



**FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE
INSTITUTO ENSINAR BRASIL - REDE DOCTUM DE ENSINO**

CARLOS HENRIQUE ARAÚJO SANTOS

DANIEL LUIZ SOUZA

**INTEGRAÇÃO DOS PROTOCOLOS MMS (IEC 61850) E MODBUS TCP PARA
APLICAÇÃO EM ACIONAMENTOS DE EQUIPAMENTOS DE MÉDIA TENSÃO**

João Monlevade

2019

**CARLOS HENRIQUE ARAÚJO SANTOS
DANIEL LUIZ SOUZA**

**INTEGRAÇÃO DOS PROTOCOLOS MMS (IEC 61850) E MODBUS TCP PARA
APLICAÇÃO EM ACIONAMENTOS DE EQUIPAMENTOS DE MÉDIA TENSÃO**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso
de Engenharia Elétrica da Faculdade
Doctum de João Monlevade, como
requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.**

**Professor Orientador: Dr. Thaís de
Fátima Araújo Silva**

João Monlevade

2019



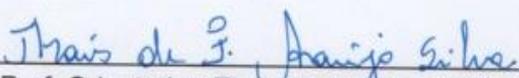
**FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE
INSTITUTO ENSINAR BRASIL – REDE DOCTUM DE ENSINO**

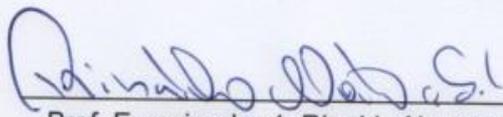
FOLHA DE APROVAÇÃO

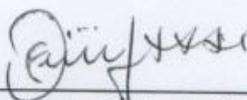
O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: INTEGRAÇÃO DOS PROTOCOLOS MMS (IEC 61850) E MODBUS TCP PARA APLICAÇÃO EM ACIONAMENTOS DE EQUIPAMENTOS DE MÉDIA TENSÃO, elaborado pelos alunos CARLOS HENRIQUE ARAÚJO SANTOS e DANIEL LUIZ SOUZA foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Doctum de João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de

Bacharel em Engenharia Elétrica

João Monlevade , 11 de dezembro de 2019


Prof. Orientador: Thais de Fátima Araújo Silva


Prof. Examinador 1: Rinaldo Nonato e Silva


Prof. Examinador 2: José Olímpio dos Santos Filho

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecemos a Deus por nos proporcionar a realização deste curso, renovando nossas energias a cada obstáculo surgido no decorrer desta caminhada. Agradecemos a todos os professores que nos auxiliaram durante todo o percurso com seus ensinamentos, cada um com seu jeito peculiar, pela paciência, empenho, atenção, dedicação e demonstração no prazer de ensinar, em especial à professora Thaís, pela paciência em nos orientar. Aos nossos colegas de sala, futuros parceiros nessa nova fase de nossas vidas. Ao eng. Paulo Henrique V. Soares, que nos incentivou e nos apoiou muito para a realização deste trabalho. E a nossa família pelo apoio nos momentos difíceis dessa nossa jornada, o nosso muito obrigado sempre!

ABREVIATURAS E SIGLAS

ACSI – Serviço de Comunicação Abstrata

ADU – Application Data Unit (Unidade de dados de aplicação)

ASCII – American Standard Code For Information Interchange (Código Padrão Americano Para Intercâmbio De Informações)

Bay – Nível De Controle E Proteção

CCM – Centro De Controle De Motores

CDC – Classes De Dados Comum

CID - Configured IED Description (Descrição de Configuração do IED)

CIP – Protocolo Industrial Comum

CRA – Cartão Escravo Da Rede I/O

CRC – Cyclical Redundancy Check (Verificação de redundância cíclica)

CRP – Cartão Mestre Da Rede I/O

CSMA/CD – Carrier Sense With Access And Collision Detect (Sentido De Acesso E Detecção De Colisão)

CST – Protocolo De Composição De Transferência De Estado

FTP – File Transfer Protocol (Protocolo de Transferência de Arquivos)

GATEWAY – Conversor (Ponte de Ligação)

GOOSE – Generic Object Oriented Substation Event (Evento De Subestação Orientado A Objeto Genérico)

GSSE - Generic Substation Status Event (Evento De Status De Subestação Genérico)

HTTP – HyperText Transfer Protocol (Protocolo de Transferência de Hipertexto)

I/O – Entrada e saída

ICD – IED Capability Description (Descrição Da Capacidade Do IED)

IEC – International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)

IED – Dispositivo Eletrônico Inteligente

IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

IGMP – Internet Group Management Protocol (Protocolo De Gerenciamento De Grupo De Internet)

IHM – Interface Homem Máquina

IP – Internet Protocol Address (Endereço De Protocolo Da Internet) Time (Tempo Real Isochronous)

ISO – International Standards Organization (Organização De Normas Internacionais)

LRC – Longitudinal Redundancy Check (Verificação De Redundância Longitudinal)

MBAP – Modbus Application Protocol Header (Cabeçalho Do Protocolo De Aplicação Modbus)

MMS – Manufacturing Message Specification (Especificação De Mensagem De Fabricação)

NRT - Non-Real Time (Tempo Não Real)

ODVA – Open Devicenet Vendor Association (Associação De Fornecedores Do Devicenet Aberto)

OSI – Open Systems Interconnection (Interconexão De Sistemas Abertos)

PLC – Controlador Lógico Programável

PTP – Protocolo De Precisão De Tempo

QoS – Qualidade De Serviço

RS232 – Recommend Standard – 232 (Padrão Recomendado 232)

RTPS – Real-Time-Publisher-Subscriber (Publicação Em Tempo Real)

RTU – Remote Terminal Units (Unidades De Terminal Remotas)

SAS – Sistema De Automação De Subestação

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (Sistemas De Supervisão E Aquisição De Dados)

SCD – Substation Configuration Description (Descrição Da Configuração Da Subestação)

SCL – Substation Configuration Language (Idioma De Configuração Da Subestação)

SNMP – Simple Network Management Protocol (Protocolo Simples De Gerenciamento De Redes)

SSD – System Specification Description (Descrição Da Especificação Do Sistema)

SV – Sampled Values (Valores Amostrados)

TC – Transformador De Corrente

TCP/IP – Transmission Control Protocol / Internet Protocol (Protocolo De Controle De Transmissão/Protocolo Internet)

TP – Transformador De Potencial

UCA – Utility Communications Architecture (Arquitetura De Comunicações Utilitárias)

UDP – User Datagram Protocol (Protocolo De Datagrama Do Usuário)

USB – Universal Serial Bus (Porta Universal)

VLAN – Rede Virtual Local

WWW – World Wide Web (Rede De Alcance Mundial)

Lista de Figuras

Figura 1- Pirâmide da automação	18
Figura 2 - Níveis de um Sistema de Automação de Subestação	22
Figura 3 - IED Industrial	23
Figura 4 - Comunicação vertical no SAS.....	24
Figura 5 - Comunicação vertical na indústria	25
Figura 6 - Conversor de protocolo no modelo OSI.....	26
Figura 7 - Arquitetura a sete camadas do padrão OSI.....	28
Figura 8 - Divisão da arquitetura TCP/IP.....	30
Figura 9 - Canais de comunicação do protocolo PROFINET	32
Figura 10 - Diferentes tipos de processos.....	33
Figura 11 - Elementos da rede	34
Figura 12 - Protocolo Modbus e o modelo OSI	35
Figura 13 - Modelo de dados Modbus.....	36
Figura 14 – Pilha de comunicação Modbus	37
Figura 15 - Frames Modbus RTU e Modbus/TCP	38
Figura 16 - Ethernet / IP como parte do modelo OSI CIP	39
Figura 17 - Modelo Cliente/Servidor.....	39
Figura 18 - Modelo de dados da IEC 61850.....	42
Figura 19 - Esquema em árvore representando a estrutura de modelos de dados...43	
Figura 20 - Visão geral da IEC 61850	45
Figura 21 - Níveis de comunicação IEC 61850	46
Figura 22 - Arquitetura de rede de comunicação	47
Figura 23 - Tipos de arquivos da IEC 61850.....	48
Figura 24 - IEC 61850 e o modelo OSI	49
Figura 25 - Tipos de mensagens.....	50
Figura 26 - Algoritmo CSMA /CD	52
Figura 27 - Complexo de mineração da cidade de Itabira - MG.....	59
Figura 28 - Processo de beneficiamento de minério de ferro.....	60
Figura 29 - Representação da rede de controle da usina estudada.....	61
Figura 30 - Arquitetura do sistema SCADA.....	62
Figura 31 - Arquitetura do sistema de controle.....	64
Figura 32 - Arquitetura de Rede.....	66
Figura 33 - Arquitetura do sistema de automação de subestações (SAS).....	69

Figura 34 - Topologia plataforma do SAS	70
Figura 35 - Passos da integração.....	71
Figura 36 - Modelo de Arquitetura de Integração	72
Figura 37 - Programação do IED.....	73
Figura 38 - Desenvolvimento da arquitetura de comunicação do gateway	74
Figura 39 - Configuração dos Protocolos do gateway	74
Figura 40 - Configuração do cartão Modbus TCP	75
Figura 41 - Configuração das variáveis de interface com o gateway	76
Figura 42 - Bloco criado para comunicar com o IED	77
Figura 43 - Lógica de Watchdog	78
Figura 44 - Integração do PLC com o IED	78
Figura 45 - Monitoramento das variáveis de comunicação no gateway	79
Figura 46 - Tempo de comunicação entre o PLC e o IED.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de comunicação.....	33
Tabela 2 - Resumo dos tipos de comunicação para Ethernet/IP.....	40
Tabela 3 - Comparação entre Protocolos.....	56
Tabela 4 - Representação das subestações presentes na planta.....	61

RESUMO

Com a “chegada” dos IEDs (*Intelligent Electronic Device*) baseados na norma IEC 61850, surgem novas possibilidades para construção e implementação das filosofias de proteção, supervisão e controle dentro das subestações. A norma IEC 61850 é o padrão para projetos de automação de subestações elétricas, destinada a “resolver” problemas de interoperabilidade entre os inúmeros IED’s de diferentes fornecedores. A utilização desta norma tem se expandido, e atualmente, além de definir o padrão de comunicação aplicado em subestações, ela vem se consolidando como o padrão para a comunicação em sistemas de energia elétrica. Em uma mineradora presente na cidade de Itabira/MG, o sistema de automação de subestações (SAS) teve um crescimento considerável nos últimos 5 anos, passando de 150 para 799 o número de IED’s utilizados na planta. Como resultados desta expansão, novos IED’s foram aplicados no processo de automação industrial, precisamente nos acionamentos de 4.16 kV, baseado nos protocolos da IEC 61850. Com este novo cenário, até então desconhecido e de poucas, ou nenhuma, referência para a arquitetura atual existente na planta de beneficiamento, o trabalho apresentado consiste no detalhamento da integração dos IED’s ao sistema de supervisão e controle da planta (SSC). Neste contexto, este trabalho visa abordar a junção do sistema de automação do setor elétrico ao sistema de automação do processo industrial, os efeitos da integração dos IED’s ao PLC (*programmable logic controller*) da planta na arquitetura *Ethernet* e a necessidade da utilização de conversores de protocolos (*gateway*). Explicou-se a arquitetura antes e após o projeto, as definições e padrões criados para essa aplicação; e o estado atual da solução. Ao final, apresentou-se os resultados alcançados com a implantação da IEC 61850 na automação do processo industrial, algumas vantagens, tais como a quantidade de informações trafegadas, o acesso aos IED’s de forma online e a possibilidade de alterações de parâmetros remotamente. Espera-se que este trabalho possa servir de base para análise e avaliação de futuras aplicações dos IED’s baseado na IEC 61850 na automação de processo. Almeja-se também que os tópicos aqui apresentados sirvam, inicialmente, de guia para a indústria e para a academia quanto à aplicação da norma neste cenário.

Palavras – chave: Automação. Norma IEC 61850. Processo Industrial. IED.

ABSTRACT

With the “arrival” of the Intelligent Electronic Devices (IEDs) based on the standard IEC 61850, new possibilities for building and implementing the protection, supervision and control philosophies within substations are emerging. The IEC 61850 is the standard for electrical substation automation projects designed to “solve” interoperability problems between countless IEDs from different suppliers. The use of this standard has expanded, and nowadays, besides defining the communication standard applied in substations, it has been consolidating as the standard for communication in electric power systems. In a mining company located in the city of Itabira / MG, the substation automation system (SAS) has grown considerably in the last 5 years, passing from 150 to 799 the number of IEDs used in the plant. As a result of this expansion, new IEDs have been applied in the industrial automation process, precisely in the 4.16 kV drives, based on the IEC 61850 protocols. With this new scenario, until then unknown and with little or no reference to the current existing architecture in the beneficiation plant, the presented work consists of giving details of the integration of the IEDs to the plant supervision and control system (SSC). In this context, this work will explore the junction of the electrical sector automation system with the industrial process automation system, the effects of the integration of the IEDs with the programmable logic controller (PLC) of the plant in the Ethernet architecture and the need for the use of power converters protocols (gateway). In this paper were explained the architecture before and after the project, the definitions and standards created for this application; and the current state of the solution. At the end, were presented the results obtained with the implementation of IEC 61850 in industrial process automation, some advantages, such as the amount of information trafficked, access to IEDs online and the possibility of parameter changes remotely. It is expected that this work can serve as a basis for analysis and evaluation of future applications of the IED based on the IEC 61850 in process automation. It is also expected that the topics presented here will initially serve as a guide for industry and university in applying the standard in this scenario.

Keywords: Automation. IEC 61850 Standard. Industrial Process. IED

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	MARCO TEÓRICO	17
3.1	Automação	17
3.1.1	Automação industrial	17
3.1.1.1	<i>PLC (Controlador Lógico Programável)</i>	19
3.1.2	Sistema de Automação de subestação (SAS)	20
3.1.2.1	<i>IED (Dispositivo Eletrônico Inteligente)</i>	23
3.1.3	Utilização dos IED's: Automação de Subestação e Automação industrial	23
3.3	Redes de Comunicação	26
3.4	Protocolos de Comunicação	27
3.5	Modelo de Referência OSI (Open Systems Interconnection)	27
3.6	Modelo de Referência TCP/IP (Transmission Control Protocol)	30
3.7	Profinet	31
3.8	Modbus	35
3.8.1	Modbus/TCP	37
3.9	Ethernet/IP	38
3.10	Norma IEC - 61850	41
3.10.1	Modelo de dados da IEC 61850	41
3.10.2	Estrutura da IEC 61850	43
3.10.3	Tipos de interfaces	45
3.10.4	Tipos de arquivos da IEC 61850	47
3.10.5	Tipos de Protocolos	48
3.10.6	Tipos de serviços	50
3.11	Determinismo	50
3.11.1	Switch	52
3.11.2	VLAN (Virtual Local Area Network)	53
3.11.3	QoS (Qualidade de serviço)	53
3.11.4	IGMP (Internet Group Management Protocol)	54
3.11.5	Determinismo no Ethernet/IP	54
3.11.6	Determinismo no Profinet	54

3.11.7	Determinismo na IEC 61850.....	55
3.11.9	Diferenças entre protocolos.....	55
4	METODOLOGIA.....	57
5	ESTUDO DE CASO.....	59
5.1	Sistema de Automação industrial	62
5.1.1	Sistema de supervisão	62
5.1.2	Sistema de controle.....	64
5.1.3	Arquitetura de acionamento.....	66
5.2	Sistema de Automação de Subestações (SAS)	67
6	RESULTADOS E DISCURSÕES	70
6.1	Integração do IED ao PLC	70
6.2	Monitoramento.....	79
7	CONCLUSÃO.....	82
	REFERÊNCIAS.....	84
	ANEXOS	89
	Anexo 1 – Definição dos Típicos	89

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia, o ambiente industrial moderno encontra-se cada vez mais integrado, devido à crescente demanda e a complexidade dos processos industriais. Para a integração de sistemas e processos industriais, são exigidos que os computadores responsáveis pelos mesmos, façam a comunicação entre si de forma segura, eficiente e confiável. Para alcançar esses requisitos, a correta escolha do protocolo de comunicação é muito importante. Encontra-se no mercado diversos tipos de protocolos de comunicação industrial. Isso se deve ao fato de fabricantes desenvolverem seus próprios protocolos para seus dispositivos. Entre os principais protocolos existentes e aplicados na indústria, baseados no meio físico ethernet, estão o *Modbus TCP*, o *Ethernet/IP*, e o *Profinet*. Cada um destes possui seu próprio padrão para realizar a troca de dados entre os seus dispositivos. Esta diferença entre os protocolos, traz como consequência a dificuldade de integração dos componentes em um ambiente industrial; o que faz necessário o uso de conversores (gateways) para estabelecer a comunicação.

Em 2003, foi publicada pela *International Electrotechnical Commission* (IEC), a norma IEC 61850 - *Communication Networks and Systems in Substations*, que nasceu devido à necessidade de modelar e uniformizar dados de comunicação e as funcionalidades operacionais encontradas nos sistemas de automação em subestações.

A norma IEC 61850 tem como objetivo padronizar a comunicação entre equipamentos. A norma estabelece meios para garantir a interoperabilidade, que é a capacidade de comunicação entre dispositivos de diferentes fabricantes sem a necessidade de conversores (gateways), para facilitar a configuração e a reconfiguração do SAS (Sistema de Automação de Subestação) por meio de arquivos definidos e padronizados pela norma e, aumentar a versatilidade para implementação de novas tecnologias em processos de modificações futuras. A norma IEC 61850 é composta por três protocolos de comunicação que são o MMS (*Manufacturing Message Specification*), o GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) e o SV (*Sampled Values*), que são responsáveis por fazer o controle, a proteção e o monitoramento do sistema elétrico.

A norma foi publicada em 2003 e está em sua segunda edição (IGARASHI, 2016). Sua utilização, em escala comercial, é consolidada em diversas aplicações industriais e seguimentos do setor de energia, tais como a automação de

subestações e em redes inteligentes (smart grid). A ausência da necessidade de conversores de protocolos e toda a padronização estabelecida pela norma elimina algumas dificuldades presentes nos outros protocolos existentes no mercado.

Baseando-se no sucesso dos projetos aos quais foram aplicados a norma IEC 61850, o presente trabalho tem como objetivo avaliar sua aplicabilidade e possíveis adequações necessárias para o acionamento de equipamentos de média tensão em um processo industrial localizado em uma mineradora da cidade de Itabira – MG.

A alternativa proposta neste trabalho, em utilizar o protocolo MMS da norma IEC 61850 no setor industrial, foi avaliada em um estudo de caso. Através deste estudo foi detalhado os passos da integração do sistema para tornar possível a aplicação deste protocolo em um ambiente industrial.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Demonstrar os procedimentos utilizados, e resultados obtidos na integração de IED's ao PLC, através dos protocolos MMS da IEC 61850 e Modbus TCP, utilizando um conversor de protocolos (gateway).

2.2 Objetivos Específicos

- Descrever a aplicação dos IED's na automação do setor industrial e no setor elétrico;
- Analisar a aplicação, as principais características e as diferenças entre os protocolos PROFINET, ETHERNET/IP, MODBUS/TCP e MMS (IEC 61850) em uma rede industrial;
- Apresentar as principais diferenças do processo industrial e elétrico de uma planta mineradora através de um estudo de caso;
- Apresentar a integração dos dispositivos (IED'S, PLC, conversor de protocolos) e resultados obtidos com essa integração.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Automação

O termo automação significa qualquer sistema que utilize computação e que substitua o trabalho humano com o intuito de automatizar a velocidade e a qualidade dos processos produtivos, a segurança dos funcionários, além de obter maior controle, planejamento e flexibilidade da produção (GOEKING, 2010). Dentre os principais sistemas de automação estão o sistema de automação industrial e o sistema de automação de subestação (SAS).

3.1.1 Automação industrial

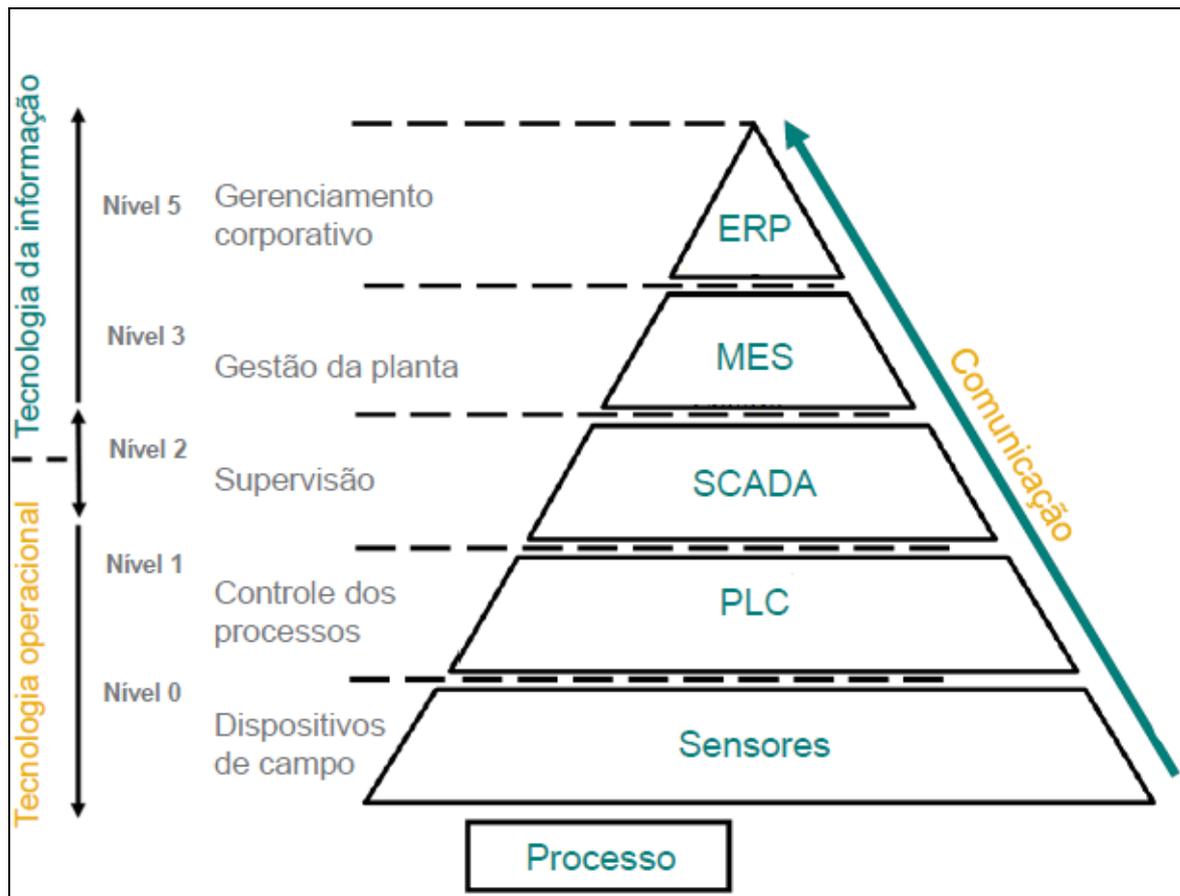
A automação industrial surgiu para transformar os trabalhos sistemáticos, que eram realizados por homens ou animais, em máquinas sequenciais. Desta forma, com o desenvolvimento da automação, o ser humano libertou-se de tarefas repetitivas, passando a gerenciar e planejar atividades mais complexas, proporcionais à capacidade cognitiva do cérebro humano (Zancan, 2016).

De acordo com Mikel (2011), a implementação da automação industrial trouxe vários benefícios, dentre estes podem ser citados: Aumento de produtividade, redução dos custos do trabalho, redução dos efeitos da falta de trabalhadores, redução das rotinas manuais e das tarefas administrativas, aumento da segurança do trabalhador, melhora na qualidade do produto, redução no tempo de produção e a realização de trabalhos que não podem ser executados manualmente.

Goeking (2010) explica que a automação industrial foi aplicada, inicialmente, em indústrias automobilísticas e petroquímicas e, desde então, a tecnologia se disseminou para outras áreas, como nas indústrias alimentícia, química, petroquímicas, siderúrgicas, dentre outras.

A automação industrial é subdividida em 5 níveis e estes níveis constituem uma pirâmide, denominada pirâmide da automação. Esta pirâmide, conforme mostra a figura 1, estabelece os atributos e a hierarquia de cada nível de atuação no setor da automação.

Figura 1- Pirâmide da automação



Fonte: Antunes (2017) – Adaptado pelos autores

O nível 1, apresentado na figura 1, da pirâmide é o chamado chão de fábrica, pois é o nível em que se realiza a integração com os processos físicos e neste nível estão as máquinas diretamente responsáveis pela produção. Este nível é composto principalmente por relés, sensores digitais e analógicos, inversores de frequência, conversores, sistemas de partida e centro de controle de motores (CCM) (GOEKING, 2010).

O nível 2, apresentado na figura 1, é responsável por controlar os sensores e atuadores do nível 1. Em ambientes industriais, o PLC (Controlador Lógico Programável) é o responsável por realizar esta função, além de repassar os comandos dos níveis superiores para as máquinas da planta (GOEKING, 2010; KÖRNER, 2019).

O nível 3, apresentado na figura 1, da pirâmide, é responsável pelos bancos de dados que concentram informações sobre qualidade da produção, relatórios e estatísticas. Neste nível estão contidos os sistemas supervisórios que transmitem as informações fornecidas pelos equipamentos dos níveis 1 e 2 e as disponibilizam

para os níveis administrativos (níveis 4 e 5). Através deste sistema é possível realizar o controle remoto e monitorar os dados de processo, bem como otimizar todo processo (SILVA, 2013).

Por sua vez, o nível 4, apresentado na figura 1, é responsável por disponibilizar ferramentas que tem o objetivo de planejar e controlar as atividades no processo produtivo, passando as tarefas que devem ser realizadas para o nível 3 que distribui o trabalho para os níveis inferiores. Esse é o nível responsável pelo controle e logística de suprimentos (GOEKING, 2010).

No nível 5, apresentado na figura 1, está contido todo o planejamento estratégico corporativo, além de hospedar os sistemas corporativos que possibilitam a administração de todos os recursos da empresa (SILVA, 2013).

Cada um destes níveis possui seus próprios padrões de comunicação, denominados como protocolos de comunicação. Martins (2015) explica que os níveis corporativos, utilizam protocolos de comunicação baseados em Ethernet enquanto os níveis de processo utilizam protocolos de comunicação baseados em redes de campo (*Fieldbus*) que serão apresentados ao decorrer do trabalho. Roa (2011) detalha que os níveis de processo (1 e 2) utilizam protocolos que promovem uma comunicação cíclica e de velocidade determinada; já os níveis corporativos (3, 4 e 5) utilizam protocolos que permitem uma alta taxa de transferência de informações, mas possui uma alta latência em relação ao tempo de resposta.

O PLC, cérebro do sistema de automação industrial, utiliza estes dois tipos de protocolos de comunicação. Um para estabelecer a comunicação com os instrumentos de campo, nível 1, e outro para estabelecer a comunicação com o sistema supervisor, nível 3. Detalhes sobre o funcionamento do PLC são apresentados na próxima seção.

3.1.1.1 PLC (Controlador Lógico Programável)

O Controlador Lógico Programável, do inglês *Programmable Logic Controller* (PLC), é o cérebro de um sistema de automação industrial. Este ativo da automação surgiu da necessidade da indústria automobilística em alterar mais facilmente a lógica de funcionamento de sua produção; uma vez que a linha de produção era formada por painéis eletromecânicos, que tornava difícil a criação ou testes de novos modelos de carros (ZANCAN, 2016; LIN, 2013).

De acordo Zancan (2016), o CLP é um aparelho eletrônico digital, que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas, tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando, por meio de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos.

Na pirâmide de automação, o PLC é o responsável por controlar os dispositivos de campo, que estão no primeiro nível, e realizar a interface com o sistema de supervisão e controle que está no terceiro nível; além de fornecer dados para os níveis de gestão e corporativo.

A comunicação entre o PLC e os dispositivos associados ao nível 1, deve ser feita através de protocolos que possuem a característica de comunicação em tempo real (tempo de execução de uma determinada tarefa é rígido) e determinístico (concluída em um período de tempo definido e a confirmação de conclusão deve ser fornecida), pois é através desta comunicação que são realizados os acionamentos e os intertravamentos em um processo industrial. Desta forma, explica Cassiolato (2013), a transmissão dos dados entre o PLC e os dispositivos de campo deve ser realizada em um processo cíclico, ou seja, repete uma sequência de operação em uma determinada ordem.

Sobre a comunicação entre os níveis 2 e 3, Lopes (2018) explica que por se tratar de sistemas supervisórios, onde se realizam supervisão e controle, a restrição temporal se torna menos rígida por se tratar de condições e alarmes. Geralmente são aceitos atrasos entre 100ms e 1000ms, dependendo do tipo de aplicação.

Lin (2013) destaca que, os PLC's, muitas das vezes, são condicionados a trabalhar sob condições ambientais adversas, suportando calor, frio, umidade, vibração e outras condições extremas, mas devem manter os controles precisos, determinísticos e em tempo real para as outras partes do sistema de automação industrial.

