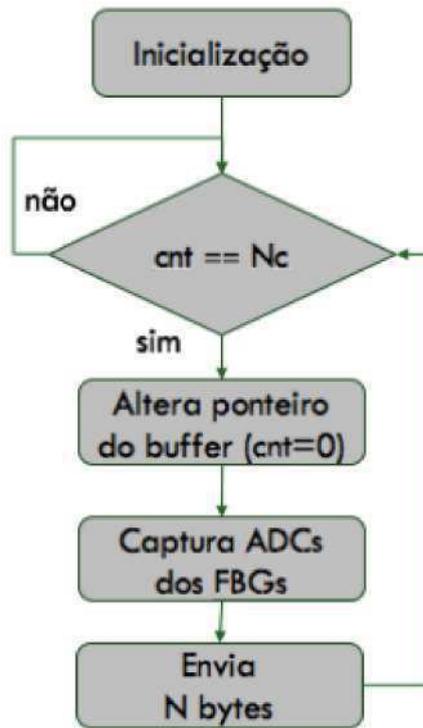


Figura 3.1 – Algoritmo implementado no interrogador.

A parte do algoritmo que se refere ao sistema de comunicação é a correspondente ao bloco: “Envia N bytes”.

A Figura 3.2 ilustra a composição dos N bytes (informações dos 10 canais e dos ganhos associados), além da temporização de armazenamento dos *buffers* ($N_C \cdot T_S$). Considerando que N_C equivale a 300 amostras (S), tem-se a seguinte relação para obtenção do valor de N bytes:

$$B_{Total} = \sum_{i=1}^{N_{canais}+2} = S_i \cdot N_{ADC_i} \cdot N_{Bit/ADC_i} \quad (3.2)$$

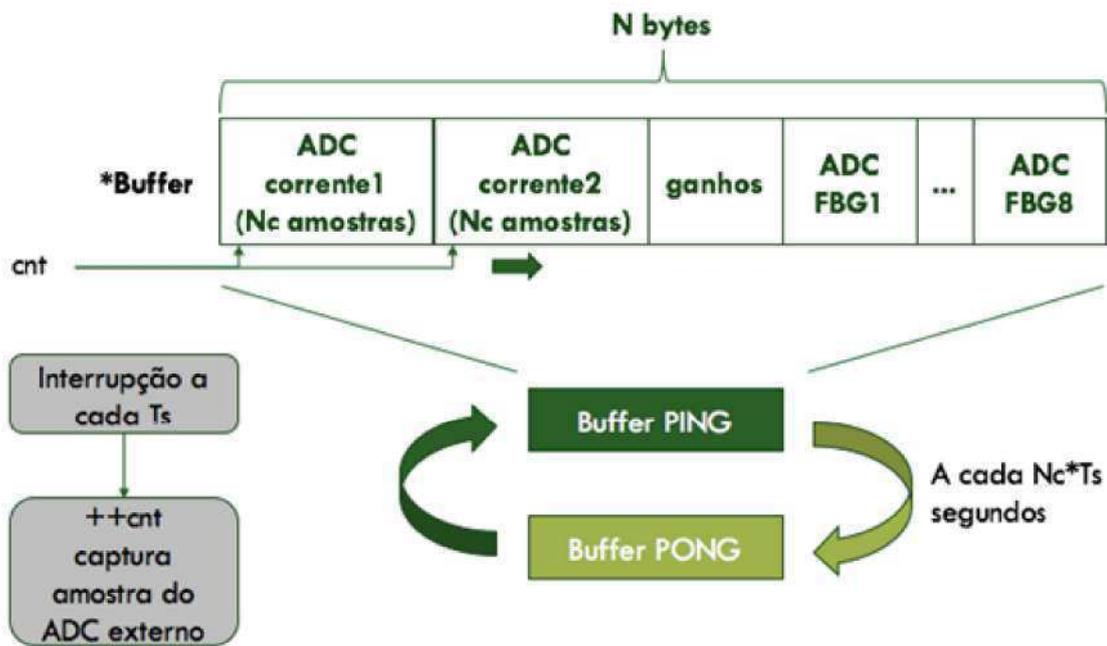


Figura 3.2 – Composição do pacote de N bytes e informação sobre o armazenamento dos dados nos *buffers* e do tempo de interrupção.

Tabela 3.2 – Composição do conjunto de N bytes

Canal	N_{canais}	N_{ADC}	$N_{bit/ADC}$	S	Num de Bits	Num de Bytes
1 a 8	8	1	12	1	96	12
9 a 10	2	1	18	300	10800	1350
Ganhos	2	1	18	1	36	5
N (bits)		10932			N (bytes)	1367

O somatório acrescenta 2 unidades devido aos ganhos que serão informados referentes aos ADCs de corrente. Dessa forma, tem-se que:

$$N = 2 \cdot (300 \cdot 1 \cdot 18) + 2 \cdot (1 \cdot 1 \cdot 18) + 8 \cdot (1 \cdot 1 \cdot 12) = 5400 + 5400 + 36 + 96 = \quad (3.3)$$

$$= 10932 \text{ bits} = 1367 \text{ bytes}$$

Na Tabela 3.2 estão as informações da composição do conjunto de N bytes.

O valor do preenchimento do *buffer* toma como base o valor da frequência de amostragem para um sinal de corrente. Esse valor é informado na Tabela 3.1 e se refere a 15360 Hz. Dessa forma, o valor do intervalo de tempo para realização de uma amostra é dado por:

$$T_S = \frac{1}{f_S} = \frac{1}{15360} \approx 65 \mu s \quad (3.4)$$

Assim, para cada ADC de corrente serão obtidas 300 amostras ($S = 300$), dessa forma, tem-se que o intervalo de interrupção para realização da transmissão é de:

$$T_{Tx} = S \cdot T_S = 300 \cdot 65 \mu s = 19,5 \text{ ms} \quad (3.5)$$

Ou seja, a cada 19,5 ms se transmite 1367 bytes de informação pelo cabo OPGW, totalizando em uma taxa de transmissão final de aproximadamente 0,53 Mbps.

