

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Estudo do Padrão de Comunicação  
Ethernet-APL**

**Milene Santos Moreira**

Agosto de 2024.

Itajubá – MG.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Milene Santos Moreira**

**Estudo do Padrão de Comunicação  
Ethernet-APL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais

Orientador: Prof. Ph.D. Tales Cléber Pimenta.

Coorientador: Prof. Ph.D. Alexandre Baratella Lugli.

Agosto de 2024.

Itajubá - MG.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte inesgotável de sabedoria e força, por guiar meus passos ao longo desta jornada de pesquisa e aprendizado. Sua graça e orientação foram fundamentais para minha perseverança e dedicação.

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador de mestrado, o Prof. Ph.D. Tales Cléber Pimenta, pela sua orientação sábia, incentivo constante e comprometimento com a excelência acadêmica. Também agradeço ao meu coorientador, o Prof. Ph.D. Alexandre Baratella Lugli, por sua valiosa contribuição para o desenvolvimento deste estudo.

À minha amada família, meu eterno agradecimento. À minha mãe, Maria Celma dos Santos e ao meu pai, Pedro Gomes Moreira, pela inabalável confiança e apoio incondicional. À minha irmã, Michele Santos Moreira, pelo incentivo constante e compreensão nas horas mais desafiadoras.

Aos colegas de trabalho da empresa SENSE Eletrônica Ltda., em especial ao Júlio Arlindo Pinto Azevedo, meu sincero agradecimento. Sua expertise em áreas classificadas, normas e seu papel como Coordenador da Comissão de Estudos 003.031.004 sobre Equipamentos Intrinsecamente Seguros do Subcomitê SCB 003.031 de atmosferas explosivas e Secretário da Comissão de Estudo 003.065.001 sobre Medição, Controle e Automação de Processos Industriais ambas da ABNT/CB003 (eletricidade), foram fundamentais desde a escolha do tema até a conclusão desta dissertação.

Agradeço ao Sérgio Augusto Bertoloni pela significativa contribuição, tanto na aquisição dos equipamentos necessários para os testes quanto no compartilhamento valioso de conhecimento.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, meu reconhecimento pela contribuição financeira que viabilizou este projeto.

À UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, e ao Inatel – Instituto Nacional de Telecomunicações, meu agradecimento pela estrutura acadêmica e pelo acesso ao laboratório de Redes Industriais, o que foi essencial para o desenvolvimento deste estudo.

Cada um de vocês desempenhou um papel crucial no meu percurso

acadêmico e por isso, expresso minha mais profunda gratidão. Este trabalho não seria possível sem a colaboração e apoio de cada um de vocês. Muito obrigada.

## RESUMO

A migração para padrões baseados em Ethernet nas redes industriais está crescendo, impulsionada pela Internet das Coisas – IoT – e pela Internet Industrial das Coisas – IIoT. No entanto, a adaptação da Ethernet para ambientes industriais, caracterizados por vibrações, partículas e ruídos eletromagnéticos, exige soluções que garantam comunicação eficaz e segurança. O padrão Ethernet-APL surgiu para atender a essas exigências, especialmente em ambientes de automação de processos industriais onde atmosferas potencialmente explosivas são comuns, como nas indústrias de petróleo, gás, açúcar e álcool. Este estudo realiza uma análise detalhada do padrão Ethernet-APL, comparando-o com os protocolos HART e PROFIBUS-PA e destacando suas características e limitações.

A pesquisa inclui uma aplicação prática de monitoramento de temperatura, utilizando um analisador de rede para capturar telegramas de comunicação e um servidor web para a parametrização e monitoramento das variáveis do sistema. A integração de TA – Tecnologia da Automação – com a TI – Tecnologia da Informação – é demonstrada pela utilização de um servidor web.

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo aprofundado do padrão de comunicação Ethernet-APL, abordando todos os pontos de interesse em um contexto laboratorial, com foco específico no monitoramento de temperatura e sem a avaliação de todas as variáveis. A comunicação da rede será validada por meio da análise de telegramas utilizando um analisador de rede gratuito, o que impõe algumas limitações. Avaliações de custo do projeto não foram realizadas. Além disso, a segurança e a confiabilidade da rede necessitam de mais investigação.

O padrão Ethernet-APL será comparado com redes projetadas para atmosferas potencialmente explosivas, demonstrando seu funcionamento prático com elementos reais de comunicação. A pesquisa destacará a configuração por meio do software TIA Portal, a parametrização e o diagnóstico da rede utilizando o servidor web, e a análise da comunicação e do desempenho de velocidade por meio do software Wireshark.

**Palavras-chave** – *Automação Industrial, Áreas Classificadas, Ethernet-APL, Redes Industriais, Segurança Intrínseca.*

## **ABSTRACT**

*The migration to Ethernet-based standards in industrial networks is growing, driven by the Internet of Things (IoT) and the Industrial Internet of Things (IIoT). However, adapting Ethernet for industrial environments, characterized by vibrations, particles, and electromagnetic noise, requires solutions that ensure effective communication and safety. The Ethernet-APL standard has emerged to meet these requirements, particularly in industrial process automation environments where potentially explosive atmospheres are common, such as in the oil, gas, sugar, and alcohol industries.*

*This study conducts a detailed analysis of the Ethernet-APL standard, comparing it with the HART and PROFIBUS-PA protocols, and highlighting its characteristics and limitations. The research includes a practical application for temperature monitoring, using a network analyzer to capture communication telegrams and a web server for parameterization and monitoring of system variables. The integration of OT (Operational Technology) with IT (Information Technology) is demonstrated through the use of a web server.*

*The aim of this work is to conduct an in-depth study of the Ethernet-APL communication standard, covering all points of interest in a laboratory context, with a specific focus on temperature monitoring without evaluating all variables. Network communication will be validated by analyzing telegrams using a free network analyzer, which imposes some limitations. Cost evaluations of the project were not conducted. Furthermore, the safety and reliability of the network require further investigation.*

*The Ethernet-APL standard will be compared with networks designed for potentially explosive atmospheres, demonstrating its practical operation with real communication elements. The research will highlight configuration using the TIA Portal software, network parameterization and diagnostics using the web server, and communication and speed performance analysis through Wireshark software.*

**Keywords** – *Industrial Automation, Classified Areas, Ethernet-APL, Industrial Networks, Intrinsic Safety.*

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	I
RESUMO .....	III
ABSTRACT.....	V
SUMÁRIO .....	VI
LISTA DE FIGURAS .....	IX
LISTA DE TABELAS .....	XII
LISTA DE SIGLAS .....	I
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>2</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA.....	2
1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	3
1.3. LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	3
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.5. TRABALHOS RELACIONADOS .....	4
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>11</b>
2.1. AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL.....	11
2.2. PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL.....	13
2.3. CLASSIFICAÇÃO DAS REDES INDUSTRIAIS .....	13
2.3.1. MEIOS FÍSICOS DE TRANSMISSÃO.....	14
2.3.2. TOPOLOGIA FÍSICA .....	15
2.3.3. CONTROLE DE ACESSO AO MEIO DE TRANSMISSÃO.....	17
2.3.4. MÉTODO DE TROCA DE DADOS .....	17
2.3.5. VELOCIDADE DA REDE .....	18
2.3.6. MODO DE OPERAÇÃO .....	18
2.3.7. TIPOS DE REDES INDUSTRIAIS .....	18
2.4. REDES ETHERNET .....	19
2.4.1. EXPLORANDO A ARQUITETURA DE PROTOCOLOS .....	21
2.4.2. CAMADAS DO MODELO OSI.....	21
2.4.3. PROFINET .....	23
2.4.4. ETHERNET/IP .....	24
2.4.5. ETHERCAT .....	25
2.4.6. POWERLINK .....	26
2.4.7. MODBUS TCP.....	26

2.5. ÁREAS CLASSIFICADAS.....	27
2.5.1. SEGURANÇA INTRÍNSECA: MITIGAÇÃO DE RISCOS EM ÁREAS CLASSIFICADAS.....	28
<b>3. PADRÃO ETHERNET-APL .....</b>	<b>31</b>
3.1. INTRODUÇÃO À REDE ETHERNET-APL.....	31
3.2. NORMA IEEE STD 802.3CG (10BASE-T1L) .....	33
3.3. NORMA IEC TS 63444 - REDES INDUSTRIAIS DE COMUNICAÇÃO - ESPECIFICAÇÃO DE PORTAS ETHERNET COM PERFIL ETHERNET-APL	34
3.3.1. CLASSIFICAÇÃO DAS PORTAS.....	34
3.3.2. CONEXÃO PARA A REDE ETHERNET-APL.....	40
3.3.3. CONECTORES M12/M8 .....	41
3.3.4. BLOCOS TERMINAIS MODULARES.....	43
3.4. NORMA ABNT IEC TS 60079-47: PROTEÇÃO DE EQUIPAMENTOS PELO CONCEITO DA ETHERNET INTRINSECAMENTE SEGURA A DOIS FIOS (2-WISE) .....	45
3.4.1. DEFINIÇÕES .....	45
3.4.2. REQUISITOS PARA DISPOSITIVOS 2-WISE.....	46
3.4.3. REQUISITOS PARA SISTEMAS 2-WISE .....	48
3.5. COMPONENTES DA REDE ETHERNET-APL .....	51
3.5.1. TIPOS DE DISPOSITIVOS DE CAMPO .....	51
3.5.2. TIPOS DE DISPOSITIVOS ETHERNET-APL.....	52
3.5.3. PORTAS DA REDE ETHERNET-APL.....	53
3.5.4. TIPOS DE CABOS PARA REDES ETHERNET-APL.....	55
3.5.5. CONEXÕES LINEARES E DISPOSITIVOS AUXILIARES.....	56
3.6. POSSÍVEIS TOPOLOGIAS EM UM SISTEMA ETHERNET-APL ....	57
3.6.1. TOPOLOGIA COM SWITCHES DE CAMPO E CONEXÃO ETHERNET INDUSTRIAL .....	58
3.6.2. TOPOLOGIA COM TRONCO ETHERNET-APL.....	59
3.7. MODULAÇÃO PAM-3 PARA ETHERNET-APL .....	59
3.7.1. MODULAÇÃO <i>FULL DUPLEX</i> EM DOIS FIOS.....	60
<b>4. COMPARAÇÃO DAS REDES INDUSTRIAIS PARA ÁREAS CLASSIFICADAS .....</b>	<b>62</b>
4.1. DESEMPENHO DA REDE.....	62
4.2. DISTÂNCIA MÁXIMA DE CABO.....	62

4.3. FAIXA DE ALIMENTAÇÃO .....	63
4.4. QUANTIDADE MÁXIMA DE DISPOSITIVOS.....	63
4.5. POSSÍVEIS TOPOLOGIAS.....	64
4.6. APLICAÇÕES EM ÁREAS CLASSIFICADAS E TIPOS DE ÁREAS	65
<b>5. APLICAÇÃO PRÁTICA ENVOLVENDO ETHERNET-APL.....</b>	<b>67</b>
5.1. DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO .....	67
5.2. DIAGRAMA EM BLOCOS.....	67
5.3. DISPOSITIVOS UTILIZADOS.....	68
5.4. TOPOLOGIA.....	69
5.5. MONTAGEM FÍSICA E CONFIGURAÇÃO DA APLICAÇÃO .....	70
5.6. CONFIGURAÇÃO DA REDE .....	75
5.7. MONITORAMENTO.....	76
<b>6. RESULTADOS.....</b>	<b>83</b>
<b>7. CONCLUSÃO .....</b>	<b>84</b>
7.1. TRABALHOS FUTUROS .....	85
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>86</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Demonstração de um sistema tradicional ponto a ponto com CLP. [2][3].....	12
Figura 2-2 - Um dos tipos de ligações das redes industriais. [2][3] .....	12
Figura 2-3 - Topologia em barramento [4]......	15
Figura 2-4 - Topologia em anel [4]. .....	15
Figura 2-5 - Topologia em estrela [4]. .....	16
Figura 2-6 - Topologia em linha [4].....	16
Figura 2-7 - Topologia mista [4]......	17
Figura 2-8 - Modo de operação <i>simplex</i> [8][9]......	18
Figura 2-9 - Modo de operação <i>half-duplex</i> [8][9]......	18
Figura 2-10 - Modo de operação <i>full-duplex</i> [8][9]......	18
Figura 2-11 - Estrutura do endereço MAC [11]......	20
Figura 2-12 - Quadro Ethernet. [11] .....	21
Figura 2-13 – Síntese das camadas do modelo OSI.....	23
Figura 2-14 - Conceito de entidade [17]. .....	30
Figura 3-1 - Pilha de protocolo ISO/OSI de Ethernet [20][21][22][23]......	31
Figura 3-2 - Diferenças entre Ethernet Industrial e Ethernet-APL [20][21][22][23]. .....	32
Figura 3-3 - Classes de portas e opções relacionadas [21]. .....	35
Figura 3-4 - Segmento tronco alimentado com porta cascata [21]......	37
Figura 3-5 - Exemplo de combinação de classe de porta entre fonte de alimentação e carga [21]......	38
Figura 3-6 - Exemplo de classe de proteção intrinsecamente segura correspondente à classe de porta e classe de potência [21]......	40
Figura 3-7 – Exemplo de combinação das classes de portas Ethernet-APL e dos tipos de conectores [21]. .....	42
Figura 3-8 - Atribuição dos pinos dos conectores de plugue e soquete M8 com código A [21]. .....	43
Figura 3-9 - Atribuição dos pinos de conectores de plugue e soquete M12 com código A [21]. .....	43

Figura 3-10 - Exemplos: bloco terminal modular de 3 pinos, 4 pinos e 6 pinos, e bloco terminal PCI de 3 pinos [21]. .....	45
Figura 3-11 - Portas de dispositivos auxiliares 2-WISE conectadas por meio de fios curtos (derivações) ao cabo do sistema [22]. .....	49
Figura 3-12 - Portas de dispositivo auxiliares 2-WISE conectadas por meio de conexão em série no cabo do sistema [22]. .....	50
Figura 3-13 - Portas de dispositivo auxiliares 2-WISE conectadas em paralelo por meio de fios curtos (derivações) ao cabo do sistema [22]. .....	50
Figura 3-14 - Portas de dispositivos auxiliares 2-WISE conectadas por meio de uma conexão série ao cabo do sistema [22]. .....	51
Figura 3-15 - Estrutura da rede Ethernet-APL com tronco e derivações [20][21][22][23]. .....	54
Figura 3-16 - Cabo <i>Fieldbus</i> tipo A para segmentos Ethernet-APL intrinsecamente seguros na cor azul-claro [20][21][22][23]. .....	55
Figura 3-17 - Cabo <i>Fieldbus</i> tipo A para outros segmentos Ethernet-APL na cor laranja [20][21][22][23]. .....	56
Figura 3-18 - Exemplo de sistema Ethernet-APL com dispositivos auxiliares e conexões em linha [20][21][22][23]. .....	57
Figura 3-19 - Localização de dispositivos de campo e <i>switches</i> de campo [20][21][22][23]. .....	58
Figura 3-20 - <i>Switches</i> de campo com conexão Ethernet industrial [20][21][22][23]. .....	59
Figura 3-21 - Modulação PAM-3 para Ethernet-APL [20][21][22][23]. .....	60
Figura 5-1 - Diagrama em blocos. ....	68
Figura 5-2 - Montagem Física no Laboratório de Redes Industriais do Inatel. .	72
Figura 5-3 - Tela inicial do projeto. ....	73
Figura 5-4 - Diagrama em Blocos. ....	73
Figura 5-5 - Endereços de rede configurados. ....	74
Figura 5-6 - Rede de controle em operação. ....	74
Figura 5-7 - Tabela das temperaturas medidas em tempo real. ....	75
Figura 5-8 - Diagnóstico da rede Ethernet. ....	77
Figura 5-9 - Gráfico gerado do consumo temporal da rede Ethernet-APL. ....	78
Figura 5-10 - Tela inicial do servidor web do transmissor de temperatura. ....	79