3.1.2 Sistema de Automação de subestação (SAS)

Os Sistemas de Automação de Subestações (SAS) sofreram evoluções expressivas nos últimos tempos. Impulsionados pelo desenvolvimento de dispositivos eletrônicos microprocessados, os equipamentos secundários das subestações saltaram de dispositivos eletromecânicos de proteção para os modernos IED's (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes). Antes responsáveis apenas

pelas funções de proteção, os dispositivos inteligentes mais atuais incorporam funcionalidades de monitoração, controle e seletividade lógica, além de realizar inúmeras medições na rede elétrica. Desta forma, o SAS tem como objetivo oferecer meios para operação, controle e manutenção das subestações (DE OLIVEIRA SOUTO, 2009; DUARTE, 2012)

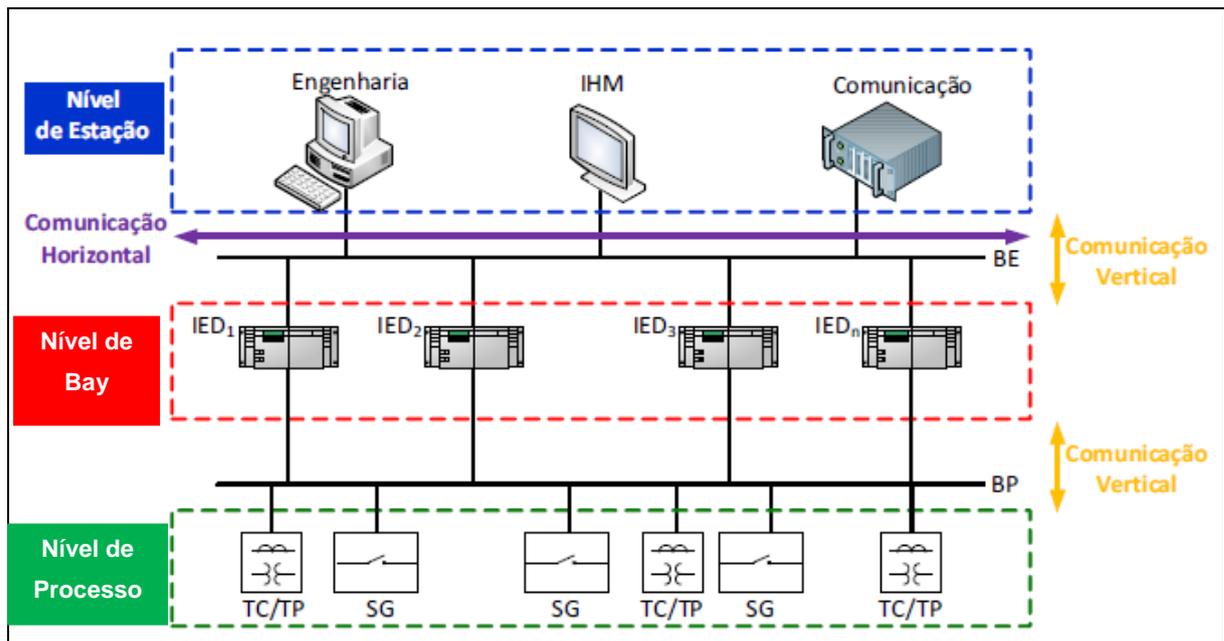
Fisicamente, os dispositivos que compõem um SAS estruturam-se em três diferentes níveis, cada um com sua função, sendo classificados em nível de processo, de controle e proteção e de subestação, como mostra a figura 2 (IGARASHI, 2008).

O nível de processo contém os dispositivos tipicamente de entrada e saída (I/O) como os sensores inteligentes, transdutores de medidas (TC - Transformador de Corrente e TP – Transformador de Potencial), atuadores (dispositivos de manobra e seccionamento), entre outros (CHEMIN NETTO, 2012; IGARASHI, 2008).

O nível de controle e proteção, também denominado com nível de *Bay* contém os dispositivos eletrônicos inteligentes, os medidores de energia e os oscilógrafos existentes na subestação. Os IED's têm por finalidade receber informações do nível de processo e trocar informações entre si de forma a garantir a proteção, automação e controle do sistema elétrico, além de realizar outras funcionalidades como, por exemplo, intertravamento entre si (CHEMIN NETTO, 2012; DUARTE, 2012; IGARASHI, 2008).

O nível de estação contém os dispositivos de comunicação, o sistema supervisório, todas as Interfaces Homem Máquina (IHM) e estações de configuração necessárias para supervisão e controle da subestação. Este é o nível superior dentro da subestação que se conectam com os centros de controle (CHEMIN NETTO, 2012; DUARTE, 2012).

Figura 2 - Níveis de um Sistema de Automação de Subestação



Fonte: Chemin Netto (2012)

Em sistemas de subestação, dois tipos de comunicação são utilizados para que haja a troca de informações entre os diferentes níveis do sistema ou entre os diferentes dispositivos do sistema em um mesmo nível. Estas comunicações são denominadas comunicação vertical e comunicação horizontal, respectivamente (VICENTE, 2011).

As comunicações verticais utilizam o modo cliente-servidor. Esta comunicação geralmente não tem restrições críticas de tempo pois é utilizada para configuração de IEDs, informações e medições de processo (DE OLIVEIRA SOUTO, 2009).

A comunicação horizontal utiliza o modo produtor-consumidor, em que um determinado dispositivo disponibiliza as informações na rede e um dispositivo consumidor trata as mensagens que lhe forem necessárias. Esta comunicação deve suportar serviços de tempo crítico, pois nela trafegam as funções de proteção e intertravamento do sistema (DE OLIVEIRA SOUTO, 2009; NGUYEN, 2013).

O principal equipamento utilizado na automação de subestação são os IED's apresentados no próximo tópico.

3.1.2.1 IED (Dispositivo Eletrônico Inteligente)

Os IEDs (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes) são unidades multifuncionais para a proteção, automação, controle, medição, monitoramento e acesso remoto de sistemas elétricos (LACERDA, 2012).

Atualmente os IED's tornaram-se uma ferramenta extremamente importante e poderosa, por causa da sua capacidade de concentrar diversas funções dentro de um único equipamento. Um ponto que merece destaque nestes equipamentos é a sua altíssima confiabilidade, isso devido aos seus relés modernos possuírem algoritmos de autodiagnóstico (auto teste). Essa funcionalidade permite que o equipamento realize uma verificação contínua de seu hardware e software, sendo capaz de detectar qualquer anormalidade dentro de seus sistemas. Ainda pode-se destacar algumas outras vantagens desses dispositivos, tais como: Oscilografia e análise de sequência de eventos, localização de defeitos, recursos de comunicação e maior flexibilidade (ABB, 2015).

O IED, mostrado na figura 3, é projetado para proteção, controle, medição e supervisão de subestações, motores assíncronos médios e grandes em sistemas de energia industrial e transformadores em redes de distribuição de concessionárias e energia industrial (ABB, 2015).

Figura 3 - IED Industrial



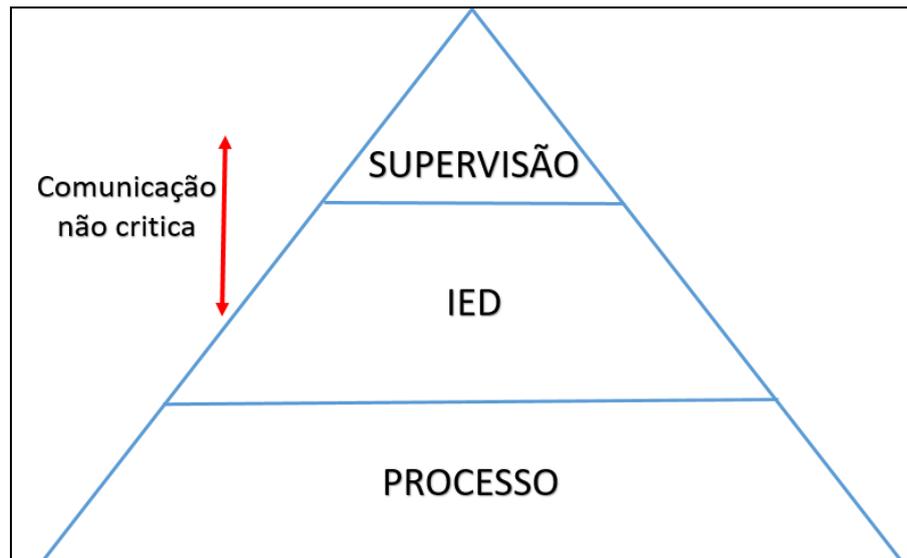
Fonte: ABB (2015)

3.1.3 Utilização dos IED's: Automação de Subestação e Automação industrial

Os IEDs são muito utilizados em Sistemas de Automação de Subestação (SAS) e em Sistemas de Automação Industrial. Porém, existem particularidades de cada um destes sistemas em relação ao uso dos IEDs.

No SAS, os IEDs ocupam o segundo nível do sistema, conforme mostra a figura 4. Neste nível os IEDs realizam as funções de proteção, intertravamento e interface com os níveis 1 e 3. A comunicação com o nível 3 utiliza protocolos de comunicação que não possuem restrição crítica de tempo, pois nesta comunicação trafegam apenas informações de supervisão e controle à distância.

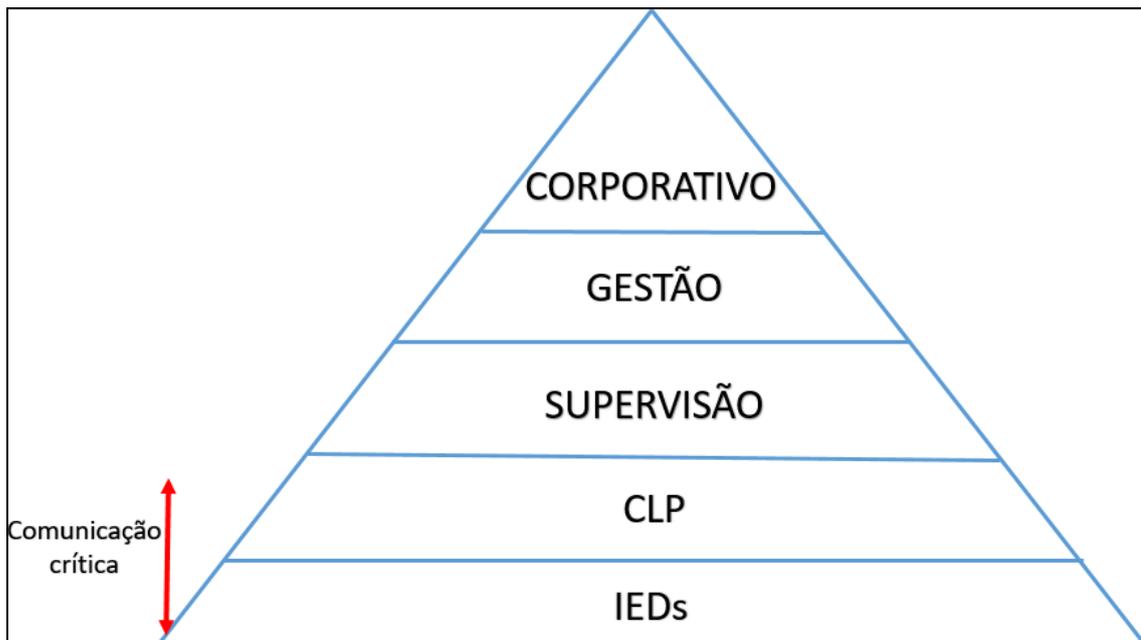
Figura 4 - Comunicação vertical no SAS



Fonte: Desenvolvido pelos autores

Já em um sistema de automação industrial, os IED's ocupam o primeiro nível da pirâmide conforme mostra a figura 5. Neste sistema os IEDs são controlados diretamente pelo PLC, que está no segundo nível da pirâmide. O PLC que realiza os intertravamentos do processo além de controlar os IEDs mediante à lógica desenvolvida. Portanto, os protocolos utilizados para esta comunicação devem garantir o determinismo e a comunicação em tempo real, que serão tratados no decorrer do trabalho (GOEKING, 2010).

Figura 5 - Comunicação vertical na indústria



Fonte: Desenvolvido pelos autores

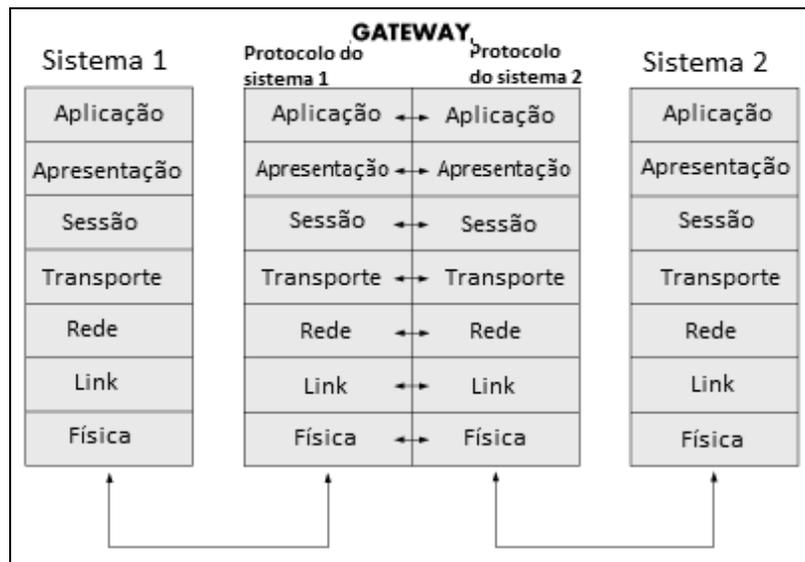
Em muitos sistemas de automação, para que seja possível a comunicação dos diferentes níveis do sistema, são utilizados conversores (gateways).

3.2 Conversor de Protocolo - Gateway

Em sistemas onde são utilizados dispositivos que possuem diferentes protocolos de comunicação, torna-se necessário a utilização de conversores de protocolos, mais comumente chamados de gateways. Os gateways “traduzem” protocolos específicos de uma aplicação para outros protocolos baseados em Ethernet. Esta tradução permite que as informações sejam transmitidas de uma rede para outra, como por exemplo da rede de controle para a rede corporativa (SOUZA, 2015; ROJAS, 2010).

Os gateways baseados em Ethernet possuem duas pilhas de protocolos, conforme mostra a figura 6, uma sendo baseado na arquitetura do modelo OSI e a outra baseada na arquitetura considerada. Geralmente os gateways são construídos com uma orientação a uma dada aplicação, como por exemplo, a interconexão entre a rede Modbus/TCP e a rede MMS da norma IEC 61850 (STEMMER, 2001).

Figura 6 - Conversor de protocolo no modelo OSI



Fonte: Souza (2015) - Adaptado pelos autores

A utilização de gateways implica em atrasos, da ordem de milissegundos, na troca de informação entre os dispositivos e possui limitações no processo de conversão de protocolos além de exigir um esforço significativo para sua configuração e suas possíveis atualizações (SOUZA, 2015; ROJAS, 2010).

O termo gateway também é aplicado para os firewalls que são dispositivos que regulam o tráfego entre redes distintas podendo impedir a transmissão de dados nocivos, ou não autorizados, de uma rede à outra. Também encontra-se este termo quando há conversão das características elétricas de um protocolo para outro, como por exemplo, o conversor serial RS232 para USB ou o conversor de redes de campo (Fieldbus) para Ethernet (DUARTE, 2012; GILCHRIST, 2016).

3.3 Redes de Comunicação

As redes de comunicação possibilitam que os computadores enviem e recebam informações uns aos outros. Segundo Tanenbaum (2003) uma rede de computadores significa uma coleção de computadores autônomos e interconectados. Pode-se dizer que dois computadores são interconectados quando se tem a capacidade de troca de informações entre si.

A introdução das redes industriais por sinais elétricos analógicos começou a surgir a partir da década de 1960. Anos depois surgiu a necessidade de interligar computadores e o Controlador Lógico Programável (PLC). Assim surgiram as redes

industriais, que permitiram o compartilhamento de base de dados e recursos, trazendo mais segurança aos usuários da informação.

As redes industriais são importantes para o ambiente industrial, visto que atualmente os processos estão cada vez mais complexos e interdependentes, fazendo com que as comunicações entre computadores responsáveis são necessárias. Portanto, o ambiente Industrial que era isolado, necessita de uma interligação com o ambiente corporativo da empresa, possibilitando o aperfeiçoamento do processo de produção, e evitando perda de tempo, de insumos e de mão de obra.

3.4 Protocolos de Comunicação

Dentro deste contexto, os protocolos de comunicação são padrões estabelecidos para a troca de dados. São códigos criados para que os dispositivos conectados à rede possam se comunicar.

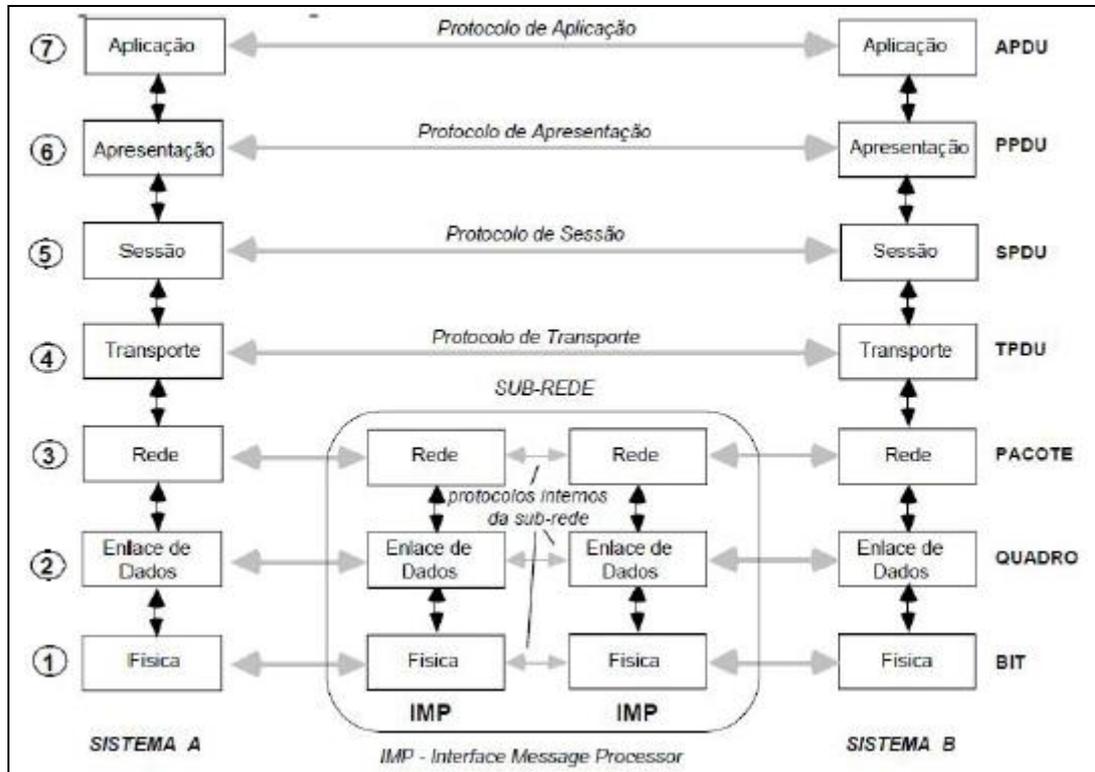
Os protocolos de comunicação são desenvolvidos por algoritmos, ou seja, instruções bem definidas para executar uma tarefa (RIOS, 2011). Segundo Tanenbaum (2003), um protocolo de rede é um conjunto de regras sobre o modo como se dará a comunicação entre as partes envolvidas, e que qualquer violação do protocolo, resultará em dificuldades de comunicação e em alguns casos poderá até impossibilitá-la. Existem vários protocolos no mundo inteiro, que podem oferecer uma diversidade de serviços em comunicação de equipamentos, dentre estes protocolos alguns são mais utilizados como, Modbus, Profibus, Ethernet IP, Profinet, IEC 61850, entre vários outros. Como os sistemas de automação industrial cresceram significativamente, com vários tipos de dispositivos, tornou-se necessário a criação de padrões para interconectar diferentes dispositivos de automação. Assim, surgiram alguns modelos de referência como o modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection*) e o modelo TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*).

3.5 Modelo de Referência OSI (Open Systems Interconnection)

Segundo Tanenbaum (2003), o modelo OSI, baseia em uma proposta desenvolvida pela ISO (*International Standards Organization*) como um primeiro passo em direção à padronização internacional dos protocolos. A proposta do modelo é realizar a interconexão de sistemas, ou seja, realizar a comunicação entre

sistemas abertos. O modelo OSI segue a filosofia das arquiteturas multicamadas, e é composto por sete camadas como mostra a figura 7.

Figura 7 - Arquitetura a sete camadas do padrão OSI



Fonte: Tanenbaum (2003)

Cada camada tem o seu objetivo e realiza a comunicação com as camadas adjacentes através de uma interface. Para a criação do modelo OSI, levou-se em consideração alguns princípios para determinar a quantidade de camadas que o modelo deveria ter. Estes princípios são:

- Cada camada representa um nível de abstração no modelo;
- Cada camada tem suas funções bem definidas e próprias;
- A função de cada camada deve ser escolhida tendo em vista a definição de protocolos padronizados internacionalmente (TANENBAUM, 2003);
- Cada camada tem que ser definida para que seu limite minimize o fluxo de informações pelas interfaces;
- O número de camadas deve ser grande o bastante para que uma camada não realize diversas funções e ao mesmo tempo pequenas para que a arquitetura não fique complexa.

O modelo OSI não é uma arquitetura de rede, pois não especifica os serviços e os protocolos exatos que devem ser usados em cada camada. Ele apenas informa o que cada camada deve fazer (TANENBAUM, 2003). Resumidamente as camadas do modelo são:

1. Camada Física

A camada física trata da transmissão de bits brutos por um canal de comunicação (TANENBAUM, 2003). Segundo Oliveira (2016), é a camada responsável por enviar e receber os bits através de um meio físico. É nesta camada que é especificado a interface elétrica e mecânica, e a forma de levar os dados às camadas superiores.

2. Camada de Enlace de Dados

Estabelece endereços para identificar os nós da rede, e divide os pacotes a serem enviados pela camada física (OLIVEIRA, 2016). A principal tarefa desta camada é deixar a linha de transmissão de dados livre de erros, não detectados pela camada de rede.

3. Camada de Rede

A camada de Rede tem o papel de gerenciar o tráfego e o roteamento dos dados, ou seja, é responsável por levar os dados de sua fonte até o receptor.

4. Camada de Transporte

A camada de transporte tem uma função básica, que segundo Tanenbaum (2003) é aceitar dados da camada acima, dividi-los em unidades menores caso necessário, repassar essas unidades à camada de rede e assegurar que todos os fragmentos chegarão corretamente à outra extremidade.

5. Camada de sessão

A camada de sessão fica responsável de sincronizar a comunicação e os pacotes que trafegam em uma rede (OLIVEIRA, 2016). Segundo Tanenbaum (2003) essa camada permite que os usuários de diferentes máquinas estabeleçam sessões entre eles.

6. Camada de apresentação

A camada de apresentação, está relacionada com a semântica e a sintaxe das informações transmitidas. Funções como conversão de dados entre diferentes formatos, compressão, expansão de dados e encriptação são responsabilidades dessa camada (OLIVEIRA, 2016).

7. Camada de Aplicação

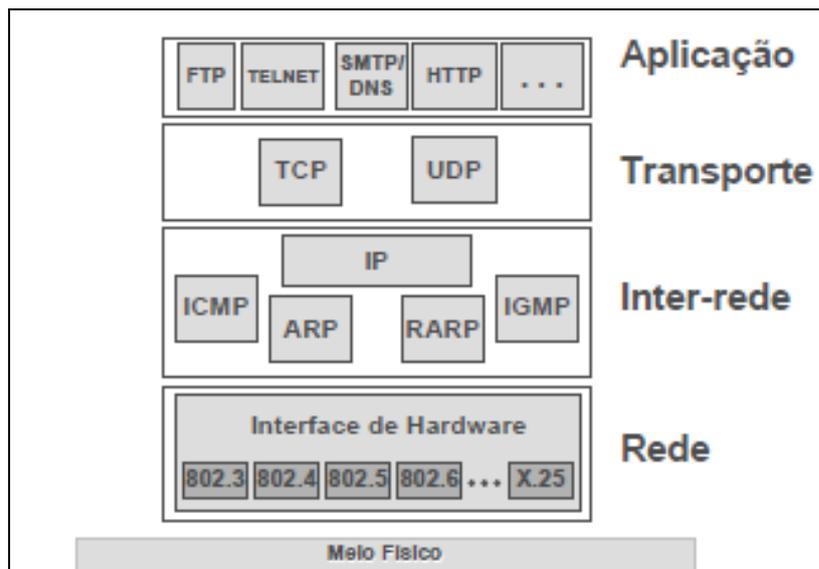
É a última camada do modelo OSI, e é responsável por fornecer acesso às aplicações de rede, oferecendo meios para que a comunicação seja possível. Esta camada oferece algumas funções como a transferência de arquivos, gerenciamento de rede e serviços de e-mail.

3.6 Modelo de Referência TCP/IP (Transmission Control Protocol)

O modelo TCP/IP é uma das arquiteturas de rede com maior expansão para a comunicação á curta, média e longa distância envolvendo computadores. Surgiu em meados dos anos 70, criado por Vinton G. Cerf e Robert E. Khan, não parando mais de crescer (TANENBAUM, 2003). Neste mesmo ano foi criado por Robert M. Metcalfe o protocolo Ethernet, que é um dos protocolos que faz parte da arquitetura TCP/IP.

Inicialmente o modelo surgiu com o objetivo de interconectar diversas redes espalhadas pelo mundo ao mesmo tempo, podendo fornecer serviços de dados, voz e imagem uma vez que, os serviços de voz e imagem não eram suportados pelo modelo OSI (TANENBAUM, 2003). O modelo TCP/IP também é dividido por camadas, mas em uma arquitetura diferente da citada no modelo OSI, como mostra a figura 8.

Figura 8 - Divisão da arquitetura TCP/IP



Fonte: Lugli (2007)

A primeira camada é a de rede, e define o meio físico e o tipo de ligação de dados utilizados na rede TCP/IP. Segundo Tanenbaum (2003) vários protocolos e padrões foram desenvolvidos e certificados nessa camada, sendo que o padrão Ethernet tornou-se o mais difundido.

A camada de Inter redes é responsável por encaminhar os pacotes em qualquer rede, assim garantem que sejam transmitidos independentemente do destino. O protocolo mais difundido dessa camada é o IP, porém há outros que auxiliam seu trabalho (LUGLI, 2007).

A camada de transporte é responsável pela conexão de dois elementos e pela garantia de transmissão dos dados. Dois protocolos operam nessa camada, o TCP (orientado a conexão) ou o UDP (não orientado a conexão), (TANENBAUM, 2003). Utiliza-se o TCP para configurar e parametrizar os elementos de rede, devido ser lenta a sua confirmação de envio da informação. Já o UDP é utilizado para trocar informações entre elementos de rede, pois é rápido no transporte das mensagens.

A camada de aplicação do usuário contém protocolos de alto nível. Esses protocolos fornecem serviços ao usuário, como o HTTP, FTP, WWW e SNMP (HELD, 2000).

Com a necessidade de interligar todos os níveis da cadeia industrial, o padrão TCP/IP foi incorporado na indústria. Assim o nível gerencial teria acesso em tempo real ao chão de fábrica. Mas segundo Lugli (2007), na arquitetura tradicional não é possível devido aos diferentes tipos de padrões de protocolos existentes no mercado. Hoje, existem vários protocolos no mercado de diferentes fabricantes, e cada um desenvolveu uma maneira de se comunicar e enviar seus dados do chão de fábrica aos níveis mais altos da hierarquia industrial. Existem vários protocolos para Ethernet industrial, entre os mais desenvolvidos estão o Ethernet/IP, Modbus/TCP, Profinet, IEC 61850.