Para se fazer a instalação, outras especificações foram feitas:

- Conexão entre MCU e conversor de mídia: Possibilidade de usar cabos *Ethernet* do tipo par trançado blindado (STP - *Shielded Twisted Pair*) ou par trançado blindado reforçado (SSTP - *Screened Shielded Twisted Pair*). A conexão é via RJ45, conector modular usado em terminações de telecomunicação e são usados normalmente em cabo par trançado.
- Conexão entre conversor de mídia e caixa de emenda: via fibra óptica monomodo.
- Distâncias entre as emendas: De acordo com as informações referentes às instalações presentes em Lajes/SC, as distâncias médias entre emendas e, portanto o comprimento dos cabos OPGW, são por volta de 5,5 km. Os conversores de mídia propostos permitem transmissão de informações por até 20 km, levando em consideração que a taxa de transmissão máxima seja de 100 Mbps;
- Clima local: Para a localidade escolhida da instalação piloto, temperaturas na faixa de -10°C a 55°C e umidade em 80 % (máxima de 90 %).

3.1.2 Diagrama de Blocos

O desenvolvimento de mecanismos de comunicação para sistemas SCADA convergiu para soluções que focam na interoperabilidade entre dispositivos e meios de comunicação de alta velocidade [23]. A existência de uma regulamentação nos protocolos, ou normas empregadas como solução de comunicações para redes inteligentes, permite o emprego de equipamentos modernos no cenário de subestações e demais componentes de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica [28].

O sistema de comunicação, como já dito, servirá como interface optoeletrônica entre elementos interrogadores e o cabo OPGW, para então fazer a transmissão de informações até a subestação. O método de interface utilizado irá fazer uso de conversores de mídia para atividades de inserção e remoção de informações da fibra óptica, com funcionalidades regidas por um dispositivo microcontrolador que também realizará o processamento das informações provenientes dos elementos sensores.

Eles convertem os sinais ópticos para sinais elétricos no padrão *Ethernet* e vice-versa. Assim, um diagrama de blocos é desenvolvido acrescentando o conversor de mídia, conforme Figura 3.3, de modo a proporcionar um melhor entendimento da ligação entre o sistema interrogador e da sequência de criação dos pacotes de dados para serem entregues ao conversor de mídia.

A forma de troca de dados da norma IEC 61850 será estabelecida pelo já mencionado SV. No diagrama da Figura 2.6 está a estrutura de rede para a comunicação.

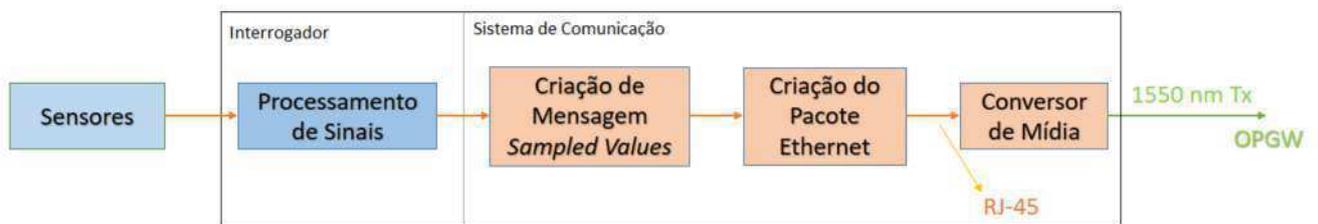


Figura 3.3 – Diagrama de blocos do sistema de comunicação.

3.1.3 Hardware Utilizado

Conversor de Mídia KFSD 1120 A/B

Conversores de mídia são equipamentos ativos de rede, aplicados em redes ponto-a-ponto (P2P - *point-to-point*) que tem como função a conversão de sinais do meio elétrico para meio óptico e vice-versa. Instalar um conversor de mídia para interligar redes *Ethernet* garante segurança e confiabilidade [29].

Para o sistema de comunicação, os conversores de mídia KFSD 1120 A/B da Intelbras foram escolhidos. Eles possuem tecnologia *Fast Ethernet*, e são desenvolvidos para conversão de um enlace metálico 10/100BASE-TX para um enlace de fibra óptica 100BASE-FX e vice-versa [30]. O conversor de mídia utilizado é mostrado na Figura 3.4 [30].



Figura 3.4 – Conversor de mídia KFSD 1120 A/B da Intelbras.

Nesses dispositivos há uma configuração de chaveamento manual (o DIP *Switch*), para cada chave existe uma função, e estas são apresentadas a seguir.

- Pino 1: Quando a função LFP está ativa (ON) o conversor de mídia identificará falhas no link da porta UTP, forçando a desconexão do link óptico e evitando a transmissão e retransmissão de pacotes desnecessários, aumentando, assim, sua vida útil.
- Pino 2: Quando OFF (*Store and forward*), ocorre o armazenamento do pacote completo para análise de erros (como o tamanho excessivo ou pequeno do pacote Ethernet) antes de encaminhá-lo para a porta de saída. Quando ON (*Cut-through*), ocorre menos atraso do que quando OFF, pois examina apenas os 6 primeiros *bytes* do pacote que contém o endereço de destino e logo o encaminha.
- Pino 3: Caso o pino 4 e/ou 5 estiver em estado ON, este deve também estar.
- Pino 4: Quando OFF, a velocidade de transmissão de dados escolhida será 100 Mbps. Quando ON, a velocidade de transmissão de dados escolhida será 10 Mbps.
- Pino 5: Quando OFF, o modo *Full duplex* é selecionado. Este consiste em um fluxo de dados bidirecional e redução do tempo de espera entre as transmissões. Quando ON, o modo *Half duplex* é selecionado. Este por sua vez consiste em um fluxo de dados unidirecional onde ocorre o envio e recebimento de dados por vez.
- Pino 6: Mesmo mecanismo do pino 5. Quando OFF, o modo *Full duplex* é selecionado. Quando ON, o modo *Half duplex* é selecionado.

Placa EK-TM4C1294XL

O kit de desenvolvimento TM4C1294XL da *Texas Instruments* possui microcontrolador do modelo TM4C129ANCPDT com entrada *Ethernet* e USB 2.0. É ideal para aplicações industriais, incluindo monitoramento remoto, automação de redes, testes e medições [31].

A placa é mostrada na Figura 3.5 e suas especificações são [31]:

- Tensão de alimentação da placa: 4,75 a 5,25 V_{DC} .
- Dimensão (C x L x A): 12,45 cm x 5,59 cm x 10,8 mm.
- Fontes de 5 e 3,3 V.