Figura 5-11 - Servidor web demonstrando os tipos de conexões disponíveis para o transmissor de temperatura. ....	79
Figura 5-12 - Servidor web demonstrando as unidades de medida de temperatura possíveis do transmissor de temperatura.....	80
Figura 5-13 - Servidor web demonstrando a medida do sensor de temperatura PT100 em °C conectado no transmissor de temperatura.....	81
Figura 5-14 - Servidor web demonstrando os tipos possíveis de sensores de temperatura para conexão no transmissor de temperatura.....	81
Figura 5-15 - Servidor web na tela de configurações do transmissor de temperatura.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 - Trabalhos relacionados.....	5
Tabela 2-1 - Tipos de classificação das redes industriais [6]. .....	14
Tabela 2-2 - Classificação em níveis de probabilidade de ocorrência de uma mistura explosiva [18].....	28
Tabela 3-1 – Classe de segmentos [21].....	36
Tabela 3-2 – Classes de portas [21].....	36
Tabela 3-3 - Classes de portas e combinações permitidas [21]. .....	37
Tabela 3-4 - Classes de proteção intrinsecamente seguras [21].....	39
Tabela 3-5 - Requisitos elétricos para os blocos terminais e conectores [21]. .	41
Tabela 3-6 - Atribuições de pinos para conectores de plugue e soquete M8/M12 com código A [21]. .....	43
Tabela 3-7 - Atribuições de pinos para bornes de 3 posições [21].....	44
Tabela 3-8 - Atribuições de pinos para bornes de 4 posições [21].....	44
Tabela 3-9 - Alocações de bornes para blocos terminais de 6 bornes [21].....	44
Tabela 3-10 - Parâmetros intrinsecamente seguros para portas de carga 2-WISE e portas de dispositivos auxiliares 2-WISE [22]. .....	47
Tabela 3-11 - Parâmetros intrinsecamente seguros para portas 2-WISE somente para comunicação [22].....	48
Tabela 3-12 - Características dos dispositivos de campo Ethernet-APL [20][21][22][23]. .....	51
Tabela 3-13 - Tipos de dispositivos Ethernet-APL [20][21][22][23].....	52
Tabela 3-14 - Comprimentos máximos de cabo permitidos de acordo com a categoria de cabo Ethernet-APL [20][21][22][23]. .....	55
Tabela 3-15 - Número máximo de dispositivos auxiliares e conexões em linha por segmento [20][21][22][23]. .....	56
Tabela 4-1 - Comparação das redes industriais para áreas classificadas [2][23][24]. .....	66
Tabela 5-1 - Descrição dos dispositivos utilizados no sistema descrito nesta dissertação.....	68
Tabela 5-2 - Nome e IP dos dispositivos da rede Ethernet-APL. ....	71

## LISTA DE SIGLAS

2-WISE	<i>2-Wire Intrinsically Safe Ethernet</i>
CI	<i>ControlNet International Ltd</i>
CIP	<i>Common Industrial Protocol</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	Unidade Central de Processamento
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
Ethernet-APL	<i>Ethernet Advaced Physical Layer</i>
EPL	<i>Equipment Protection Leve</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
Gbps	Giga bits por segundo
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
Industria 4.0	Quarta Revolução Industrial
IIoT	Internet das Coisas Industrial
I/O	Portas de entrada e saída ( <i>in/out</i> )
LAN	<i>Local Area Networks</i>
MAC	<i>Media Access Controll</i>
Mbps	Mega bits por segundo
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
PoDL	<i>Power over Data Lines</i>
ODVA	<i>Open DeviceNet Vendor Association</i>
OPC UA	<i>OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control Unified Architecture</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
OUI	<i>Organizationally Unique Identifier</i>
PROFINET	<i>Process Field Network</i>
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SOF	<i>Start of frame</i>
TA	Tecnologia da Automação
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TI	Tecnologia da Informação
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem sido testemunhada uma evolução no campo da automação industrial, impulsionada pela crescente demanda por eficiência, interoperabilidade e segurança nos processos industriais. Nesse cenário, a convergência entre tecnologias de rede e automação desempenha um papel crucial na transformação digital das indústrias.

O padrão de comunicação Ethernet-APL emerge como uma tecnologia promissora que busca atender às demandas específicas da automação industrial, combinando os benefícios das redes Ethernet com os requisitos de ambientes industriais adversos. Projetado para suportar aplicações exigentes, como controle de processos em tempo real e comunicação de alta velocidade, o Ethernet-APL apresenta características que a tornam uma escolha atrativa para a modernização de redes industriais.

Nesta dissertação, é explorado o papel do Ethernet-APL como uma solução para os desafios enfrentados na automação industrial. Investigam-se sua arquitetura, protocolos e capacidades, bem como seu potencial para impulsionar a eficiência operacional e a flexibilidade nos ambientes industriais.

### 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA

A crescente complexidade dos processos industriais e a demanda por maior conectividade e integração impulsionam a busca por soluções de rede mais avançadas e robustas. Nesse contexto, o Ethernet-APL surge como uma resposta às necessidades específicas da indústria, oferecendo uma infraestrutura de comunicação confiável, escalável e interoperável.

Compreender os fundamentos do Ethernet-APL e sua aplicação prática é essencial para profissionais e pesquisadores que buscam otimizar operações industriais, garantir a segurança cibernética e promover a inovação tecnológica. Esta dissertação visa preencher essa lacuna de conhecimento, fornecendo uma análise da tecnologia Ethernet-APL e suas implicações para a automação industrial.

## **1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO**

Os objetivos desta dissertação são investigar os princípios e características fundamentais do Ethernet-APL, incluindo sua arquitetura, protocolos e requisitos de implementação. Avaliar as vantagens e desafios da adoção do Ethernet-APL em ambientes industriais, destacando suas capacidades de suporte a aplicações críticas.

Além disso, explorar casos de uso e exemplos de implementação do Ethernet-APL em cenários industriais reais, identificando melhores práticas e lições aprendidas. Por fim, propor recomendações e diretrizes para a implementação bem-sucedida do Ethernet-APL em ambientes industriais, visando otimizar desempenho, segurança e interoperabilidade.

## **1.3. LIMITAÇÕES DA PESQUISA**

Esta pesquisa se concentrou na aplicação do Ethernet-APL para o monitoramento de temperatura em ambientes industriais, destacando suas vantagens e a viabilidade de sua implementação. No entanto, algumas limitações devem ser consideradas para uma compreensão completa dos resultados.

A avaliação do desempenho do Ethernet-APL foi focada principalmente em taxa de transmissão e tráfego de rede. Aspectos como consumo energético e comportamento sob condições extremas não foram explorados, deixando em aberto como a rede se comportaria em um cenário de produção real.

Além disso, a implementação do Ethernet-APL foi validada por meio da análise dos telegramas de comunicação capturados pelo analisador de rede. No entanto, a pesquisa não incluiu uma validação extensiva em diferentes tipos de áreas classificadas ou sob diversas condições operacionais, o que pode limitar a generalização dos resultados.

Por fim, embora a Ethernet-APL traga avanços significativos para a automação industrial, a compatibilidade com sistemas legados e a necessidade de integração com infraestruturas de rede existentes podem representar desafios não cobertos nesta pesquisa.

---

Estas limitações devem ser levadas em conta ao interpretar os resultados desta pesquisa e oferecem um ponto de partida para futuras investigações que visem aprofundar o entendimento e a aplicação da Ethernet-APL em cenários industriais mais amplos e diversificados.

#### **1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica, abordando conceitos relevantes sobre automação industrial, protocolos de comunicação industrial, características e classificação das redes industriais.

O Capítulo 3 explora o padrão Ethernet-APL em detalhes, incluindo sua normatização, componentes da rede, práticas recomendadas e fundamentos de topologias.

No Capítulo 4, é realizada uma comparação das redes industriais para áreas classificadas.

O Capítulo 5 apresenta um estudo de caso prático.

Os resultados são discutidos no Capítulo 6.

Finalmente, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

Ao final deste estudo, espera-se contribuir para o entendimento e a aplicação do padrão Ethernet-APL na automação industrial, fornecendo subsídios para profissionais, acadêmicos e empresas do setor.

#### **1.5. TRABALHOS RELACIONADOS**

A revisão dos trabalhos relacionados fornece uma compreensão crítica dos avanços e desafios nas redes de comunicação industrial, com ênfase nas soluções aplicáveis a áreas classificadas e ambientes industriais exigentes. Este subcapítulo examina contribuições que exploram a aplicação da tecnologia Ethernet e suas variações no contexto da automação industrial. Entre os trabalhos destacados, encontram-se os de Alexandre Baratella Lugli, que discutem a aplicação de redes como AS-I, PROFIBUS, PROFINET e Ethernet Industrial, além de estudos que abordam as normas de segurança intrínseca e

os padrões de comunicação, como a IEC TS 63444 e a ABNT IEC/TS 60079-47, essenciais para garantir a operação segura das redes Ethernet-APL em atmosferas explosivas. A seguir, tem-se a Tabela 1-1, a qual explica o conteúdo específico de cada trabalho que foi utilizado como referência para esta dissertação.

Tabela 1-1 - Trabalhos relacionados.

Título	Autores/Organização	Descrição
Ethernet Industrial	Ronaldo Teixeira Couto	Aborda a aplicação da tecnologia Ethernet no contexto industrial, destacando suas vantagens e desafios na implementação em redes de automação.
Redes Industriais para Automação Industrial: AS-I, PROFIBUS e PROFINET	Alexandre Baratella Lugli e Max Mauro Dias Santos	Compara diferentes redes industriais, enfatizando as características e aplicações dos protocolos AS-I, PROFIBUS e PROFINET na automação industrial.
Redes Industriais: Características, Padrões e Aplicações	Alexandre Baratella Lugli e Max Mauro Dias Santos	Oferece uma visão abrangente das características, padrões e aplicações das redes industriais, destacando vantagens e limitações de cada tecnologia.
<i>Industrial Communication Technology Handbook</i>	Richard Zurawski	Fornece um panorama detalhado das tecnologias de comunicação industrial, explorando fundamentos e aplicações avançadas em diferentes contextos.

<i>The Industrial Electronics Handbook: Industrial Communication Systems</i>	Bogdan M. Wilamowski e J. David Irwin	Detalha os sistemas de comunicação em eletrônica industrial, incluindo princípios de operação, tecnologias e aplicações práticas.
<i>Fieldbus and Networking in Process Automation</i>	Sunit Kumar Sen	Explora as redes Fieldbus e sua aplicação na automação de processos, incluindo especificações técnicas, configurações e exemplos práticos.
<i>Network Media (The Physical Layer)</i>	Cisco Press	Aborda os meios físicos utilizados para a transmissão de dados nas redes de comunicação, com foco na camada física das redes Ethernet e suas aplicações industriais.
<i>A Comprehensible Guide to Industrial Ethernet</i>	Wilfried Voss	Fornece uma análise compreensível sobre a tecnologia Ethernet e sua aplicação no ambiente industrial, incluindo princípios, vantagens e desafios.
<i>Industrial Network Security: Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and</i>	Eric D. Knapp e Joel Thomas Langill	Foca na segurança das redes de comunicação industrial, especialmente na proteção de infraestruturas críticas como <i>Smart Grid</i> e SCADA contra ameaças cibernéticas.

<i>Other Industrial Control Systems</i>		
<i>Networking Fundamentals</i>	Gordon Davies	Apresenta os fundamentos das redes de comunicação, incluindo conceitos essenciais sobre Ethernet e sua aplicação em ambientes industriais.
Comunicação Industrial com o PROFINET	Manfred Popp	Destaca a tecnologia PROFINET e sua aplicação na comunicação industrial, enfatizando suas características e benefícios na automação de processos.
<i>Ethernet: The Definitive Guide</i>	Charles E. Spurgeon e Joann Zimmerman	Fornece uma visão abrangente sobre a tecnologia Ethernet, incluindo princípios, padrões e aplicações na comunicação de dados.
<i>Industrial Communication with PROFINET</i>	Manfred Popp	Aborda a utilização da tecnologia PROFINET na comunicação industrial, destacando vantagens e desafios na automação de processos.
<i>EtherNet/IP: The Everyman's Guide to EtherNet/IP</i>	John S. Rinaldi e Jamin Wendorf	Oferece uma visão prática e acessível sobre a tecnologia EtherNet/IP e sua aplicação na comunicação industrial, incluindo princípios e benefícios.
<i>EtherCAT: the Ethernet Fieldbus</i>	<i>EtherCAT Technology Group</i>	Destaca a tecnologia EtherCAT e sua aplicação na comunicação industrial, abordando vantagens

		e desafios na automação de processos.
<i>MODBUS: The Everyman's Guide to a Protocol That Has Stayed Relevant in Automation for Over 30 Years</i>	John S. Rinaldi	Fornece uma visão prática e compreensível sobre o protocolo MODBUS e sua relevância contínua na automação industrial.
Manual de Segurança Intrínseca Ex i: do Projeto à Instalação	Giovanni Hummel Borges	Aborda os princípios e práticas da segurança intrínseca na instalação de equipamentos elétricos em áreas classificadas, destacando normas e diretrizes para garantir a segurança em ambientes potencialmente explosivos.
NBR IEC 60079-14 Atmosferas Explosivas - Parte 14: Projeto, Seleção e Montagem de Instalações Elétricas	Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)	Destaca normas e diretrizes para o projeto, seleção e montagem de instalações elétricas em atmosferas explosivas, incluindo requisitos de segurança para equipamentos e sistemas elétricos.
NFPA 70: NEC 2011	<i>National Fire Protection Association (NFPA)</i>	Fornece normas de segurança elétrica para instalações em áreas classificadas, com diretrizes e requisitos para garantir a segurança em ambientes industriais com risco de explosão.

<p><i>IEEE Standard for Ethernet - Amendment 5: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Mb/s Operation and Associated Power Delivery over a Single Balanced Pair of Conductors, IEEE Std 802.3cg™ - 2019</i></p>	<p>IEEE</p>	<p>Aborda as especificações da camada física e os parâmetros de gerenciamento para a operação de Ethernet a 10 Mbps sobre um único par de condutores balanceados, destacando inovações e aplicações na comunicação industrial.</p>
<p><i>IEC TS 63444 - Industrial networks – Ethernet-APL Port Profile Specification</i></p>	<p>IEC</p>	<p>Fornecer diretrizes para as especificações das portas Ethernet no contexto do perfil Ethernet-APL, incluindo orientações para a implementação e utilização na comunicação industrial.</p>
<p>ABNT IEC/TS 60079-47 - Atmosferas Explosivas Parte 47: Proteção de Equipamentos pelo Conceito da Ethernet Intrinsecamente</p>	<p>ABNT</p>	<p>Aborda a proteção de equipamentos pelo conceito da Ethernet intrinsecamente segura a dois fios (2-WISE), destacando normas e diretrizes para garantir a segurança em áreas classificadas.</p>

---

Segura a Dois Fios (2-WISE)		
<i>Engineering Guideline Ethernet-APL: Planning, Installation and Commissioning of Ethernet-APL Networks</i>	Karl-Heinz Niemann	Fornece diretrizes para o planejamento, instalação e comissionamento de redes Ethernet-APL, oferecendo orientações práticas para a implementação dessa tecnologia na automação industrial.
<i>HART Communication Application Guide</i>	<i>HART Communication Foundation</i>	Aborda diretrizes para a aplicação da comunicação HART, fornecendo orientações práticas para a implementação dessa tecnologia na automação industrial.

---

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos básicos necessários para entender o conteúdo desta dissertação. Primeiro, serão explorados os principais conceitos e definições de Automação Industrial, para construir uma base sólida de conhecimento. A partir dessa base, a discussão se voltará para uma análise detalhada das Redes Industriais, focando principalmente nas Redes Industriais Ethernet. Também será feita uma revisão de algumas redes industriais que utilizam a tecnologia Ethernet. Por último, será explicado o conceito de áreas classificadas, mostrando como as Redes Industriais são usadas em locais com riscos específicos.

Esse estudo teórico é crucial para apresentar o estudo do padrão de comunicação para áreas classificadas Ethernet-APL. Considerando que o objetivo desta dissertação é realizar testes para a análise de desempenho, em termos de taxa de transmissão e do tráfego da rede, é importante compreender os conceitos e o funcionamento da mesma. Ao conectar os pontos desde os princípios fundamentais da automação até as aplicações especializadas em áreas classificadas, este capítulo estabelece uma base para a compreensão integral do contexto em que o Ethernet-APL opera.

### 2.1. AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Nas indústrias modernas, as variáveis de processos são controladas por CLP's, SDCD's, computadores de gerenciamento, entre outros. A comunicação entre esses dispositivos é viabilizada por redes industriais, buscando reduzir custos e aumentar a eficiência operacional [1].

Inicialmente, a comunicação entre esses dispositivos ocorria de forma simples, conhecida como "comunicação ponto a ponto", controlada por CLP's. Cada porta de entrada e saída dos sensores analógicos ou digitais era conectada individualmente ao CLP, como ilustrado na Figura 2-1. Essa abordagem demandava uma quantidade significativa de cabos, tornando-se economicamente inviável e dificultando a detecção de problemas no sistema. A modificação das configurações no processo industrial também se tornava complexa, gerando custos adicionais, como a adição de módulos de entrada e

saída no CLP. Foi nesse contexto desafiador que as redes industriais surgiram como solução para esses obstáculos [2][3].