3.7 Profinet

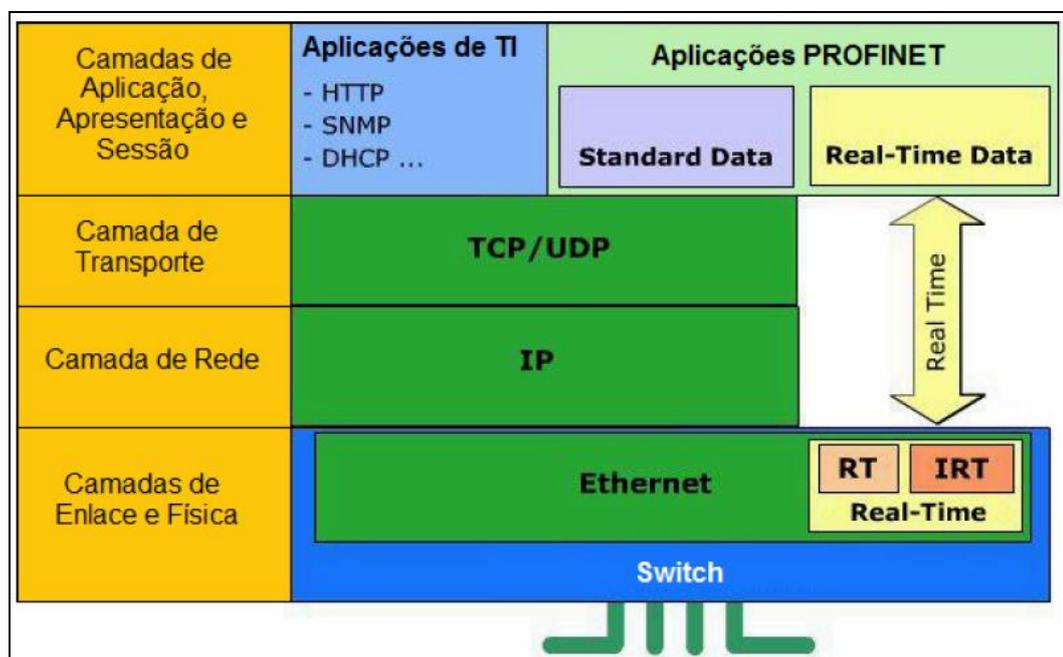
O protocolo Profinet (*Process Field Network*) é um protocolo contemporâneo para redes industriais que apresenta importância destacada no mercado (TURCATO, 2015).

De acordo com o estudo realizado por Sestito (2011), em 2007, após 5 anos de existência deste protocolo, já haviam 1 milhão de dispositivos instalados operando com este protocolo. Em 2011, o *The World Market for Industrial Ethernet*

do *IMS Research*, publicou que este protocolo já dominava 28% do Mercado de protocolos baseados em Ethernet. Segundo Marcos (2013), o protocolo vem despontando na liderança do segmento Ethernet industrial e mostra-se digno de maior pesquisa, com o intuito de ampliar o entendimento a seu respeito e aperfeiçoar as suas aplicações.

A Profinet é regulamentada pela norma IEC 61158-5 e IEC 61158-6 que tratam dos serviços e dos protocolos da camada de aplicação. A figura 9 mostra a divisão dos serviços e dos protocolos aplicados ao Profinet.

Figura 9 - Canais de comunicação do protocolo PROFINET



Fonte: Marcos (2013)

Por trabalhar sobre um padrão Ethernet, a Profinet permite o uso de topologias em estrela, árvore, anel além da linear que é a mais utilizada nos processos industriais (OLIVEIRA, 2016).

Existem basicamente dois tipos de redes Profinet: Profinet IO e Profinet CBA apresentada na Tabela 1. Lugli (2007) explica que a Profinet CBA é baseada na arquitetura TCP/IP, que conserva as camadas de 1 a 4 e é chamada de *Non-real time* (NRT) devido ao tempo de processamento ser próximo de 100 ms. Por outro lado, a Profinet IO é caracterizada por ter aplicação com tempos menores que 1ms e é chamada de *Isochronous Real Time* (IRT). Esta redução no tempo de ciclo é devido à eliminação de vários níveis do protocolo o que resulta em uma diminuição do comprimento das mensagens transmitidas. Existe ainda um terceiro segmento;

neste pode ser utilizado tanto o CBA quanto o IO, chamado de *Soft Real Time* (SRT). Neste segmento também há a eliminação de vários níveis de protocolo, porém os tempos de varreduras são em torno de 10ms. Baseada no protocolo Profibus DP, a Profinet IO opera diretamente com os dispositivos de campo, realizando leituras dos sensores, atualizando os sinais de saída e controle de diagnósticos da rede.

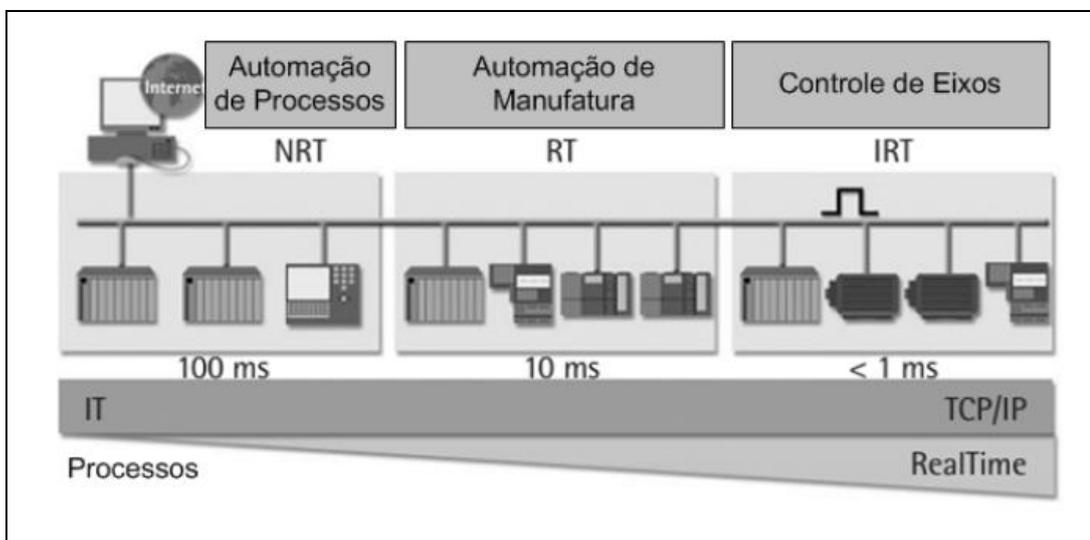
Tabela 1: Tipos de comunicação

Tipo	Aplicação	Latência
CBA – NRT	IHM – Interfaces	100ms
CBA/IO – SRT	Controles de I/O	10ms
IO – IRT	Controle de movimento	<=1ms

Fonte: Elaborado pelos autores

Oliveira (2016) explica que a aplicação da Profinet NRT é utilizada na automação de processos quando o tempo de ciclo não é crítico conforme a figura 10. Estes processos, segundo Marcos (2013) são por exemplo: parametrização, configuração ou interface Homem Máquina (IHM); onde o acesso pode ser realizado de forma acíclica. Para aplicações onde é necessário precisão, como na maioria dos processos de manufatura, utiliza-se a Profinet RT que visa a transmissão de dados críticos no tempo, para um desempenho otimizado na troca de dados. Devido a essa necessidade, o Profinet abandona partes dos protocolos IP, TCP e UDP, mas conserva os mecanismos da Ethernet (IEEE 802.3).

Figura 10 - Diferentes tipos de processos

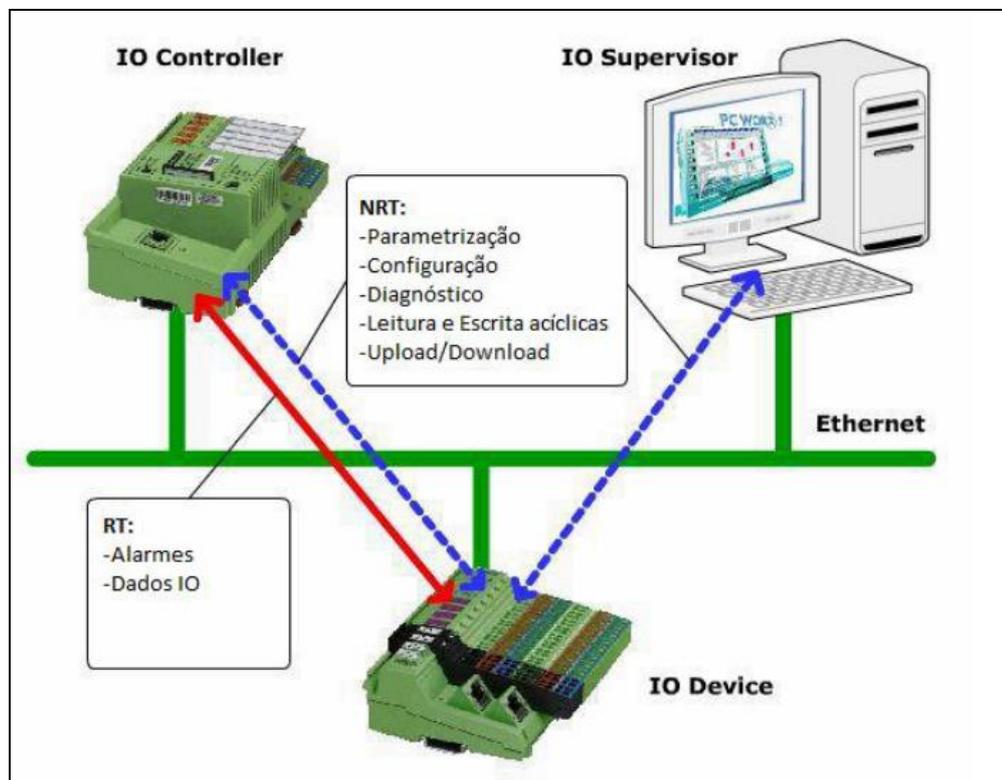


Fonte: Oliveira (2016)

O protocolo Profinet utiliza o modelo fornecedor - consumidor para a troca de dados entre os dispositivos da rede. Sendo assim, não há hierarquia entre os elementos da rede como em protocolos que utilizam o modelo mestre-escravo. Turcato (2015) exemplifica uma comunicação entre os elementos de uma rede Profinet conforme a figura 11. São definidos três tipos de equipamentos para compor esta rede:

- *IO-Controller*: O elemento *IO-Controller* se refere à uma estação central de controle que é utilizado para configurar, parametrizar e controlar a transferência dos dados do processo.
- *IO-Device*: O elemento *IO-Device*, é representado pelo instrumento, ou dispositivo de campo, que envia ao *IO-Controller* os dados de processos e os alarmes e diagnósticos que possui.
- *IO-Supervisor*: O *IO-Supervisor* representa uma estação de engenharia disposta para realizar configuração e parametrização dos dispositivos da rede.

Figura 11 - Elementos da rede



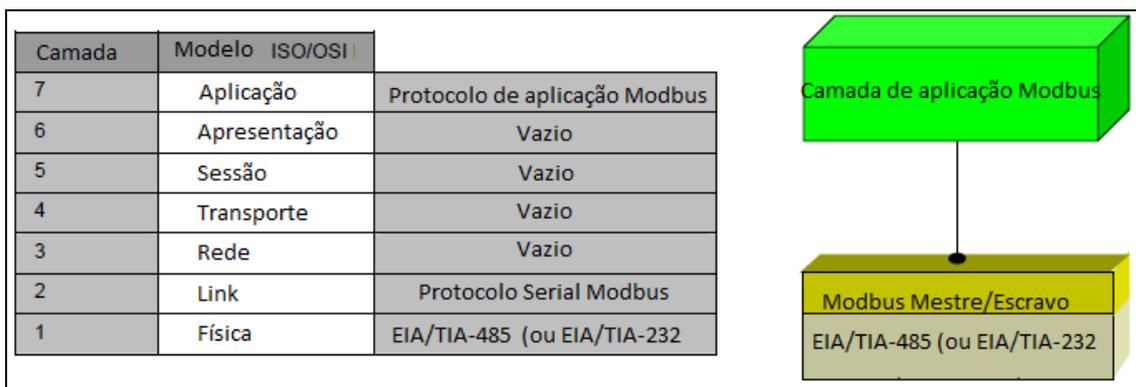
Fonte: Marcos (2013)

3.8 Modbus

O protocolo Modbus foi desenvolvido pela Modicon em 1979 e posteriormente, em 2004, os direitos desta empresa foram transferidos à *Schneider Automation*. Nestes 40 anos de existência, o protocolo Modbus continua s'endo um protocolo de comunicação muito utilizado em aplicações industriais. O Modbus é um protocolo universal, aberto, fácil de usar e que pode ser utilizado em diversos meio físicos de comunicação que vão desde par trançado até fibras óticas (TAMBOLI, 2015).

Conforme mostrado na figura 12, a utilização deste protocolo se dá na camada de aplicação, a 7ª do modelo OSI, e possibilita a comunicação do tipo mestre/escravo entre os dispositivos conectados nos diferentes tipos de redes e barramentos (MODBUS, 2006).

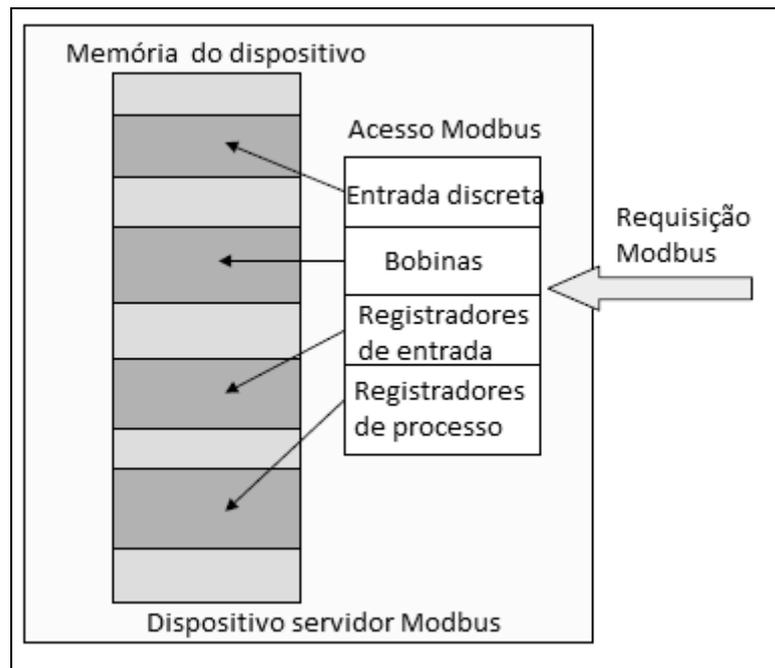
Figura 12 - Protocolo Modbus e o modelo OSI



Fonte: Modbus (2006) - Adaptado pelos autores

Os dispositivos que utilizam o protocolo Modbus possuem uma alocação de memória que é utilizada para guardar as informações de dados do sistema. Esta memória é dividida em quatro partes, conforme mostrado na figura 13, e servem para armazenar as informações de entradas discretas, saídas discretas, registradores de entrada e registradores processo. A área de memória dedicada para cada entrada e saída discreta possui o tamanho de 1 bit enquanto a área de memória dedicada para armazenar os registradores de entradas e de processo possui o tamanho de 16 bits (TAMBOLI, 2015).

Figura 13 - Modelo de dados Modbus



Fonte: Modbus (2006) - Adaptado pelos Autores

Os protocolos Modbus mais comumente utilizados são:

- Modbus RTU
- Modbus ASCII
- Modbus/TCP

Os modos RTU (*Remote Terminal Units*) e o ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) são protocolos do tipo Ponto a Ponto quando utilizam a comunicação RS232 e do tipo Multiponto quando utilizam a comunicação RS422 ou RS485. Ambos utilizam a comunicação serial para estabelecer comunicação do tipo Mestre/Escravo entre seus dispositivos (TAMBOLI, 2015).

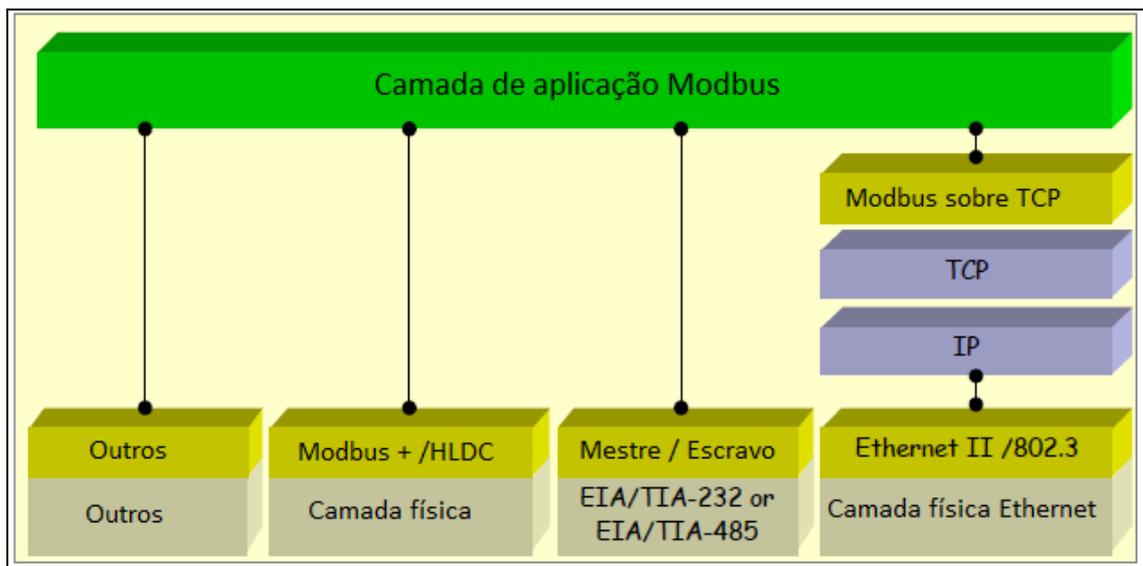
O modo RTU envia cada byte de mensagem contendo dois caracteres hexadecimais de 4 bits enquanto o modelo ASCII envia cada byte contendo dois caracteres ASCII (0-9, A-F). Para verificação de erro de comunicação, o modo RTU utiliza o CRC (*Cyclical Redundancy Check*) enquanto o modo ASCII utiliza o LRC (*Longitudinal Redundancy Check*). A principal vantagem do modo RTU em relação ao modo ASCII é que a possibilidade de condensar mais informação, devido o formato dos caracteres, permite uma melhor taxa de transferência de dados para uma mesma taxa de transmissão (TAMBOLI, 2015; MODBUS, 2006).

3.8.1 Modbus/TCP

O protocolo Modbus/TCP é uma junção do protocolo Modbus serial e do protocolo TCP/IP. O resultado desta junção é um protocolo aberto, estruturado e de simples transmissão que pode ser usado em redes do tipo cliente/servidor. Todos os protocolos Modbus empregam um protocolo dedicado na camada de aplicação, conforme é mostrado na figura 14. Isto permite assegurar a compatibilidade dos dados durante o processamento da comunicação (ARISTOVA, 2016).

Especificamente o protocolo Modbus/TCP, em relação ao modelo ISO, utiliza o protocolo Ethernet nas camadas 1 e 2, o protocolo TCP/IP nas camadas 3 e 4; e o protocolo Modbus RTU na camada 7. Pode-se dizer que o protocolo Ethernet TCP/IP é usado para transportar o protocolo Modbus RTU (ARISTOVA, 2016).

Figura 14 – Pilha de comunicação Modbus

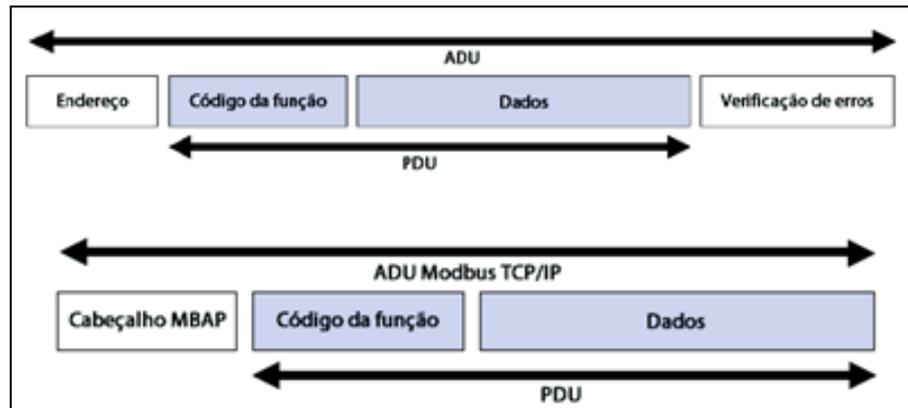


Fonte: Modbus (2006) - Adaptado pelos Autores

Para que seja possível a transmissão do protocolo Modbus utilizando uma rede TCP/IP, o frame Modbus RTU é modificado conforme mostra a figura 15. O campo "endereço", utilizado na linha serial Modbus para a identificação dos dispositivos, é substituído pelo cabeçalho MBAP (*Modbus Application Protocol Header*). Este cabeçalho é utilizado para identificar o ADU (*Application Data Unit*) do Modbus na rede TCP/IP e contém informações necessárias para o envio de dados através de pontes, roteadores e gateways para a distinção de dispositivos que compartilham o mesmo endereço IP. A verificação de erros por CRC é removida e é acrescentada uma informação no MBAP que possibilita os dispositivos identificarem

as mensagens quando forem compartilhadas. Assim, todas as requisições e respostas que são compartilhadas durante a comunicação possui um campo que permite a conferência da integridade da informação. (MODBUS, 2006; PALMER, 2009).

Figura 15 - Frames Modbus RTU e Modbus/TCP



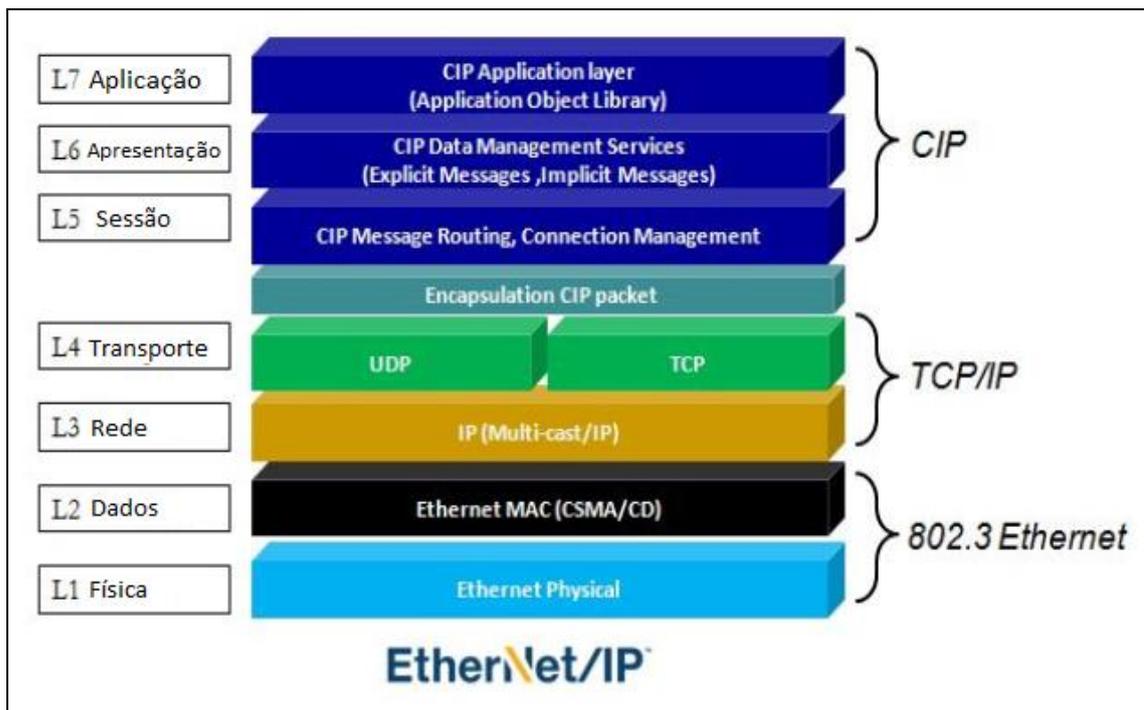
Fonte: Modbus (2006) - Adaptado pelos Autores

3.9 Ethernet/IP

O protocolo Ethernet/IP (IP, Protocolo Industrial) é uma rede desenvolvida pela Rockwell Automation em 2001 e apoiado pela ODVA (*Open DeviceNet Vendor Association*) (ROBERT, 2012).

O protocolo Ethernet/IP utiliza o modelo OSI e conserva as estruturas das camadas de 1 a 4 (meio físico, ligação de dados, rede e transporte) conforme mostra figura 16. O protocolo CIP (Protocolo Industrial Comum) é aplicado nas camadas 5 a 7 (sessão, apresentação e aplicação). Para assegurar o funcionamento em tempo real é utilizado o CIP Sync, uma extensão do protocolo CIP baseado no Protocolo de precisão de tempo (PTP) IEEE 1588 (ARISTOVA, 2016). O CIP é um protocolo bem adaptado para sistemas distribuídos, com orientação a objetos, folhas de dados eletrônicos e perfis de dispositivos (KUMAR, 2013).

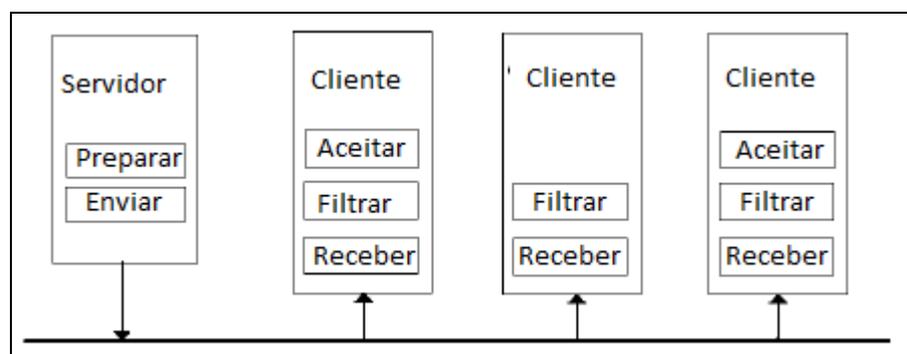
Figura 16 - Ethernet / IP como parte do modelo OSI CIP



Fonte: ODVA (2016)

De acordo com Kumar (2013), o protocolo Ethernet/IP além de utilizar o CIP, trabalha com o modelo *Provider-Consumer* (Cliente/Servidor) para estabelecer a comunicação entre os dispositivos da rede como apresentado na Figura 17. Neste modelo, a mensagem é enviada através de um dispositivo para todos os outros dispositivos da rede. Uma vez que recebida, esta mensagem é filtrada e apenas o dispositivo de destino utiliza a informação. A implementação deste modelo na CIP é suportada pelo serviço de *multicast* Protocolo de internet (IP), que, por sua vez, é suportado pelo serviço de *multicast Ethernet* (ODVA, 2007).

Figura 17 - Modelo Cliente/Servidor



Fonte: Kumar (2013) - Adaptado pelos autores

A Ethernet/IP incorpora o conjunto TPC/IP, utilizando o TCP para mensagens explícitas e o UDP para mensagens implícitas ou I/O conforme tabela 2. Estes protocolos amplamente adotados são implementados na camada de rede (IP) e na camada de transporte (UDP e TCP) do modelo OSI e são a tecnologia básica da rede Ethernet/IP (ODVA, 2007):

- Explícitas: Utilizadas para a programação, configuração e diagnósticos de dispositivos e para troca de dados onde o tempo não é crítico. Apresenta normalmente um tráfego de taxa baixa que geralmente tem um impacto insignificante no desempenho da rede.
- Implícitas: Utilizadas para troca de dados onde o tempo é crítico. Estes dados são de entrada / saída (I/O) e dados a serem utilizados por um controlador com informações de estados de dispositivos remotos.

Tabela 2 - Resumo dos tipos de comunicação para Ethernet/IP

Tipo de transmissão	Tipo de Mensagem	Descrição	Exemplo
Informação	Explícito	Transferência de dados não crítica	Leitura/Escrita via Instrução de Mensagem
Dados I/O	Implícito	Dados de Tempo-Real	Dados de Controle em Tempo-Real de um Dispositivo remoto I/O
Sincronização em Tempo-Real	Implícito	Sincronização em Tempo-Real	Troca de Dados em Tempo-Real entre dois Processadores

Fonte: Lugli (2007)

A Ethernet tem a característica única de ser uma rede com uma infraestrutura ativa. Portanto, ao contrário das redes industriais típicas – que geralmente têm uma infraestrutura passiva que limita o número de dispositivos que podem ser conectados e a forma como eles podem ser conectados – a rede Ethernet/IP possui uma infraestrutura que pode acomodar um número virtualmente ilimitado de nós ponto-a-ponto e com a tecnologia de switch integrado. Ela também suporta topologias em anel fornecendo aos usuários a flexibilidade inigualável na concepção de redes, que podem acomodar as suas necessidades atuais enquanto permite a expansão fácil, rentável e linear no futuro (ODVA, 2016). Segundo Lin (2013), através deste processo é possível interligar todos os equipamentos do chão de fábrica e corporativos em uma só rede.

3.10 Norma IEC - 61850

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) é uma organização internacional que lidera e gerencia o desenvolvimento de normas e padrões internacionais em diversos âmbitos do setor elétrico e afins (SOUZA, 2015).

A norma IEC 61850 é o padrão para projeto de automação de subestação elétrica, destinado a resolver problemas de interoperabilidade entre diferentes dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs) de diferentes fornecedores (DEHALWAR, 2015).

A IEC 61850 foi criada em 2003 pelo comitê técnico 57 (TC57), porém a base desta norma foi desenvolvida em 1988, quando a UCA (*Utility Communications Architecture*) foi estabelecida (RAUSSI, 2017). A norma veio com o intuito de modelar e uniformizar dados da comunicação e as funcionalidades operacionais encontradas nos sistemas de automação em subestações (SOUZA, 2015). Mas a utilização desta norma tem se expandido desde então e, atualmente, ela define o padrão utilizado dentro de subestações e na comunicação de rede inteligente (RAUSSI, 2017).