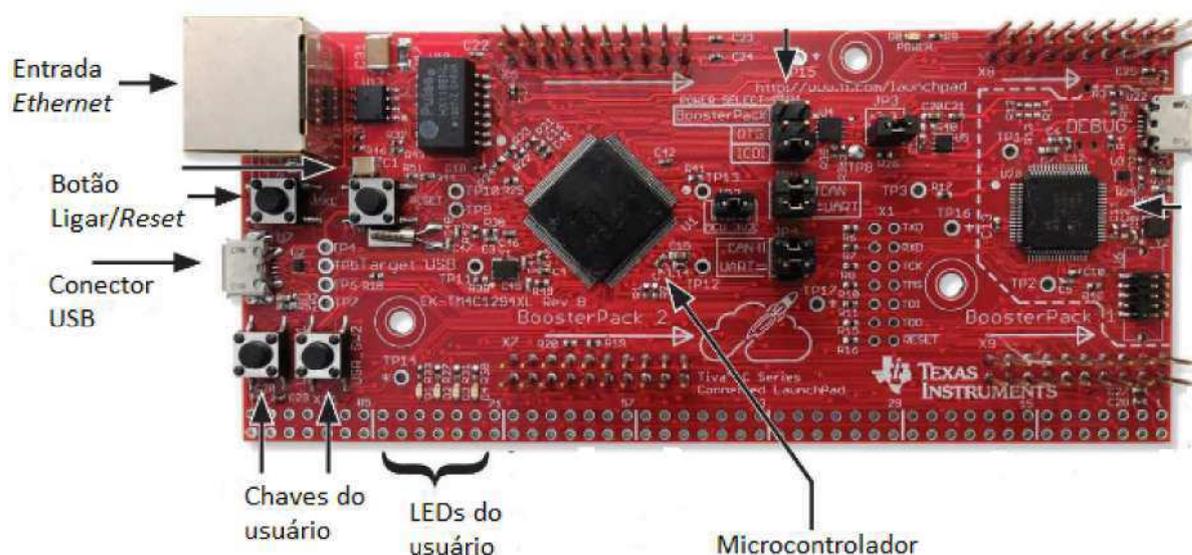


Figura 3.5 – Kit de desenvolvimento TM4C1294XL da *Texas Instruments*.

3.2 Estado da Arte

Na literatura foram encontrados artigos e relatórios técnicos de sistemas de comunicação para o monitoramento de linhas de transmissão. Através de sistemas SCADA, a central pode monitorar o funcionamento da subestação e componentes pertencentes a ela por meio de um computador. Esse sistema atende a utilização de rede *Ethernet* e também prevê o suporte para protocolos de aquisição e distribuição. No que abrange o protocolo utilizado, sendo este um dos focos do sistema de comunicação, os mais encontrados na literatura (mais comumente utilizados por empresas e equipes de engenharia) foram o Modbus, IEC e DNP3. Como a norma IEC 61850 foi exigida pela empresa TBE para ser usada no sistema de comunicação, o foco será neste protocolo.

Sidhu e Yin [32] usam o *Software OPNET Modeler* para criar modelos de IED configuráveis permitindo que engenheiros pudessem construir redes de diferentes topologias para qualquer tipo de subestação. Porém eles não abordaram o uso de mensagens SV. Ali e Thomas em [33], também modelaram vários cenários de comunicação dentro de uma subestação usando o *software OPNET Modeler*, porém não especificaram se quaisquer campos específicos SV foram anexados ao pacote. Liang e Campbell fizeram uma revisão da norma IEC 61850 e propuseram sugestões para a sua implementação em [34]. Ouellette et al. apresentaram em [35] testes com auxílio de um simulador digital de tempo real em interface com relés físicos com controle dinâmico de dados SV e mensagens tipo Objeto Genérico Orientado pelo Evento de Subestação (GOOSE - *Generic Object Oriented Substation Events*), um dos métodos para comunicação em tempo real entre IEDs.

O teste consistiu na manipulação das mensagens enviadas para observar se o sistema detectava a informação adicional nos dados SV e GOOSE. Eles relataram que, a partir de testes, a resposta a comportamentos não esperados no envio de mensagens SV e GOOSE poderiam apresentar diferenças para cada fabricante. Assim, foi indicado o teste antes da instalação para determinar como o sistema responderia a dados irregulares. Konka et al. [24] apresentaram um sistema de geração de tráfego para mensagens SV, onde para validar o modelo era feita uma simulação usando o NS3 (simulador de rede de código aberto) e os pacotes enviados para o *Wireshark*, que analisava e validava as mensagens SV geradas. Baranov et al. apresentaram [36] um *software* para simulação de transmissão de SV com 80 ou 256 amostras/ciclo, de acordo com a norma IEC 61850-9-2 LE. O *software* chamado de IED *Emulator* foi verificado pelo *Wireshark* e o *software SVScout* foi usado para analisar visualmente as funções de tensão e corrente geradas. Em [37], Sumec introduziu uma ferramenta computacional desenvolvida para a verificação de mensagens SV geradas por diversos dispositivos usando a norma IEC 61850-9-2, chamado *Sampled Value Analyser* (SVA). O SVA trazia as opções de visualizar SVs recebidas e verificar o formato da corrente de dados.

Steinhauser apresentou em [38] um experimento onde uma rede era constituída por dois comutadores interligados e uma fonte de SV transmitia uma corrente de SV para dentro da rede. O dispositivo de medição capturava os pacotes SV vindos da fonte antes de entrar na rede pelo comutador e depois novamente quando eles eram transmitidos a partir do outro comutador, depois de atravessar a rede. Um computador conectado a um comutador gerava tráfego de carga, fazendo com que houvesse interferência com as mensagens SV. Assim Steinhauser abordou circunstâncias onde SV estavam envolvidas e ilustrou alguns problemas, mostrando que alguns efeitos poderiam ser previstos até certo grau e como essas previsões seriam verificadas por medições. León et al. propuseram em [39] modelos de simulação para a norma IEC 61850, focando aplicações que usavam mensagens GOOSE e SV. As simulações foram criadas usando o *software* OMNeT++/INET. Em [40], Lehtonen e Hallstrom descreveram um digitalizador de referência para produzir uma corrente de SV rastreáveis sobre a *Ethernet*.

Em [41], Igarashi apresentou contribuições para a implementação de um barramento de processo segundo a norma IEC 61850-9, onde foram realizados testes de geração e transmissão de mensagens SV com a finalidade de implementar e avaliar as ferramentas disponíveis. Ele fez uso de um kit de desenvolvimento STM3240G-EVAL, para geração das mensagens SV, do *software Atollic TrueSTUDIO for ARM Pro*, para geração do *firmware* do kit, juntamente com o *firmware LwIP*, para envio das mensagens SV através da interface de Controle de Acesso ao Meio (MAC - *Media Access Control*) do microcontrolador. Os *softwares SVScout* e *Wireshark* também foram usados para a análise e validação das mensagens SV geradas.