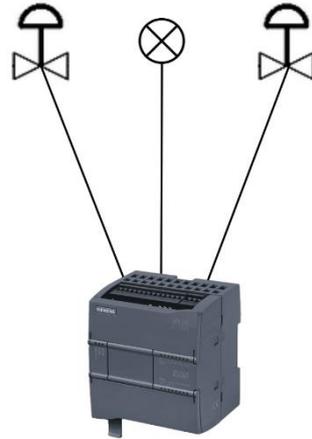


Figura 2-1 - Demonstração de um sistema tradicional ponto a ponto com CLP. [2][3]

A principal vantagem das redes industriais está na capacidade de interconectar dispositivos por meio de apenas uma porta de entrada e saída do CLP, eliminando a necessidade de conexões múltiplas e reduzindo a complexidade do cabeamento. Essas redes desempenham um papel importante na interligação de todos os dispositivos no processo de automação, transportando dados e proporcionando um fluxo de informação em todas as camadas da planta industrial [2][3].

A Figura 2-2 apresenta um exemplo de conexão em redes industriais, destacando a eficiente interconexão de dispositivos utilizando apenas uma única porta de entrada e saída do CLP [2][3].

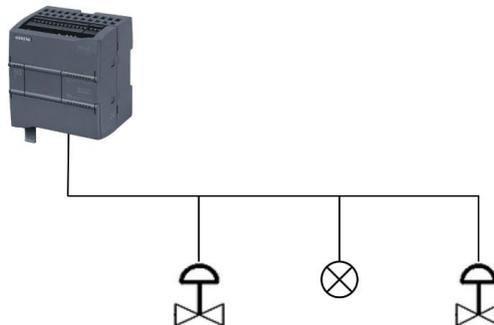


Figura 2-2 - Um dos tipos de ligações das redes industriais. [2][3]

---

## 2.2. PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL

Os protocolos de comunicação industrial representam um conjunto de diretrizes que delinham o modo e os meios pelos quais as mensagens trafegam na rede de comunicação de dados. Essas diretrizes, procedimentos e normativas que regem a troca de informações entre dois ou mais dispositivos são denominados protocolos de comunicação [3][4][5].

O propósito fundamental dos protocolos de comunicação é viabilizar a troca de informações entre dois processos quaisquer dentro de um sistema distribuído. Esses protocolos desempenham uma série de funções vitais, tais como endereçamento, estabelecimento de conexão, confirmação de recebimento, solicitação de retransmissão, conversão de código, numeração e sequenciamento, controle de fluxo, aprimoramento do controle dos instrumentos de campo, ampliação da capacidade do tráfego de informações, disponibilização de mensagens de diagnóstico, configuração remota dos componentes, entre outras [3][4][5].

Os protocolos de comunicação industrial são a “espinha dorsal” que asseguram a integridade e eficiência da troca de informações em ambientes industriais distribuídos. Sua multifuncionalidade contribui não apenas para o estabelecimento robusto de comunicação, mas também para otimizar o controle de processos, diagnosticar falhas e promover uma configuração remota dos componentes do sistema. Este subcapítulo destaca a importância e a diversidade de funções desempenhadas pelos protocolos de comunicação no contexto do meio físico Ethernet-APL, fornecendo uma base para a compreensão mais aprofundada deste estudo [3][4][5].

## 2.3. CLASSIFICAÇÃO DAS REDES INDUSTRIAIS

A compreensão e o dimensionamento das redes industriais demandam critérios essenciais, abrangendo desde os meios físicos de comunicação até a velocidade de comunicação, moldando a escolha do protocolo de comunicação. Estes critérios serão explorados nos subcapítulos subsequentes. A seguir é

apresentada uma síntese das principais categorias de classificação das redes industriais, conforme apresentado na Tabela 2-1 [6].

Tabela 2-1 - Tipos de classificação das redes industriais [6].

Classificação geral das Redes Industriais	
Meios físicos de transmissão	Par trançado Cabo coaxial Fibra ótica Redes sem fio
Topologia física	Barramento Linha Anel Estrela Mista
Controle de acesso ao meio de transmissão	Monomestre Multimestre Produtor consumidor
Método de troca de dados	<i>Pooling</i> Cíclico Mudança de estado <i>Bit-Strobe</i>
Velocidade da rede	Taxa de transmissão
Modo de operação	Simplex Half duplex Full duplex

Com base na Tabela 2-1, nos subcapítulos a seguir, cada uma destas categorias será explorada detalhadamente, discutindo suas implicações práticas e como influenciam na escolha e configuração das redes em ambientes industriais. A análise detalhada ajuda a compreender como cada aspecto da classificação afeta a funcionalidade e eficiência da rede no contexto industrial [6].

### 2.3.1. MEIOS FÍSICOS DE TRANSMISSÃO

A transmissão de dados utiliza meios físicos, sendo o par trançado uma opção adotada. Pares trançados, agrupados em cabos multipares são classificados como blindados ou não [7].

Os cabos coaxiais, resistentes a interferências externas, oferecem maior alcance em relação aos pares trançados. Em contrapartida, o par trançado destaca-se pela facilidade de instalação, custo acessível e ocupação reduzida de espaço [7].

A fibra óptica, transmitindo sinais luminosos em vez de elétricos, destaca-se pela velocidade e imunidade a interferências eletromagnéticas [7].

As redes sem fio utilizam frequências de rádio ou ondas infravermelhas para transmitir dados, eliminando a necessidade de meios físicos e permitindo flexibilidade e expansão em ambientes onde o cabeamento físico é inviável ou indesejável [7].

### 2.3.2. TOPOLOGIA FÍSICA

A topologia física, determinante na escolha do protocolo, refere-se à interligação de elementos na rede. A seleção da topologia influencia diretamente nas características da comunicação e diferentes arranjos podem ser combinados e empregados conjuntamente dentro de uma mesma planta industrial. A seguir, apresentam-se ilustrações das topologias físicas mais comuns [4]:

Topologia em barramento (Figura 2-3): Neste arranjo, todos os dispositivos são conectados a um único meio de transmissão central [4].

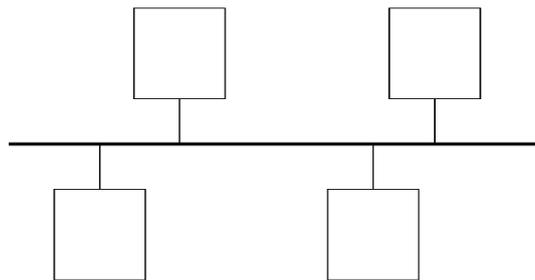


Figura 2-3 - Topologia em barramento [4].

Topologia em anel (Figura 2-4): Cada dispositivo está conectado a dois outros dispositivos formando um círculo. A comunicação ocorre de forma sequencial de um dispositivo para outro [4].

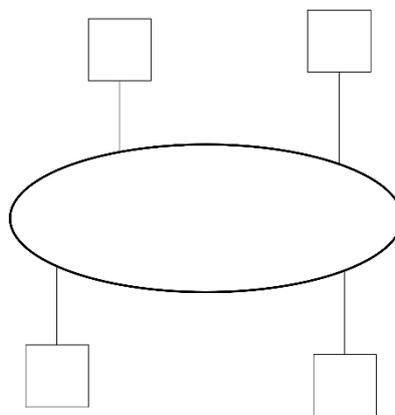


Figura 2-4 - Topologia em anel [4].

Topologia em estrela (Figura 2-5): Todos os dispositivos são conectados a um ponto central, como um *switch* ou *hub*. Isso permite uma melhor gestão do tráfego e facilita a detecção e isolamento de falhas, desde que o ponto central seja um *switch* [4].

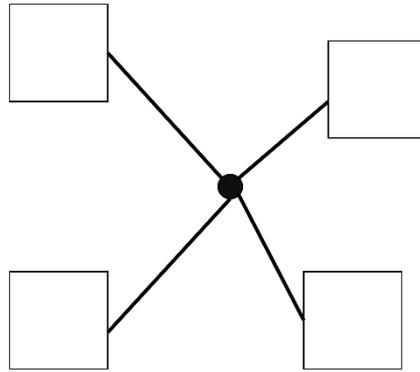


Figura 2-5 - Topologia em estrela [4].

Topologia em linha (Figura 2-6): Similar ao barramento, mas com dispositivos conectados em uma série linear. Esta topologia é simples e costuma ser usada em aplicações menores [4].



Figura 2-6 - Topologia em linha [4].

Topologia mista (Figura 2-7): Combina topologias diferentes para atender a requisitos específicos de uma rede, oferecendo flexibilidade na configuração e expansão [4].

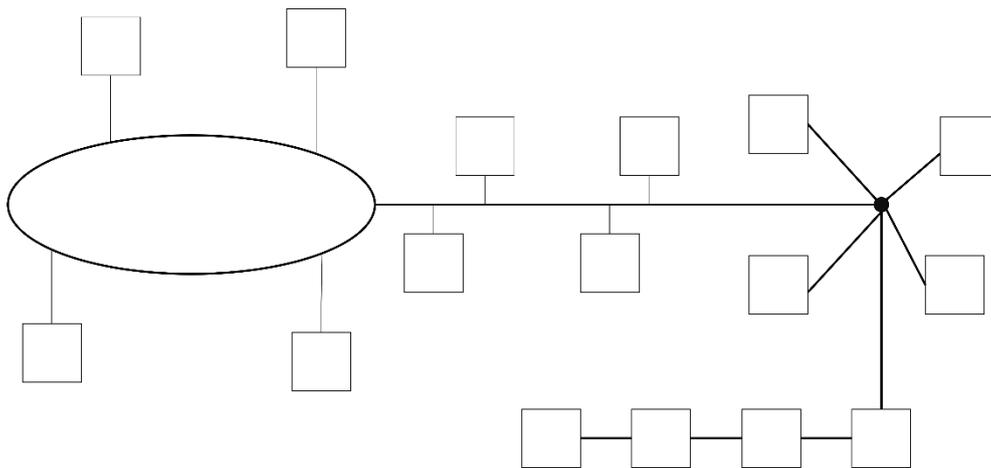


Figura 2-7 - Topologia mista [4].

Essas ilustrações destacam a diversidade de configurações possíveis e sua aplicabilidade em diferentes contextos industriais, enfatizando a importância de escolher a topologia adequada para otimizar a comunicação e operação da rede [4].

### 2.3.3. CONTROLE DE ACESSO AO MEIO DE TRANSMISSÃO

O controle monomestre centraliza as operações sob um único mestre e vários escravos, geralmente utilizando a CPU do CLP como mestre. O controle multimestre, por sua vez, permite que escravos respondam a requisições do mestre, podendo operar com vários mestres em um barramento. No controle produtor consumidor, dados são enviados apenas a dispositivos que os requisitam, otimizando a transmissão [8][9].

### 2.3.4. MÉTODO DE TROCA DE DADOS

Diversos métodos de troca de dados são empregados, como o *polling*, que envia e recebe dados imediatamente, o cíclico, que transfere dados a uma taxa configurada pelo usuário, e a mudança de estado, que produz dados apenas

quando há alteração. O *bit-strobe*, por sua vez, realiza requisições gerais do mestre com respostas individuais dos escravos [8][9].

### 2.3.5. VELOCIDADE DA REDE

A velocidade da rede é mensurada pela taxa de transmissão, representando a taxa total de transferência de dados por unidade de tempo, medida em bits por segundo ou *baud rate* [8][9].

### 2.3.6. MODO DE OPERAÇÃO

Existem três modos de operação: *simplex*, *half-duplex* e *full-duplex*. O *simplex* permite enlace em apenas um dos sentidos de transmissão, enquanto o *half-duplex* viabiliza enlace nos dois sentidos, um por vez. O *full-duplex* permite enlace simultâneo em ambos os sentidos. As Figura 2-8, Figura 2-9 e Figura 2-10, exemplificam esses modos de operação, respectivamente [8][9].

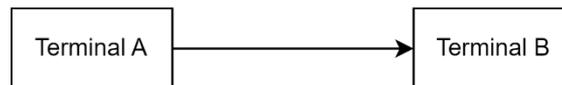


Figura 2-8 - Modo de operação *simplex* [8][9].

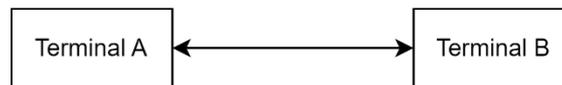


Figura 2-9 - Modo de operação *half-duplex* [8][9].

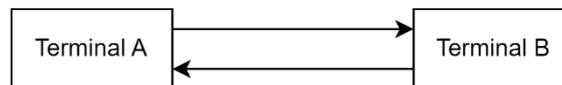


Figura 2-10 - Modo de operação *full-duplex* [8][9].

### 2.3.7. TIPOS DE REDES INDUSTRIAIS

A evolução das redes industriais trouxe uma diversidade de tipos, cada qual projetado para atender a necessidades específicas, dada a vasta gama de dados presentes em sistemas de controle. Cada protocolo de rede, ao incorporar distintos conjuntos de características e estruturas de dados, destaca-se por suas peculiaridades. A seguir, são descritos alguns desses tipos de redes [8][9].

---

As redes abertas são projetadas para suportar equipamentos e dispositivos provenientes de diferentes fabricantes. Sua vantagem reside na não geração de dependência ou limitação, tornando-as mais versáteis para controlar processos industriais. No entanto, apresentam desafios potenciais, como a possibilidade de falhas de comunicação. A velocidade de comunicação pode variar, e a necessidade de compreender os protocolos específicos de cada fabricante é uma exigência constante [8][9].

As redes proprietárias são implementadas pelos fabricantes para estabelecer conectividade entre seus próprios equipamentos. Seus pontos fortes incluem estabilidade na comunicação e facilidade na instalação de novos dispositivos. Entretanto, essas redes operam sob a dependência de um único fabricante, limitando a escolha e flexibilidade. Além disso, a necessidade de *upgrades* dedicados pode ser uma desvantagem, exigindo uma consideração cuidadosa ao optar por essa abordagem [8][9].

Essa diversidade de redes industriais reflete a constante busca por soluções que equilibrem a interoperabilidade, estabilidade e flexibilidade, essenciais para a eficiência dos sistemas de automação industrial. A análise cuidadosa das características e requisitos específicos de cada tipo de rede é fundamental para a seleção adequada, considerando as demandas particulares de cada contexto industrial [8][9].

O próximo subcapítulo abordará as redes Ethernet, explorando a arquitetura de protocolos e as camadas do modelo OSI. Em seguida, serão apresentadas as principais redes industriais baseadas em Ethernet, como PROFINET, Ethernet/IP, EtherCAT, POWERLINK e Modbus TCP, destacando suas características, aplicações e vantagens no contexto da automação industrial.

## **2.4. REDES ETHERNET**

A rede Ethernet, lançada em 1972 pelo pesquisador Robert Metcalfe na empresa Xerox para interconectar computadores, inicialmente carecia de padronização. Em 1980, foi homologada pelo IEEE, tornando-se uma das tecnologias de rede mais difundidas e relevantes [11].

O padrão Ethernet IEEE 802.3 é uma tecnologia de interconexão para redes locais (LANs), fundamentada no envio de pacotes entre dispositivos. Sua comunicação segue o modelo de comunicação OSI, abrangendo as camadas de enlace de dados e física. O padrão define como os dados são transmitidos e recebidos, agrupando mensagens em quadros e os enviando pela rede. Esse processo ocorre reversamente quando os dados são recebidos por outro dispositivo [11].

Ao trafegar em uma rede local, os dados são denominados quadros, requerendo apenas o endereço MAC para navegar de um *host* de origem a um destino local. Para transmissão pela internet ou em redes além da local, os dados são encapsulados em pacotes, incluindo informações de endereço de rede e destino final. O padrão também define aspectos físicos da transmissão, como o formato do sinal, operando em modo *full duplex* [11].

A codificação adotada pela Ethernet é a *Manchester*, onde o número “1” é representado por +0,85V e -0,85V, enquanto o número “0” é representado por -0,85V e +0,85V, respectivamente [11].

A Ethernet trafega dados por meio de cabos coaxiais, pares trançados e fibras óticas, operando em velocidades de 1 Mbps a 400 Gbps. Originalmente projetada para topologia de barramento, onde todos os dispositivos recebem todos os pacotes (arquitetura de difusão), seu desempenho pode decair para 37% em redes congestionadas, afetando a eficiência em tráfego intenso [11].

O IEEE padronizou endereços MAC compostos por 6 bytes. Os 3 primeiros representam a identificação do fabricante (OUI) e os 3 últimos são o número sequencial da placa atribuído pelo fabricante. O endereço MAC é expresso em hexadecimal, formatado como 12 algarismos separados por dois pontos (“:”) ou hífen (“-”). Este formato e a divisão dos componentes do endereço MAC são ilustrados na Figura 2-11, facilitando a compreensão de sua estrutura e utilização em redes industriais [11].