Os três principais objetivos desta norma são: a interoperabilidade entre diferentes dispositivos, a facilidade de configuração e reconfiguração do SAS (Sistema de Automação de Subestação) e a versatilidade para implementação de novas tecnologias que futuramente venham a ser desenvolvidas (IGARASHI, 2016). Deste modo Igarashi (2016) afirma que a norma IEC 61850 não é apenas um protocolo de comunicação, pois ela visa estabelecer uma padronização de todo o processo desenvolvido do SAS.

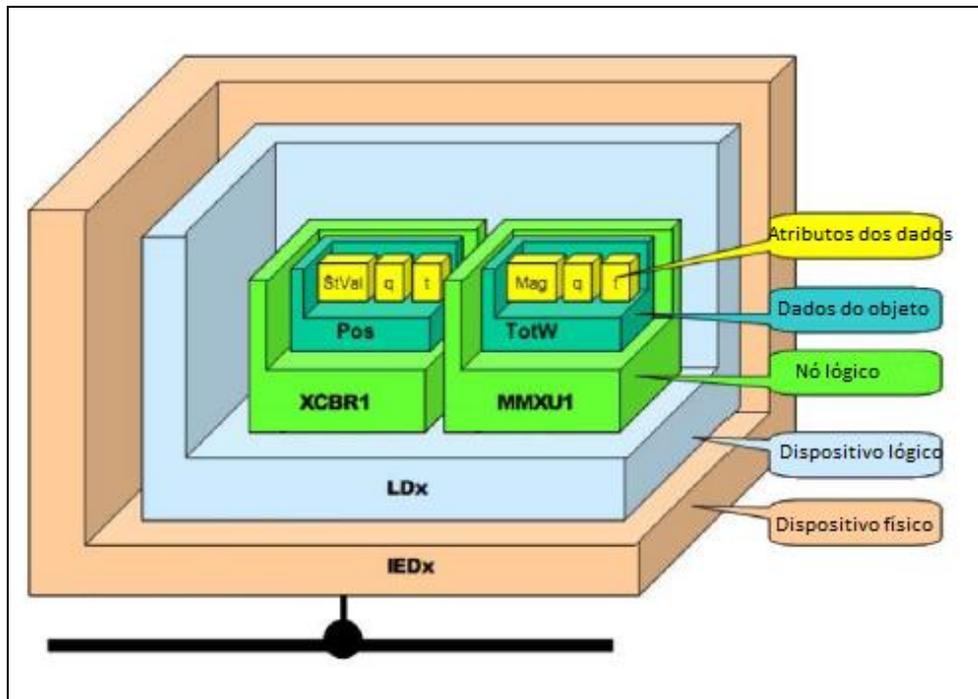
3.10.1 Modelo de dados da IEC 61850

A ideia central da IEC 61850 é transformar um dispositivo físico em dispositivos lógicos, que podem ser adicionalmente decompostos em nós lógicos, objetos de dados e em atributos de dados como representado na figura 18 (DEHALWAR, 2015). O modelo de dados definido e recomendado pela norma é constituído de (SOUZA, 2015):

- *Intelligent Electronic Device (IED)*: representa o dispositivo físico (*Physical Device*) inteligente que pode conter um ou mais dispositivos lógicos (*Logical Devices*) (IGARASHI, 2016);

- *Logical Device* (Dispositivos Lógicos): É o conjunto de nós lógicos;
- *Logical Node* (Nós lógicos): Menor elemento funcional capaz de trocar informações.

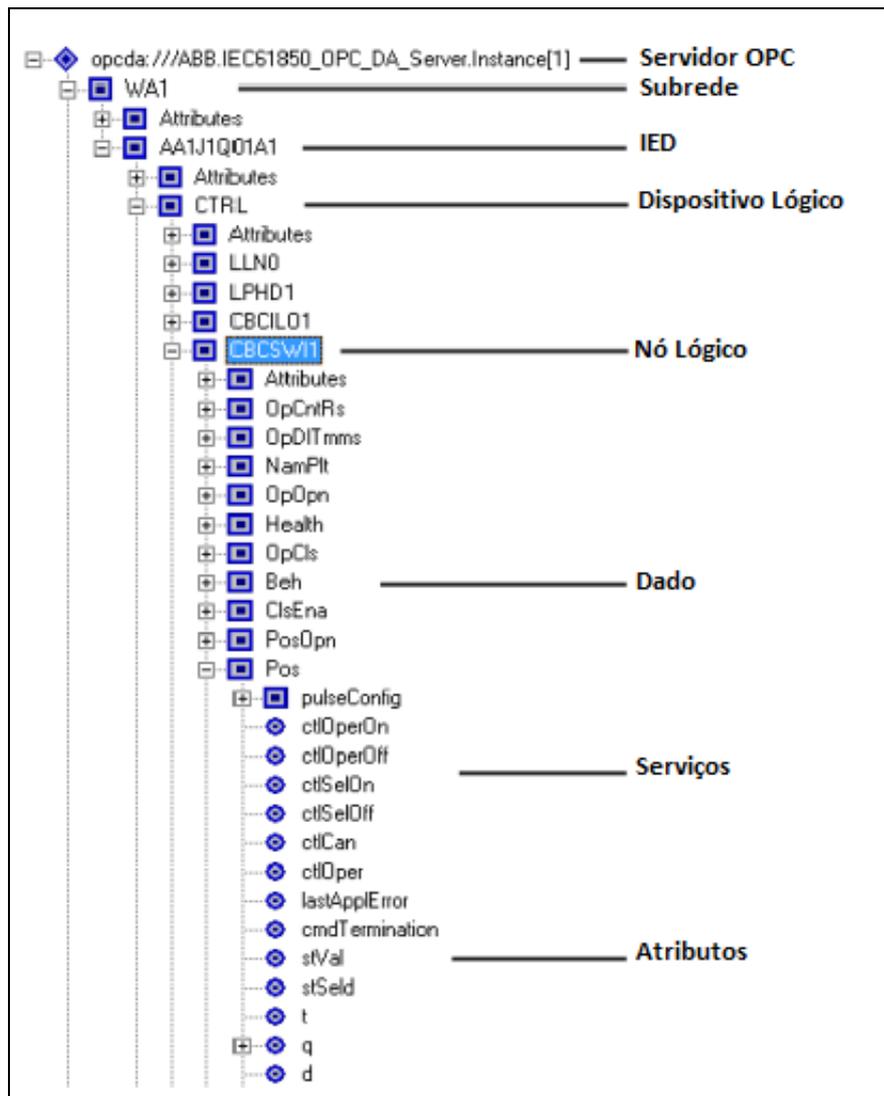
Figura 18 - Modelo de dados da IEC 61850



Fonte: Dehalwar (2015) - Adaptado pelos autores

Raussi (2017) traz uma representação deste modelo em forma de árvore, conforme mostra a figura 19. Este modelo se assemelha à um esquema de diretórios de um sistema operacional para computadores (IGARASHI, 2016).

Figura 19 - Esquema em árvore representando a estrutura de modelos de dados



Fonte: Raussi (2017) - Adaptado pelos autores

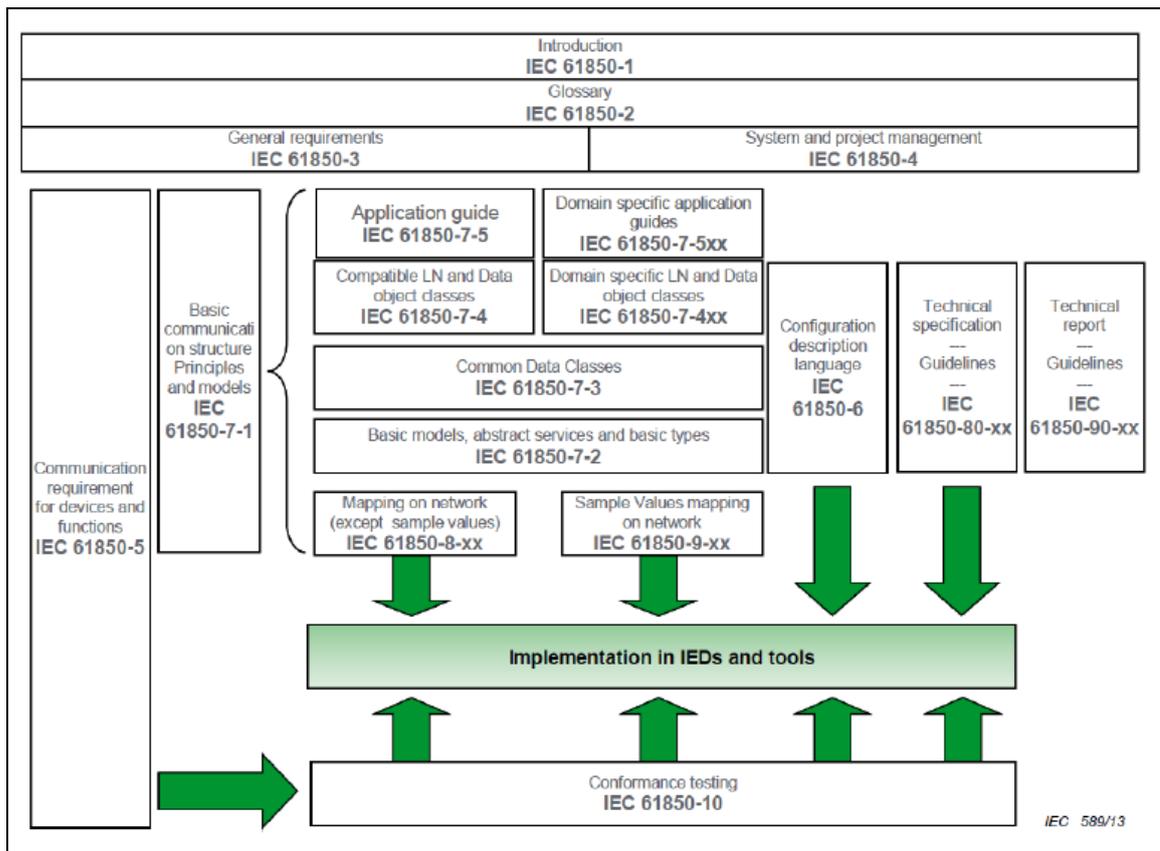
3.10.2 Estrutura da IEC 61850

A norma IEC 61850 consiste em 10 partes conforme a figura 20:

- Parte 1: Introdução e visão geral;
- Parte 2: Glossário;
- Parte 3: Requisitos gerais;
- Parte 4: Gerenciamento de sistemas e projetos;
- Parte 5: Requisitos de comunicação para funções e modelos de dispositivos;
- Parte 6: Linguagem de descrição de configuração para comunicação em subestações elétricas;

- Parte 7.
 - 1: Estrutura básica de comunicação para subestações – princípios e modelos;
 - 2: Estrutura básica de comunicação para subestações – Interface de Serviço de Comunicação Abstrata (ACSI);
 - 3: Estrutura básica de comunicação para subestações – Classes de Dados Comum (CDC);
 - 4: Estrutura básica de comunicação para subestações – classes de nós lógicos compatíveis e classes de dados.
- Parte 8.
 - 1: Mapeamento de serviços de comunicação específica – Mapeamento para MMS ISO/IEC 9506 (Parte 1 e 2) e para ISO/IEC 8802-3.
- Parte 9.
 - 1: Mapeamento de serviços de comunicação específica – valores amostrados sobre enlace serial ponto a ponto unidirecional;
 - Mapeamento de serviços de comunicação específica – valores amostrados sobre ISO/IEC 8802-3
- Parte 10: Teste de conformidade.

Figura 20 - Visão geral da IEC 61850



Fonte: Raussi (2017)

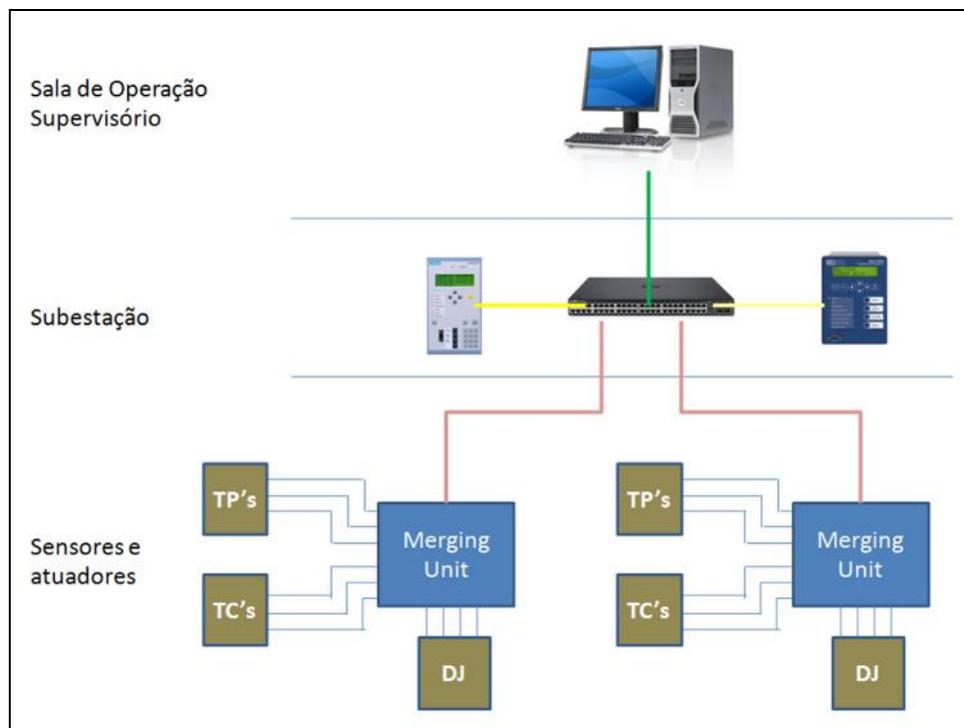
3.10.3 Tipos de interfaces

A IEC 61850, no capítulo 5, define três níveis de interface para comunicação em uma subestação mostrado na figura 21. Estes níveis realizam a função de proteção, controle e monitoramento. Estas funções podem ser executadas dentro de um único equipamento ou então, podem ser distribuídas entre vários dispositivos (SOUZA, 2015).

- **Nível de estação:** Este nível é conceituado na parte 8 da IEC 61850, que traz o mapeamento das camadas de comunicação (TCP/IP), GSSE e sincronização de tempo (DUARTE, 2012). Nele estão contidos os equipamentos que recebem informações para processá-las e conectá-las aos centros de controle possibilitando o monitoramento e manutenção do SAS. Estes dispositivos consistem em computadores da subestação com um banco de dados, a IHM para o operador, interfaces que terão links para outras subestações, dentre outros. (IGARASHI, 2008).

- Nível de Vão: Este nível é conceituado na parte 7 da IEC 61850, no qual é definido o modelo de dados e aplicação das funções do sistema (DUARTE, 2012). Ele é composto por equipamentos que são responsáveis pela proteção e controle, relés de proteção, medidores de energia e oscilógrafos (IGARASHI, 2008). Estes equipamentos protegem e controlam a posição na qual estão alocados, e podem também incluir funcionalidades relacionadas com a operação de outras posições, por exemplo, intertravamento e controle de lógicas (DUARTE, 2012).
- Nível de processo: Este nível é conceituado na parte 9 da IEC 61850, na qual são definidas as transmissões dos valores analógicos de tensão e corrente adquiridos nos equipamentos primários que trafegam pela rede e das mensagens GOOSE (DUARTE, 2012). Neste nível estão os dispositivos de I/Os remotos, sensores inteligentes, atuadores (disjuntores e seccionadoras) e transformadores TC's (transformadores de Corrente) e TP's (Transformadores de Potência) (IGARASHI, 2008).

Figura 21 - Níveis de comunicação IEC 61850

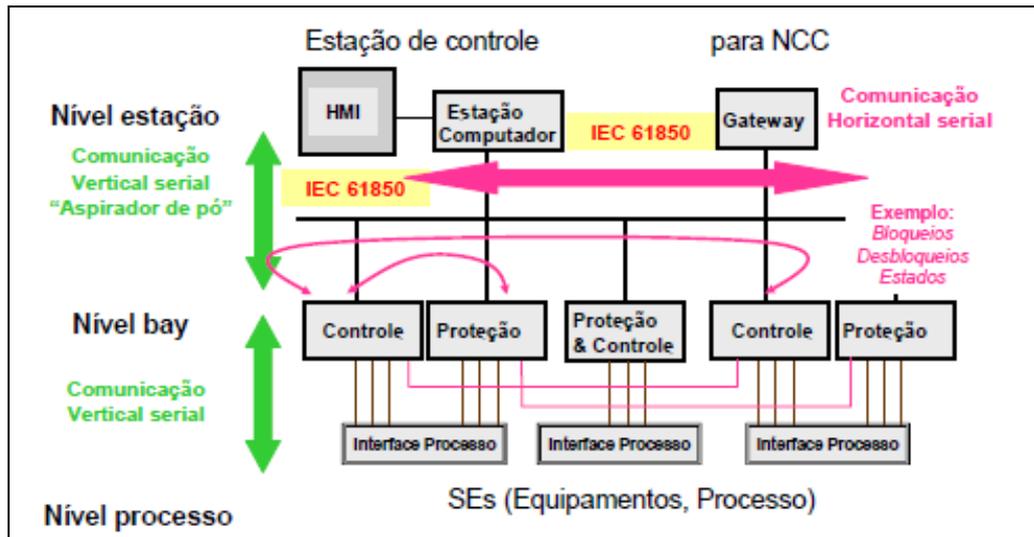


Fonte: Coutinho (2015)

As comunicações podem ser verticais, realizadas entre estes níveis hierárquicos, ou horizontais, que ocorrem dentro do mesmo nível como mostra a figura 22 (DUARTE, 2012). No tráfego horizontal é utilizado o protocolo GOOSE e

GSSE (*Generic Substation Status Event*) para estabelecer a comunicação entre os diferentes IEDs, que podem ser de diferentes fabricantes (DOS SANTOS, 2007). Já para as mensagens verticais, é utilizado o protocolo MMS (*Manufacturing Message Specification*), definição que é dada uma vez que este tipo de comunicação não possui restrições críticas de tempo (SOUZA, 2015).

Figura 22 - Arquitetura de rede de comunicação



Fonte: Santos (2007)

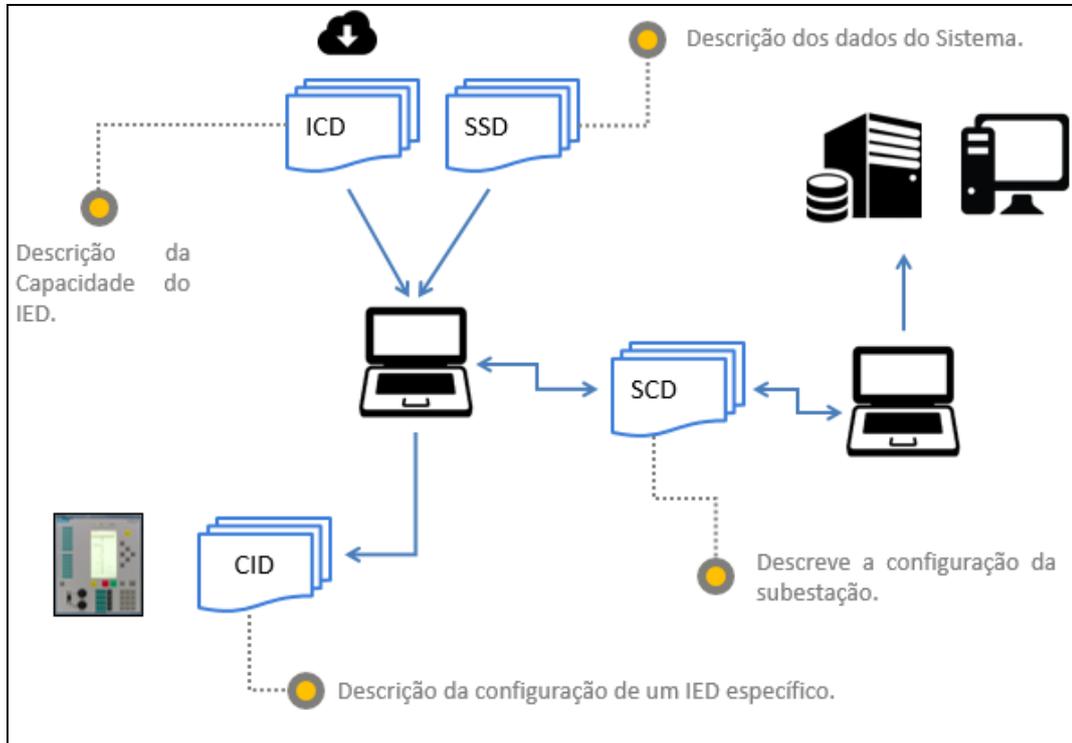
3.10.4 Tipos de arquivos da IEC 61850

O capítulo seis da norma IEC estabelece uma padronização para a linguagem que mapeia os modelos de dados de objetos, *Substation Configuration Language* (SCL) (SOUZA, 2015). A configuração da comunicação baseada na IEC 61850 é mostrada na figura 23 e é descrita através dos seguintes arquivos:

- **SSD (*System Specification Description*):** Possui a descrição dos dados de todo o sistema e contém o diagrama unifilar da subestação e todos os nós lógicos (funções) alocados;
- **SCD (*Substation Configuration Description*):** Arquivo gerado pela ferramenta de configuração do sistema, contendo as informações configuradas para a comunicação de toda a subestação. Possui os ICD's, descritos a seguir;
- **ICD (*IED Capability Description*):** Arquivo gerado pela ferramenta de configuração do IED para informar suas características e funções que podem ser utilizadas;

- CID (*Configured IED Description*): Arquivo para ser carregado em determinado IED com as configurações habilitadas ou parametrizadas pelo usuário.

Figura 23 - Tipos de arquivos da IEC 61850



Fonte: Desenvolvido pelos autores

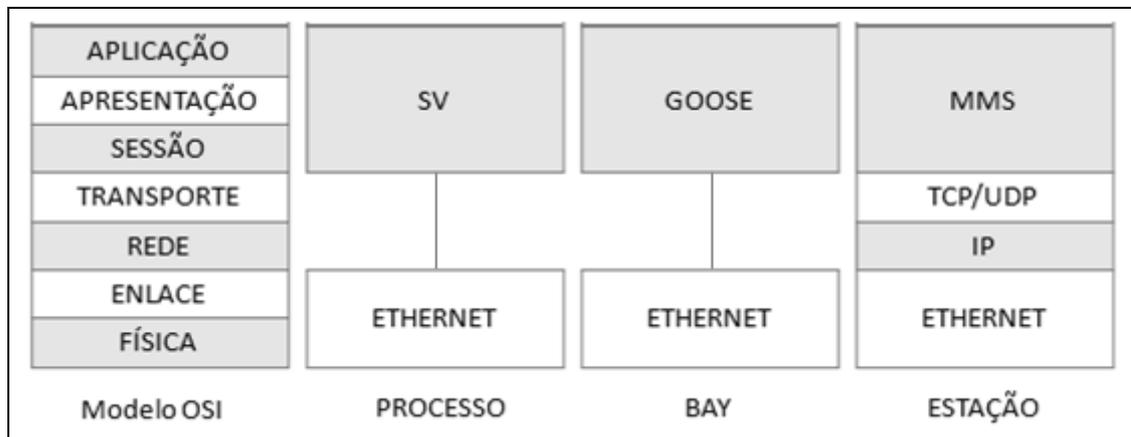
3.10.5 Tipos de Protocolos

O protocolo GOOSE e GSSE são de alta prioridade, pois a troca de mensagens são realizadas no modo produtor/consumidor (*Publisher-subscriber*) e devem ser feitas com a mesma eficiência e rapidez de um contato físico (cabo) (SOUZA, 2015). Utilizados para a troca de mensagens entre IEDs, estes sinais são utilizados para implementar diversas lógicas de controle e de proteção, como função de proteção de falha de disjuntor, lógica de religamento de disjuntores, intertravamentos dentre outros (IGARASHI, 2016). Uma das grandes vantagens do protocolo GOOSE é a redução na dependência de cabos, uma vez que em apenas um pacote de dados ou “telegrama”, se torna possível definir vários estados e reportar todo o enlace da rede através destas informações (SOUZA, 2015).

Comparado ao modelo ISO/OSI de sete camadas, o protocolo GOOSE é composto por quatro camadas eliminando as camadas de sessão, transporte e rede como mostra a figura 24. A mensagem GOOSE atravessa a camada de aplicação, a

camada de apresentação e, em seguida, mapeia-se diretamente para a camada de enlace de dados e a camada física para aumentar a confiabilidade e reduzir o atraso de transmissão (YEH,2015)

Figura 24 - IEC 61850 e o modelo OSI



Fonte: Coutinho (2015)

O MMS é o padrão internacional (ISSO 9506) projetado para suportar a troca de dados em tempo real e informações de controle de supervisão entre dispositivos de rede (NGUYEN, 2013). Trata-se de um protocolo da camada de aplicação, específico para mensagens do tipo cliente-servidor que utiliza tanto o protocolo TCP/IP como o ISO CO, ou seja, ambos de característica orientada a conexão (DUARTE, 2012). Deste modo, dispositivos como *Remote Terminal Units* (RTUs), *Power Line Communications* (PLCs) e IEDs podem ser controlados remotamente com o uso desse protocolo (LOPES,2018). A especificação deste padrão descreve apenas os aspectos de rede visíveis de comunicação; portanto, ele só especifica a comunicação entre cliente e um servidor, não o funcionamento das entidades. Com esta estratégia, o MMS permite total flexibilidade na sua implementação (NGUYEN,2013).

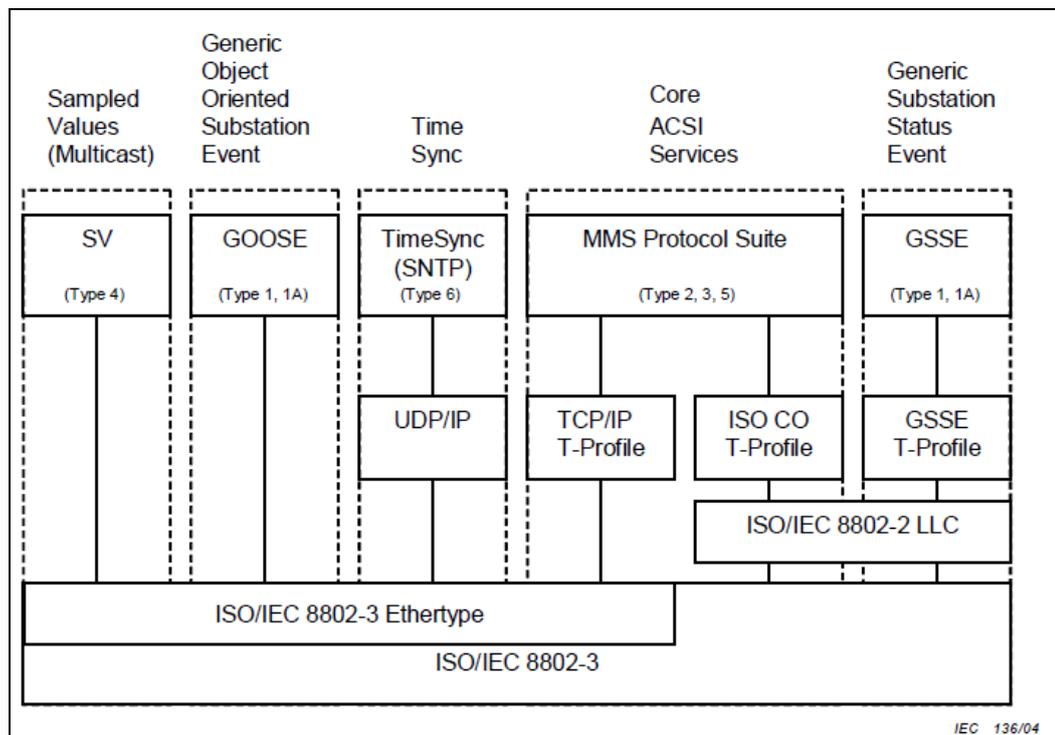
As mensagens MMS podem ser solicitadas via *pooling* ou via *reports* (relatórios). Na leitura via *pooling* o sistema de controle solicita as informações dos IEDs, já via *reports* estas informações são disponibilizadas pelos IEDs mediante ao cumprimento de condições pré-configuradas, como banda morta ou vencimento de um tempo de integridade (*Scan*).

3.10.6 Tipos de serviços

O mapeamento dos serviços de comunicação da IEC 61850 é representado na figura 25. Os tipos de mensagens que tem requisitos de desempenho semelhantes estão agrupadas em conjunto e mapeada com o mesmo protocolo. Assim, verifica-se que o protocolo MMS é destinado para mensagens do tipo 2, 3 e 5 (PHAM,2015) enquanto o protocolo GOOSE é destinado às mensagens do tipo 1 e 1A, a saber:

- Tipo 1 – Mensagens rápidas (GOOSE);
- Tipo 1A – Atuações emergências de Trip (GOOSE);
- Tipo 2 – Velocidade média (MMS);
- Tipo 3 – Baixa velocidade (MMS);
- Tipo 4 – Dados em rajada ou SV (Sampled values);
- Tipo 5 – Transferência de arquivos (MMS).
- Tipo 6 – Sincronização de tempo (SNTP).