Tabela 3.3 – Resumo referente ao estado da arte.

Referências	Modelos de IED	SV	IEC 61850	Wireshark	SVScout	SV Analyser	OMNet++/INET	OPNET	NS3
[24]		X	X	X					X
[32]	X		X					X	
[33]	X		X					X	
[34]		X	X						
[35]		X	X						
[36]		X	X	X	X				
[37]		X	X			X			
[38]		X	X						
[39]	X	X	X				X		
[40]		X	X						
[41]		X	X	X	X				

Na Tabela 3.3, estão apresentadas as informações principais retiradas da revisão bibliográfica. É possível observar que a norma IEC 61850 é bastante abrangente e pode ser usada de diversas maneiras. A implementação e análise das mensagens SV são feitas a partir de diversos *softwares* existentes. Neste trabalho, usa-se o *Wireshark*, assim como nos trabalhos [24], [36] e [41]. O desafio está em adaptar a norma e transmitir as mensagens SV personalizadas utilizando a placa da *Texas Instruments*, EK-TM4C1294XL. O trabalho do Igarashi [41] apresenta abordagem semelhante, porém fazendo uso de outra placa.

4 Desenvolvimento do Sistema de Comunicação

O capítulo 4 apresenta o dimensionamento do pacote de dados do tipo *sampled values*, de acordo com a norma IEC 61850. Também é discutido a implementação deste protocolo para realizar o envio e recebimento de dados através da placa EK-TM4C1294XL, fazendo uso dos *softwares* CSS e *WireShark* para codificar e analisar os dados. Os testes realizados para validar os dados transmitidos e sua análise em período de tempo também são mostrados neste capítulo. Por último, é abordado a transmissão do sinal óptico realizada pelos conversores de mídia.

4.1 Dimensionamento do Pacote de Dados

Toda a informação que passa pelo sistema de comunicação envolve pacotes. A rede divide os dados em partes com um certo tamanho em *bytes*. Cada pacote carrega a informação que o ajudará a chegar a seu destino: o endereço IP do emissor, o endereço IP do destinatário, algo que informe à rede em quantos pacotes a mensagem foi dividida e o número desse pacote em particular. Assim, cada pacote contém parte do corpo da mensagem. Um pacote típico contém 1000 ou 1500 *bytes*. No capítulo anterior, é dado na Tabela 3.2 que o pacote de dados tem um tamanho de 1367 *bytes*.

Para um melhor entendimento do dimensionamento do pacote de dados, a Figura 3.2, apresentada no Capítulo 3, mostra a organização de um pacote de dados de N *bytes*. O uso de *buffers* é bastante comum neste tipo de aplicação. Um *buffer* é uma região de memória física usada para armazenar temporariamente dados que serão movidos para outro local. Já um *buffer* Ping Pong é um buffer duplo no qual cada um é preenchido e esvaziado alternadamente, resultando em um fluxo quase contínuo de dados de entrada e de saída [42].

Assim, economiza-se o uso da unidade central de processamento (CPU - *Central Processing Unit*), já que a tarefa de aplicação só será colocada em modo ativo quando novos dados estiverem disponíveis, sendo possível gerar uma linha de atraso (*delay*) de acordo com tamanho de memória reservada, multiplicada pela taxa de preenchimento do *buffer* $N_C \cdot T_S$.

4.2 Implementação do Protocolo de Comunicação

A implementação do protocolo de comunicação na placa de desenvolvimento EK-TM4C1294XL é feita através da IDE da *Texas Instruments*, o CSS (*Code Composer Studio*). Como parte da codificação aplicada ao *hardware*, aplicações de rede foram programadas para a implementação do protocolo IEC 61850, utilizando o código da biblioteca `libiec61850` [43].

Para a comunicação entre o microcontrolador da placa e os conversores de mídia, a placa fornece uma interface de rede *Ethernet*, onde, para a implementação do protocolo, se fez necessário o estudo da sua aplicação para encapsular os dados recebidos e transmitidos de acordo com a norma. A verificação do uso do protocolo que está enviando as mensagens do tipo *sampled values* é realizada através do *software Wireshark*. Nele é configurada a interface *Ethernet* 'eth0', que é a interface padrão para comunicação *ethernet* no sistema operacional Linux. Assim, os pacotes SV enviados para a interface *Ethernet*, por meio da aplicação `sv_publisher` da biblioteca `libiec61850`, são identificados.

O *Wireshark* valida esses pacotes como *sampled values* através da informação presentes nos dados recebidos, ou metadados, que são característicos do SV, sendo condizentes com a forma em que é descrito na documentação da norma IEC 61850 e também é abordado em algumas teses e artigos [41]. Esses dados são organizados em uma unidade de dados do protocolo de aplicação (APDU - *Application Protocol Data Unit*), uma estrutura composta com um cabeçalho e por uma estrutura de dados que guardam os valores amostrados capturados, chamada unidade de dados de serviço de aplicação (ASDU - *Application Service Data Unit*). Uma APDU pode conter mais de uma ASDU [41]. Na Figura 4.1, é mostrado o esquema em que o APDU é montado, contendo 2 ASDUs.

```

▶ Frame 7744978: 99 bytes on wire (792 bits), 99 bytes captured (792 bits) on interface 0
▶ Ethernet II, Src: AsustekC_28:25:9a (74:d0:2b:28:25:9a), Dst: Iec-Tc57_01:00:01 (01:0c:cd:01:00:01)
▶ 802.1Q Virtual LAN, PRI: 4, CFI: 0, ID: 0
▼ IEC61850 Sampled Values
  APPID: 0x4000
  Length: 81
  Reserved 1: 0x0000 (0)
  Reserved 2: 0x0000 (0)
  ▼ savPdu
    noASDU: 2
    ▼ seqASDU: 2 items
      ▼ ASDU
        svID: svpub1
        smpCnt: 682
        confRef: 1
        smpSynch: none (0)
        seqData: 4ae4c8c249367465
      ▼ ASDU
        svID: svpub2
        smpCnt: 682
        confRef: 1
        smpSynch: none (0)
        seqData: 0000000000000000

```

Figura 4.1 – Configuração do APDU.

Então, o transporte de dados é realizado através da norma IEC 61850, com ênfase

nas mensagens do tipo SV, que são encapsuladas pelo protocolo *Ethernet* utilizando o padrão *Fast Ethernet*, para transmitir as informações coletadas.