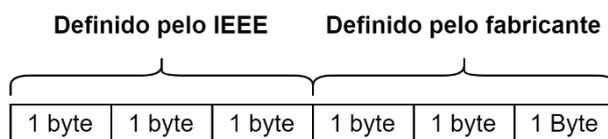


Figura 2-11 - Estrutura do endereço MAC [11].

O quadro Ethernet é dividido em campos: preâmbulo, SOF, endereço de destino, endereço de origem, tamanho, dados e FCS. Cada uma dessas partes desempenha um papel crucial na transmissão de dados dentro da rede Ethernet, garantindo a integridade e a correta distribuição das informações.

O preâmbulo informa que um frame está começando, seguido pelo *Start of Frame*, que serve como delimitador do início do frame. O endereço de destino contém o endereço MAC do destinatário, enquanto o endereço de origem carrega o endereço MAC do remetente. O campo de tamanho indica o tamanho em bytes dos dados (802.3) a serem transmitidos. Os próprios dados consistem nas informações a serem enviadas para a próxima camada. Finalmente, o *Frame Check Sequence*, um valor de *Cyclic Redundancy Check*, é usado para a verificação de erros durante a transferência de dados entre dispositivos. A organização de cada um desses campos está detalhadamente ilustrada na Figura 2-12, proporcionando uma visão clara de como um quadro Ethernet é estruturado [11].

Preâmbulo	SoF	Endereço de destino	Endereço de origem	Tamanho	Dados	FCS
-----------	-----	---------------------	--------------------	---------	-------	-----

Figura 2-12 - Quadro Ethernet. [11]

#### 2.4.1. EXPLORANDO A ARQUITETURA DE PROTOCOLOS

Para o avanço na exploração das redes industriais baseadas em Ethernet, torna-se imprescindível uma compreensão da arquitetura de protocolos fundamentada no padrão de comunicação de rede OSI. Esta base conceitual é essencial para uma análise abrangente e contextualizada das tecnologias subsequentes [10].

A seguir é apresentada uma explicação do modelo de comunicação OSI.

#### 2.4.2. CAMADAS DO MODELO OSI

A camada 7, de aplicação, atua como a interface entre a máquina e o usuário, integrando este último à rede. Exemplos incluem navegadores *web*, nos quais o usuário insere dados para iniciar comunicações, tornando-se o ponto de entrada para as interações entre usuário e rede [10].

A camada 6 de apresentação traduz criptografia e compacta os dados, tornando-os consumíveis por aplicativos. Responsável pela conversão dos dados recebidos da camada de aplicação para a camada de sessão, a apresentação contribui para a eficiência e velocidade da comunicação [10].

A camada 5, de sessão, abre e fecha a comunicação entre dois dispositivos, denominada "sessão". Garante que a sessão permaneça aberta o tempo necessário para transferir todos os dados, evitando desperdício de recursos ao fechar rapidamente após a conclusão da transferência [10].

A camada 4, de transporte, gerencia o tráfego de dados de ponta a ponta, dividindo-os em segmentos para enviar à camada 3. No dispositivo receptor, é responsável por remontar os segmentos em dados para encaminhar à camada 5. Além disso, controla o fluxo e os erros na comunicação [10].

A camada 3 é responsável por facilitar o tráfego de dados entre redes distintas, a camada de rede endereça pacotes para determinar o melhor caminho físico até o destino, sendo desnecessária se os dados trafegam na mesma rede [10].

A camada 2, de enlace de dados, facilita a transferência entre dispositivos na mesma rede, dividindo os pacotes da camada de rede em "quadros" menores. Além disso, controla o fluxo e os erros na comunicação dentro da rede [10].

A camada 1, física, engloba os componentes físicos, como cabos e comutadores da rede, convertendo dados para uma sequência de zeros e uns [10].

A seguir, é apresentada a Figura 2-13 que mostra as sete camadas do modelo OSI, acompanhada de uma breve descrição das funções e responsabilidades de cada camada.

**Camada 7 – Aplicação:** Interface entre o homem e a máquina

**Camada 6 – Apresentação:** Converte os dados para a camada de Sessão

**Camada 5 – Sessão:** Abre e fecha a comunicação entre dois dispositivos

**Camada 4 – Transporte:** Gerencia o tráfego, dividindo os dados e segmentos para enviar à camada 3

**Camada 3 – Rede:** Endereça os pacotes para determinar o melhor caminho até o destino

**Camada 2 – Enlace de dados:** Divide os pacotes da camada de rede em “quadros” menores

**Camada 1 – Física:** Converte os dados para uma sequência de zeros e uns

Figura 2-13 – Síntese das camadas do modelo OSI.

A seguir, serão apresentadas algumas das principais redes industriais baseadas em Ethernet, destacando suas características, funcionalidades e aplicações em diferentes ambientes de automação industrial.

### 2.4.3. PROFINET

A rede PROFINET foi desenvolvida e mantida pela PI, sendo projetada para atender às crescentes demandas da Indústria 4.0, onde a conectividade e a comunicação em tempo real são essenciais para operações industriais [2][12][13].

A rede PROFINET é construída sobre a base na Ethernet padrão e do protocolo TCP/IP, proporcionando uma infraestrutura robusta para a comunicação em tempo real em ambientes industriais. Sua arquitetura modular permite adaptação a uma variedade de indústrias, incluindo manufatura discreta e processos contínuos. A rede PROFINET suporta comunicação cíclica para troca de dados em tempo real e comunicação acíclica para transferência de dados assíncronos [2][12][13].

A rede PROFINET oferece uma série de características que a tornam uma escolha atraente para integração em sistemas de automação. A capacidade de comunicação em tempo real da PROFINET é crucial para aplicações onde o controle preciso é necessário, como em linhas de produção automatizadas,

garantindo tempos de resposta rápidos. Além disso, o protocolo é projetado para facilitar a integração de dispositivos PROFINET em ambientes industriais já existentes, permitindo a coexistência eficiente com equipamentos legados e outros protocolos de comunicação. A arquitetura flexível da PROFINET possibilita a escalabilidade das redes industriais para atender às demandas em constante mudança, permitindo expansões e ajustes conforme necessário [2][12][13].

A rede PROFINET suporta diversas topologias de rede, como barramento, anel, estrela e linha, adaptando-se às necessidades específicas de cada ambiente industrial. A flexibilidade na escolha da topologia permite que as empresas otimizem suas redes para alcançar redundância, tolerância a falhas e eficiência operacional [2][12][13].

Apesar de suas muitas vantagens, desafios continuam a surgir, especialmente em relação à segurança cibernética e à complexidade crescente das redes industriais. O desenvolvimento futuro da rede PROFINET visa superar esses desafios, melhorando a interoperabilidade, eficiência energética e suporte a tecnologias emergentes, como a IIoT [2][12][13].

#### **2.4.4. ETHERNET/IP**

A rede Ethernet/IP teve seu início na década de 90, com desenvolvimento inicial pela CI [4][14].

Em 2000, a ODVA e a CI uniram esforços para continuar aprimorando a rede, sendo que, em 2009, a ODVA assumiu o controle exclusivo sobre o seu desenvolvimento [4][14].

Embora o Ethernet/IP utilize o padrão Ethernet, é válido destacar que nem todos os cabos e conectores desse padrão atendem aos requisitos específicos do ambiente fabril. O CIP é uma parte fundamental dessa arquitetura, abrangendo representação de dados, gerenciamento de conexão e protocolo de mensagem, com a capacidade de operar sobre diversas camadas físicas e de transporte [4][14].

O CIP, fundamentado em objetos, expõe dados na rede CIP como uma coleção de atributos agrupados em uma categoria denominada objetos. Esses objetos podem ser organizados em classes, representando entidades com

características comuns, sendo que a implementação real é conhecida como uma instância daquelas classes. Por exemplo, uma válvula pneumática implementaria uma classe de válvulas, com cada instância representando uma dessas válvulas em um bloco específico [4][14].

O CIP identifica objetos, instâncias e atributos, bem como os serviços oferecidos por esses objetos, através de identificadores inteiros. Ele define duas conexões: explícita e implícita. As conexões explícitas são destinadas a transferências não controladas, enquanto as implícitas são utilizadas para transferências de dados controladas [4][14].

É importante observar que o CIP não inclui comunicações nas camadas de transporte, apresentação ou física. Sua implementação sobre as camadas física e de transporte resulta em um baixo nível de transporte. O Ethernet/IP é uma implementação do CIP sobre a Ethernet [4][14].

O Ethernet/IP faz uso do TCP para enviar mensagens explícitas. O TCP é selecionado para operações críticas, oferecendo confirmação de entrega de mensagem. Já o UDP proporciona um serviço sem confirmação de entrega de pacotes e é preferido para pequenas transferências de dados, onde a perda de pacotes não acarreta consequências significativas. O Ethernet/IP utiliza o UDP para mensagens de entrada e saída, frequentemente transferidas ciclicamente [4][14].

O padrão Ethernet/IP alinha-se ao padrão IEEE 802.3 Ethernet, tornando-se semelhante a qualquer sistema Ethernet comercial. Ele representa outra aplicação que trafega mensagens sobre Ethernet, da mesma forma que o HTTP fornece o serviço de mensagem para navegadores de internet. O que geralmente diferencia uma tecnologia de Ethernet Industrial, como o Ethernet/IP, é o hardware físico especializado para sua implementação. As redes Ethernet industriais são uma aplicação adaptada, oferecendo imunidade elétrica adicional, padrões ambientais rigorosos, proteção contra vibração e outras características que permitem a operação em ambientes extremos [4][14].

#### **2.4.5. ETHERCAT**

A rede EtherCAT, desenvolvida pela *Beckhoff Automation*, foi lançada em abril de 2003, e em novembro do mesmo ano, a *EtherCAT Technology Group* foi

fundada, tornando-se a principal organização dedicada à Ethernet Industrial e *Fieldbus*, com padronização conforme a norma IEC 61158 [15].

As características distintivas da rede EtherCAT incluem seu curto tempo de ciclo ( $\leq 100 \mu\text{s}$ ) e baixo *jitter* para sincronização precisa ( $\leq 1 \mu\text{s}$ ) [15].

O princípio funcional da EtherCAT é notável. O mestre da rede transmite dados para todos os escravos, cada um lê os dados endereçados a eles sem interrupção, e, em resposta, inserem os dados no quadro. O atraso do tráfego da mensagem ocorre apenas devido ao atraso de propagação do *hardware*. Além disso, a operação da EtherCAT é *full-duplex* [16].

O mestre da rede é o único autorizado a enviar dados, um conceito que elimina atrasos e garante a transmissão e recebimento de informações em tempo real [15].

#### **2.4.6. POWERLINK**

A rede POWERLINK é uma solução de Ethernet Industrial que se destaca pela integração eficiente de comunicação e energia. Foi introduzida pelo EPSG, proporcionando uma combinação única de capacidades de transmissão de dados e energia em uma única infraestrutura [4].

A principal característica da POWERLINK reside na sua capacidade de transmitir dados e fornecer energia por meio do mesmo cabo, otimizando a eficiência do sistema. Isso simplifica a infraestrutura de cabeamento e reduz custos associados a instalações e manutenções [4].

A POWERLINK oferece modos de operação diferentes, incluindo ciclos assíncronos e síncronos, adequando-se às exigências específicas de cada aplicação. Isso permite a coexistência eficaz de dispositivos com requisitos diversos em uma única rede, proporcionando flexibilidade para adaptação a diferentes cenários industriais [4].

#### **2.4.7. MODBUS TCP**

A rede Modbus TCP representa uma extensão da conhecida e utilizada família de protocolos Modbus, agora adaptada para operar sobre redes Ethernet, proporcionando uma solução para a comunicação em sistemas de automação

industrial. Desenvolvida para atender às demandas crescentes por conectividade em tempo real, a Modbus TCP mantém os princípios fundamentais do protocolo Modbus, oferecendo benefícios adicionais no contexto de redes Ethernet [16].

A principal característica do Modbus TCP é a utilização da pilha de protocolos TCP/IP para a transmissão de dados. Essa abordagem integra o Modbus diretamente ao modelo de comunicação da internet, possibilitando a conectividade eficiente em ambientes industriais. A portabilidade e a interoperabilidade são facilitadas pela aderência aos padrões abertos e aceitos do TCP/IP [16].

O Modbus TCP mantém os modelos de comunicação mestre-escravo característicos do Modbus, permitindo a leitura e escrita de dados de dispositivos remotos. Essa estrutura modular e escalável possibilita a integração de dispositivos diversos, proporcionando uma comunicação entre controladores, sensores e atuadores em um ambiente industrial [16].

A seguir, será abordado o tema Áreas Classificadas, com uma explicação detalhada sobre o que são e sua importância em ambientes industriais.

## **2.5. ÁREAS CLASSIFICADAS**

“O progresso tecnológico na indústria trouxe consigo novos desafios, especialmente na preocupação constante com a segurança, evidenciada em ambientes denominados Áreas Classificadas. Nestas áreas, o risco de explosão surge devido à presença de gases ou poeiras suspensas no ar, que, quando combinadas com o calor gerado por máquinas industriais e seus dispositivos, podem criar ambientes potencialmente perigosos” [2].

A definição de Atmosfera Potencialmente Explosiva é crucial para compreender esses riscos. Trata-se de um local onde ocorre a mistura explosiva de gases ou vapores inflamáveis com o ar, sob condições atmosféricas específicas, como pressões entre 0,8 e 1,1 bar e temperaturas variando de -20 a +60°C. A categorização dessas áreas, conhecida como "áreas classificadas", torna-se essencial para determinar as substâncias inflamáveis possíveis e a frequência de sua presença, permitindo a escolha adequada de equipamentos elétricos a serem instalados [17].

A norma IEC estabelece uma classificação de níveis de probabilidade de ocorrência de misturas explosivas, conforme apresentado na Tabela 2-2, padrão também adotado pelas normas brasileiras da ABNT [18].

Tabela 2-2 - Classificação em níveis de probabilidade de ocorrência de uma mistura explosiva [18].

Zona 0	Área na qual uma atmosfera explosiva, na forma de gás ou vapor, está presente continuamente por longos períodos ou frequentemente.
Zona 1	Área na qual uma atmosfera explosiva, na forma de gás ou vapor inflamável, pode estar presente eventualmente em condições normais de operação.
Zona 2	Área na qual não se espera que uma atmosfera explosiva, na forma de gás ou vapor, ocorra em operação normal, porém, se ocorrer, permanece somente por um curto período de tempo.
Zona 20	Área na qual uma atmosfera explosiva, na forma de uma nuvem de poeira combustível no ar, está presente continuamente, por longos períodos ou frequentemente.
Zona 21	Área na qual uma atmosfera explosiva, na forma de uma nuvem de poeira combustível no ar, pode estar presente eventualmente em condições normais de operação.
Zona 22	Área na qual não se espera que uma atmosfera explosiva, na forma de uma nuvem de poeira combustível no ar, ocorra em operação normal, porém, se ocorrer, permanece somente por um curto período de tempo.

A legislação norte-americana adota uma abordagem diferente, utilizando o NEC, classificando as áreas em Divisão 1 ou Divisão 2. Neste contexto, a Divisão 2 equivale à Zona 2, enquanto a Divisão 1 corresponde às Zonas 0 e 1 [19].

### **2.5.1. SEGURANÇA INTRÍNSECA: MITIGAÇÃO DE RISCOS EM ÁREAS CLASSIFICADAS**

A utilização de equipamentos elétricos em áreas classificadas impõe desafios significativos de segurança, pois, em situações de falha, esses equipamentos podem gerar faíscas ou aquecimento, tornando-se fontes potenciais de ignição para atmosferas explosivas circundantes. Para mitigar esse risco, os equipamentos devem ser certificados de acordo com tipos de proteção padronizados, sendo a segurança intrínseca uma das abordagens mais comuns [17].

A segurança intrínseca fundamenta-se na limitação da energia fornecida pelo dispositivo associado aos dispositivos de campo (intrinsecamente seguro), garantindo que operem abaixo do limite de energia de ignição. Isso significa que, mesmo em operação normal ou sob falhas, os circuitos não causarão a ignição

---

de uma mistura explosiva. A energia liberada por faíscas elétricas ou altas temperaturas não é suficiente para desencadear a ignição em uma concentração crítica [17].

O projeto de circuitos intrinsecamente seguros requer níveis de redundância, assegurando que, mesmo em presença de duas falhas, o sistema permaneça seguro para operar em Zona 0, a classificação mais crítica de áreas [17].

Para operar com energia limitada, um circuito intrinsecamente seguro deve ser alimentado por um circuito limitador de energia, geralmente instalado fora das áreas classificadas. Esse circuito de limitação, conhecido como Equipamento Associado, deve ser projetado e certificado de acordo com as normas para compor o sistema intrinsecamente seguro [17].