Figura 25 - Tipos de mensagens



Fonte: IEC 61850-8.1 (2004)

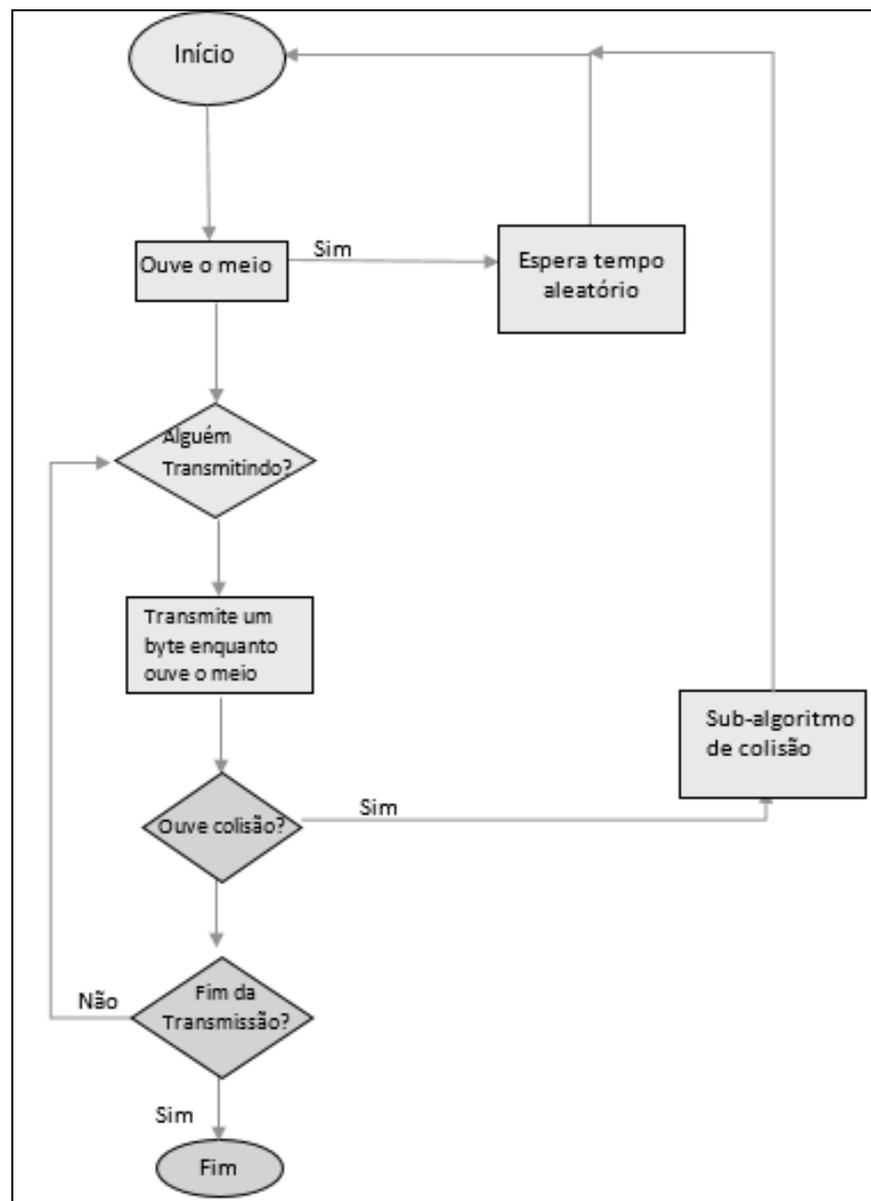
3.11 Determinismo

Os sistemas de controle e automação se diferem de outras aplicações devido a sua necessidade de determinismo e requisitos de controle em tempo real (ROJAS,

2010). O determinismo de um protocolo é a capacidade de suportar a transmissão estável e previsível dos parâmetros de controle entre os dispositivos ligados à rede. A transferência de dados deve ser concluída em um período de tempo definido e a confirmação de conclusão deve ser fornecida (ROA, 2011). Portanto, destaca Rojas (2010), a Ethernet Industrial deve ser concebida e implementada observando estes aspectos.

Muitos protocolos de comunicação industrial estão se movendo para soluções baseadas em Ethernet; porém as comunicações Ethernet com TCP/IP não são determinísticas e o tempo de reação é, na maioria das vezes, em cerca de 100ms (LIN, 2013). A arquitetura TCP/IP utiliza-se da técnica CSMA/CD (*Carrier Sense With Access And Collision Detect*) para acessar o meio de transmissão (figura 26) e através desta técnica é possível detectar colisões no meio de transmissão quando mais de um dispositivo deseja transmitir dados simultaneamente (LUGLI, 2007). Este processo não garante que as mensagens transmitidas sejam entregues em um tempo determinado. Desta forma, o protocolo nativo da Ethernet não deve ser implementado diretamente em uma planta com restrições de tempo, como é o caso dos processos industriais (ROBERT, 2012).

Figura 26 - Algoritmo CSMA /CD



Fonte: Lugli (2007)

Para ajudar na otimização do acesso aos dados, os equipamentos que compõe a rede Ethernet Industrial, tais como os *Switches*, devem possuir inteligências que oferecem suporte à recursos como controle de *multicast* (*IGMP Snooping*), qualidade de serviço (QoS) e redes virtuais (VLAN's) (ROJAS, 2010).

3.11.1 Switch

De acordo com Lugli (2007), para tornar esta arquitetura em determinística, foi necessário a utilização de *switch* com portas independentes entre si e com capacidade de programar prioridades e tempo de espera das mensagens. Desta

forma, o *switch* determina o tempo de varredura de cada porta. Segundo a ODVA (2007), os *switches* reduzem o tráfego desnecessário devido ao mapeamento que é realizado em cada uma de suas portas. Através deste mapeamento, o *switch* é capaz de enviar a informação desejada apenas à porta de destino. Rojas (2010) explica que, os *switches* que oferecem características QoS possuem a capacidade de priorizar e não descartar o tráfego crítico em caso de congestionamento, além de garantir a entrega da informação transmitida de forma íntegra.

Mesmo com o uso do *switch*, algumas eventuais colisões poderiam acontecer, como por exemplo se houvesse um envio de mensagem do *switch* a todos os dispositivos da rede (*broadcasting*) no mesmo instante em que algum dispositivo estivesse enviando alguma informação para o *switch*. Para resolver este problema, o sistema de comunicação bidirecional, também chamado de *full duplex*, foi aplicado ao *switch*. Este sistema permite que haja a comunicação instantânea entre o *switch* e o dispositivo sem colisão; e, segundo a ODVA (2007) o sistema *full duplex* é um requisito fundamental para o controle determinístico em sistemas baseados em *Ethernet*.

3.11.2 VLAN (Virtual Local Area Network)

A rede virtual local (VLAN) é definida pela norma IEEE 802.1Q como a concatenação de redes locais (LAN's) individuais interconectadas através de um *switch* gerenciável (VICENTE, 2011). A utilização destas redes virtuais possibilita, em um mesmo meio físico, a separação das redes de processo em tempo real das demais redes.

3.11.3 QoS (Qualidade de serviço)

Os *switches* oferecem características de QoS que tornam possíveis a priorização do tráfego crítico de forma que ele seja tratado com prioridade e, em caso de congestionamento, ele não seja descartado (ROJAS, 2010). Esta capacidade de priorizar e fornecer diferentes QoS com base no tipo de mensagem pode ajudar a melhorar o desempenho em tempo real e garante a entrega das informações de forma íntegra e consistente (ODVA, 2007).

3.11.4 IGMP (Internet Group Management Protocol)

O IGMP controla as mensagens *multicast* que podem retardar o desempenho dos dispositivos da rede e também reduz exponencialmente a quantidade de tráfego na rede, reduzindo a chance de congestionamento e conseqüentemente perda de pacotes (ODVA, 2007). Segundo Rojas (2010), este protocolo configura dinamicamente as interfaces que para que o tráfego *multicast* seja encaminhado apenas para as interfaces de destino.

3.11.5 Determinismo no Ethernet/IP

Para tornar seu protocolo determinístico, a Ethernet/IP utiliza os recursos IGMP (*Internet Group Management Protocol*) e QoS (ODVA, 2007), além de utilizar o padrão CIP, que é um padrão amplamente utilizado nos protocolos DeviceNet e ControlNet. Este padrão organiza os dispositivos em rede como uma coleção de objetos; define acesso, procedimentos e extensões que permitem dispositivos diferentes serem acessado usando um protocolo comum. Segundo a ODVA (2007), este protocolo é utilizado para facilitar o controle de I/O, a programação, o funcionamento e a manutenção do sistema de controle.

3.11.6 Determinismo no Profinet

Para obter o determinismo no processo industrial, a Profinet utiliza o protocolo Profinet IO através dos canais SRT e IRT. O canal SRT é usado como padrão para a transferência cíclica de dados e alarmes, enquanto o canal IRT, canal de alta velocidade, é utilizado para aplicações de controle de movimento (MARCOS, 2013). Para conseguir um tempo de resposta na configuração IRT, é necessário um hardware específico que consiga processar as informações nesse tempo (LUGLI, 2007).

Conforme a análise realizada por Dias (2014), a comunicação entre o *IO-Controller* e o *IO-Device* ocorre nos canais de comunicação em tempo real. Para as demais informações como, configuração, parametrização e estatísticas é utilizado o canal de comunicação que não apresentam suporte a tempo real. Dias (2014) ainda observa que o ciclo de comunicação é altamente preciso e sincronizado e que sempre envia, inicialmente, os pacotes de maior determinismo em tempo real, seguido dos pacotes de tempo não real. Marcos (2013), explica que, para que haja

este sincronismo e determinismo, é necessário que 40% da largura de banda do protocolo Profinet RT esteja livre; caso contrário, pode haver possíveis sobrecargas de informações causando perda de dados.

3.11.7 Determinismo na IEC 61850

Na IEC 61850, o protocolo que estabelece comunicação com o sistema SCADA é o MMS. De acordo com Duarte (2012), a mensagem MMS utiliza todas as camadas do protocolo de comunicação e, apesar de se tornar uma informação confiável, consome um tempo de comunicação razoável tornando-a inadequada para transmissão de dados com criticidade temporal inferiores a 20ms. Desta forma as operações de proteção e intertravamentos, típicos de processos industriais, podem ser afetadas dependendo do tempo de ciclo determinado pelo processo. Por outro lado, o MMS pode ser utilizado em sistemas supervisórios, em que o tempo de resposta pode chegar a 1s sem afetar as operações.

3.11.8 Determinismo no Modbus/TCP

O protocolo Modbus/TCP possui uma velocidade de comunicação relativamente baixa para operações em tempo real, em torno de 100ms. Para suportar este tipo de comunicação, uma extensão é oferecida a este protocolo, a Real-Time-Publisher-Subscriber (RTPS). Esta extensão utiliza o protocolo UDP/IP e as mensagens são disponibilizadas no padrão Produtor/Consumidor. Dois tipos de comunicação são definidos para este protocolo: o Produtor/Consumidor, que publica dados de um servidor para os clientes; e o protocolo de composição de transferência de estado (CST), que transfere uma informação de estado de um servidor para um cliente. Através do uso deste protocolo, a velocidade de comunicação pode chegar até 10ms (FELSER, 2009; ARISTOVA, 2016).

3.11.9 Diferenças entre protocolos

Abaixo, na tabela 3, é apresentada uma breve comparação entre os três protocolos mais consolidados para a automação de processos industriais e o protocolo da IEC 61850. Esta tabela tem o objetivo de destacar as diferenças entre as formas de se obter o determinismo de cada protocolo em um sistema de controle. É possível notar que os protocolos Profinet e Ethernet/IP, por serem uma evolução

de outros protocolos já consolidados em sistemas de controle, têm como característica base o controle de processos industriais com tempo de resposta abaixo de 10ms. Destaca-se ainda o protocolo Profinet por ter a extensão, conceituada em IRT, que possui um tempo de resposta menor que 1ms. Já o protocolo Modbus/TCP, mesmo com a extensão RTPS, não é muito utilizado em processos industriais, pois, nesta configuração, utilizando o UDP/IP, torna-se difícil a definição de um tempo de entrega de mensagem durante a comunicação. Por sua vez, o protocolo MMS da IEC 61850 foi desenvolvido apenas para sistemas de supervisão e por isso sua aplicação é mais adequada em sistemas de controle onde requer controle com tempos de resposta em até 10ms.

Tabela 3 - Comparação entre Protocolos

Protocolo	Migração de outras redes	Método	Determinismo	Aplicação
Profinet	Profibus	Profinet – IO (RT)	1 – 10ms	Cíclica, supervisão, controle de movimento e conexão entre redes diversas
Ethernet/IP	DeviceNet	UDP/IP com aplicação CIP e utilização do CIP Sync para sincronismo em tempo real.	<10ms	Cíclica, supervisão e conexão entre redes diversas
Modbus/TCP	Modbus/RTU	RSTP – UDP/IP	>10ms	Cíclica e supervisão
IEC 61850 - MMS	-	TCP/IP	>10ms	Cíclica e supervisão

Fonte: Desenvolvido pelos autores

4 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade da Norma IEC 61850 para acionamento de equipamentos de média tensão em uma planta industrial de uma mineradora na cidade de Itabira. Sendo assim, esse projeto caracteriza-se como um trabalho exploratório, pois, visa buscar um maior entendimento sobre o tema, por se trata um assunto pouco conhecido, uma vez que a aplicação da norma é bem consolidada na automação de subestações e pode ser passível de adequação para realizar o acionamento de equipamentos na indústria. O trabalho também tem um propósito explicativo, pois foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os principais conceitos envolvidos no processo de compreensão e adequação da norma. O trabalho é baseado em métodos experimentais e aplicações práticas através de um estudo de caso, quanto aos procedimentos técnicos utilizados para a investigação e levantamento de dados e informações, a pesquisa pode ser classificada como de campo, documental e bibliográfica, tendo em vista que a maior parte dos documentos e local analisado pertence a uma mineradora instalada na cidade de Itabira/MG.

Para alcançar o objetivo principal, o trabalho foi desenvolvido através de etapas metodológicas elencadas na sequência.

- 1) **Primeira Etapa:** Na primeira etapa foi realizado um levantamento bibliográfico. Neste levantamento foi apresentado o que é automação, as diferenças entre a automação em um processo industrial e a automação de subestação, o que são os IED's e os conversores de protocolos (gateways).
- 2) **Segunda Etapa:** Na segunda etapa pesquisou-se o que é uma rede de comunicação, quais seus modelos de referências de protocolos mais utilizados, o que são os protocolos da norma IEC 61850, Ethernet/IP, PROFINET, algumas comparações dos protocolos citados quanto aos seus princípios de funcionamento. Esse levantamento bibliográfico proporcionou um melhor entendimento do tema estudo, e foi realizado em meio físico e virtual, baseado em livros, dissertações, artigos, manuais e teses que abrangeram o estudo deste trabalho. Este levantamento foi executado em todas as etapas, para garantir credibilidade da pesquisa.
- 3) **Terceira Etapa:** Na terceira etapa foi efetuado a comparação do protocolo MMS da norma IEC 61850 com os protocolos consolidados como: o Ethernet/IP, o Profinet e o Modbus/TCP. Verificou-se a capacidade de aplicação do protocolo MMS

na camada de processo em uma planta industrial, comparando os principais aspectos de cada protocolo, como tempo de resposta, o tipo de comunicação e a aplicação.

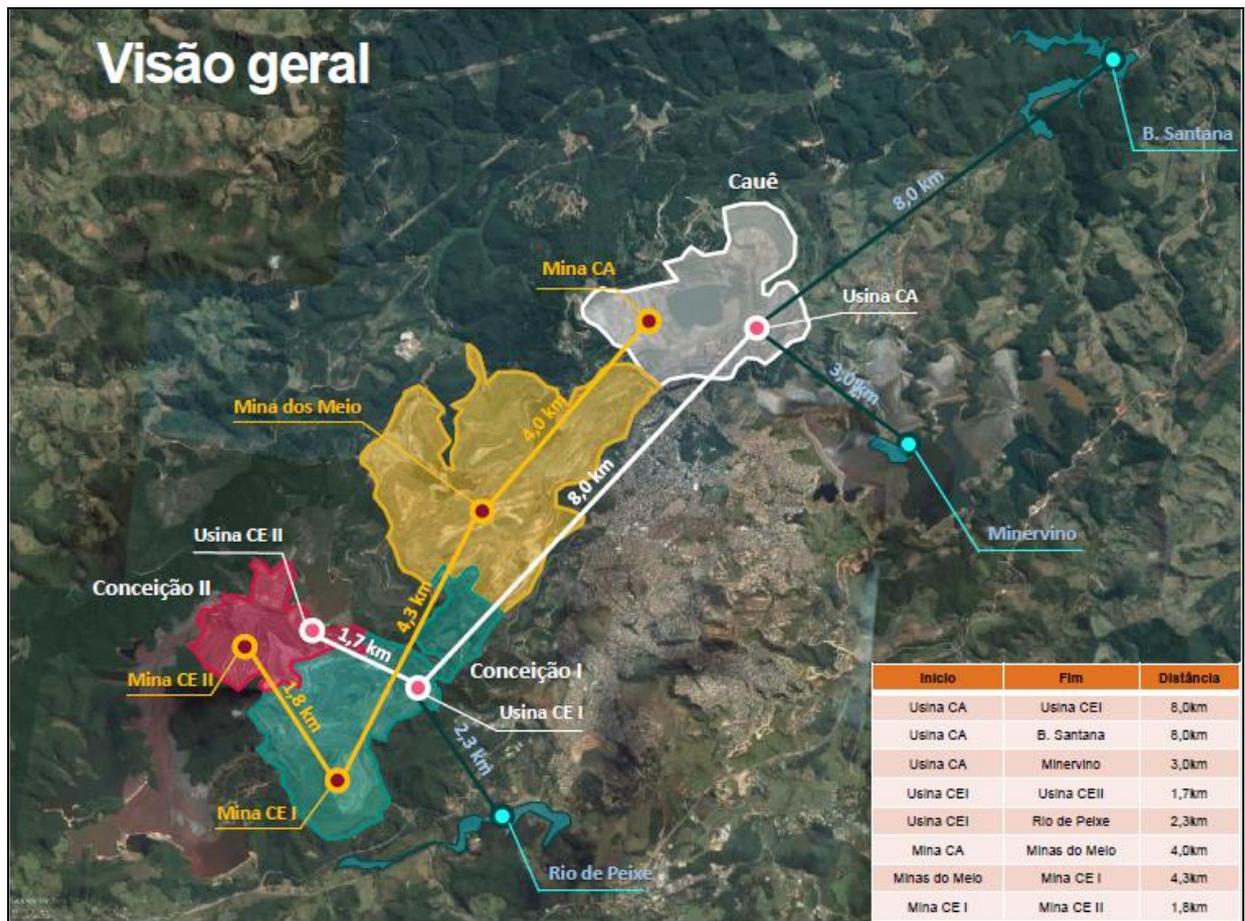
4) **Quarta Etapa:** Na quarta etapa do trabalho, realizou-se o estudo de caso com demonstrar os procedimentos utilizados, e resultados obtidos na integração de IED's para acionamento de motores de média tensão em um processo de mineração ao PLC, através dos protocolos MMS da IEC 61850 e Modbus TCP, utilizando um conversor de protocolos (gateway). O estudo foi realizado em uma planta industrial de uma mineradora da cidade de Itabira – MG. Nesta etapa foi analisado os dados de projeto, definições técnicas dos fabricantes, informações colhidas através de relatórios técnicos, arquivos de programação do equipamento e sequência de eventos registrados pelos relés de proteção (IED), switch e PLC's. Estes dados foram organizados e analisados mediante a realização de um processo criterioso de interpretação dos dados na comunicação, tempos entre comunicações e efetividade da comunicação.

5) **Quinta Etapa:** Após interpretação dos dados e análise das informações, foram apresentadas as soluções encontradas para a integração do PLC com o IED através do uso de um gateway para estabelecer a comunicação entre os protocolos Modbus/TCP e o MMS. Essas soluções foram demonstradas através de tópicos, que vão desde definições de engenharia até o monitoramento dos dados enviados entre o PLC, o gateway e o IED. Como conclusão foi apresentado os benefícios com a aplicação do protocolo MMS, como a parametrização à distância, a geração de relatórios, o monitoramento, dentre outros. E proposto a continuidade como trabalhos futuros, a integração do protocolo MMS, da IEC 61850, com os outros protocolos industriais importantes tais como o Ethernet IP, e o Profinet; e a integração com protocolo Modbus TCP/IP sem a necessidade do uso de um gateway.

5 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso baseia-se em uma planta de beneficiamento de minério de ferro, da segunda maior mineradora do mundo. A mineradora possui sede no Brasil e está presente em cerca de 30 países ao redor do mundo. A unidade estudada está localizada no complexo da cidade de Itabira – MG, conforme apresentado na figura 27.

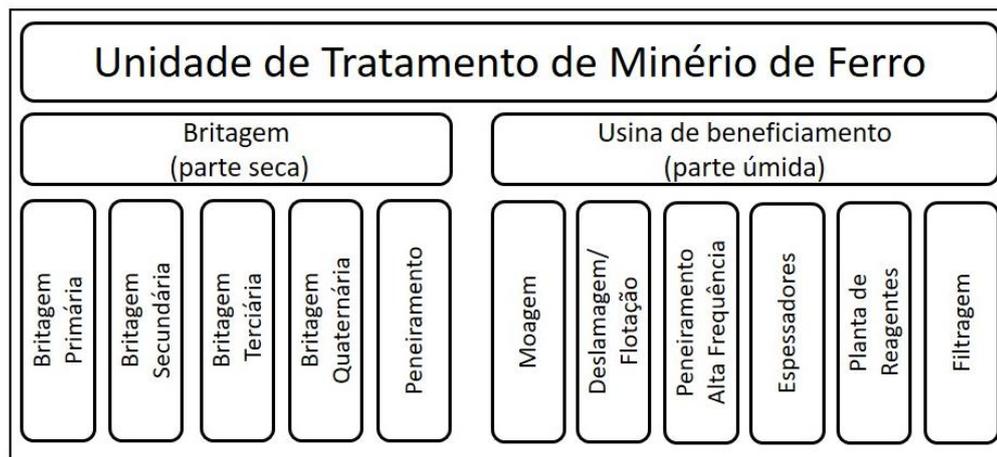
Figura 27 - Complexo de mineração da cidade de Itabira - MG



Fonte: Elaborado pelos autores

As operações de beneficiamento de minério de ferro tiveram início na década de 70, e hoje constitui-se dos processos de britagem, moagem, deslamagem, flotação e filtragem. A figura 28 a seguir apresenta um esquema das atividades presentes na unidade estudada:

Figura 28 - Processo de beneficiamento de minério de ferro



Fonte: Desenvolvido pelos autores

A planta passou por grandes projetos de expansão para continuar com suas operações na cidade de Itabira – MG. O processo na cidade encontra-se no terceiro ciclo da mineração, ou seja, foi incorporado o processo de moagem do material através de moinhos de bolas, assim, tornando possível o beneficiamento de um tipo de minério com propriedade de baixo teor de ferro.

Essa expansão trouxe novas tecnologias em automação e equipamentos, além de um parque de aproximadamente 164 acionamentos de média tensão, divididos entre britadores, correias transportadoras, bombas de polpa e moinhos de bolas. Com a expansão foi necessário realizar modificações no sistema de automação de subestação e no sistema de automação do processo industrial, devido ao aproveitamento de equipamentos de manobra de outra unidade da empresa juntamente com o fornecimento de novos equipamentos não compatíveis com este protocolo, foi necessário então encontrar uma solução para realizar a comunicação da nova estrutura com a antiga que utiliza o protocolo de comunicação Modbus TCP.

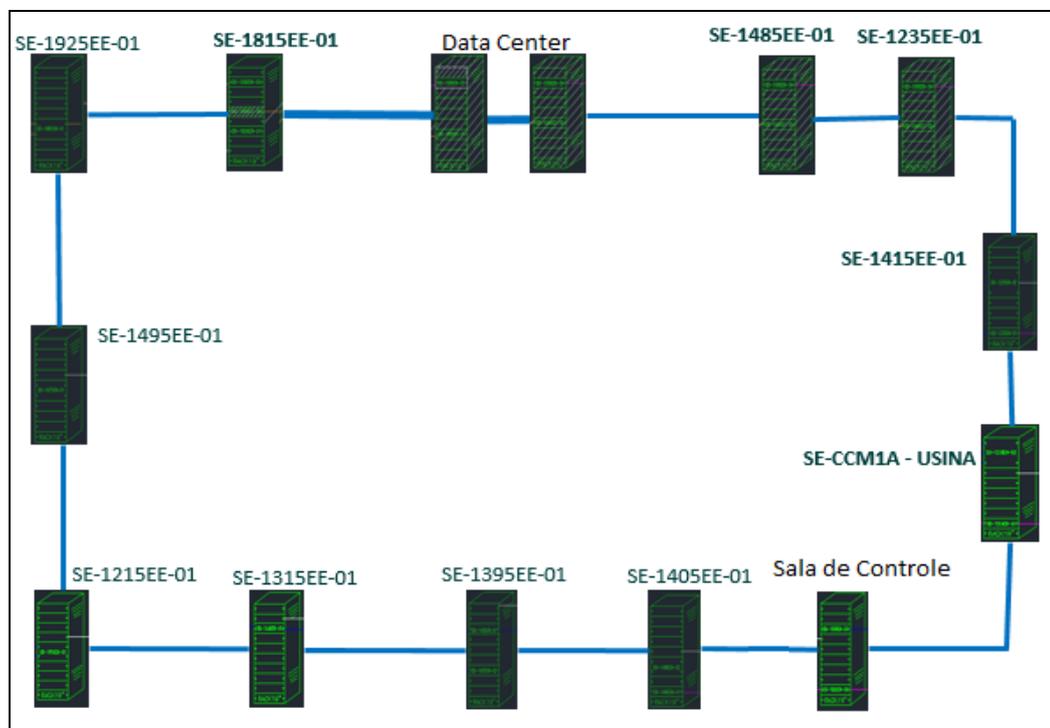
Estes equipamentos de manobras, foram equipados com IED's para acionamento, que estão dispostos em subestações referentes à cada processo da planta. Na tabela 4 estão descritos os processos e a quantidade de relés contidos em cada subestação. Estas subestações estão interligadas ao centro de controle e à sala de controle, onde constam todos os PLC's da planta, através da rede de controle com a utilização de switches que estão na configuração em anel, conforme mostra a figura 29. Cada equipamento da rede ethernet possui um endereço IP que serve para identificá-lo na rede e, através deste endereço, é possível estabelecer comunicação à distância; deste modo, pode-se monitorar, configurar e alterar parâmetros do dispositivo desejado.

Tabela 4 - Representação das subestações presentes na planta

Subestação	Processo	Quantidade de IED
SE-1485EE-01	Britagem quaternária	21
SE-1415EE-01	Britagem, Peneiramento e Usina de Hematita	15
SE-1405EE-01	Espessamento e filtragem	34
SE-1215EE-01	Britagem Primária de Itabirito	6
SE-1925EE-01	Captação de Água Nova	7
SE-1495EE-01	Moagem, Deslamagem, Flotação de Grossos e Peneiramento de Alta Frequência	61
SE-1235EE-01	Britagem II e III de Itabirito	16
SE-1395EE-01	Paio homogeneização	11

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 29 - Representação da rede de controle da usina estudada



Fonte: Elaborado pelos autores

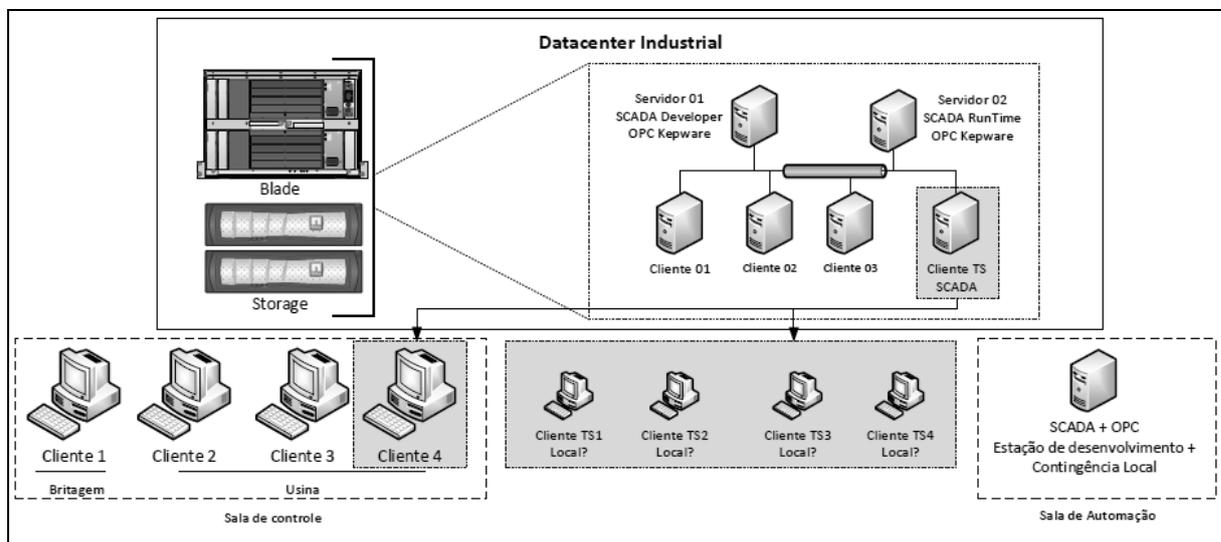
5.1 Sistema de Automação Industrial

5.1.1 Sistema de supervisão

Para realizar o controle e supervisão do sistema de automação de processos, é utilizado o sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), que é responsável pela coleta de dados no chão de fábrica e pela sua distribuição às pessoas e aplicativos por todas as redes conectadas.