4.3 Realização de Testes e Validação dos Dados Transmitidos

Para a realização dos testes, definiu-se a seguinte estrutura, mostrada na Figura 4.2.

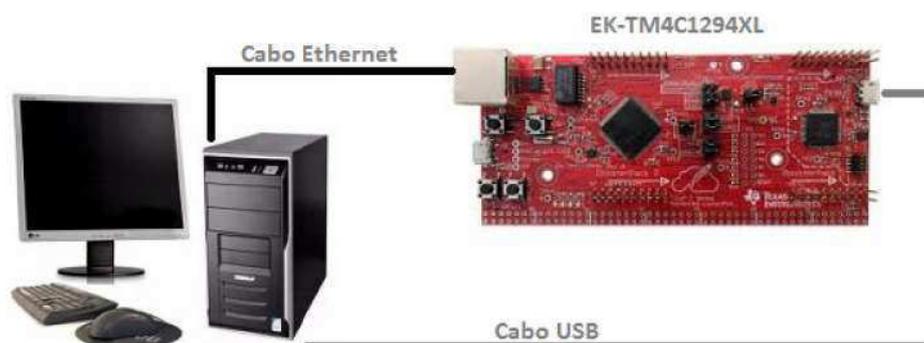


Figura 4.2 – Estrutura usada para a geração e avaliação de mensagens SV.

Na estrutura, tem-se:

- computador;
- kit de desenvolvimento EK-TM4C1294XL, da *Texas Instruments*.

E são utilizados os *softwares*:

- CCS, para enviar as mensagens SV pela interface do microcontrolador;
- *Wireshark*, para análise e validação das mensagens SV geradas.
- WinGW, que permite gerar pacotes da biblioteca *libiec61850* para simular o envio de pacotes SV.

Na Figura 4.3, é possível verificar o envio das mensagens tipo *sampled values* pelo *software Wireshark*.

Apply a display filter ... <Ctrl>/> Expression... +

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1720.	21.891768129	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.891768789	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895522575	Spanning-tree-(for-	Spanning-tree-(for-bridges)_01	MAC CTRL	60	Pause: pause_time: 0 quanta
1720.	21.895528259	Spanning-tree-(for-	Spanning-tree-(for-bridges)_01	MAC CTRL	60	Pause: pause_time: 65535 quanta
1720.	21.895536261	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895537996	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895538295	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895538556	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895538634	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895539116	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895539382	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895539779	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895540658	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895540326	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895540581	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895540921	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895541181	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895541421	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895541763	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895541991	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895542316	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895542577	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895542849	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895543161	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895543367	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895543601	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895543949	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.895544471	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.898787458	Spanning-tree-(for-	Spanning-tree-(for-bridges)_01	MAC CTRL	60	Pause: pause_time: 0 quanta
1720.	21.898770185	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.898772108	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.898772497	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	
1720.	21.898772838	AsustekC_28:25:9a	Iec-Tc57_01:00:01	IEC61850 Sampled Values	99	

▶ Frame 172022: 99 bytes on wire (792 bits), 99 bytes captured (792 bits) on interface 0
 ▶ Ethernet II, Src: AsustekC_28:25:9a (74:d8:2b:28:25:9a), Dst: Iec-Tc57_01:00:01 (01:9c:cd:01:00:01)
 ▶ 802.1Q Virtual LAN, PRI: 4, CFI: 0, ID: 0
 ▶ IEC61850 Sampled Values

eth0 -live capture in progress

Packets: 1560212 · Displayed: 1560212 (100.0%) Profile: Default

Figura 4.3 – Verificação das saídas na interface *Ethernet*.

Análise do Tempo de Envio dos Pacotes

A captura de pacotes SV, a partir do Wireshark em um intervalo de 60 segundos, foi realizada para analisar o tempo em que os pacotes são enviados. Durante esse período, 419540 pacotes foram enviados, dando uma aproximação de 6909 pacotes enviados a cada 1 segundo.

Assim, tem-se um valor aproximado de 0,14 ms, para que um pacote SV leva para ser enviado. Na Figura 4.4 e na Figura 4.5 observa-se os gráficos para o número de pacotes enviados no tempo e a quantidade de bits enviados no tempo, respectivamente. Onde uma linearidade é observada, garantindo uma taxa de transmissão estável ao longo de um período de tempo.

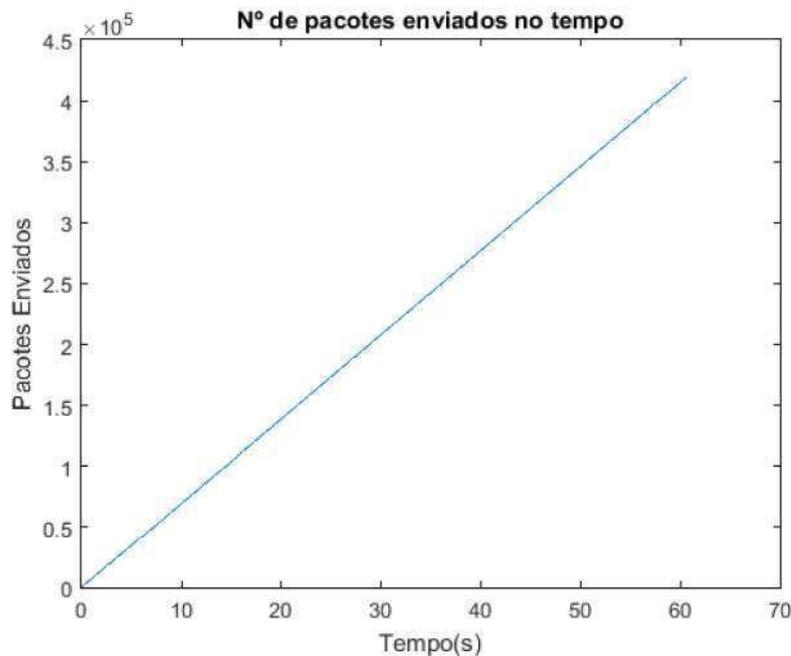


Figura 4.4 – Gráfico do número de pacotes enviados no tempo.

Cada pacote SV é composto por 1367 *bytes* de *payload*, que é o corpo de dados, e 67 *bytes* de cabeçalho *Ethernet* e do protocolo *sampled values*, assim tendo um tamanho total de 1434 *bytes*. Para o envio de 6909 pacotes SV a cada segundo, a taxa de transmissão obtida é de aproximadamente 79 Mbps.