Seja como um exemplo uma sala de controle que não é uma área classificada. Nela, interfaces ligadas a sensores intrinsecamente seguros atuam em campo. A energia proveniente da sala de controle precisa ser limitada para compatibilidade com os sensores, garantindo que estes não se tornem fontes de ignição. Isso é alcançado por meio de circuitos intrinsecamente seguros nas interfaces, que definem o equipamento como associado [17].

Assim, os circuitos das interfaces de conexão, intrinsecamente seguros, devem ter parâmetros de entrada e saída claramente definidos na documentação de certificação. Isso permite que o usuário final instale o sistema de maneira segura, seguindo o Conceito de Entidade, que se baseia em princípios como limites máximos de tensão, corrente e potência para equipamentos associados e de campo. A Figura 2-14 ilustra o Conceito de Entidade, guiando a instalação segura do sistema em áreas classificadas [17].

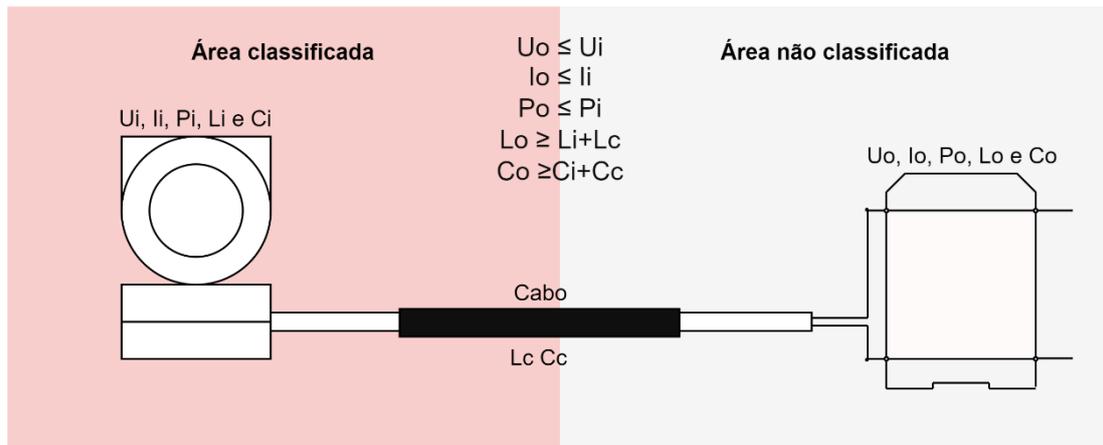


Figura 2-14 - Conceito de entidade [17].

Os equipamentos associados possuem valores máximos dos elementos reativos que podem ser conectados aos seus terminais de saída, bem como a tensão de circuito aberto, a máxima corrente de curto-circuito e a máxima potência que pode ser fornecida à carga ( $U_o, I_o, P_o, L_o$  e  $C_o$ ) [17].

Os equipamentos de campo ou intrinsecamente seguros, possuem valores máximos de tensão, corrente e potência que podem ser conectadas à sua entrada bem como valores de indutância e capacitância internas vistas nos seus terminais de entrada ( $U_i, I_i, P_i, L_i$  e  $C_i$ ) [17].

O equipamento intrínseco pode ser seguramente conectado ao equipamento a ele associado se a tensão, corrente e a potência máxima do associado forem menores ou iguais aos respectivos valores do equipamento intrínseco [17].

Os parâmetros reativos do cabo em seu comprimento total ( $L_c$  e  $C_c$ ) são somados aos valores dos parâmetros reativos dos terminais de entrada do circuito intrinsecamente seguro e a soma deve ser menor do que os valores definidos como limite na avaliação do circuito limitador associado [17].

Em resumo, a segurança intrínseca emerge como uma abordagem robusta para garantir a operação segura de equipamentos elétricos em ambientes desafiadores, contribuindo para a integridade e a proteção contra riscos potenciais de ignição em áreas classificadas [18].

O próximo capítulo abordará o tema central desta dissertação: o padrão Ethernet-APL.

### 3. PADRÃO ETHERNET-APL

#### 3.1. INTRODUÇÃO À REDE ETHERNET-APL

Este subcapítulo introduz a tecnologia Ethernet-APL, descrevendo os contextos em que esse padrão é aplicado. O protocolo de comunicação Ethernet segue a estrutura do modelo OSI, conforme apresentado na Figura 3-1. Destaca-se a camada em que o padrão de comunicação Ethernet-APL atua [20][21][22][23].

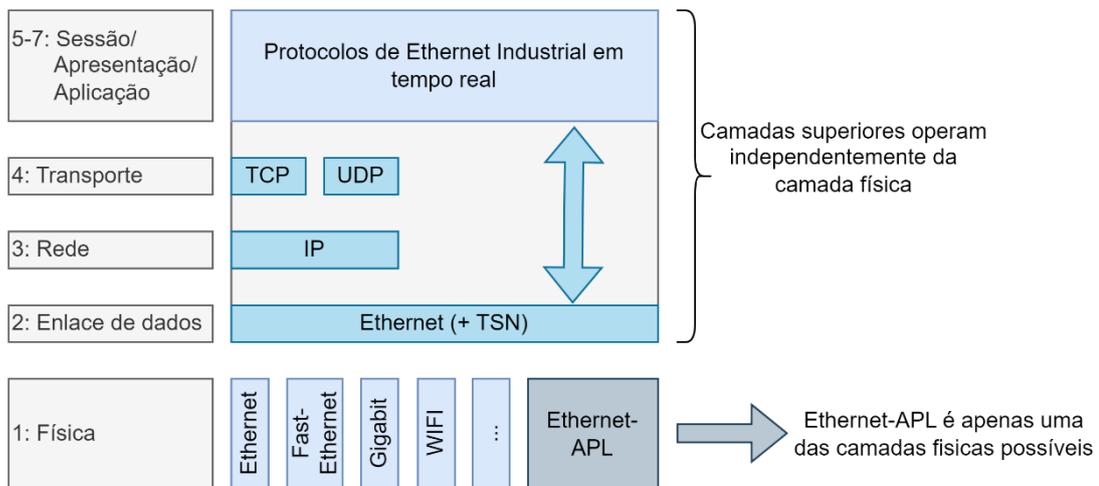


Figura 3-1 - Pilha de protocolo ISO/OSI de Ethernet [20][21][22][23].

Na estrutura do modelo OSI, é possível alterar uma camada sem afetar as outras. A camada física, a mais baixa do modelo OSI, será especificada neste capítulo, incluindo os meios de transmissão, taxas de dados e conectores do Ethernet-APL. A Figura 3-1 demonstra que diferentes camadas físicas podem ser utilizadas mantendo as outras camadas inalteradas. O Ethernet-APL pode ser incorporado como uma dessas camadas físicas, especialmente em aplicações específicas com características especiais. Esse padrão de camada física complementa redes de automação baseadas em Ethernet, como EtherNet/IP e PROFINET, diferindo apenas a camada física. A seguir, serão exploradas as distinções do Ethernet-APL em relação a outras camadas físicas e serão descritas suas características distintivas [20][21][22][23].

A implementação do protocolo Ethernet na indústria busca atender aos objetivos fundamentais, alinhando-se com os princípios da Indústria 4.0. A facilidade de mão de obra, a utilização consistente da tecnologia em todas as camadas da

pirâmide da automação e as facilidades diagnósticas da rede são aspectos essenciais. Seguindo as recomendações [NE 168] e [NE 74], os requisitos estabelecidos para o padrão conhecido como "Ethernet para o campo" incluem a interoperabilidade de protocolos, interfaces amigáveis, operação em áreas classificadas, compatibilidade de camada física entre dispositivos de campo, conectores robustos para ambientes adversos, considerações sobre topologia e condições do ambiente, tempo de transmissão dos dados entre 10 ms e 2000 ms, e compatibilidade entre todos os componentes do barramento [23].

A camada física Ethernet-APL foi concebida para operar com conexão a dois fios, aproveitando cabos existentes, permitindo manutenção em áreas classificadas, prevendo a operação segura tanto do *switch* quanto dos dispositivos de campo nessas áreas, além de integrar alimentação e comunicação no mesmo par de fios. A Figura 3-2 compara uma rede Ethernet Industrial (cor verde) com a rede Ethernet-APL, destacando a conexão à central de controle, CLP e *switch* de alimentação. Enquanto os dois primeiros necessitam de uma alimentação auxiliar, o *switch* Ethernet-APL converte a rede Ethernet Industrial de 100 Mbps para Ethernet-APL de 10 Mbps, utilizando apenas um par de fios para comunicação *full-duplex*. O cabo tronco, conectado ao *switch* de alimentação Ethernet-APL, permite a conexão dos dispositivos de campo Ethernet-APL, com comprimento máximo de 1.000 metros. A alimentação do *switch* de campo Ethernet-APL e dos dispositivos de campo é fornecida pelo *switch* de alimentação Ethernet-APL [20][21][22][23].

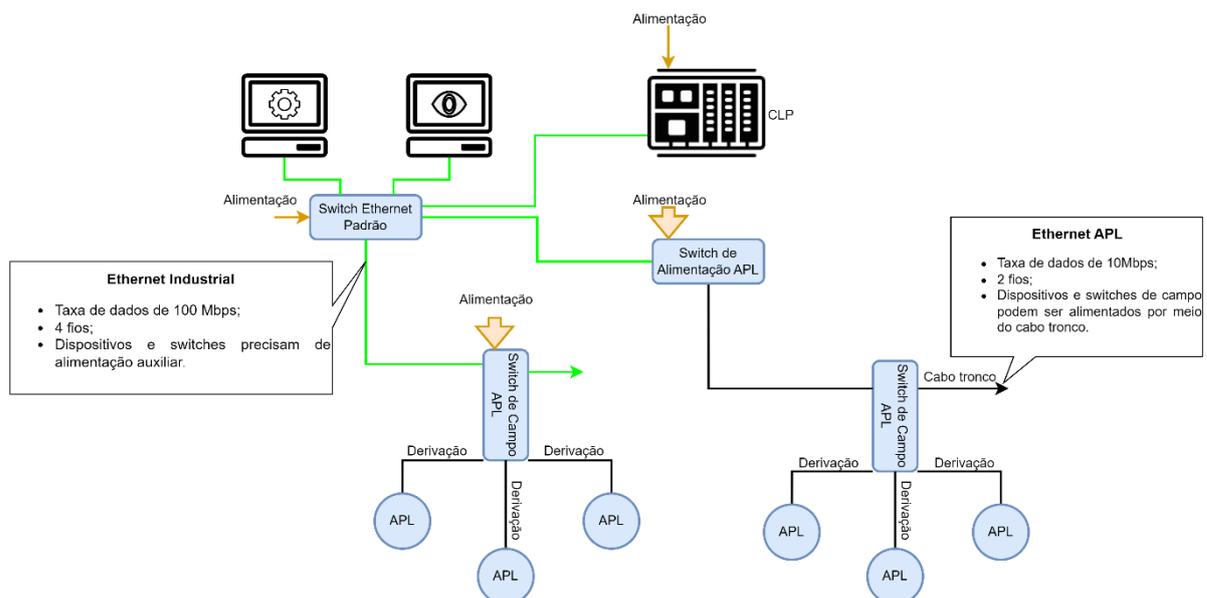


Figura 3-2 - Diferenças entre Ethernet Industrial e Ethernet-APL [20][21][22][23].

---

Dentro da estrutura do modelo OSI, o protocolo Ethernet-APL ocupa a primeira camada, a camada física, sendo uma das várias camadas físicas possíveis do padrão Ethernet [20][21][22][23].

O Ethernet-APL representa um marco significativo na evolução da comunicação industrial, impulsionando a conectividade confiável em ambientes classificados. Essa tecnologia inovadora é resultado da integração de quatro normas fundamentais, cada uma desempenhando um papel crucial em sua concepção e implementação. A norma IEEE 802.3cg (10BASE-T1L) serviu como a base essencial para o desenvolvimento do padrão Ethernet-APL, fornecendo os alicerces técnicos para sua arquitetura e funcionamento. A norma IEC 61158-2 contribuiu para estabelecer os protocolos de comunicação detalhados para a transmissão de dados em sistemas de controle automatizados. Por sua vez, a norma ABNT NBR IEC TS 60079-47 (2-WISE) estabeleceu os princípios de segurança intrínseca necessários para proteger equipamentos em ambientes potencialmente explosivos, delineando o conceito de Ethernet intrinsecamente segura a dois fios (2-WISE), que constitui a essência do padrão Ethernet-APL. Além disso, a especificação da norma IEC TS 63444 detalha as características específicas das portas Ethernet no contexto do perfil Ethernet-APL, contribuindo para a implementação consistente e eficiente do Ethernet-APL em diversas aplicações industriais. Neste contexto, exploraremos como a sinergia entre essas normas moldou o Ethernet-APL, capacitando-o a oferecer uma solução robusta e adaptável para as demandas crescentes do setor industrial [20][21][22][23].

Nos subcapítulos seguintes, serão analisadas cada uma dessas normas, em especial as normas IEC TS 63444, IEEE Sts 802.3cg e a norma ABNT IEC 60079-47, explorando sua contribuição individual para o desenvolvimento e funcionamento do Ethernet-APL.

### **3.2. NORMA IEEE STD 802.3CG (10BASE-T1L)**

A norma IEEE 802.3cg foi lançada pelo IEEE em 2019 e traz uma nova opção de padronização para comunicação à longa distância sobre o único par de condutores trançados e balanceados com comprimento de até 1000 metros [20].

A norma IEEE 802.3cg, conhecida como 10BASE-T1L, representa um avanço significativo no campo das redes Ethernet. Ela permite aos projetistas no mercado de

automação utilizar o protocolo Ethernet familiar para comunicação a longa distância entre controladores industriais e sensores, com protocolos TCP/IP do protocolo Ethernet sendo a base para OPC UA, MQTT e HTTP. A tecnologia PoDL permite os serviços citados acima enquanto reduz o cabeamento, simplificando as redes atuais de comunicação 4 a 20 mA ou *Fieldbus* existentes [20].

A designação "10BASE-T1L" reflete as características essenciais desta norma. O "10" indica a velocidade de transmissão de 10 Mbps, o "BASE" refere-se à transmissão de banda base, enquanto o "T1L" destaca a operação em um único par de fios (*twisted pair*) e a capacidade de alcance prolongado (*long reach*) [20].

A seguir, são apresentadas as principais características deste padrão. A norma IEEE 802.3cg (10BASE-T1L) suporta uma taxa de transmissão de 10 Mbps, atendendo às necessidades de comunicação em tempo real e garantindo a eficiência nas aplicações industriais.

Projetada para oferecer um alcance estendido, a norma permite a comunicação em distâncias significativas sem comprometer o desempenho da rede. Além disso, possibilita a expansão da conectividade em ambientes críticos, facilitando a coleta de dados, o monitoramento remoto e o controle de processos industriais essenciais. A norma oferece uma solução de conectividade adaptada aos desafios de ambientes industriais hostis, proporcionando uma base confiável para comunicação em áreas classificadas [20].

Sua capacidade de operar em um único par de fios, aliada ao alcance prolongado, contribui para a eficiência operacional, reduzindo custos de implementação e facilitando a manutenção. Reconhecida internacionalmente, a norma promove a padronização global e facilita a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes. Como parte do conjunto de padrões Ethernet em constante evolução, a 10BASE-T1L permite a incorporação de inovações futuras, garantindo a relevância e a atualização contínua das redes em ambientes desafiadores [20].

### **3.3. NORMA IEC TS 63444 - REDES INDUSTRIAIS DE COMUNICAÇÃO - ESPECIFICAÇÃO DE PORTAS ETHERNET COM PERFIL ETHERNET-APL**

#### **3.3.1. CLASSIFICAÇÃO DAS PORTAS**

As portas nos dispositivos Ethernet-APL são categorizadas em diferentes classes para determinar a interoperabilidade entre elas. A Figura 3-3 ilustra como

essas portas são classificadas, com várias opções disponíveis para cada classe. Embora haja diversas combinações possíveis, nem todas são permitidas [21].