Este sistema, mostrado na figura 30, permite o controle automático ou manual dos equipamentos ou dispositivos do processo além de possibilitar a administração de toda a planta. Esta administração consiste na avaliação de condições e geração de alarmes, no fornecimento de dados de amostragem para um historiador e, também, na interação com outros aplicativos que utilizam o chão de fábrica. Através desta administração torna-se possível, aos integrantes da equipe de operação, avaliar as condições atuais, melhorar o desempenho, manter a segurança e evitar problemas dispendiosos ou perigosos em processos industriais.

Figura 30 - Arquitetura do sistema SCADA



Fonte: Desenvolvido pelos autores

O sistema é formado por:

- Servidor: Repositório central de dados de processo. Ele é responsável pela coleta e atualização de informações vindas dos equipamentos ou dispositivos conectados. Ele organiza a informação e fornece nomes e contexto mais

amigáveis para os operadores e outros usuários. Estes servidores podem ser encontrados em formato de *Blades* e *Storages*, que são disposições físicas que permitem o compartilhamento de componentes em comum, como discos óticos, fontes de alimentação e armazenamento de dados.

- Cliente: Requisita dados de um servidor por meio de sua interface gráfica para gerar, em tempo real, links em displays gráficos, alarmes em objetos de tela, tendências em gráficos, conteúdos para relatórios, etc.
- Cliente TS: É um cliente da estação SCADA que utiliza a tecnológica Terminal Services, da Microsoft, que permite a conexão em rede com um número ilimitado de servidores, com acesso a um número ilimitado de I/Os e possibilita a operação e o desenvolvimento de aplicações via internet utilizando o *browser Internet Explorer*. Em outras palavras, através de um Cliente, físico, é possível estabelecer várias conexões remotas possibilitando vários acessos ao sistema.
- Estação de desenvolvimento e contingência: Cliente utilizado para operações em caso de falha do sistema principal.

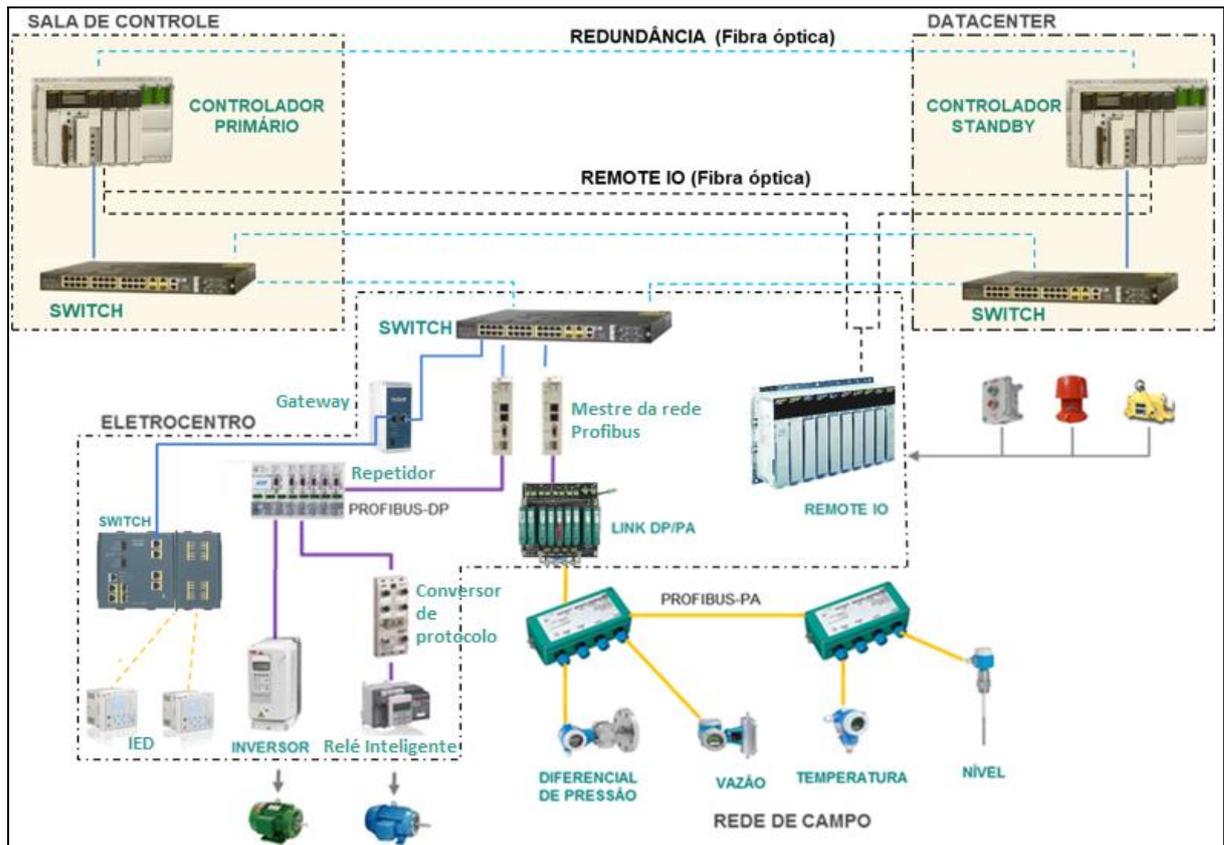
Na configuração apresentada, utiliza-se servidores redundantes. Estes servidores são idênticos onde um será o servidor principal e o outro, o servidor de backup. Caso ocorra algum problema no servidor ativo, automaticamente o outro servidor assume a comunicação principal e os clientes passam a comunicar com este servidor. O protocolo utilizado para esta comunicação é o TCP/IP. Esta arquitetura é utilizada para aumentar a disponibilidade do sistema tornando-se obrigatória para sistemas críticos.

Os servidores administram as conexões, com os outros dispositivos da pirâmide da automação, combinando os diferentes meios de comunicação com os protocolos de cada equipamento. Desta forma, é necessário utilizar drivers de I/O e servidores OPC (*OLE for Process Control*) para estabelecer comunicações com os dispositivos das outras camadas, como por exemplo com o sistema de controle. Estes drivers e servidores OPC são aplicativos instalados nos servidores SCADA que atuam como agendadores, arbitradores, requisitantes e respondedores para todos os dados trocados entre a estação SCADA e os outros dispositivos. No estudo de caso presente, utiliza-se o driver OPC com a comunicação Modbus TCP para estabelecer comunicação com o sistema de controle.

5.1.2 Sistema de controle

A arquitetura do sistema de controle utilizado na planta é representada conforme mostra a figura 31. Nesta arquitetura está representada todas as ligações que compõe o sistema de controle bem como os equipamentos que foram utilizados para estabelecer a comunicação entre os dispositivos.

Figura 31 - Arquitetura do sistema de controle



Fonte: Desenvolvido pelos autores

Os PLC's de cada processo estão dispostos em uma sala, denominada Data Center. Esta sala possui sistema de climatização, controle de acesso, energia ininterrupta com o objetivo de sempre manter o processo em operação e livre de possíveis incidentes.

O sistema de controle possui redundância de processamento, portanto existe uma outra sala, idêntica ao Data Center, denominada sala de controle, onde estão dispostos outros PLC's que estão em comunicação em tempo real com os controladores do Data Center. Em operação, apenas um controlador é responsável por controlar os ativos da planta, sendo que o outro fica em prontidão para que, em caso de alguma falha no primeiro controlador, este assuma o controle da planta.

Esta ação é chamada de “*Hot Stand-by*” pois esta troca é realizada em milésimos de segundos e não gera parada na planta.

A comunicação entre as diversas partes do sistema de controle é realizada através de switches que possuem a função estabelecer o direcionamento do tráfego da comunicação, através das VLAN's, de forma a priorizar as mensagens de controle em relação às mensagens de supervisão. Mediante a necessidade de isolar e gerenciar as diversas redes utilizadas na planta, a engenharia de telecomunicações criou VLANS's para separar as diversas faixas de IP's dentro de cada segmento de operação incluindo a VLAN para a rede de controle que compreende os equipamentos desta rede.

Dentro de cada subestação do processo, encontra-se os dispositivos para acionar os equipamentos da planta. Estes estão conectados com os PLC's através dos switches, dispostos em cada subestação. Para o acionamento dos equipamentos que possuem a comunicação FieldBus (Profibus) é utilizado um mestre de rede Profibus que possui duas funções distintas: realizar a comunicação com o PLC, através da rede Ethernet; e ser o mestre da rede Profibus.

Para um melhor controle e diagnóstico da planta, foram disponibilizados mestres que controlam a comunicação com os dispositivos de acionamento e mestres que controlam a comunicação com os instrumentos da planta. Para realizar a interligação entre o mestre da rede e os dispositivos de campo, é utilizado um repetidor, que tem a função de segmentar a rede e distribuí-la aos vários dispositivos a serem acionados. Cada mestre pode estabelecer a comunicação com, no máximo, 126 equipamentos.

Para o acionamento dos equipamentos de 440V, é utilizado um distribuidor que realiza a interface de rede profibus com até 4 gavetas a serem acionadas. Estas gavetas são compostas com um relé de acionamento inteligente que possui funções pré-programadas para controlar e proteger o motor, além de possuir uma IHM para a parametrização e operação manual.

Para o acionamento dos IED's é utilizado um gateway que tem a função de permitir a comunicação entre o PLC e o IED. Para o acionamento dos inversores, é utilizado um adaptador que tem a função de estabelecer a comunicação entre o mestre da rede Profibus e o inversor.

Para a comunicação com os instrumentos de campo, é utilizado um conversor de protocolo que tem a função de converter o protocolo Profibus DP para o protocolo

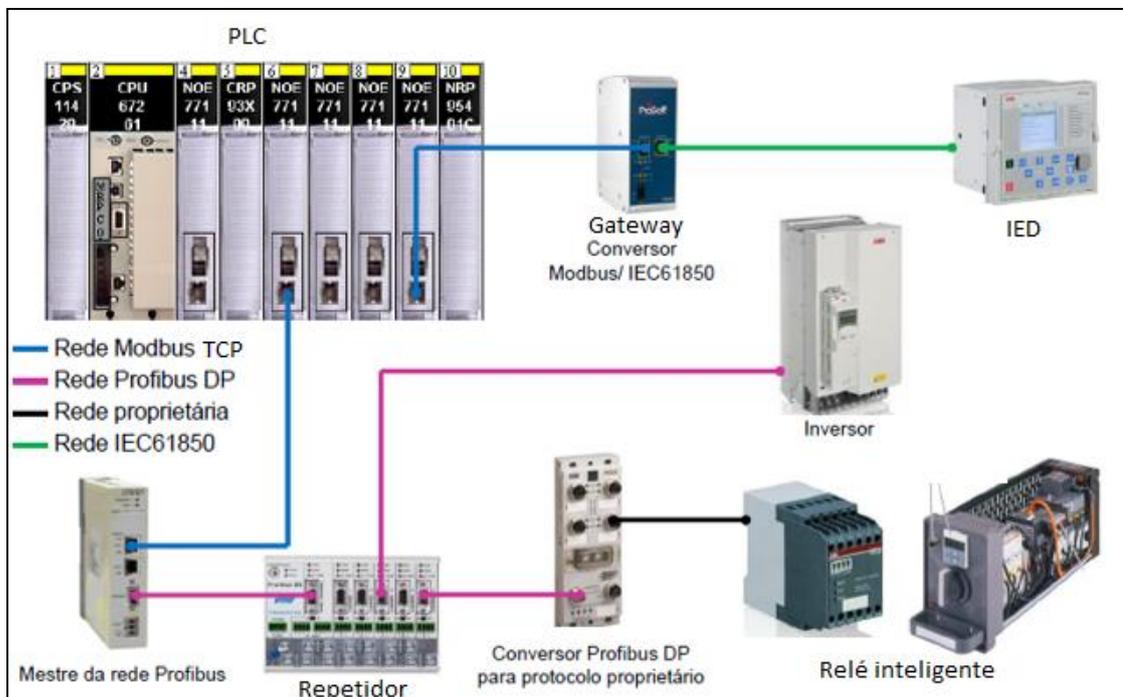
Profibus PA, devido aos instrumentos de campo utilizarem este protocolo. Após a conversão, o tronco de comunicação é interligado às caixas de junção que servem para interligar aos instrumentos espalhados pela planta.

Além da comunicação estabelecida através da rede FieldBus, existe também a rede de remotas, denominada como *Remote I/O*. Esta rede é prioritária no processamento do PLC, pois nela estão contidos todos os pontos de entrada e saídas, para o acionamento manual dos equipamentos, como, por exemplo, o botão desliga, sinais de emergência, dentre outros. Como os PLC's estão dispostos em uma sala de controle e as remotas espalhadas pela planta, torna-se necessário realizar a conversão dos sinais elétricos para óticos; a fim de manter a integridade e tornar possível a utilização de redundância destes sinais.

5.1.3 Arquitetura de acionamento

A arquitetura do sistema de acionamento utilizado na planta é representada conforme mostra a figura 32. Nesta arquitetura estão representadas todas as conversões de protocolos e as ligações realizadas em cada dispositivo.

Figura 32 - Arquitetura de Rede



Fonte: Desenvolvido pelos autores

A planta utiliza um PLC que possui o protocolo de comunicação Modbus Serial com a possibilidade de utilização dos dois modos, RTU e ASC II. Para

estabelecer a comunicação com as remotas de entrada e saída (I/O), utilizou-se o modo RTU através dos cartões mestre e escravo da rede I/O

Para que fosse possível realizar a comunicação com os dispositivos das outras camadas da pirâmide, que utilizam os protocolos em Ethernet, foi necessário utilizar um cartão para converter o protocolo Modbus Serial para Modbus/TCP. Através do uso deste cartão tornou-se possível estabelecer funções de I/O *Scanning*, servidor Modbus, sistema em redundância, além de tornar possível a conexão ao PLC, para programação e monitoramento, de forma remota.

Com a utilização deste cartão, tornou-se possível estabelecer a comunicação do PLC com os dispositivos da camada de acionamento, através dos switches, como por exemplo os mestres da rede Profibus e os IED's. Além da utilização do cartão de conversão de protocolos Modbus RTU para TCP, para estabelecer a comunicação com os IED's, foi necessário a utilização de um gateway para converter o protocolo Modbus/TCP para o protocolo MMS da IEC61850. Esta integração será detalhada passo a passo no tópico de resultados e discussões.

5.2 Sistema de Automação de Subestações (SAS)

A planta estudada contém um Sistema de Automação de Subestações (SAS), responsável pelo gerenciamento do sistema elétrico, composto pelos equipamentos de 4.16KV, conforme mostra a arquitetura na figura 33.

O SAS é formado por:

- Central de engenharia: Utilizado para programação, parametrização e atualização dos IED's;
- Central de manutenção: Utilizado para os diagnósticos e acionamentos dos IED's;
- Data Center: Sala dedicada para armazenar os servidores de aspecto e conectividade;
- Salas elétricas: Contém os IED's a serem acionados e monitorados, as IHM's para o diagnóstico e o acionamento à distância dos IED's.

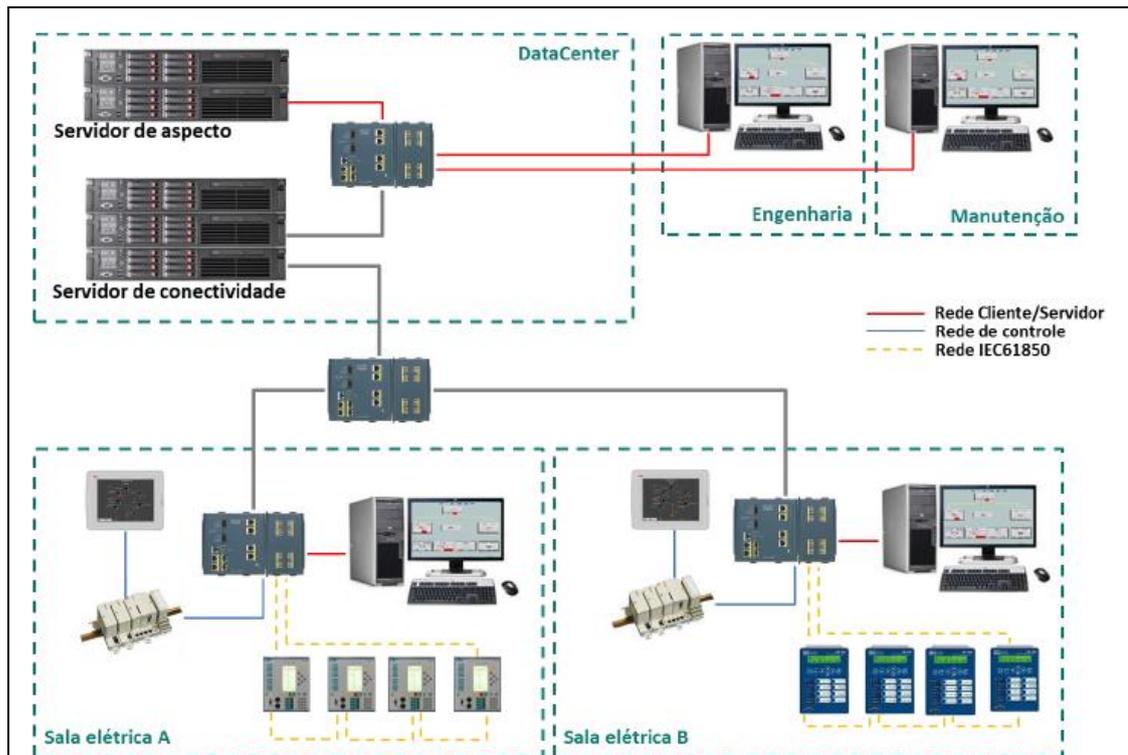
Este sistema é baseado na norma IEC 61850 e utiliza o protocolo MMS para estabelecer a comunicação dos IED's e os dispositivos de interface (Central de engenharia, manutenção e diagnóstico); e o protocolo GOOSE para estabelecer a comunicação entre os IED's afim de tornar o sistema de proteção bem eficaz para

realizar operações como proteção do tipo de falha de disjuntor, seletividade lógica e intertravamento lógico entre IED's.

Nesta arquitetura, são utilizados três tipos de redes que realizam as funções descritas a seguir:

- Rede Cliente/Servidor: Tráfego e informações do sistema de automação, resultado da comunicação entre os servidores de aspecto e os demais computadores do sistema, como estações de operação e engenharia. Os servidores de aspecto são responsáveis pelo armazenamento de toda a base de dados do sistema de automação. Os servidores de conectividade são responsáveis por realizar a interface e conexão com outros protocolos de comunicação utilizado na planta;
- Rede de controle: Tráfego de informação em nível de controle entre os controladores da planta, como a comunicação com as telas de interface homem-máquina. Nesta rede trafega a informação que os controladores traduzem dos IED's recebida via GOOSE para as tela de IHM e que, ao final, são disponibilizadas para a informação da situação atual de todos os equipamentos de subestação, através de telas de diagramas unifilares;
- Rede IEC 61850: Tráfego da comunicação entre os IED's, entre o controlador e entre o servidor de conectividade OPC IEC 61850.

Figura 33 - Arquitetura do sistema de automação de subestações (SAS)



Fonte: Desenvolvido pelos autores

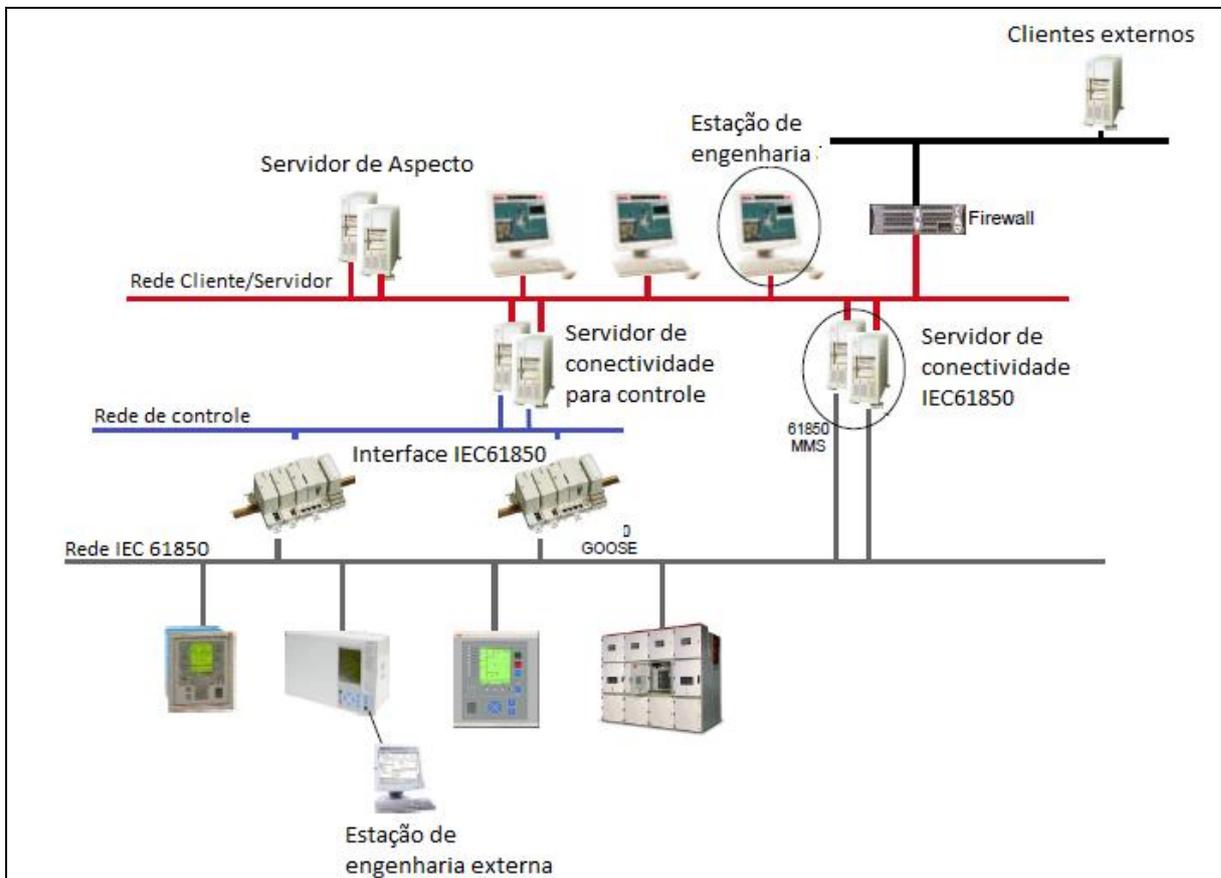
Para realizar a configuração, parametrização ou gerenciamento dos IED's, é utilizada uma ferramenta dedicada do sistema. Esta ferramenta oferece todas as funcionalidades necessárias para trabalhar durante todos os estágios de ciclos de vida do IED, permitindo a realização de planejamento, engenharia, comissionamento, operação e manipulações de perturbações, análise funcional, dentre outros.

Para realizar a supervisão do SAS, é disposto uma plataforma que utiliza a topologia mostrada na figura 34. Esta plataforma permite a visualização do quantitativo de ativos e um monitoramento em tempo real do status de cada IED existente na planta além de permitir:

- Operação remota: permite o operador obter as mesmas informações encontradas localmente no dispositivo, porém com a segurança de estar afastado do risco elétrico.
- Organização de alarmes e eventos: permite que o operador visualize a sequência dos eventos ocorridos durante uma falha elétrica, ou seja, é possível determinar qual equipamento sinalizou alguma falha primeiro; e esta análise permite a detecção e resolução do problema em um espaço curto de tempo.

- Manutenção e parametrização dos relés remotamente: reduz a exposição humana aos riscos elétricos, permitindo à equipe de engenharia ou de manutenção executar todas as atividades sem estar em frente ao cubículo.

Figura 34 - Topologia plataforma do SAS



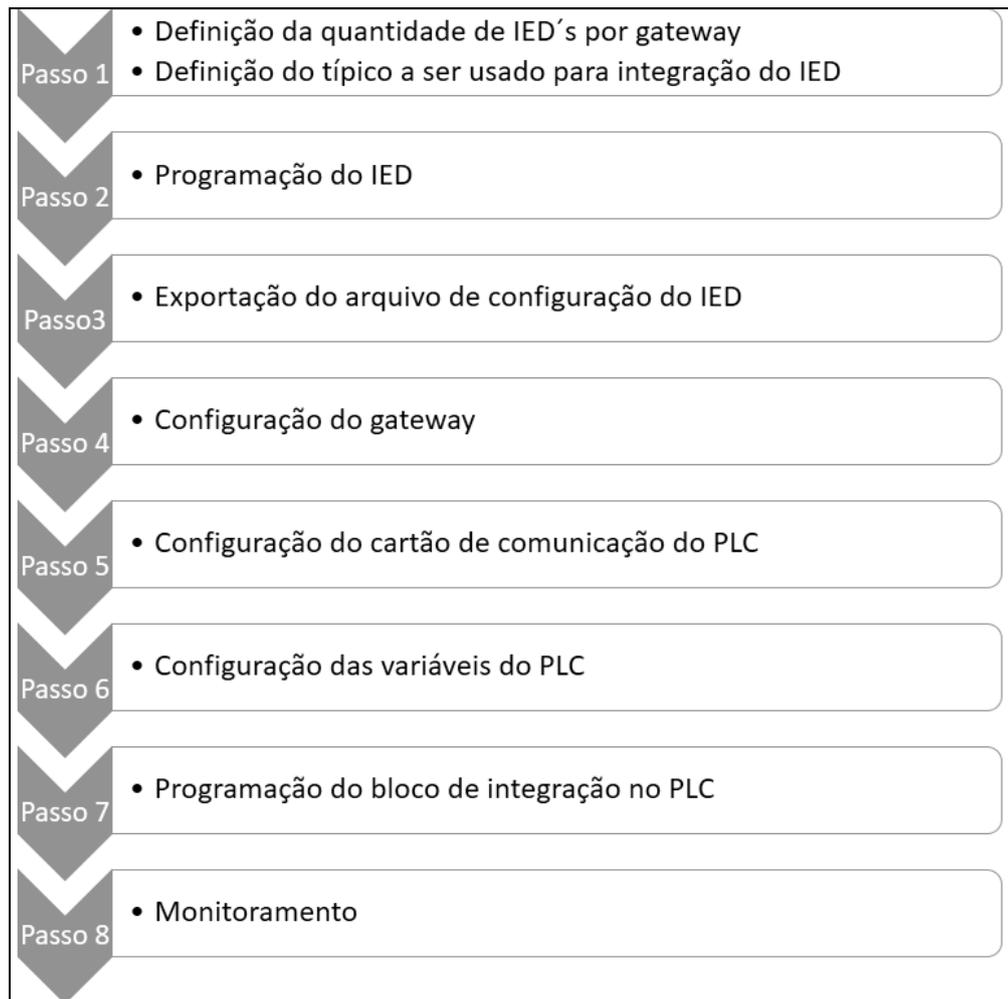
Fonte: Desenvolvido pelos autores

6 RESULTADOS

6.1 Integração do IED ao PLC

Para realizar a integração dos IEDs, que utilizam o protocolo MMS da IEC 61850, e o PLC, que utiliza o protocolo Modbus TCP/IP, foi necessário realizar os passos que serão descritos a seguir, conforme mostra a figura 35. Estes passos vão desde as definições de engenharia até o monitoramento dos dados enviados entre o PLC, o gateway e o IED.