Configuração dos conversores de mídia

Os conversores de mídia, modelo KFS D 1120 da Intelbras, foram utilizados para realizar a conversão da saída *Ethernet* para o meio óptico, via cabo OPGW. Esses conversores de mídia funcionam em pares, o modelo A transmitindo em 1550 nm, e o modelo B, recebendo em 1550 nm. No teste, o modelo KFS D 1120 A é ligado ao modelo B via cabo de fibra óptica de 2 m de comprimento. O modelo A é conectado à placa EK-TM4C1294XL usando um cabo *Ethernet* e o modelo B é conectado ao *notebook* para verificação da

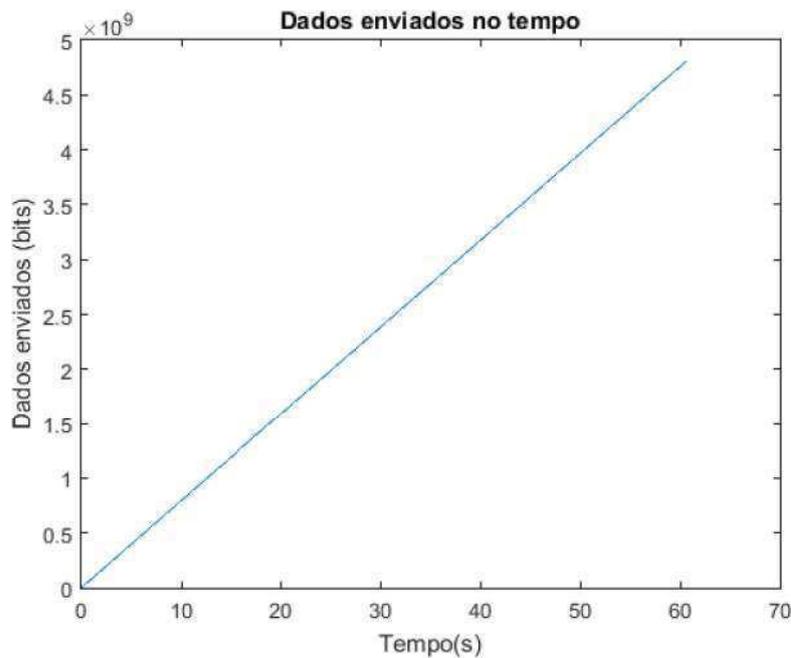


Figura 4.5 – Gráfico da quantidade de bits enviados no tempo.

transmissão de dados pelo *software Wireshark*, também via cabo *Ethernet*.

Os conversores foram configurados da seguinte maneira:

- Pino 1: Função LFP : ON Caso alguma falha ocorra na conexão da porta UTP, o conversor identificará e cancelará a conexão até que o erro seja reparado.
- Pino 2: Método de comutação: ON Como o objetivo do projeto é monitoramento em tempo real, isso requer o menor tempo possível para a passagem de dados até seu recebimento, desse modo é preferível que esta função esteja ligada.
- Pino 3: Modo negociação da porta TP: OFF Como o pino 4 e o pino 5 estarão na posição OFF, este também ficará.
- Pino 4: Velocidade da porta TP: OFF Velocidade de 100 Mbps.
- Pino 5: Modo duplex porta TP: OFF Selecionado o modo *Full duplex*.
- Pino 6: Modo duplex porta FX: OFF Selecionado o modo *Full duplex*.

Teste do Envio de Mensagens e Taxa de Transmissão

A partir do teste foi possível verificar o envio das mensagens e sua taxa de transmissão, em que para um tempo de 0,9 ms enviou 1429 *bytes* de informação.

Como maneira de melhorar ainda mais o tempo de envio, foi retirado do código de implementação do sistema de comunicação a função de cópia do *Payload*, assim há uma

economia de tempo no envio, sendo o *Payload* atribuído diretamente na *Struct 'Ethernet-Frame'*. As estruturas de dados ou (*Structs*) são blocos que armazenam diversas informações. Nesse caso, a *Struct* é implementada para representar o *Buffer* e seus respectivos campos. Com isso, o tempo de envio baixou de 0,9 ms para 0,4 ms.

Isso permite suporte para envio de pacotes com *Payload* variável. Então, podem ser enviados pacotes com *Payload* variando de 1 até 1429 *bytes*. O limite de 1429 *bytes* é dado pelo tamanho do *Frame Ethernet*, já que além do *Payload* serão adicionados 71 *bytes* de *Header*. Todos os campos são incrementados ou decrementados automaticamente de acordo com o novo *Payload* definido.

4.4 Dimensionamento da Transmissão do Sinal Óptico

A transmissão do sinal óptico é feita a partir dos conversores de mídia. Eles atuam em pares, sendo um responsável pela transmissão do sinal em 1550 nm e o outro, pela recepção, também em 1550 nm. O conversor transmissor do tipo KFSD 1120 A deve ser instalado próximo a cada microcontrolador e o conversor receptor do tipo KFSD 1120 B é colocado na central de comunicação para receber os dados.

A potência do sinal óptico para este equipamento é de -3 dBm a -14 dBm. O sinal que é transmitido pelo conversor tipo A é negociado pelo próprio equipamento quando conectado com o conversor tipo B, e se for necessário saber a potência antes da conexão, precisa-se de um equipamento conectado do outro lado da fibra que meça essa potência. Ou seja, os conversores negociam a potência do sinal. Assim, é preciso somente garantir que o outro lado receba sinal com potência dentro do limiar estabelecido de -3 dBm a -14 dBm. Segundo o fabricante, esta margem não é definida e não é configurável [44].

A potência máxima do transmissor TX é -3 dBm o que chegará ao outro lado, no melhor caso, será essa potência menos a atenuação proporcionada pela fibra. Essa atenuação não poderá ultrapassar o limiar de -31 dBm. A margem de segurança em dB, incluindo perdas nos conectores, emendas e perdas de inserção é 5 dB e a constante de atenuação da fibra óptica no comprimento de onda de 1550 nm é 0,2 dB/km.

Cáculo da Distância Máxima e Mínima do Enlace

O cálculo da distância em km é dado por

$$d_{km} = \frac{P_{TX} - P_{RX} - M_S}{\alpha} \quad (4.1)$$

onde P_{TX} é a variação de potência na saída do transmissor em dBm, P_{RX} é a variação de potência na entrada do receptor em dBm, M_S é a margem de segurança em dB e α é a constante de atenuação da fibra.