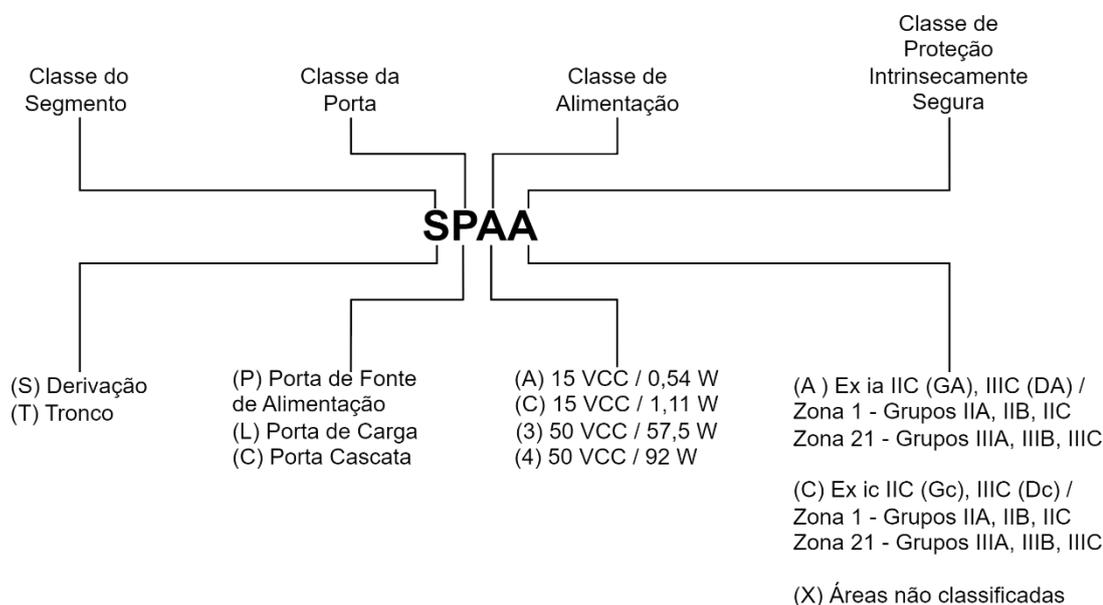


Figura 3-3 - Classes de portas e opções relacionadas [21].

### 3.3.1.1. CLASSE DO SEGMENTO

A classe de segmento define os tipos de segmentos suportados na IEEE Std 802.3cg, Cláusula 146, e são mostradas na Tabela 3-1 [21].

O número máximo de conexões em linha não inclui terminações de cabo das portas Ethernet-APL [21].

Um dispositivo auxiliar corresponde a uma conexão em linha, por exemplo, ter dois dispositivos auxiliares conectados a um segmento Ethernet-APL reduz o número de conexões em linha em dois [21].

Dispositivos auxiliares, que possuem resistência em linha, reduzem o comprimento do cabo suportado em segmentos Ethernet-APL com alimentação devido à queda de tensão adicional e perda de inserção [21].

Tabela 3-1 – Classe de segmentos [21].

Classe de segmento		Modo de operação 10BASE-T1L	Comprimento do cabo suportado	Número máximo de dispositivos auxiliares	Número máximo de conexões em linha em um segmento Ethernet-APL
S	Derivação ( <i>spur</i> )	1,0 V <sub>PP</sub>	0 a 200 m	2	4
T	Tronco	2,4 V <sub>PP</sub>	0 a 1000 m	2	10

### 3.3.1.2. CLASSE DA PORTA

Cada porta é designada como "P" (portas de fonte de alimentação), "L" (portas de carga) ou "C" (portas cascata). As características de alimentação da porta são determinadas pela sua classe. A Tabela 3-2 especifica as classes de portas e as combinações permitidas, formando um segmento Ethernet-APL [21].

Se uma porta de classe C estiver conectada a uma porta de classe P, a porta C deve permanecer passiva (C<sub>L</sub>) e não deve fornecer nenhuma alimentação ao segmento Ethernet-APL [21].

Uma porta cascata como porta de fonte de alimentação (C<sub>P</sub>) alimentada por uma porta cascata como porta de carga (C<sub>L</sub>) pode ter valores de saída reduzidos. A potência de saída da porta cascata como porta de fonte de alimentação (C<sub>P</sub>) é a potência de entrada da porta de carga (C<sub>L</sub>) menos o consumo de energia do dispositivo e menos as perdas internas [21].

As portas cascata são permitidas apenas no tronco [21].

Tabela 3-2 – Classes de portas [21].

Classe de porta		Combinações permitidas
P	A porta de fonte de alimentação fornece energia para uma porta de carga.	P-L, P-C <sub>L</sub>
L	A porta de carga requer energia de uma porta de fonte de alimentação.	P-L, C <sub>P</sub> -L,
C	As portas cascata podem atuar como porta de fonte de alimentação (C <sub>P</sub> ) ou como porta de carga (C <sub>L</sub> ). Portas cascata podem ser usadas em topologias anel ou em linha. Uma porta cascata que alimenta (C <sub>P</sub> ) recebe sua energia de uma porta cascata que atua como porta de carga (C <sub>L</sub> ) no mesmo dispositivo. A porta cascata como porta de carga (C <sub>L</sub> ), por sua vez, está conectada a uma porta de fonte de alimentação (P) ou a outra porta de cascata operando como fonte (C <sub>P</sub> ) em um dispositivo diferente. Ver a Figura 3-4.	P-C <sub>L</sub> , C <sub>P</sub> -L, C <sub>P</sub> - C <sub>L</sub>

A Figura 3-4 exibe uma topologia com um cabo tronco conectado em portas cascata com *switches* de campo [21].

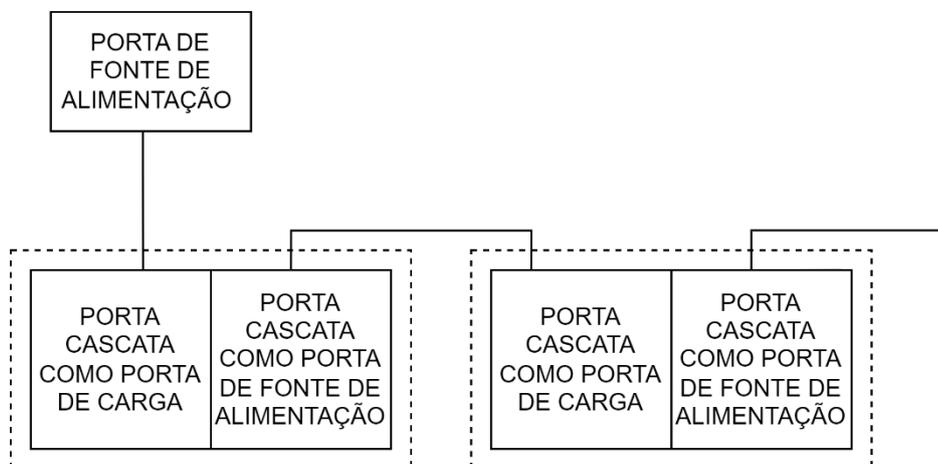


Figura 3-4 - Segmento tronco alimentado com porta cascata [21].

### 3.3.1.3. CLASSE DAS PORTAS

As características elétricas das portas são categorizadas por sua classe de porta. A Tabela 3-3 mostra as combinações possíveis de classes de segmentos, classe de portas e classes de alimentação [21].

Tabela 3-3 - Classes de portas e combinações permitidas [21].

Classe de alimentação das portas	Máxima tensão / mínima potência de saída	Classes de segmento permitidas	Classes de cargas de alimentação permitidas
A	15 VCC / 0,54 W	S	A
C	15 VCC / 1,11 W	S	A, C
3	50 VCC / 57,5 W	T	3
4	50 VCC / 92 W	T	3, 4

As combinações de portas permitidas em um segmento de tronco ou derivação seguem as classes de portas estipuladas para a fonte e a carga e podem ser vistas na Figura 3-5. É fundamental observar essas combinações, pois uma porta de carga pode ser designada para mais de uma classe de porta. Destaca-se que combinações além das especificadas na Tabela 3-3 não são permitidas de um ponto de vista intrinsecamente seguro. Essa avaliação precisa ser realizada separadamente conforme o conceito 2-WISE, detalhado no subcapítulo 3.4. [21].

As classes A e C são destinadas a portas que derivam para áreas classificadas intrinsecamente seguras, enquanto a classe 3 é para portas com derivação de cabos troncos, não intrinsecamente seguras [21].

As portas cascata (C) só podem ser conectadas se a porta de fonte de alimentação tiver valores de saída máximos, iguais ou inferiores a tensão, corrente e potência especificados para a porta cascata [21].

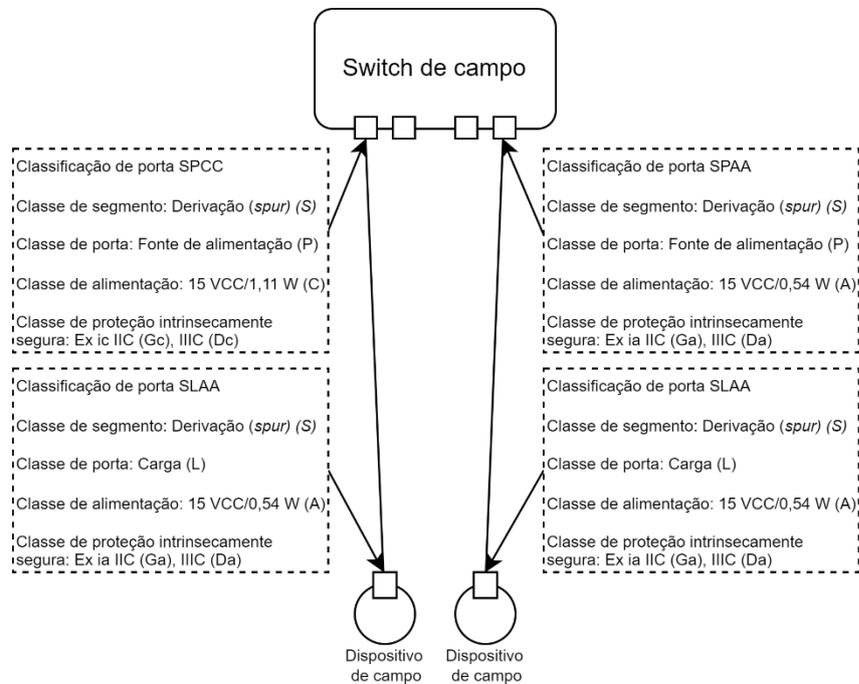


Figura 3-5 - Exemplo de combinação de classe de porta entre fonte de alimentação e carga [21].

#### 3.3.1.4. CLASSE DE PROTEÇÃO INTRINSECAMENTE SEGURAS

A classe de proteção intrinsecamente segura define o nível de proteção relacionado ao uso intrinsecamente seguro de um circuito de portas. As portas podem ter certificações tanto do padrão IEC quanto do padrão norte-americano. A Tabela 3-4 define as classes de proteção intrinsecamente seguras [21].

Determinadas normas, códigos ou diretivas nacionais ou regionais pode utilizar outras notações específicas, diferentes das notações internacionais IEC (por exemplo, CEC ou NEC) [21].

Tabela 3-4 - Classes de proteção intrinsecamente seguras [21].

<b>Classe de proteção intrinsecamente segura</b>	<b>Definição</b>	<b>Conforme a norma</b>	<b>Classe de porta permitida</b>	<b>Classe de alimentação permitida para uma porta de carga</b>
A	Intrinsecamente seguro Ex ia IIC (Ga) / IIIC (Da)	ABNT NBR IEC 60079-11	P, L	A
C	Intrinsecamente seguro Ex ic IIC (Gc) / IIIC (Dc)	ABNT NBR IEC 60079-11	P, L	A, C
X	Área não classificada / Áreas classificadas com outros tipos de proteção "Ex" excetuando proteção por segurança intrínseca	—	P, L, C	3, 4

A Figura 3-6 é um exemplo de combinação de classe de potência e classe de proteção intrinsecamente segura. Para a classe de proteção intrinsecamente segura A, uma fonte de energia P fornece carga para L [21].

As portas das classes intrinsecamente seguras A e C devem seguir o conceito de segurança intrínseca denominado "2-WISE" (2-Wire Intrinsically Safe Ethernet), padronizado na ABNT NBR IEC TS 60079-47 (2-WISE). O 2 WISE é um conceito de sistema intrinsecamente seguro, simplificando a interconexão de portas, dispositivos auxiliares e cabos em um segmento Ethernet-APL [21].

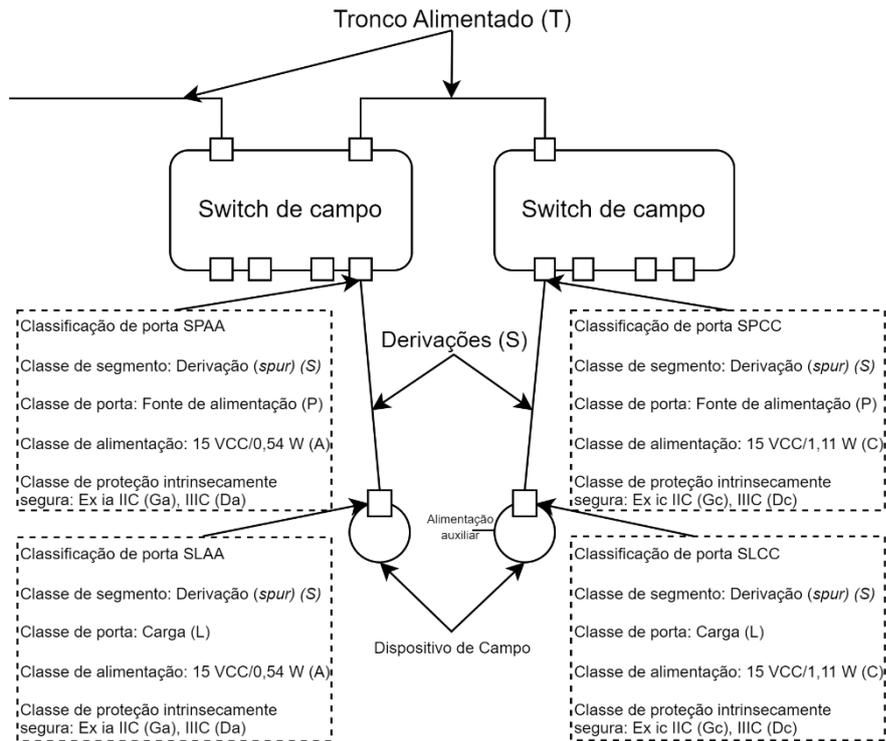


Figura 3-6 - Exemplo de classe de proteção intrinsecamente segura correspondente à classe de porta e classe de potência [21].

### 3.3.2. CONEXÃO PARA A REDE ETHERNET-APL

A escolha adequada dos conectores é crucial para a eficiência e confiabilidade das redes Ethernet-APL. Entre as opções disponíveis para dispositivos Ethernet-APL, destacam-se os terminais de grampo de parafuso ou terminais com mola de pressão constante e blocos de terminais modulares. Os terminais de grampo de parafuso oferecem uma solução robusta e confiável, enquanto os terminais com mola de pressão constante e os blocos de terminais modulares proporcionam flexibilidade e facilidade de manuseio. Essas opções garantem uma conexão segura nos dispositivos Ethernet-APL [21].

Outra escolha importante é o conector M12, especificamente na versão com código A, que emerge como uma opção versátil adequada para diversas aplicações nas redes Ethernet-APL. Sua concepção robusta e eficiente contribui para a integridade da conexão. Além disso, o conector M8, também com código A, oferece uma alternativa valiosa, embora sua utilização seja restrita a áreas não classificadas e não seja indicado para circuitos intrinsecamente seguros [21].

Essas seleções de conectores desempenham papéis fundamentais na manutenção da funcionalidade e segurança em ambientes industriais, especialmente aqueles que operam sob condições rigorosas ou em áreas potencialmente explosivas [21].

No próximo subcapítulo serão apresentados detalhes específicos sobre os conectores, incluindo a atribuição precisa dos pinos. Este subcapítulo foca exclusivamente na seleção dos conectores utilizados nos dispositivos Ethernet-APL, destacando o prensa-cabo e o conector como componentes essenciais para assegurar uma conectividade eficaz nas redes Ethernet-APL [21].

### 3.3.3. CONECTORES M12/M8

A versatilidade dos conectores M12 os torna aplicáveis tanto em áreas classificadas quanto em áreas não classificadas. No entanto, é importante ressaltar que os conectores M8 são restritos a áreas não classificadas [21].

Os conectores M8 devem aderir à norma IEC 61076-2-104 na versão com código A, satisfazendo os requisitos especificados na Tabela 3-5. Da mesma forma, os conectores M12 devem estar em conformidade com a norma IEC 61076-2-101, na versão com código A e atender aos requisitos descritos na Tabela 3-5. A Tabela 3-5 delinea os requisitos elétricos para dispositivos terminais bloco/conector, proporcionando clareza quanto às características necessárias [21].

Tabela 3-5 - Requisitos elétricos para os blocos terminais e conectores [21].