Figura 35 - Passos da integração

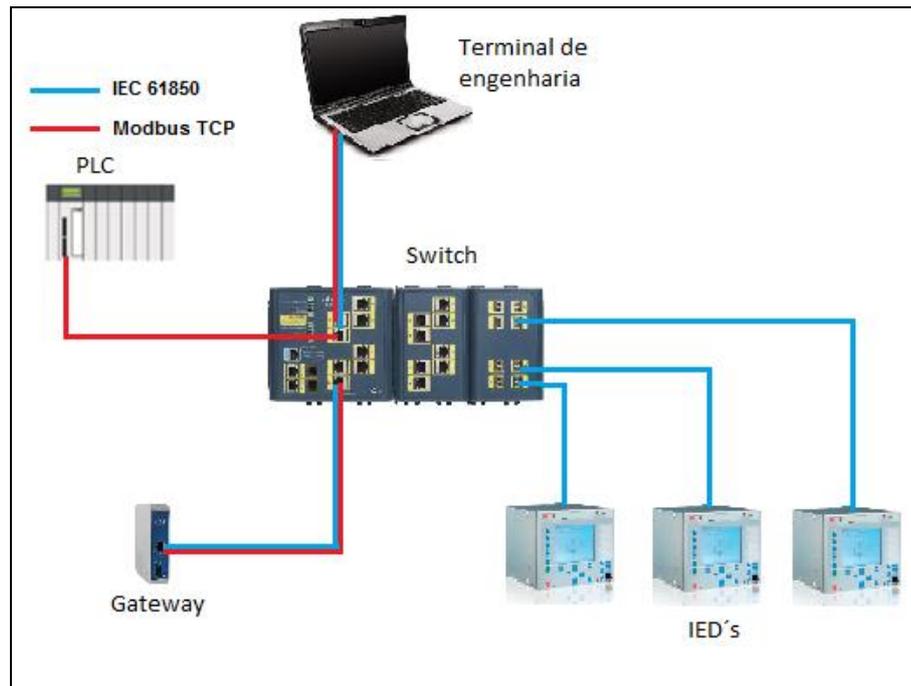


Fonte: Desenvolvido pelos autores

A arquitetura utilizada para realizar a integração está representada na figura 36 e os equipamentos que foram necessários para esta integração foram:

- PLC: Controlador da planta;
- Switch: Dispositivo responsável por interligar e gerenciar as redes de comunicação;
- Gateway: Dispositivo responsável por ser a ponte entre os protocolos Modbus TCP e o MMS;
- IED's: Dispositivos de acionamento dos equipamentos da planta;
- Terminal de engenharia: Dispositivo utilizado para configurar os PLC's, os Switches, e os IED's.

Figura 36 - Modelo de Arquitetura de Integração



Fonte: Desenvolvido pelos autores

Como a planta já possuía as redes de controle e a Cliente/Servidor, houve a necessidade da criação de uma nova rede para o tráfego das informações dos protocolos da IEC 61850. Portanto, foram criadas uma VLAN para o tráfego de mensagens GOOSE e uma outra VLAN para o tráfego de mensagens MMS entre os dispositivos da IEC 61850 ligados ao sistema de controle.

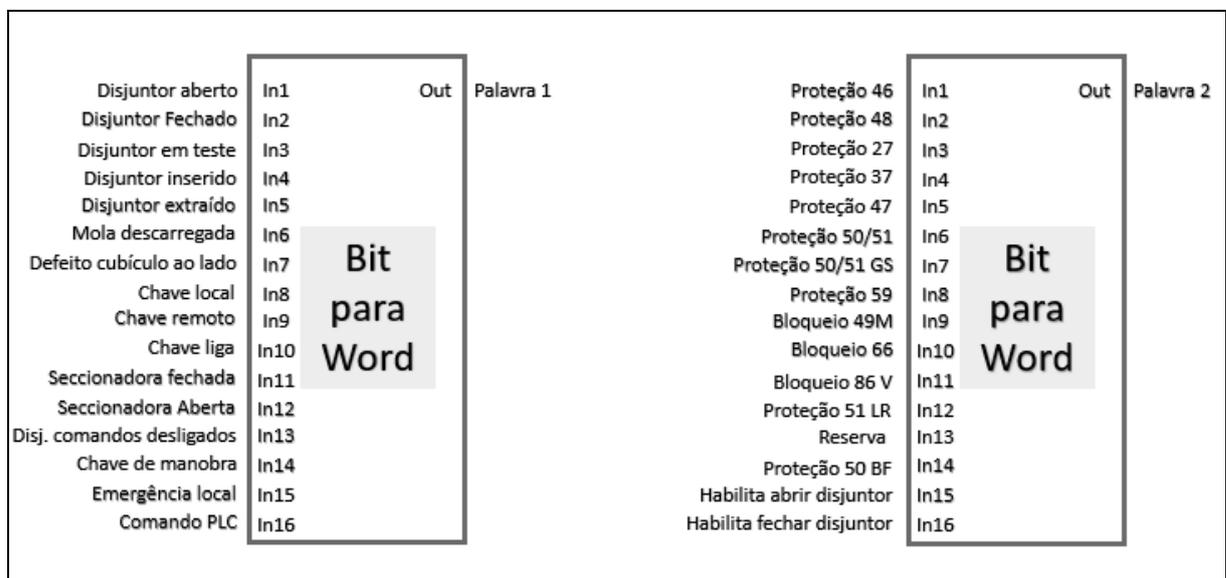
O primeiro passo da integração, consistiu na definição de quantos IED's teriam interfaces com cada gateway. Sendo assim, definiu-se um gateway por subestação limitando a comunicação deste com no máximo 12 IED's. Se houvesse necessidade de mais comunicações, outros gateways deveriam ser utilizados para este fim. Este valor representou 60% da capacidade de integração do gateway.

Com o uso de um gateway, houve-se necessidade de selecionar quais variáveis seriam disponibilizadas pelo IED, devido às limitações do dispositivo. Portanto, após o arranjo estabelecido no primeiro passo, definiu-se o típico que seria utilizado para a comunicação dos IED's com o PLC, conforme mostra o anexo 1. Neste típico foram relacionados quais sinais de entrada e saída seriam disponibilizadas pelo IED para o seu acionamento e monitoramento; dentre estes estão as informações de estado do disjuntor, as proteções atuadas; as medições de corrente, potência, energia fornecida, tempo de resfriamento, tempo para nova partida e os sinais de comando que serão enviados pelo PLC. Para definir este típico

foi necessário estudar todos os equipamentos que seriam acionados pelos IED's (moinho, britador, transportador de correia, dentre outros) e quais informações seriam necessárias integrar destes equipamentos.

No segundo passo realizou-se a programação dos IED's, para a comunicação com o gateway, com a utilização do software dedicado para esta programação. A figura 37 exemplifica esta programação. Nesta programação utilizou-se o típico, definido no primeiro passo, de forma a disponibilizá-lo para o gateway. Algumas conversões de dados foram necessárias, como por exemplo os sinais de estados e defeitos do disjuntor; estes foram convertidos para palavras (*Words*) de 16 bits que seriam disponibilizadas para o gateway.

Figura 37 - Programação do IED

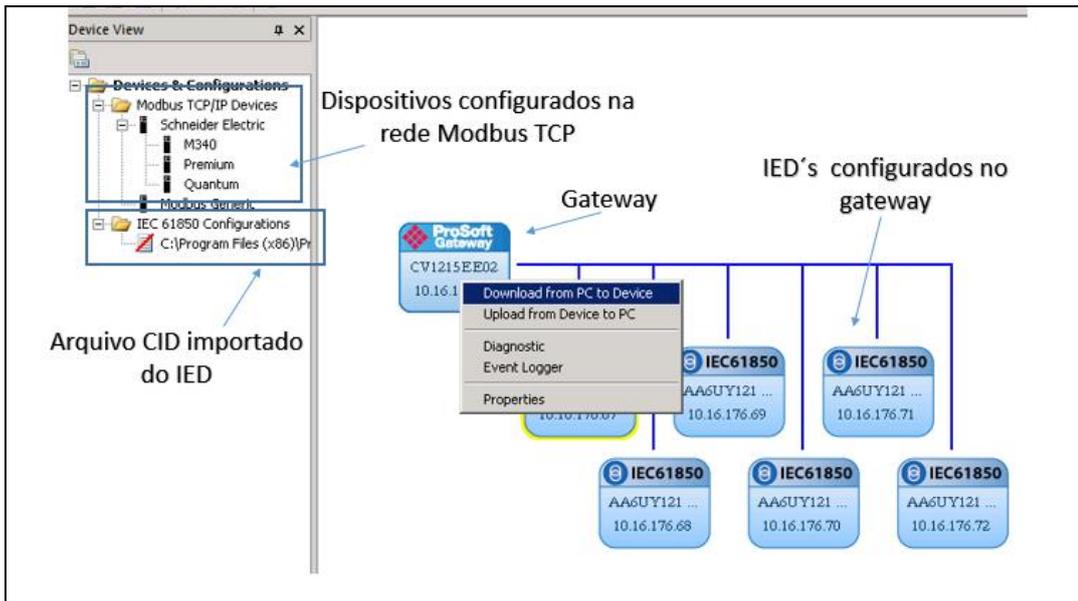


Fonte: Desenvolvido pelos autores

No terceiro realizou-se a exportação do arquivo CID (Descrição de Configuração do IED), com a utilização do software dedicado para parametrização e configuração do IED. Este arquivo contém toda a informação que o IED irá disponibilizar na rede seguido da estrutura de dados da norma IEC 61850. É através deste arquivo que o gateway relaciona os sinais de entrada e saída, referente ao IED, para a comunicação com o PLC.

No quarto passo realizou-se a configuração do gateway e, para esta etapa, foi utilizado o software dedicado do dispositivo. Primeiro foi realizado a importação do arquivo CID, gerado anteriormente pelo IED, e montado a arquitetura de comunicação do gateway com os IEDs conforme mostra a figura 38.

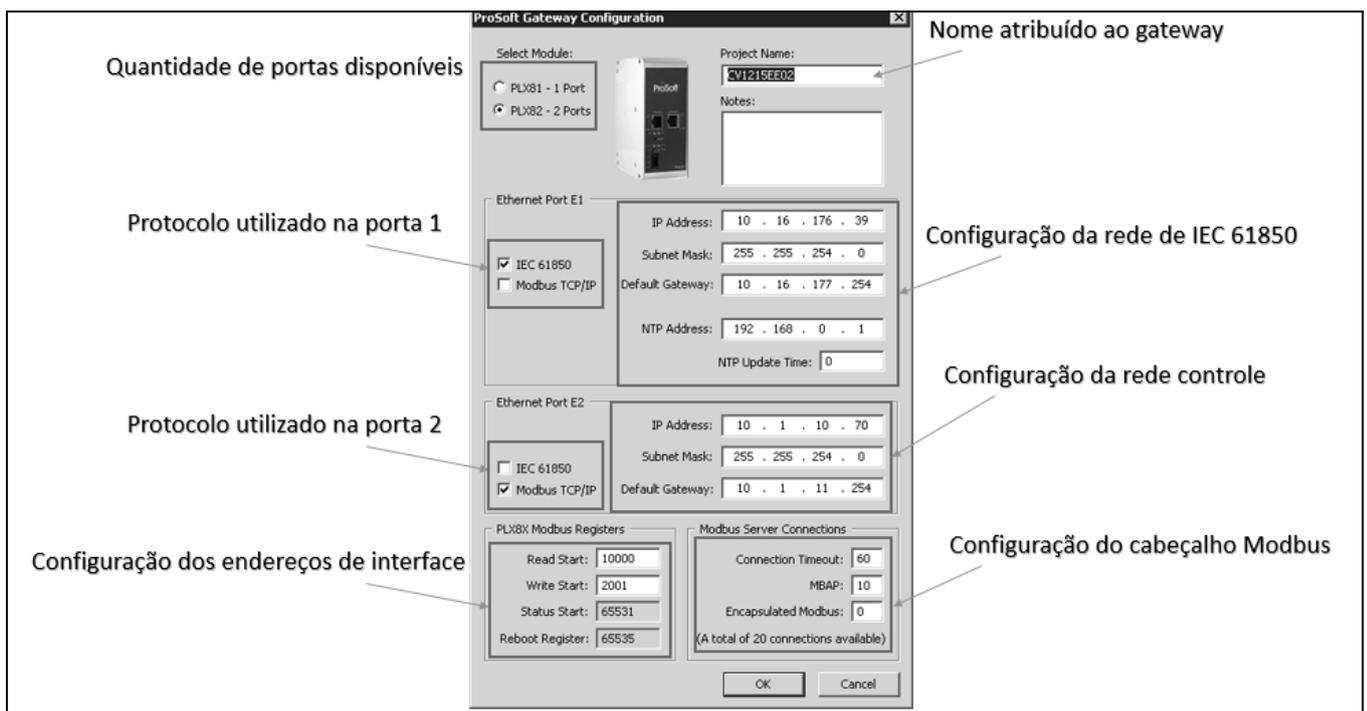
Figura 38 - Desenvolvimento da arquitetura de comunicação do gateway



Fonte: Desenvolvido pelos autores

Posteriormente, configurou-se os dados de rede do gateway onde foram fornecidos os endereços de rede e os protocolos de cada porta de comunicação, sendo uma para o protocolo MMS e outra para o protocolo Modbus TCP, conforme mostra a figura 39.

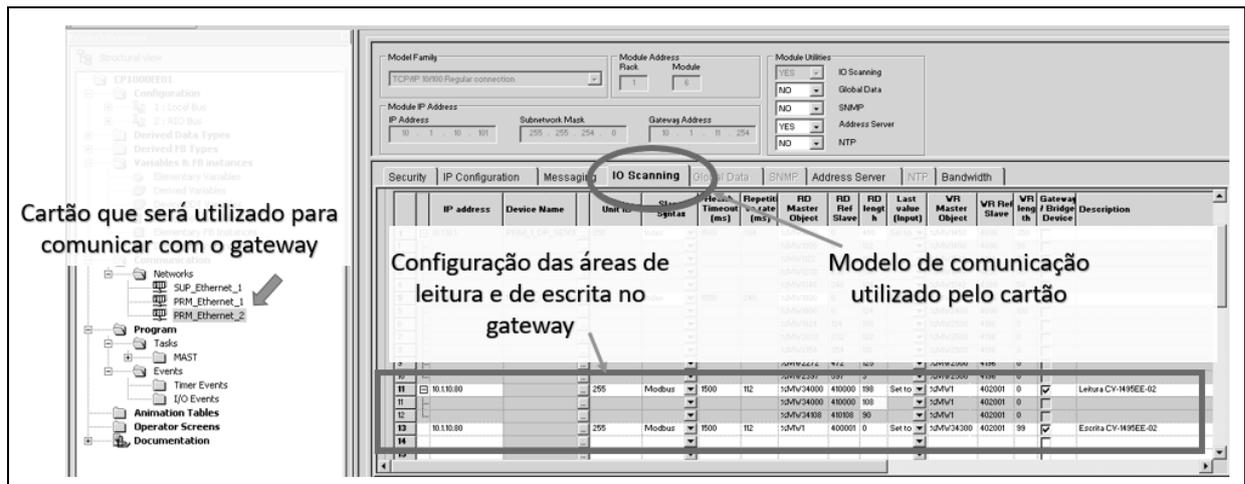
Figura 39 - Configuração dos Protocolos do gateway



Fonte Desenvolvido pelos autores

No quinto passo realizou-se a configuração do cartão de conversão de protocolos Modbus RTU para TCP, utilizado pelo PLC. Nesta etapa utilizou-se o software dedicado para a programação do PLC para configurar as áreas de memória em que cada gateway iria se comunicar com o PLC, conforme mostra a figura 40. Dentro desta área de memória estão contidas as palavras de interfaces de todos os IED's configurados no gateway.

Figura 40 - Configuração do cartão Modbus TCP



Fonte: Desenvolvido pelos autores

No sexto passo foi realizado o mapeamento de cada equipamento dentro da área de memória disponibilizado no passo anterior. Este mapeamento foi feito na mesma ordem em que foi realizado a arquitetura de cada gateway, conforme mostra a figura 41. A ordem de cada informação seguirá o típico utilizado no CID, realizado no terceiro passo.

Figura 41 - Configuração das variáveis de interface com o gateway

Name	Type	Address	Sa	Value	Comment
MD1491EED0M01_LEIT1	ARRAY(0..5) OF REAL	3Mw34001	1	1	ARRAY DE LEITURA 1 RELE REM630 MOINHO MOTOR PRINCIP
MD1491EED0M01_LEIT2	ARRAY(0..11) OF DINT	3Mw34013	1	1	ARRAY DE LEITURA 2 RELE REM630 MOINHO MOTOR PRINCIP
MD1491EED0M01_LEIT3	INT	3Mw34017	1	1	PALAVRA DE LEITURA 1 RELE REM630 MOINHO MOTOR PRINCIP
BP1493EE01_LEIT1	ARRAY(0..5) OF REAL	3Mw34053	1	1	ARRAY DE LEITURA 1 RELE REM630 BOMBA DE POLPA (VEM
BP1493EE01_LEIT2	ARRAY(0..11) OF DINT	3Mw34051	1	1	ARRAY DE LEITURA 2 RELE REM630 BOMBA DE POLPA (VEM
BP1493EE01_LEIT3	INT	3Mw34055	1	1	PALAVRA DE LEITURA 1 RELE REM630 BOMBA DE POLPA (VEM
BP1493EE02_LEIT1	ARRAY(0..5) OF REAL	3Mw34057	1	1	ARRAY DE LEITURA 1 RELE REM630 BOMBA DE POLPA (VEM
BP1493EE02_LEIT2	ARRAY(0..11) OF DINT	3Mw34049	1	1	ARRAY DE LEITURA 2 RELE REM630 BOMBA DE POLPA (VEM
BP1493EE02_LEIT3	INT	3Mw34053	1	1	PALAVRA DE LEITURA 1 RELE REM630 BOMBA DE POLPA (VEM
BP1493EE07_LEIT1	ARRAY(0..5) OF REAL	3Mw34059	1	1	ARRAY DE LEITURA 1 RELE REM630 BOMBA DE POLPA (VEM
BP1493EE07_LEIT2	ARRAY(0..11) OF DINT	3Mw34067	1	1	ARRAY DE LEITURA 2 RELE REM630 BOMBA DE POLPA (VEM
BP1493EE07_LEIT3	INT	3Mw34071	1	1	PALAVRA DE LEITURA 1 RELE REM630 BOMBA DE POLPA (VEM
CF1441EE01_LEIT1	ARRAY(0..5) OF REAL	3Mw34073	1	1	ARRAY DE LEITURA 1 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V
CF1441EE01_LEIT2	ARRAY(0..11) OF DINT	3Mw34085	1	1	ARRAY DE LEITURA 2 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V
CF1441EE01_LEIT3	INT	3Mw34089	1	1	PALAVRA DE LEITURA 1 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V
CF1441EE04_LEIT1	ARRAY(0..5) OF REAL	3Mw34091	1	1	ARRAY DE LEITURA 1 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V
CF1441EE04_LEIT2	ARRAY(0..11) OF DINT	3Mw34103	1	1	ARRAY DE LEITURA 2 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V
CF1441EE04_LEIT3	INT	3Mw34107	1	1	PALAVRA DE LEITURA 1 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V
CF1441EE07_LEIT1	ARRAY(0..5) OF REAL	3Mw34109	1	1	ARRAY DE LEITURA 1 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V
CF1441EE07_LEIT2	ARRAY(0..11) OF DINT	3Mw34121	1	1	ARRAY DE LEITURA 2 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V
CF1441EE07_LEIT3	INT	3Mw34125	1	1	PALAVRA DE LEITURA 1 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V
CF1441EE10_LEIT1	ARRAY(0..5) OF REAL	3Mw34127	1	1	ARRAY DE LEITURA 1 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V
CF1441EE10_LEIT2	ARRAY(0..11) OF DINT	3Mw34139	1	1	ARRAY DE LEITURA 2 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V
CF1441EE10_LEIT3	INT	3Mw34143	1	1	PALAVRA DE LEITURA 1 RELE REM630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (V

Name	Type	Address	Sa	Value	Comment
BP1493EE08_LEIT2	ARRAY(0..11) OF DINT	3Mw34193	1	1	ARRAY DE LEITURA 2 RELE REM630 BOMBA DE POLPA (VEM D
BP1493EE08_LEIT3	INT	3Mw34197	1	1	PALAVRA DE LEITURA 2 RELE REM630 BOMBA DE POLPA (VEM
BP1493EE01_ESCR1	ARRAY(0..8) OF INT	3Mw34289	1	1	ARRAY DE ESCRITA 1 RELE REM630 MOINHO MOTOR PRINCIP
BP1493EE02_ESCR1	ARRAY(0..8) OF INT	3Mw34289	1	1	ARRAY DE ESCRITA 1 RELE 630 BOMBA DE POLPA (VAI PARA C
BP1493EE02_ESCR1	ARRAY(0..8) OF INT	3Mw34318	1	1	ARRAY DE ESCRITA 1 RELE 630 BOMBA DE POLPA (VAI PARA C
BP1493EE07_ESCR1	ARRAY(0..8) OF INT	3Mw34327	1	1	ARRAY DE ESCRITA 1 RELE 630 BOMBA DE POLPA (VAI PARA C
CF1441EE01_ESCR1	ARRAY(0..8) OF INT	3Mw34336	1	1	ARRAY DE ESCRITA 1 RELE 630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (VAI PA
CF1441EE04_ESCR1	ARRAY(0..8) OF INT	3Mw34345	1	1	ARRAY DE ESCRITA 1 RELE 630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (VAI PA
CF1441EE07_ESCR1	ARRAY(0..8) OF INT	3Mw34354	1	1	ARRAY DE ESCRITA 1 RELE 630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (VAI PA
CF1441EE10_ESCR1	ARRAY(0..8) OF INT	3Mw34363	1	1	ARRAY DE ESCRITA 1 RELE 630 CÉLULA DE FLOTAÇÃO (VAI PA
MD1491EED0M01_ESCR1	ARRAY(0..8) OF INT	3Mw34372	1	1	ARRAY DE ESCRITA 1 RELE REM630 MOINHO MOTOR PRINCIP
BP1493EE08_ESCR1	ARRAY(0..8) OF INT	3Mw34390	1	1	ARRAY DE ESCRITA 1 RELE 630 BOMBA DE POLPA (VAI PARA C
MD1491EED01_P13_DIAG	INT	3Mw38000	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5801)
MD1491EED01_P14_DIAG	INT	3Mw38001	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5802)
MD1491EED01_P15_DIAG	INT	3Mw38002	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5803)
MD1491EED01_P16_DIAG	INT	3Mw38003	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5804)
MD1491EED01_P17_DIAG	INT	3Mw38004	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5805)
MD1491EED01_P18_DIAG	INT	3Mw38005	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5806)
MD1491EED01_P19_DIAG	INT	3Mw38006	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5807)
MD1491EED01_P20_DIAG	INT	3Mw38007	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5808)
MD1491EED01_P21_DIAG	INT	3Mw38008	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5809)
MD1491EED01_P22_DIAG	INT	3Mw38009	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5810)
MD1491EED01_P23_DIAG	INT	3Mw38010	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5811)
MD1491EED01_P24_DIAG	INT	3Mw38011	2	1	DIAGNÓSTICO PROFIBUS PA (PT1491EE5812)

Fonte: Desenvolvido pelos autores

No sétimo passo realizou-se a criação do bloco de integração utilizado no PLC. Neste bloco foi estratificado todas as informações disponibilizadas pelo IED, conforme mostra a figura 42, para que pudessem ser utilizadas na programação da planta. Na programação do bloco, contemplaram-se os seguintes comandos a serem enviados ao IED:

- Abrir disjuntor: Comando enviado para o seccionamento do IED. Este comando não é restrito ao modo de operação do IED, ou seja, se o IED estiver em local ou em remoto este comando terá funcionalidade;
- Fechar disjuntor: Comando enviado para o IED para fechamento dos contatos. Este comando é restrito apenas para modo de operação em remoto;
- Watchdog: Comando utilizado para logica de monitoramento de tempo de comunicação entre o IED e o PLC.

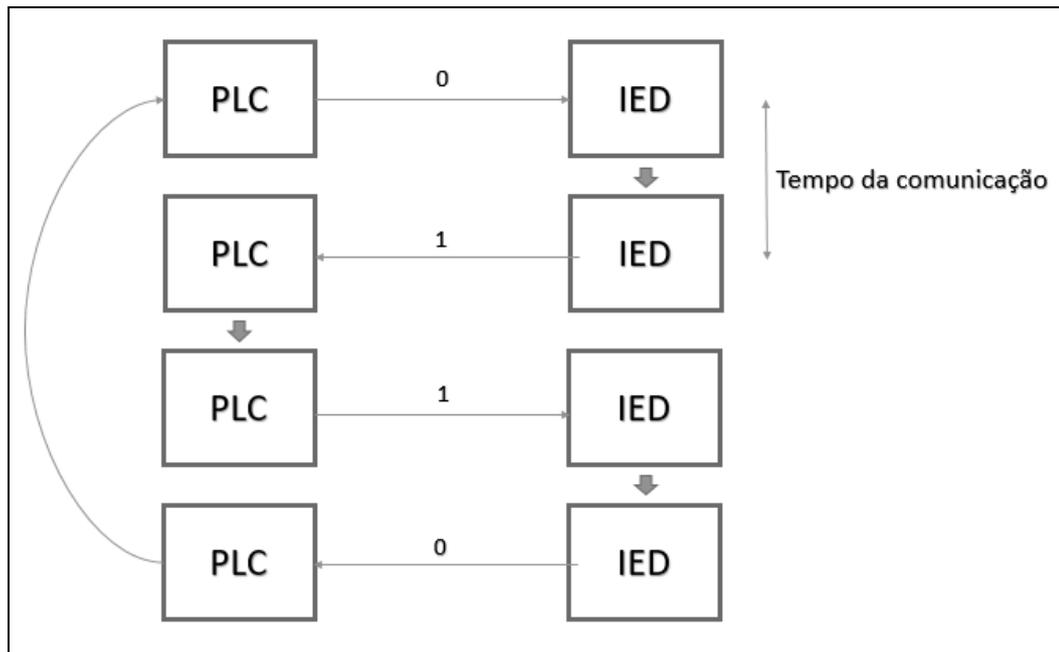
Figura 42 - Bloco criado para comunicar com o IED

Palavra de leitura 1 do gateway	Leitura 1	Escrita	Palavra a ser escrita no gateway
Palavra de leitura 2 do gateway	Leitura 2	Diag	Palavra de diagnostico lida do gateway
Palavra de leitura 3 do gateway	Leitura 3	Ifunc	Sinal do IED em funcionamento
Comando de ligar e desligar	Liga/Desliga	IPPP	Sinal do IED pronto para operar
Comando de rearmar	Rearme	ILR	Sinal do IED em local ou remoto
		Dsub	Sinal do IED com subtensão
		Idjin	Sinal do IED com disjuntor inserido
		Imdsc	Sinal do IED com mola descarregada
		Idjte	Sinal do IED com disjuntor extraído
		Ibeme	Sinal do IED com emergência atuada
		Ibloq	Sinal do IED com bloqueio atuado
		Ctime	Palavra do IED de tempo de resfriamento
		Rtime	Palavra do IED de tempo para nova partida
		Wtime	Palavra com o tempo do comunicação entre o PLC e o IED
		Curr	Palavra com o valor de corrente do IED

Fonte: Desenvolvido pelos autores

A lógica de Watchdog consiste em uma função de “cão de guarda”, que foi programada tanto no PLC quanto no IED. Nesta lógica, conforme mostra a figura 43, o PLC envia uma informação ao IED e este inverte a informação devolvendo-a para o PLC. O tempo necessário para esta informação ser enviada ao IED e retornar para o PLC é denominada como tempo de Watchdog. Se este tempo ultrapassar um valor predeterminado, significa que a comunicação não está fluindo entre os dispositivos e então é gerado um sinal denominado falha de comunicação. Nesta condição os dispositivos zeram as tabelas de comunicação e desativam as saídas entrando no modo de falha segura (*Fail Safe*).

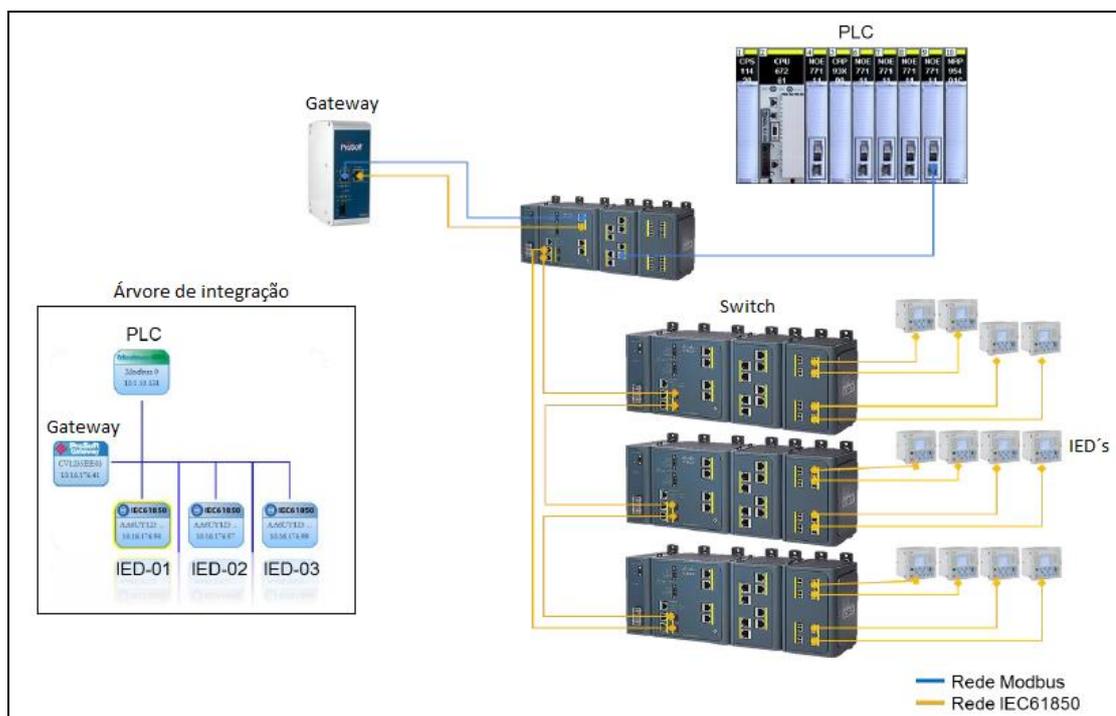
Figura 43 - Lógica de Watchdog



Fonte: Desenvolvido pelos autores

A arquitetura, após a realização dos passos acima, pode ser compreendida na figura 44. Nesta arquitetura é possível observar as etapas de conversão de protocolo e como foram distribuídos os IED's por cada gateway.