Caso 1 $P_{TX} = -4$ dBm; $P_{RX} = -31$ dBm e $M_S = 5$ dB

$d_{km} = 110$ km

Caso 2 $P_{TX} = -14$ dBm; $P_{RX} = -31$ dBm e $M_S = 5$ dB

$d_{km} = 60$ km

Assim, é considerado como pior caso a transmissão em até 60 km de acordo com os cálculos feitos. Porém, o fabricante dos conversores de mídia só garante uma transmissão de 100 Mbps por até 20 km de distância.

Na Figura 4.6, é mostrado o esquema em que a implementação dos conversores de mídia é feita como parte do sistema de comunicação que vai da placa na linha de transmissão até a subestação para o recebimento e análise dos dados.

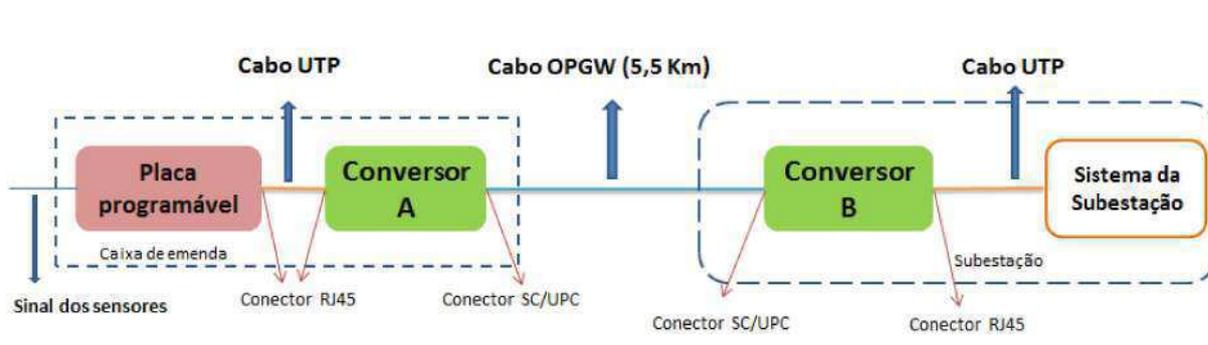


Figura 4.6 – Esquema de implementação dos conversores de mídia.

Ao fim deste capítulo, tem-se todo o estudo e desenvolvimento realizado sobre o sistema de comunicação apresentado neste trabalho de conclusão de curso.

5 Conclusões

Para manter as linhas de transmissão em plena condição de uso é usual realizar o monitoramento em toda a extensão da linha, com inspeção visual e eventuais reparos. Diariamente, diversas equipes realizam esse monitoramento, e para a execução do trabalho, necessita-se de equipamentos como telefones satelitais, rádios, camionetes tracionadas, GPS, estação total, medidores de resistência, Refletômetro óptico no domínio do tempo (OTDR - *Optical Time Domain Reflectometer*), usado para analisar a transmissão da fibra ótica, dentre outros, para que seja possível o acesso e execução de todos os serviços necessários a LT [45]. Assim, é possível perceber que toda essa manutenção é muito dispendiosa e que demanda toda uma operação de pessoas e equipamentos.

Neste trabalho, para realizar a automatização de um sistema de subestação, foi apresentado um módulo de comunicação que tem a função de fazer o monitoramento em tempo real das LTs, em especial nos isoladores. O módulo desenvolvido tem o objetivo de transmitir os dados capturados na rede elétrica para o controle da subestação. Essa supervisão, a partir da transferência de dados, evita que constantes inspeções presenciais sejam feitas, sendo necessárias apenas se houver a verificação de dados inesperados.

Neste trabalho adotou-se a norma IEC 61580, que permite o envio e recebimento de mensagens *Sampled Values*. Analisando os resultados obtidos, verificou-se que a implementação, embora não trivial e sem um banco de dados vasto para consulta, é totalmente viável.

A partir dos testes realizados, o sistema de comunicação apresenta uma base bem formada e com resultados satisfatórios. Sendo possível a diminuição da taxa de transmissão de dados para um tempo de 0,4 ms, onde o tempo original seria de 14 ms.

Agora, com o progresso já feito neste trabalho e em outros em paralelo, é possível concluir o módulo de comunicação para seu uso comercial e dar continuidade à pesquisa para se obter mais avanços na área de comunicações aplicada a redes de transmissão de energia elétrica.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como parte da continuação deste trabalho, são apresentadas aqui as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Aperfeiçoamento do módulo de comunicação para uso comercial.
- Realização de testes em ambiente real para verificar seu funcionamento.

Referências

- 1 LEÃO, R. Capítulo 3: Linhas de transmissão de energia elétrica. *Projeto e Instalações Elétricas Prediais, primeira edição*, Universidade Federal do Ceará, 2010.
- 2 SILVA, L. C. Recuperação dos isoladores de vidro das linhas de transmissão condenados dor corrosão e avaliação da aplicação de nanotecnologia na redução de acúmulo de poluentes. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Pernambuco, 2008.
- 3 NERI, M. G. G. et al. Avaliação de técnicas de monitoramento de isoladores poliméricos. *Encuentro de Potencia, Instrumentacion y Medidas*, IEEE, 2005.
- 4 ARAGÃO, B. et al. Sistema de comunicação utilizando cabos opgw para monitoramento de linhas de transmissão. *ENCOM*, Universidade Federal de Campina Grande, 2016.
- 5 BORDUCHI, F. C.; DURÃO, J.; SANTOS, R. D. V. Estudo do desempenho do cabos do tipo opgw quando submetidos aos ensaios de descargas atmosféricas e curto-circuito. *Trabalho de Conclusão de Curso*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.
- 6 ZILIO, S. C. Óptica moderna: fundamentos e aplicações. Editora do Instituto de Física de São Carlos, 2009, 1a edição.
- 7 FURUKAWA. Cabeamento estruturado Óptico. *Relatório de Ensaio*, Furukawa, 2012.
- 8 PEREIRA, R. Fibras ópticas e wdm. *Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/grad/081/wdm1>*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Acesso em: 28 de julho de 2016.
- 9 RUDGE, F. Dispersão em fibras ópticas. *Laboratório de Tecnologia Eletrônica - LTE*, Universidade Estadual de Campinas, 2009.
- 10 ALVIM, M. G. Cabo opgw - suas implicações para o sistema elétrico. *Disponível em: <http://www.aptel.com.br/riomadeira/palestras/maria17.pdf>*, Furnas Centrais Elétricas S.A., Acesso em: 02 de Setembro de 2016.
- 11 FARIZELE, R. L. Análise de métodos convencionais na avaliação do desempenho de cabos opgw em linha de transmissão. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- 12 PINTO, R. Análise de métodos convencionais na avaliação de cabos opgw em linhas de transmissão. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- 13 DUARTE, F. T. P. Redução de perdas por indução em cabos para-raios de linhas de transmissão dotadas de um cabo pára-raio opgw e outros ehs. *Dissertação de Doutorado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- 14 ELETRONORTE. Estudo comparativo para implantação de cabos ópticos em linhas de transmissão em operação. *XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Eletronorte, 2001.