Especificação	Min	Máx
Corrente por contato	4 A	
Tensão nominal contato para contato	50 VCC	
Tensão de isolamento contato para blindagem	1 500 VCA	
Perda de inserção		0,04 para $0,1 \text{ MHz} \leq f < 4 \text{ MHz}$
		$0,02 \times \sqrt{(f / \text{MHz})}$ para $4 \text{ MHz} \leq f \leq 20 \text{ MHz}$
Perda de retorno		$28 + 8 \times f \text{ dB}$ para $0,1 \text{ MHz} \leq f < 0,5 \text{ MHz}$ ,
		$32 \text{ dB}$ para $0,5 \leq f \leq 20 \text{ MHz}$
PSANEXT		$73 \text{ dB}$ para $0,1 \text{ MHz} \leq f < 0,95 \text{ MHz}$ ,
		$50,5 \text{ dB} - 17 \times \log_{10}(f / 20)$ for $0,95 \text{ MHz} \leq f < 3,68 \text{ MHz}$ ,

		63 dB para $3,68 \text{ MHz} \leq f \leq 20 \text{ MHz}$
Resistência CC por contato		0,025 $\Omega$

As atribuições de pinos para os conectores circulares M8 / M12 seguem as funções indicadas na Tabela 3-6 e são visualmente representadas nas Figura 3-8 e Figura 3-9. Nas portas de fonte de alimentação e portas cascata como porta de fonte de alimentação, a recomendação é o uso de soquetes – S, enquanto em portas de carga e portas cascata como porta de carga, a preferência recai sobre plugues – P, conforme exemplificado na Figura 3-7 [21].

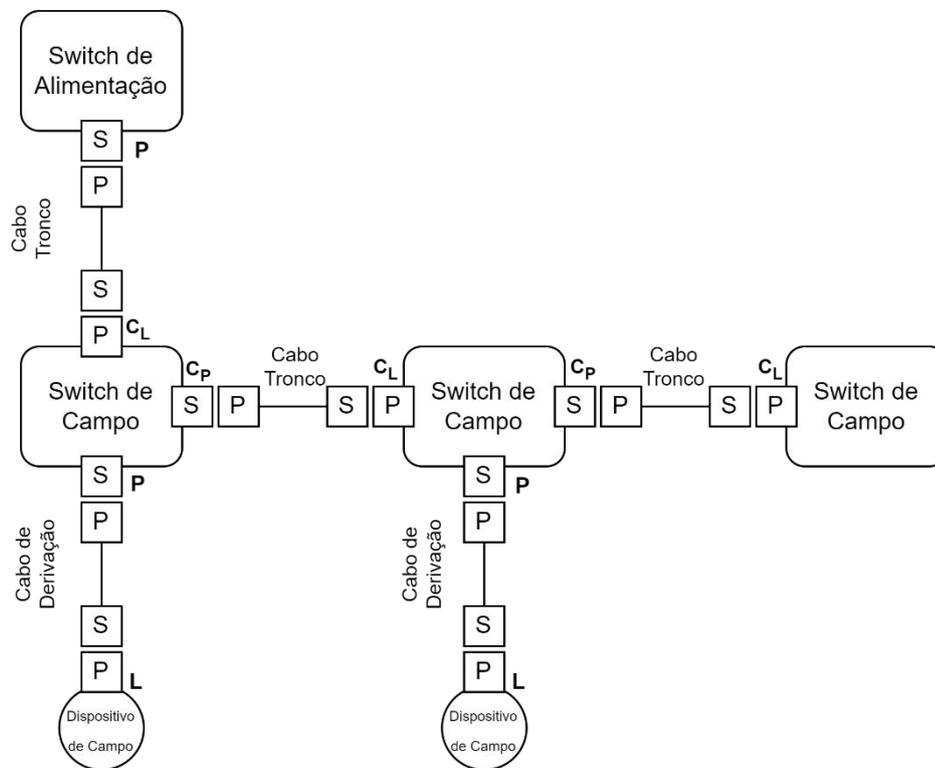


Figura 3-7 – Exemplo de combinação das classes de portas Ethernet-APL e dos tipos de conectores [21].

A Tabela 3-6 oferece uma referência clara das atribuições de pinos para conectores de plugue e soquete M8 / M12, código A [21].

Tabela 3-6 - Atribuições de pinos para conectores de plugue e soquete M8/M12 com código A [21].

Número do contato	Função do conector M8 / M12
1	Sinal Ethernet-APL -
2	Sinal Ethernet-APL +
3	Blindagem a
4	Não utilizada
Estrutura de encaixe de conector metálico	Blindagem
a Se um fio de dreno de blindagem for utilizado.	

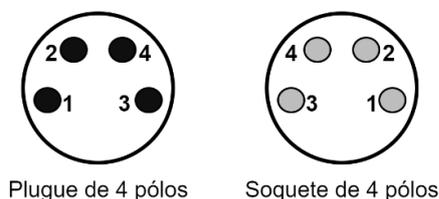


Figura 3-8 - Atribuição dos pinos dos conectores de plugue e soquete M8 com código A [21].

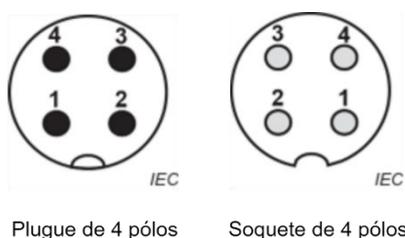


Figura 3-9 - Atribuição dos pinos de conectores de plugue e soquete M12 com código A [21].

### 3.3.4. BLOCOS TERMINAIS MODULARES

A atribuição de pinos para blocos terminais modulares segue as diretrizes apresentadas nas

Tabela 3-7, Tabela 3-8 e Tabela 3-9. Em portas que suportam apenas uma opção de aterramento da blindagem ou quando o aterramento é configurado por outros meios, como um interruptor mecânico, os contatos devem ser designados conforme as indicações da Tabela 3-7.

Nos casos em que as portas oferecem opções de blindagem usando dois terminais, a atribuição de contatos deve ser realizada conforme mostrado na Tabela 3-8. Já nos casos em que se utilizam 2 redes Ethernet-APL, a atribuição dos contatos deve ser realizada conforme mostrado na Tabela 3-9 [21].

As Tabela 3-7, Tabela 3-8 e Tabela 3-9 detalham as atribuições específicas de pinos para bornes de 3, 4 e 6 posições, respectivamente. Além disso, a Figura 3-10 oferece visualizações gráficas de exemplos práticos, apresentando bloco terminal modular de 3 pinos, 4 pinos e 6 pinos, juntamente com um bloco terminal PCI de 3 pinos. Essas informações são fundamentais para garantir a correta aplicação e funcionamento desses componentes em sistemas Ethernet-APL [21].

Tabela 3-7 - Atribuições de pinos para bornes de 3 posições [21].

<b>Número do borne</b>	<b>Função</b>
1	Sinal Ethernet-APL +
2	Sinal Ethernet-APL –
3	Blindagem

Tabela 3-8 - Atribuições de pinos para bornes de 4 posições [21].

<b>Número do borne</b>	<b>Função</b>
1	Sinal Ethernet-APL +
2	Sinal Ethernet-APL –
3	Blindagem conectada diretamente ao terra
4	Blindagem conectada com capacitor ao terra

Tabela 3-9 - Alocações de bornes para blocos terminais de 6 bornes [21].

<b>Número do borne</b>	<b>Função</b>
1	Sinal Ethernet-APL 1 +
2	Sinal Ethernet-APL 1 –
3	Blindagem
4	Sinal Ethernet-APL 2 +
5	Sinal Ethernet-APL 2 –
6	Blindagem

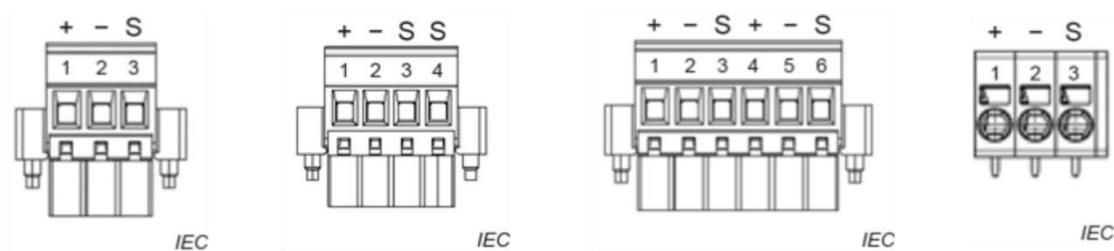


Figura 3-10 - Exemplos: bloco terminal modular de 3 pinos, 4 pinos e 6 pinos, e bloco terminal PCI de 3 pinos [21].

### 3.4. NORMA ABNT IEC TS 60079-47: PROTEÇÃO DE EQUIPAMENTOS PELO CONCEITO DA ÉTHERNET INTRINSECAMENTE SEGURA A DOIS FIOS (2-WISE)

Esta norma especifica os requisitos para a fabricação, marcação, documentação e instalação de equipamentos e sistemas para a utilização com o conceito 2-WISE (*2-Wire Intrinsically Safe Ethernet Concept*), com base na especificação de camada física para Ethernet a dois fios 10BASE-T1L, como definido na IEEE 802.3cg [22].

O conceito 2-WISE para uma camada física avançada (APL- *Advanced Physical Layer*) é projetado para “simplificar” o processo de avaliação dos parâmetros de entidade dos equipamentos e cabeamento dentro dos segmentos Ethernet-APL. Esta simplificação é obtida por meio da determinação de limites para os parâmetros universais de segurança intrínseca para as portas de comunicação Ethernet-APL, de acordo com os requisitos da classificação de área específica do local da instalação e apresenta listagens simples de conjunto de parâmetros universais para a configuração dos segmentos 2-WISE [22].

#### 3.4.1. DEFINIÇÕES

Um dispositivo 2-WISE é um equipamento elétrico intrinsecamente seguro ou um dispositivo associado que possui uma porta de comunicação conforme o 2-WISE [22].

Um sistema 2-WISE é um conjunto interconectado de dispositivos 2-WISE que pode ser instalado parcial ou integralmente em áreas classificadas, sendo esses dispositivos intrinsecamente seguros [22].

Os dispositivos 2-WISE são equipados com portas definidas da seguinte maneira: a porta de fonte 2-WISE é uma porta de um dispositivo 2-WISE que fornece

alimentação em corrente contínua para um segmento Ethernet-APL, além de funções de comunicação. A porta de carga 2-WISE é uma porta de um dispositivo que consome energia em corrente contínua a partir de um segmento Ethernet-APL, além das funções de comunicação. A porta de comunicação 2-WISE é uma porta que oferece apenas comunicação e não consome energia. Além disso, há a porta para dispositivo auxiliar 2-WISE, cuja função específica não é completamente detalhada na informação fornecida [22].

Porta de um dispositivo 2-WISE que possui outras funções além da comunicação, como uma carga passiva ou a introdução de um sinal de perda de comunicação, exemplificado pelo protetor de surto [22].

Um segmento Ethernet-APL é uma interconexão de uma porta de alimentação e uma porta de carga ou a interconexão de duas portas de comunicação em um sistema 2-WISE [22].

### **3.4.2. REQUISITOS PARA DISPOSITIVOS 2-WISE**

Os dispositivos 2-WISE devem estar em conformidade com a norma ABNT NBR IEC 60079-11, que trata de projeto de equipamentos com proteção por segurança intrínseca, em relação aos requisitos mencionados a seguir [22].

As portas dos dispositivos 2-WISE devem seguir os requisitos em 3.4.2.1, 3.4.2.2 ou 3.4.2.3 [22].

Um dispositivo de terminação de rede, quando conectado em uma porta de fonte de alimentação, porta de carga ou porta de comunicação 2-WISE, não pode ter uma capacitância superior a  $2,2 \mu\text{F}$ , associada a um resistor em série de  $90 \Omega$ . Outros valores de capacitância e resistência em série podem ser combinados de acordo com os requisitos da norma ABNT NBR IEC 60079-11 [22].

#### *3.4.2.1. PORTAS DE FONTE DE ALIMENTAÇÃO 2-WISE*

As portas de fonte de alimentação 2-WISE podem ter características lineares ou não. A tensão de saída máxima  $U_0$  deve situar-se entre 14 V e 17,5 V, sob condições especificadas pela ABNT NBR IEC 60079-11, para o nível de proteção (EPL) pretendido [22].

A tensão  $U_o$  é a soma da tensão de alimentação e da tensão de comunicação. A capacitância interna máxima ( $C_i$ ) deve ser de 5 nF, e a indutância interna máxima ( $L_i$ ) deve ser de 10  $\mu$ H [22].

A corrente máxima de saída para as portas 2-WISE ( $I_o$ ) é de 380 mA e deve estar em conformidade com a norma ABNT NBR IEC 60079-11. A potência máxima de saída ( $P_o$ ) deve ser de no máximo 5,32 W [22].

### 3.4.2.2. PORTAS DE CARGA 2-WISE E PORTAS DE DISPOSITIVOS AUXILIARES 2-WISE

As portas de carga 2-WISE e as portas de dispositivos auxiliares 2-WISE, quando conectadas em sistemas intrinsecamente seguros, devem seguir requisitos específicos [22].

A Tabela 3-10 determina os parâmetros elétricos para portas de carga 2-WISE e portas de dispositivos auxiliares 2-WISE. Os valores apresentados são aplicáveis a todos os grupos de equipamentos (grupos I, II e III) [22].

Tabela 3-10 - Parâmetros intrinsecamente seguros para portas de carga 2-WISE e portas de dispositivos auxiliares 2-WISE [22].

		Porta de carga 2-WISE	Porta de dispositivo auxiliar 2-WISE
Tensão máxima de entrada	$U_i$	17,5 V	17,5 V
Corrente máxima de entrada	$I_i$	380 mA	380 mA
Potência máxima de entrada	$P_i$	5,32 W	5,32 W
Capacitância máxima interna	$C_i$	5 nF	5 nF
Indutância máxima interna	$L_i$	10 $\mu$ H	200 nH
Corrente máxima de fuga		1 mA	50 $\mu$ A

### 3.4.2.3. PORTAS 2-WISE SOMENTE PARA COMUNICAÇÃO

As portas de comunicação 2-WISE devem possuir características de saída linear. A Tabela 3-11 determina os valores elétricos para portas 2-WISE somente para comunicação que são conectadas em sistemas intrinsecamente seguros. Os valores de  $U_i$ ,  $I_i$  e  $P_i$  são especificados para evitar a ocorrência de dano de uma porta 2-WISE somente para comunicação, caso esta porta seja acidentalmente conectada a uma porta de fonte de alimentação [22].

Tabela 3-11 - Parâmetros intrinsecamente seguros para portas 2-WISE somente para comunicação [22].

Tensão máxima de saída	$U_o$	9 V
Corrente máxima de saída	$I_o$	112,5 mA
Potência máxima de saída	$P_o$	254 mW
Tensão máxima de entrada	$U_i$	17,5 V
Corrente máxima de entrada	$I_i$	380 mA
Potência máxima de entrada	$P_i$	5,32 W
Capacitância máxima interna	$C_i$	5 nF
Indutância máxima interna	$L_i$	10 $\mu$ H

#### 3.4.2.4. EQUIPAMENTOS SIMPLES

Em equipamentos simples, a indutância interna deve ser de no máximo 1  $\mu$ H e a capacitância interna de no máximo 1 nF [22].

#### 3.4.3. REQUISITOS PARA SISTEMAS 2-WISE

Existem dois tipos distintos de sistemas 2-WISE: o sistema apenas para comunicação, sem alimentação e o sistema para comunicação com alimentação. O sistema 2-WISE, em sua essência, é projetado para comunicação. Já o sistema 2-WISE com alimentação adicional possui características específicas, a porta de fonte de alimentação fornece corrente contínua para uma porta de carga e as portas dos dispositivos auxiliares também podem consumir energia em corrente contínua [22].

No caso do sistema 2-WISE sem alimentação, uma fonte externa é necessária para alimentar os dispositivos. Nesse cenário, uma porta dedicada exclusivamente à comunicação não pode ser conectada a uma porta de alimentação [22].

Além disso, em um sistema 2-WISE, a soma das indutâncias de todos os dispositivos conectados não pode exceder 10  $\mu$ H, enquanto a soma das capacitâncias não pode ultrapassar 5 nF [22].

Observações importantes incluem o fato de que os terminais de conexão de campo 2-WISE ou chaves eletromecânicas são considerados equipamentos simples e, portanto, não contribuem para o cálculo total de indutância e capacitância. Ademais, os *stubs* utilizados para a conexão de dispositivos auxiliares 2-WISE, desde que tenham comprimento inferior a 1 metro, não são considerados parte do comprimento total do sistema 2-WISE [22].

### 3.4.3.1. SISTEMA DE CABEAMENTO DE CAMPO

Os cabos em um sistema 2-WISE devem atender aos seguintes parâmetros:

- Resistência do cabo ( $R_c$ ): 15  $\Omega$ /km a 150  $\Omega$ /km [22];
- Indutância do cabo ( $L_c$ ): 0,4 mH/km a 1 mH/km [22];
- Capacitância do cabo ( $C_c$ ): 45 nF/km a 200 nF/km [22].