Figura 44 - Integração do PLC com o IED



Fonte: Desenvolvido pelos autores

6.2 Monitoramento

Após as configurações acima, no oitavo passo, foi utilizado o software do gateway, dedicado para diagnóstico, para realizar o monitoramento da comunicação entre o PLC e o IED, observando as variáveis de integração no gateway, conforme mostra a figura 45.

Figura 45 - Monitoramento das variáveis de comunicação no gateway

Tag	Tag Name	MB Address	I1850 Path	Data Type	Value
1	AA6UY121SEES07_SPC8GGIO1_CO_011	2000	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS01\$Oper\$ctVal	BOOL	0
2	AA6UY121SEES07_SPC8GGIO1_CO_012	2001	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS01\$Oper\$origIn\$orCat	INT	6
3	AA6UY121SEES07_SPC8GGIO1_CO_013	2002	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS01\$Oper\$Check	INT	0
4	AA6UY121SEES07_SPC8GGIO1_CO_014	2003	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS02\$Oper\$ctVal	BOOL	0
5	AA6UY121SEES07_SPC8GGIO1_CO_015	2004	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS02\$Oper\$origIn\$orCat	INT	3
6	AA6UY121SEES07_SPC8GGIO1_CO_017	2005	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS02\$Oper\$Check	INT	0
7	AA6UY121SEES07_SPC8GGIO1_CO_018	2006	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS04\$Oper\$ctVal	BOOL	1
8	AA6UY121SEES07_SPC8GGIO1_CO_019	2007	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS04\$Oper\$origIn\$orCat	INT	6
9	AA6UY121SEES07_SPC8GGIO1_CO_020	2008	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS04\$Oper\$Check	INT	0
10	AA6UY121SEES08_SPC8GGIO1_CO_011	2009	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS01\$Oper\$ctVal	BOOL	0
11	AA6UY121SEES08_SPC8GGIO1_CO_012	2010	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS01\$Oper\$origIn\$orCat	INT	6
12	AA6UY121SEES08_SPC8GGIO1_CO_013	2011	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS01\$Oper\$Check	INT	0
13	AA6UY121SEES08_SPC8GGIO1_CO_014	2012	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS02\$Oper\$ctVal	BOOL	0
14	AA6UY121SEES08_SPC8GGIO1_CO_015	2013	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS02\$Oper\$origIn\$orCat	INT	3
15	AA6UY121SEES08_SPC8GGIO1_CO_016	2014	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS02\$Oper\$Check	INT	0
16	AA6UY121SEES08_SPC8GGIO1_CO_017	2015	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS04\$Oper\$ctVal	BOOL	1
17	AA6UY121SEES08_SPC8GGIO1_CO_018	2016	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS04\$Oper\$origIn\$orCat	INT	6
18	AA6UY121SEES08_SPC8GGIO1_CO_019	2017	SPC8GGIO1\$CO\$SPCS04\$Oper\$Check	INT	0
55	AA6UY121SEES07_SPGGIO41_ST_I_001	9999	SPGGIO41\$ST\$IInd\$ctVal	BOOL	0
56	AA6UY121SEES07_MWGGIO1_MX_An_002	10000	MWGGIO1\$MX\$AnIn\$mag\$F	REAL	14602.000000
57	AA6UY121SEES07_MWGGIO2_MX_An_003	10002	MWGGIO2\$MX\$AnIn\$mag\$F	REAL	32784.000000
58	AA6UY121SEES07_MWGGIO3_MX_An_004	10004	MWGGIO3\$MX\$AnIn\$mag\$F	REAL	32768.000000
59	AA6UY121SEES07_MWGGIO5_MX_An_005	10006	MWGGIO5\$MX\$AnIn\$mag\$F	REAL	60.136311
60	AA6UY121SEES07_PWRMMU1_MX_T_006	10008	PWRMMU1\$MX\$TotW\$mag\$F	REAL	38980.838938
61	AA6UY121SEES07_MWGGIO4_MX_An_007	10010	MWGGIO4\$MX\$AnIn\$mag\$F	REAL	54642581504.000000
62	AA6UY121SEES07_MPTTR1_ST_Tms_008	10012	MPTTR1\$ST\$TmsRecEna\$ctVal	DINT	0
63	AA6UY121SEES07_STPMR11_ST_S_009	10014	STPMR11\$ST\$StrInhTmnd\$ctVal	DINT	0
64	AA6UY121SEES07_SPGGIO48_ST_I_010	10016	SPGGIO48\$ST\$IInd\$ctVal	BOOL	1
65	AA6UY121SEES08_SPGGIO41_ST_I_001	10017	SPGGIO41\$ST\$IInd\$ctVal	BOOL	0
66	AA6UY121SEES08_MWGGIO1_MX_An_002	10018	MWGGIO1\$MX\$AnIn\$mag\$F	REAL	14602.000000
67	AA6UY121SEES08_MWGGIO2_MX_An_003	10020	MWGGIO2\$MX\$AnIn\$mag\$F	REAL	32784.000000
68	AA6UY121SEES08_MWGGIO3_MX_An_004	10022	MWGGIO3\$MX\$AnIn\$mag\$F	REAL	32768.000000
69	AA6UY121SEES08_MWGGIO5_MX_An_005	10024	MWGGIO5\$MX\$AnIn\$mag\$F	REAL	23.266100
70	AA6UY121SEES08_PWRMMU1_MX_T_006	10026	PWRMMU1\$MX\$TotW\$mag\$F	REAL	101776.640625
71	AA6UY121SEES08_PWGGIO4_MX_An_007	10028	MWGGIO4\$MX\$AnIn\$mag\$F	REAL	1354509713408.000000
72	AA6UY121SEES08_MPTTR1_ST_Tms_008	10030	MPTTR1\$ST\$TmsRecEna\$ctVal	DINT	0
73	AA6UY121SEES08_STPMR11_ST_S_009	10032	STPMR11\$ST\$StrInhTmnd\$ctVal	DINT	0
74	AA6UY121SEES08_SPGGIO48_ST_I_010	10034	SPGGIO48\$ST\$IInd\$ctVal	BOOL	0
75	AA6UY121SEES08_SPGGIO41_ST_I_001	10036	SPGGIO41\$ST\$IInd\$ctVal	BOOL	0

Palavras enviadas ao IED 507 na ordem em que foram programadas no gateway:

- Comando para abrir
- Valor 6 (Fixo)
- Valor 0 (Fixo)
- Comando para fechar
- Valor 3 (Fixo)
- Valor 0 (Fixo)
- Valor de Watchdog
- Valor 6 (Fixo)
- Valor 0 (Fixo)

Palavras recebidas do IED 507 na ordem em que foram programadas no gateway:

- Palavra de leitura 1 (Estados do disjuntor)
- Palavra de leitura 2 (Estados do disjuntor)
- Palavra de leitura 3 (Defeitos do disjuntor)
- Corrente Média
- Potência
- Consumo
- Tempo para resfriar
- Tempo para nova partida
- Valor de Watchdog

Fonte: Desenvolvido pelos autores

Para estabelecer esta conexão ao gateway foi necessário informar o endereço IP do gateway desejado e o tempo de atualização das informações a serem monitoradas. Após estes passos, uma tabela, contendo os dados que estão trafegando dentro do gateway, foi disponibilizada na ordem em que foram previamente definidos e programados conforme o típico definido.

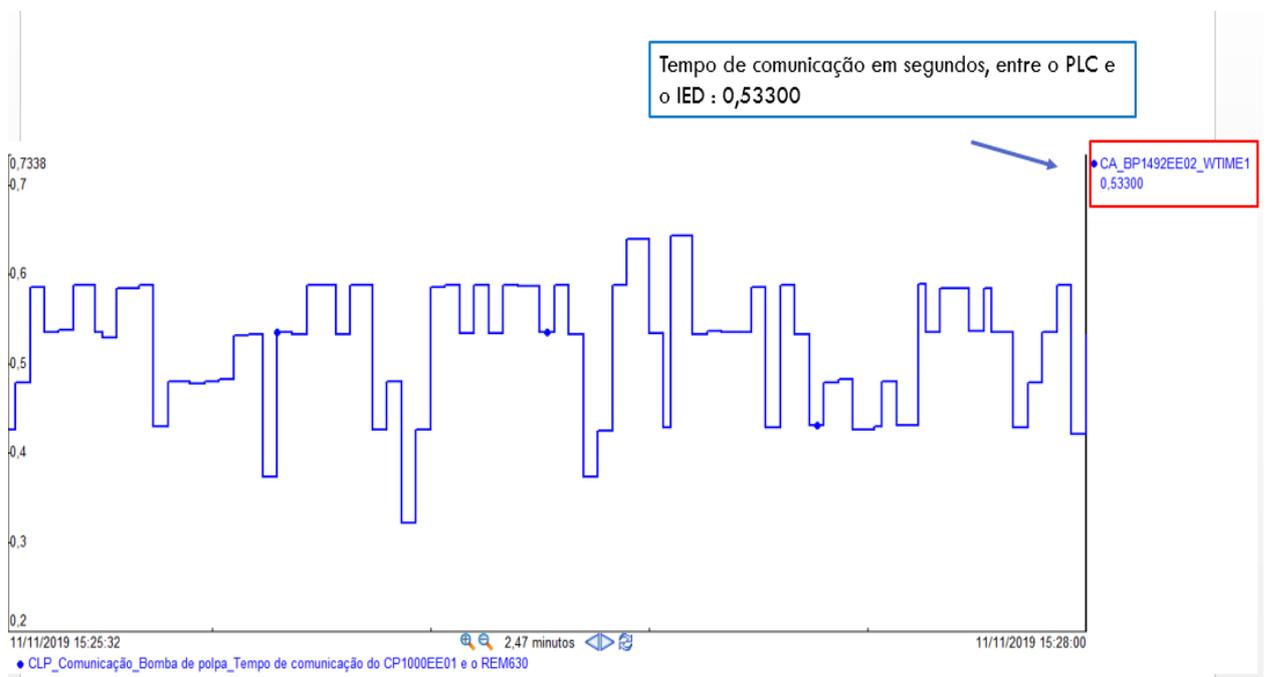
Neste monitoramento, foi possível verificar a integridade das informações enviadas do PLC para o IED, comparando-as com os dados do programa do PLC; e as informações enviadas do IED para o PLC, comparando-as com os dados lidos pela plataforma de supervisão do SAS ou localmente pelo painel frontal do IED. Nesta etapa, a verificação da ordem em que as variáveis estavam dispostas é um

ponto importante, pois estas devem seguir o mesmo fluxo de integração que foi utilizado na arquitetura do quinto passo.

Tendo concluído a verificação da integridade da informação, foi necessário realizar a verificação do tempo de comunicação entre o PLC e o IED. Este tempo torna-se importante pois retrata o tempo necessário para a atualização das informações dos comandos do PLC no IED. Sabendo-se que o IED, em um sistema industrial, é um dispositivo de acionamento controlado pelo PLC, este tempo deve ser o menor possível pois, em situações que o PLC realiza intertravamentos entre equipamentos, tempos com grandezas maiores podem desencadear grandes entupimentos e acidentes pessoais.

Portanto, foi disponibilizado uma variável para guardar o valor que contém o tempo de comunicação entre o PLC e o IED proveniente da lógica de Watchdog. Este valor é atualizado à cada comunicação concluída e historiado na plataforma PIMS (*Plant Information Managemenet System*), conforme mostra a figura 46, para ser utilizado em acompanhamentos em tempo real, com atualização a cada segundo, e diagnósticos de falha de comunicação.

Figura 46 - Tempo de comunicação entre o PLC e o IED



Fonte: Desenvolvido pelos autores

Durante o monitoramento, foi possível verificar que todas as informações estavam integras tanto no PLC quanto no IED e os tempos de comunicação estavam

compreendidos entre 300ms e 800ms. Estes tempos, para a realização de acionamento e intertravamento, tornam-se aceitáveis por se tratar de uma planta de mineração, onde os equipamentos a serem acionados possuem características de tempo de inercia elevados, pois a função de proteção é realizada especificamente pelo IED com tempos da ordem de microssegundos.

7 CONCLUSÃO

No estudo da automação dos dois sistemas propostos, verificou-se que, na automação do setor elétrico, o IED encontra-se no segundo nível da pirâmide e este possui a função de controlar o sistema elétrico, realizando intertravamentos e proteções dos equipamentos. Já na automação do setor industrial, o IED ocupa o primeiro nível da pirâmide e este é comandado pelo PLC, que ocupa o segundo nível da pirâmide, sendo o principal componente de controle do setor industrial. Neste setor, o PLC tem como função realizar o intertravamento dos equipamentos e o IED realizar a proteção elétrica destes equipamentos. Para ambos os sistemas, diferentes protocolos de comunicação precisam ser utilizados para estabelecer a comunicação entre os dispositivos.

Mediante o estudo realizado sobre os protocolos Profinet, Ethernet/IP, Modbus/TCP e o MMS, verificou-se que os protocolos Profinet e o Ethernet/IP possuem características de aplicação em tempo real e de determinismo; o que os torna aceitáveis para o uso em acionamentos no setor industrial, pois alcançam tempos de comunicação com valores em até 10ms. Já os protocolos Modbus/TCP e o MMS, por utilizarem o algoritmo de determinismo CSMA/CD, típico do protocolo TCP/IP, possuem tempos de comunicação com valores maiores que 10ms e para que sejam utilizados no setor industrial é necessário realizar uma avaliação das características do processo ao qual serão submetidos, afim de não comprometer a segurança das pessoas e das operações.

O trabalho apresentou um estudo de caso que descreveu os sistemas de automação industrial e o de automação de subestação de uma mineradora. No sistema de automação industrial utilizou-se um PLC com o protocolo Modbus/TCP para comunicar-se com os dispositivos da camada de supervisão e de acionamento. No setor elétrico, foi utilizado o protocolo MMS, da IEC 61850, para estabelecer a comunicação do IED com os dispositivos da camada de supervisão e controle; e o GOOSE para estabelecer a comunicação com os outros IED's afim de realizar as proteções e intertravamentos.

Neste estudo de caso foi demonstrado a integração do PLC com o IED através do uso de um gateway para estabelecer a comunicação entre os protocolos Modbus/TCP e o MMS onde foram descritos os passos para a realização desta integração e os resultados obtidos. Esta integração proporcionou tempos de comunicação maiores que a dos outros protocolos para uma aplicação industrial;

porém, para a aplicação ao qual estes protocolos foram submetidos, estes tempos tornaram-se aceitáveis pois o tempo de intertravamento entre equipamentos será bem menor que o tempo de inércia.

A utilização da IEC 61850, no setor industrial, permitiu que todos os benefícios encontrados no setor elétrico, tais como a utilização do protocolo GOOSE para realizar a comunicação entre os IED's de forma a garantir a proteção elétrica; a utilização do protocolo MMS que permite a parametrização à distância, a geração de relatórios, o monitoramento, dentre outros; estivessem disponíveis no setor industrial. Esta integração tornou a aplicação industrial ainda mais robusta pois, além do PLC, que é o ativo principal do setor industrial para realizar os acionamentos e intertravamentos, os IED's, por sua vez, possuem capacidade para realizar proteção, controle e monitoramento local do sistema elétrico de forma eficiente, possibilitando menor tempo de diagnóstico e maior flexibilidade nas aplicações industrial.

Como próximos passos, torna-se importante a retirada do gateway de comunicação, utilizado para a integração dos protocolos MMS e Modbus/TCP, de forma a eliminar pontos de manutenção e defeito no sistema além de eliminar o tempo na conversão dos protocolos. Realizar integrações com protocolos nativos possibilitam obter melhores resultados; desta forma, torna-se necessário que o PLC possua um cartão de comunicação MMS de forma a maximizar o fluxo de informações e simplificar o processo de integração entre o IED e o PLC. Também como proposta de trabalhos futuros fica a integração do protocolo MMS com os outros protocolos industriais importantes, tais como Ethernet IP e o Profinet.

REFERÊNCIAS

ABB (FI-65101 Vaasa, Finlândia). *Manual técnico família 630*. 1.1. ed. rev. Finlândia: [s. n.], 2015. 1352 p. ISBN 1MRS757793.

ARISTOVA, Natalia I. *Ethernet in industrial automation: Overcoming obstacles*. *Automation and Remote Control*, v. 77, n. 5, p. 881-894, 2016.

CASSIOLATO, César. *Redes Industriais*. In: CASSIOLATO, César. *Redes Industriais*. [S. l.], 2013. Disponível em: <http://www.smar.com/newsletter/marketing/index150.html>. Acesso em: 24 set. 2019.

CHEMIN NETTO, Ulisses. *Determinação de um parâmetro para monitoramento do desempenho de mensagens GOOSE do padrão IEC 61850 utilizadas em subestações de energia elétrica*. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

COUTINHO, Samuel Paulo. *Protocolos para sistemas elétricos: iec 61850. Automação industrial*, [S. l.], 26 set. 2015. Disponível em: <https://industriaautomatica.wordpress.com/2015/09/26/protocolos-para-sistemas-eletricos-iec-61850/>. Acesso em: 27 abr. 2019.

DEHALWAR, Vasudev et al. *Review of IEEE 802.22 and IEC 61850 for real-time communication in Smart Grid*. In: 2015 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet). IEEE, 2015. p. 571-575.

DE OLIVEIRA SOUTO, Allan et al. *TESTES DE DESEMPENHO E INTEROPERABILIDADE UTILIZANDO A NORMA IEC 618501*. 2009.

DIAS, A. L., SESTITO, G. S., MOSSIN, E. A., FERNANDES, R., & BRANDÃO, D. *Análise comparativa de desempenho de redes profibus dp e profinet*. 2014.

DOS SANTOS, LUIS FABIANO; PEREIRA, MAURÍCIO. *Uma Abordagem Prática do IEC61850 para Automação, Proteção e Controle de Subestações*. 2007.

DUARTE, Alexandre Bitencourt. *Fundamentos da série de normas IEC 61850 e sua aplicação nas subestações*. 2012.

SILVA, Elcio Brito da. Metodologia para planejamento da convergência da Tecnologia da Informação (TI) & Tecnologia da Automação (TA) em processos industriais. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FELSER, Max; ZURAWSKI, R. Real-Time Ethernet for Automation Applications. 2009.

GILCHRIST, Alasdair. Designing industrial internet systems. In: Industry 4.0. Apress, Berkeley, CA, 2016. p. 87-118.

GOEKING, Weruska. Da máquina a vapor aos softwares de automação. Publicação online—O Setor Elétrico/Memória da Eletricidade.[Acessado em 20/08/2010]. URL: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/automacao.html>, 2010.

HELD, Gilbert. *Ethernet Networks*, London, Wiley Editor, 2nd ed., 2000, 458p.

IGARASHI, Gilberto. *Estudo da IEC 61850 e o seu impacto no sistema de automação de subestações*. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

IGARASHI, Gilberto. *Contribuições para a implementação de um barramento de processo segundo a norma IEC 61850-9*. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

KÖRNER, Marc-Fabian et al. Extending the Automation Pyramid for Industrial Demand Response. *Procedia CIRP*, v. 81, p. 998-1003, 2019.

KUMAR, PA Manoj; KUMAR, B. Sathish. *A Study on the Suitability of Ethernet/IP and EtherCAT for Industrial Time Critical Applications. International Journal of Future Computer and Communication*, v. 2, n. 2, p. 76, 2013.

LACERDA, Sérgio Louredo Maia; CARNEIRO, Greyce Hayana Ribeiro. *Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED's) e a Norma IEC61850: União que Está Dando Certo*. Artigo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, 2012.

LIN, Zhihong et al. *An inside look at industrial Ethernet communication protocols*. White Paper Texas Instruments, 2013.

LOPES, Yona; FERNANDES, Natalia C.; OBRACZKA, Katia. *Smart grid communication: Requirements and SCADA protocols analysis*. In: 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). IEEE, 2018. p. 1-6.

LUGLI, Alexandre Baratella. *Uma Ferramenta Computacional Para Análise De Topologia E Tráfego Para Redes Ethernet Industriais*. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá, 2007.

MARTINS, Marcos Roberto Alves. *Análise de convergência para arquiteturas para automação industrial: Abordagem de integração TA e TI*. 2015.

Modbus Organization. *MODBUS MESSAGING ON TCP/IP IMPLEMENTATION GUIDE V1.0b* [S.1.],2006.

Modbus Organization. *MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02*[S.1],2006.

MARCOS, Lucas Barbosa et al. *Metodologia para análise de desempenho do protocolo PROFINET aplicado a redes de comunicação industrial*. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MIKEL, GROOVER. *Automação industrial e sistemas de manufatura*. Pearson Brasil, 2011.

MORAES, C. C. de; CASTRUCCI, P. L. *Engenharia de Automação Industrial*. 2.ed. LTC, 2007.

NGUYEN, A. D. *Integration of IEC 61850 MMS and LTE to support remote control communications in electricity distribution grid*. 2013. Dissertação de Mestrado. University of Twente, Enschede, 2013.

OLIVEIRA, Vinicius de Souza Lima. *Protocolo de comunicação profinet para redes de automação*. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ODVA Profile File, *CIP on Ethernet Technology*. ODVA Publication, 2016, 8p.

ODVA Profile File, *Network Infrastructure for Ethernet/IP: Introduction and Considerations*. ODVA Publication, 2007, 118p.

PALMER, Charles; SHENOI, Sujeet (Ed.). *Critical Infrastructure Protection III: Third IFIP WG 11.10 International Conference, Hanover, New Hampshire, USA, March 23-25, 2009, Revised Selected Papers*. Springer Science & Business Media, 2009.

PHAM, Giang T. *Integration of IEC 61850 MMS and LTE to support smart metering communications*. 2013. Dissertação de Mestrado. University of Twente. Enschede, 2013

RAUSSI, Petra et al. *Real-time laboratory interconnection for smart grid testing*. 2017.

RIOS, Renan Osório. *Protocolos e serviços de redes: curso técnico em informática / Renan Osório Rios. – Colatina: CEAD / Ifes, 2011.87p.*

ROA, Michael et al. Requirements for deterministic control systems. In: 2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. IEEE, 2011. p. 439-445.

ROBERT, Jérémy et al. *Minimum cycle time analysis of Ethernet-based real-time protocols*. International Journal of Computers, Communications and Control, v. 7, n. 4, p. 743-757, 2012.

ROJAS, Carlos; MORELL, Peter. *Guidelines for Industrial Ethernet infrastructure implementation: A control engineer's guide*. In: 2010 IEEE-IAS/PCA 52nd Cement Industry Technical Conference. IEEE, 2010. p. 1-18.

SESTITO, Guilherme Serpa et al. *Uso de ethernet em automação industrial*. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

SOUZA, Emerson Barbosa. *Aplicação de equipamentos eletrônicos inteligentes via IEC 61850/GOOSE em sistema de média de tensão*. 2015.

STEMMER, DR-ING MARCELO RICARDO. *Das 5331-sistemas distribuídos e REDES de computadores para controle e AUTOMAÇÃO industrial*. UFSC, Departamento de Automação e Sistemas, Florianópolis, 2001.

TAMBOLI, Sadik et al. Implementation of Modbus RTU and Modbus TCP communication using Siemens S7-1200 PLC for batch process. In: 2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM). IEEE, 2015. p. 258-263.

TANENBAUM, A.S. *Redes de Computadores*. Tradução da Quarta Edição, (tradução Vandenberg D. Souza). Rio de Janeiro, 2003.

TURCATO, Afonso Celso et al. *Ataque denial of service em redes Profinet: estudo de caso*. Anais, 2015.

VICENTE, Décio Tomasulo de. *Aplicação dos padrões da norma IEC 61850 a subestações compartilhadas de transmissão/distribuição de energia elétrica*. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

YEH, Tzu-Han et al. *Conformance test for IEDs based on IEC 61850 communication protocol*. Journal of Power and Energy Engineering, v.3, n.04, p. 289, 2015.

ZANCAN, Marcos Daniel. *Controladores Programáveis*. 2016.

ANEXOS

Anexo 1 – Definição dos Típicos

SINAIS PARA PROCESSO					
BI	Sinal	Típico 4.16kV	Típico 13.8kV	Tamanho	BIT
COM_101.BI1	Disjuntor Aberto	MVGGIO1	MVGGIO1	32 bits, 2 palavras	IN1
COM_101.BI2	Disjuntor Fechado				IN2
COM_101.BI3	Disjuntor Teste				IN3
COM_101.BI4	Disjuntor Inserido				IN4
COM_101.BI5	Disjuntor Extraído				IN5
COM_101.BI6	Mola Carregada				IN6
COM_101.BI7	Def Int Cub Vizinho				IN7
COM_101.BI8	Chave Local (Painel)				IN8
COM_101.BI9	Chave Remoto (Painel)				IN9
COM_101.BI10	Chave Liga (Permite só na Posição Teste)				IN10
COM_101.BI11	Secc Fechada				IN11
COM_101.BI12	Secc Aberta				IN12
COM_101.BI13	Disj Coimandos Desligados				IN13
COM_101.BI14	Intenção de Operação (BLOQUEADO por Ficha)				IN14
BIO_3.BI1	Botão Emergência				IN15
BIO_3.BI2	Comando PLX				IN16
BIO_3.BI3	Disj Circ Comando (4.16kV)/Equiptos (13,8kV)	MVGGIO2	MVGGIO2	32 bits, 2 palavras	IN1
BIO_3.BI4	Disj Motor Ext e Mola				IN2
BIO_3.BI5	(DJ Fechado /Porta Aberta/Local/Alavanca Inserção				IN3
BIO_3.BI6	Chave Desliga (Permite só na Posição Teste)				IN4
BIO_3.BI7	Emergência Campo				IN5
BIO_3.BI8	Motor Alarme RTD				IN6

BIO_3.BI9	Motor Trip RTD				IN7
BIO_4.BI1	Disj TP IED				IN8
BIO_4.BI2	VARIX				IN9
BIO_4.BI3	VARIX				IN10
BIO_4.BI4	VARIX				IN11
BIO_4.BI5	VARIX				IN12
BIO_4.BI6	VARIX				IN13
BIO_4.BI7	VARIX				IN14
BIO_4.BI8	Reserva				IN15
BIO_4.BI9	Def Int REA				IN16
Proteções	46 Sequência Negativa ou falta de fase	MVGGIO3	MVGGIO3	32 bits, 2 palavras	IN1
	50/51 Sobrecorrente				IN2
	27 - Subtensão				IN3
	37 Subcorrente				IN4
	47				IN5
	50/51				IN6
	50/51GS				IN7
	59				IN8
	49M Bloqueio com REARME				IN9
	66 – Bloqueio sem REARME				IN10
	86 com REARME				IN11
	51LR				IN12
	Reserva				IN13
50 BF	IN14				
Permissão_Int	Pronto para Abrir Disjuntor				IN15
Permissão_int	Pronto para Fechar Disjuntor				IN16
Medição	Corrente A (A)	CPHMMXU	CPHMMXU	32 bits, 2 palavras	-
	CANCELADO			NA	-
	CANCELADO			NA	-

	Potência Ativa Trifásica (W)	PWRMMXU	PWRMMXU	32 bits, 2 palavras	-
	Energia Fornecida Trifásica (kWh)	MVGGIO4	MVGGIO4	32 bits, 2 palavras	-
	Colling Time - Tempo de resfriamento	MPTR1	MPTR1	32 bits, 2 palavras	-
	Time to Restart - Tempo para partida	STTPMRI1	STTPMRI1	32 bits, 2 palavras	-
Comando	Comando Abrir	SPC8GGIO1	SPC8GGIO1	1 Palavra 11 bits	-
	Comando Abrir (Origem)	SPC8GGIO1	SPC8GGIO1	1 Palavra 11 bits	Set to 6
	Comando Abrir (Check)	SPC8GGIO1	SPC8GGIO1	1 Palavra 11 bits	-
	Comando Fechar	SPC8GGIO2	SPC8GGIO2	1 Palavra 11 bits	-
	Comando Fechar (Origem)	SPC8GGIO2	SPC8GGIO2	1 Palavra 11 bits	Set to 3
	Comando Fechar (Check)	SPC8GGIO2	SPC8GGIO2	1 Palavra 11 bits	-
	Comando Watchdog	SPC8GGIO4	SPC8GGIO4	1 Palavra 11 bits	-
	Comando Watchdog (Origem)	SPC8GGIO4	SPC8GGIO4	1 Palavra 11 bits	Set to 6
	Comando Watchdog (Check)	SPC8GGIO4	SPC8GGIO4	1 Palavra 11 bits	-