- 15 IEEE Standard for Testing and Performance for Optical Ground Wire (OPGW) for Use on Electric Utility Power Lines. IEEE Std 1138-2009 (Revision of IEEE Std 1138-1994). IEEE, 2009.
- 16 ODISHA. Technical specification for opgw cabling in tr line. *E27-OPGW CABLE for TRANSMISSION LINE, vol. 2*, Power Transmission Corporation Limited., 2010.
- 17 SOUSA, T. Vantagens dos serviços utilizando cabos opgw em linhas de transmissão de alta tensão voltados para sistemas de telecomunicação. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, vol. 4*, Anhaguera Educacional Ltda, 2012.
- 18 ROCHA, L. C. Desempenho de linhas de transmissão eat e uat frente a descargas atmosféricas: Influência da ruptura a meio de vão. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- 19 APTEL. Recomendações para especificação de cabos opgw e acessórios. *Disponível em: <http://www5.chesf.gov.br/Anexos/ABV11-5110.pdf>*, Acesso em 11 de novembro de 2016, 2005.
- 20 ENERPEL. Caixa de emenda opgw. *Disponível em: <http://enerpel.com.br/teste.php?pg=imovelid=207idcat=3idtipo>*, Acesso em: 15 de agosto de 2016, 2016.
- 21 PRASHER, V. Indian experience in implementation of scada/ems systems. *Power Tech*, IEEE Russia, p. 1-7, 2005.
- 22 NAMMUR, R. O que é um sistema scada? *Disponível em: <http://plcescada.com/automacao/o-que-e-um-sistema-scada/>*, Acesso em: 13 de setembro de 2016, 2015.
- 23 MACKIEWICZ, R. E. Overview of iec 61850 and benefits. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, IEEE, p. 623-630, 2006.
- 24 KONKA, J. W. et al. Traffic generation of iec 61850 sampled values. *IEEE First International Workshop on Smart Grid Modelling and Simulation*, IEEE, 2011.
- 25 SCHWEITZER, L. de E. Redes de comunicação em subestações de energia elétrica – norma iec 61850. *Revista O Setor Elétrico*, 2010.
- 26 GRIGOLETTO, V. O. Protocolos de comunicação para automação de sistemas de energia - análise teórica e aplicação prática. *Dissertação de Mestrado*, Universidade de São Paulo, 2012.
- 27 SILVA, E. L. Redes iec-61850 – estudo de protocolo e exemplo de aplicação. *Disponível em: <http://www.automacaoindustrial.info/redes-iec-61850-estudo-de-protocolo-e-exemplo-de-aplicacao/>*, Acesso em: 10 de agosto de 2016, 2012.
- 28 ZILLGITH, M. libiec documentation. *Disponível em: <http://libiec61850.com/libiec61850>*, Acesso em: 14 de agosto de 2016, 2016.
- 29 JALOUDI, S. et al. Communication strategy for grid control and monitoring of distributed generators in smart grids using iec and iee standards. *In Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe)*, 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition, 2011.

- 30 CIANET. Por que você deve utilizar um conversor de mídia para interligar redes ethernet. Disponível em: <http://www.cianet.com.br/conversor-de-midia/>, Blog Cianet, Acesso em: 04 de setembro de 2016.
- 31 INTELBRAS. Guia de instalação: Kfm 112, kfs 1120, kfsd 1120 a/b. Disponível em: <http://www.intelbras.com.br>, Acesso em: 20 de dezembro de 2016, 2014.
- 32 TEXAS INSTRUMENTS. Manual do usuário - tiva ek-tm4c1294xl evaluation kit. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ug/spmu365c/spmu365c.pdf>, Acesso em: 17 de setembro de 2016, 2016.
- 33 SIDHU, T. S.; YIN, Y. Modelling and simulation for performance evaluation of iec 61850-based substation communication systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, 2007.
- 34 ALI, I.; THOMAS, M. S. Substation communication networks architecture. *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, POWERCON*, IEEE, 2008.
- 35 LIANG, Y.; CAMPBELL, R. H. Understanding and simulating the iec 61850 standard. IEEE.
- 36 OUELLETTE, D.; DESJARDINE, M.; FORSYTH, P. Using a real time digital simulator to affect the quality of iec 61850 goose and sampled value data. *Developments in Power System Protection (DPSP 2010)*. , *10th IET International Conference on Managing the Change. IET, RTDS Technologies*, 2010.
- 37 BARANOV, P. F. Software for emulation the sampled values transmission in accordance with iec 61850 standard. *2nd International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation*, Atlantis Press, 2013.
- 38 SUMEC, S. Software tool for verification of sampled values transmitted via iec 61850-9-2 protocol. *Electric Power Engineering (EPE)*, IEEE, 2014.
- 39 STEINHAUSER, F. Propagation and interaction of ethernet packets with iec 61850 sampled values in power utility communication networks. *IEEE, IET*, 2014.
- 40 LEÓN, H. et al. Simulation models for iec 61850 communication in electrical substations using goose and smv time-critical messages. *IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, IEEE, 2016.
- 41 LEHTONEN, T.; HALLSTROM, J. A reference merging unit and calibration setup for sampled values over ethernet. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, IEEE, 2016.
- 42 IGARASHI, G. Contribuições para a implementação de um barramento de processo segundo a norma iec 61850-9. Dissertação de Doutorado - Universidade de São Paulo, 2016.
- 43 NEVES, F. Ping-pong buffer para sistemas embarcados. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/ping-pong-buffer>, Acesso em: 10 de janeiro de 2017, 2016.

44 INTELBRAS. Guia de instalação: Conversores de mídia fast ethernet. *Disponível em:* <<http://www.intelbras.com.br>, Intelbras, Acesso em: 04 de outubro de 2016.

45 NATIVA. Manutenção em linhas de transmissão. *Disponível em:* <http://www.nativaengenharia.com.br/manutencao.asp>, Acesso em: 16 de outubro de 2016, 2005.