### 3.4.3.2. SISTEMAS 2-WISE ALIMENTADOS

Um sistema 2-WISE alimentado é considerado intrinsecamente seguro quando uma porta de fonte de alimentação e até duas portas de dispositivos auxiliares 2-WISE estão conectadas por meio de um cabo, atendendo às especificações previamente mencionadas, com um comprimento máximo de 200 m, conforme ilustrado nas Figura 3-11 e Figura 3-12 [22].

As Figura 3-11 e Figura 3-12 possuem as seguintes representações: o número 1 corresponde ao dispositivo 2-WISE, o número 2 representa a porta de fonte de alimentação 2-WISE, o número 4 indica a porta de dispositivo auxiliar 2-WISE, o número 5 refere-se a uma porta de dispositivo auxiliar 2-WISE que está fisicamente separada em dois terminais de conexão de campo, mas eletricamente conectada, sendo considerada como uma única porta de dispositivo auxiliar por dispositivo 2-WISE, e o número 6 representa a porta de carga 2-WISE [22].

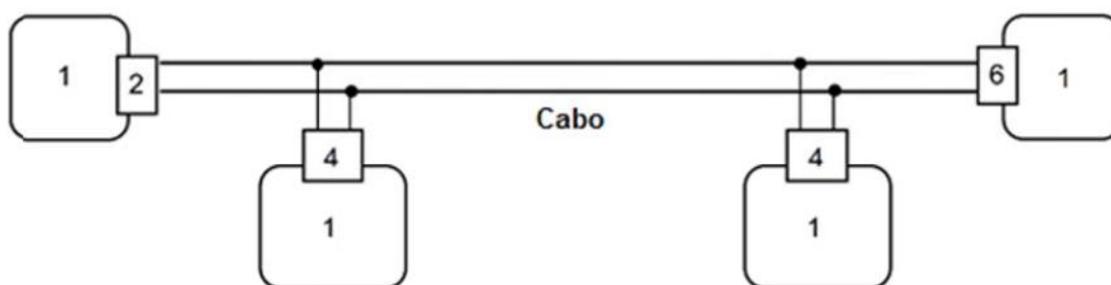


Figura 3-11 - Portas de dispositivos auxiliares 2-WISE conectadas por meio de fios curtos (derivações) ao cabo do sistema [22].

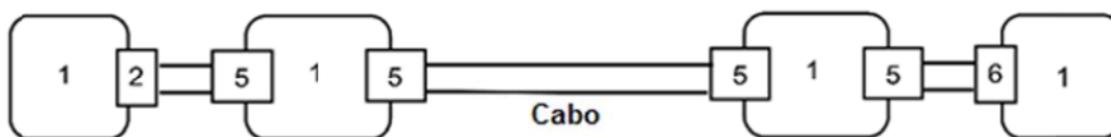


Figura 3-12 - Portas de dispositivo auxiliares 2-WISE conectadas por meio de conexão em série no cabo do sistema [22].

6 - Porta de carga 2-WISE. [22]

### 3.4.3.3. SISTEMAS 2-WISE SOMENTE COM COMUNICAÇÃO

Um sistema 2-WISE não alimentado é considerado intrinsecamente seguro quando uma porta de fonte de alimentação e até duas portas de dispositivos auxiliares 2-WISE estão conectadas por meio de um cabo, atendendo às especificações previamente mencionadas, com um comprimento máximo de 200 m, conforme ilustrado nas Figura 3-13 e Figura 3-14 [22].

As Figura 3-13 e Figura 3-14 possuem as seguintes representações: o número 1 corresponde ao dispositivo 2-WISE, o número 3 representa a porta 2-WISE utilizada exclusivamente para comunicação, o número 4 indica a porta de dispositivo auxiliar 2-WISE, e o número 5 refere-se a uma porta de dispositivo auxiliar 2-WISE fisicamente separada em duas conexões de campo, mas eletricamente conectada, sendo considerada como uma única porta de dispositivo auxiliar por dispositivo 2-WISE.

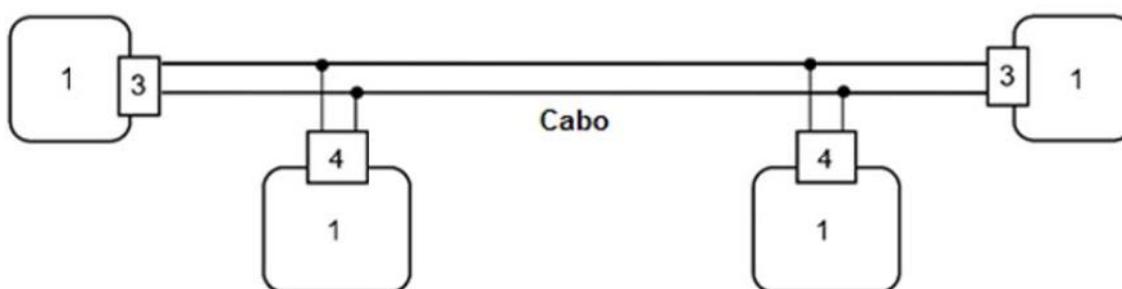


Figura 3-13 - Portas de dispositivo auxiliares 2-WISE conectadas em paralelo por meio de fios curtos (derivações) ao cabo do sistema [22].

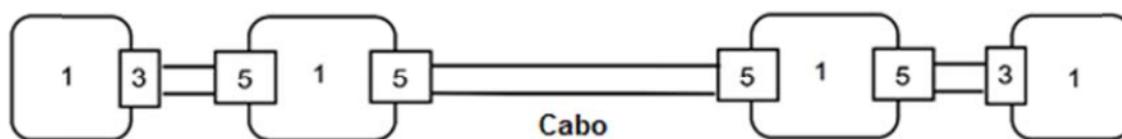


Figura 3-14 - Portas de dispositivos auxiliares 2-WISE conectadas por meio de uma conexão série ao cabo do sistema [22].

### 3.5. COMPONENTES DA REDE ETHERNET-APL

#### 3.5.1. TIPOS DE DISPOSITIVOS DE CAMPO

A Tabela 3-12 descreve as características dos dispositivos de campo Ethernet-APL, considerando fatores como aplicação, fluxo, temperatura, compatibilidade de portas, conectores, classificação Ex (para áreas classificadas) e protocolos de comunicação. A certificação do dispositivo Ethernet-APL deve seguir as normas IEC TS 63444 e ABNT NBR IEC TS 60079-47 (2-WISE) para garantir conformidade com diferentes tipos de dispositivos Ethernet-APL [20][21][22][23].

Tabela 3-12 - Características dos dispositivos de campo Ethernet-APL [20][21][22][23].

Aplicação	Fluxo Temperatura
Compatibilidade de portas	Tronco Derivação Alimentado / sem alimentação
Conectores	Terminal M12 M8 (para sinais não intrinsecamente seguros)
Classificação Ex	Sem classificação Ex Zona 2 Zona 1 Zona 0
Protocolo de comunicação	PROFINET Ethernet/IP HART-IP OPC UA

Para a especificação correta do dispositivo, é crucial que o fabricante especifique o tipo de porta e a classe da porta, garantindo a integração eficiente na rede Ethernet Industrial, como EtherNet/IP, HART IP, OPC UA e PROFINET [20][21][22][23].

### 3.5.2. TIPOS DE DISPOSITIVOS ETHERNET-APL

A Tabela 3-13 lista os diferentes tipos de dispositivos Ethernet-APL, incluindo o *switch* Ethernet Industrial padrão, o *switch* de alimentação Ethernet-APL, o *switch* Ethernet-APL com cabo tronco não alimentado, o *switch* de campo Ethernet-APL sem / com fonte de alimentação auxiliar, o dispositivo Ethernet-APL auxiliar, a conexão Ethernet-APL em linha e o escravo Ethernet-APL [20][21][22][23].

Tabela 3-13 - Tipos de dispositivos Ethernet-APL [20][21][22][23].

Símbolo	Nome	Descrição
	Switch Ethernet padrão	Switch Ethernet Industrial padrão.
	Switch de Alimentação Ethernet-APL	Switch de alimentação Ethernet-APL. Converte Ethernet Industrial em Ethernet-APL e alimenta as portas Ethernet-APL. É necessária uma energia auxiliar para alimentar a rede Ethernet-APL subordinada. A fonte de alimentação auxiliar é indicada pela seta grossa.
	Switch de campo Ethernet-APL.	Este switch de campo Ethernet-APL se conecta ao tronco Ethernet-APL aos dispositivos de campo Ethernet-APL e fornece energia para os dispositivos de campo Ethernet-APL conectados ao switch. Recebe energia através de um cabo tronco.
	Switch de campo Ethernet-APL com fonte de alimentação auxiliar	Este switch de campo Ethernet-APL com fonte de alimentação auxiliar conecta a Ethernet Industrial com os dispositivos de campo Ethernet-APL e fornece energia para o campo Ethernet-APL. O switch está conectado à alimentação auxiliar e não recebe alimentação da rede Ethernet industrial.

	Dispositivo Ethernet-APL auxiliar	Um dispositivo que é conectado em um segmento Ethernet-APL, mas que não se comunica. Pode ser uma carga de energia ou uma introdução de perdas de inserção de sinal de comunicação. Um protetor contra surtos é, por exemplo, um dispositivo auxiliar.
	Conexão Ethernet-APL em linha	Uma conexão em linha é um dispositivo que é usado para conectar cabos Ethernet-APL.
	Escravo Ethernet-APL	Escravo Ethernet-APL

### 3.5.3. PORTAS DA REDE ETHERNET-APL

#### 3.5.3.1. COMPATIBILIDADE DE PORTAS DA REDE ETHERNET-APL

Os segmentos de cabo na rede Ethernet-APL se dividem entre troncos (T) e derivações (S). Suas características são delineadas da seguinte maneira [20][21][22][23]:

Tronco (T): O cabo tronco representa a "linha principal" da rede Ethernet-APL, conectando o *switch* de Alimentação Ethernet-APL aos *switches* de Campo Ethernet-APL. O comprimento máximo de um cabo tronco é de 1000 metros e seu comprimento máximo é calculado conforme demonstrado no subcapítulo 3.6.2 [20][21][22][23].

Derivação (S): O cabo de derivação conecta um dispositivo de campo a um *switch* de campo e o comprimento máximo dessa derivação é de 200 metros (categoria de cabo IV). [20][21][22][23]

A Figura 3-15 ilustra o segmento tronco e o segmento de derivação na mesma estrutura de rede. Importante notar que o comprimento máximo de um tronco e de uma derivação depende exclusivamente da categoria do cabo, conforme indicado Tabela 3-14 [20][21][22][23].

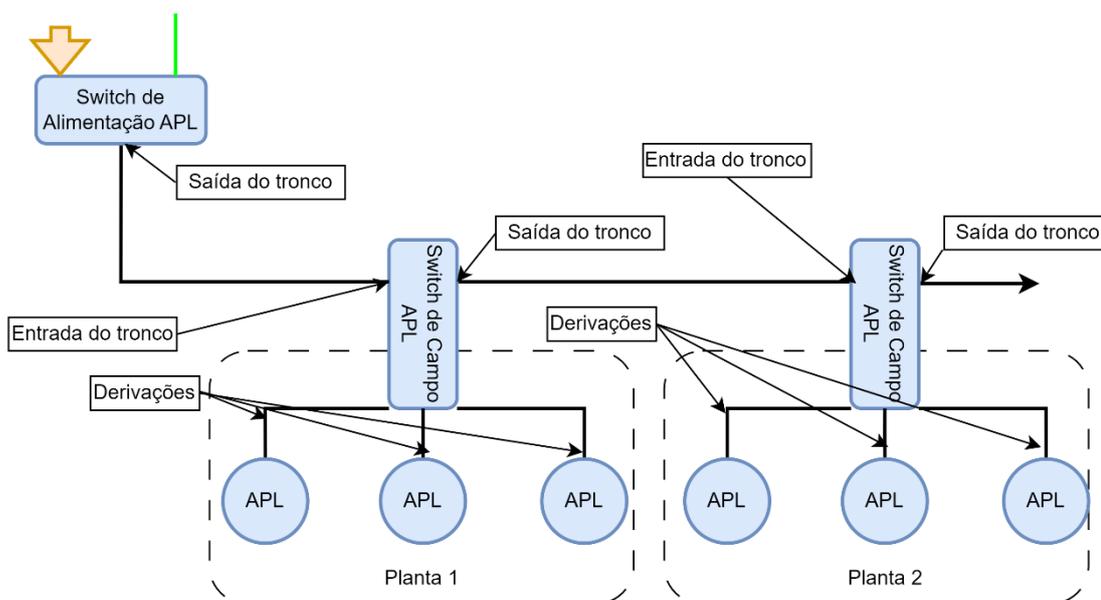


Figura 3-15 - Estrutura da rede Ethernet-APL com tronco e derivações [20][21][22][23].

### 3.5.3.2. CATEGORIA DE CABO

A Tabela 3-14 especifica o comprimento máximo de cabo suportado para troncos e derivações dependendo das características dos cabos [20][21][22][23].

Na Figura 3-15, o *switch* de alimentação Ethernet-APL se conecta ao cabo tronco por meio da porta de saída do tronco. O sinal Ethernet-APL é direcionado para a porta de entrada do tronco do primeiro *switch* de campo Ethernet-APL e, em seguida, encaminhado para os demais *switches* de campo Ethernet-APL. Estes possuem portas de derivação conectadas às portas de derivação do *switch* de campo Ethernet-APL.

Para a interconexão de portas, aplicam-se as seguintes regras: uma porta de entrada do tronco deve ser conectada apenas a uma porta de saída do tronco; uma porta de derivação de um dispositivo de campo Ethernet-APL só pode ser conectada a uma porta de derivação de um *switch* de campo Ethernet-APL; e a cada porta do *switch* de campo Ethernet-APL só pode ser conectado um dispositivo de campo Ethernet-APL. Em algumas topologias, os dispositivos de campo são alimentados diretamente pela rede de controle. Nesses casos, aplicam-se exclusivamente as regras relativas às portas de derivação [20][21][22][23].

É importante ressaltar que apenas um dispositivo de campo Ethernet-APL pode ser conectado a cada porta do *switch* de campo Ethernet-APL [20][21][22][23].

Tabela 3-14 - Comprimentos máximos de cabo permitidos de acordo com a categoria de cabo Ethernet-APL [20][21][22][23].

Parâmetro	Categoria de cabo Ethernet-APL			
	I	II	III	IV
Comprimento máximo do cabo tronco em metros	250	500	750	1000
Comprimento máximo da derivação em metros	50	100	150	200

### 3.5.4. TIPOS DE CABOS PARA REDES ETHERNET-APL

Para os segmentos Ethernet-APL (2-WISE), os cabos são baseados no padrão *Fieldbus* tipo A. Este cabo, que atende aos requisitos para aplicações intrinsecamente seguras e está em conformidade com a norma ABNT NBR IEC TS 60079-47 (2-WISE) [20][21][22][23].

As Figura 3-16 e Figura 3-17 ilustram os cabos mencionados, destacando dois fios protegidos por uma blindagem e uma capa. A coloração padrão da capa para os cabos Ethernet-APL intrinsecamente seguros é azul-claro. Para distinção em relação às aplicações intrinsecamente seguras, os demais segmentos Ethernet-APL podem adotar qualquer outra cor, exceto o azul claro [20][21][22][23].

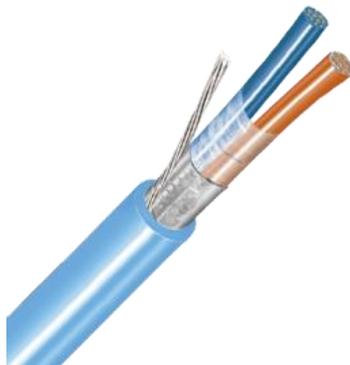


Figura 3-16 - Cabo *Fieldbus* tipo A para segmentos Ethernet-APL intrinsecamente seguros na cor azul-claro [20][21][22][23].

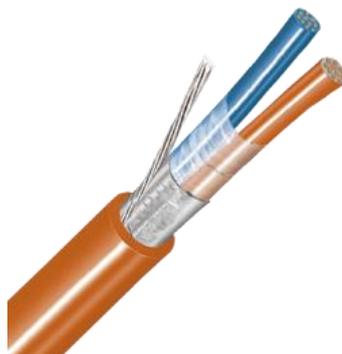


Figura 3-17 - Cabo *Fieldbus* tipo A para outros segmentos Ethernet-APL na cor laranja [20][21][22][23].

### 3.5.5. CONEXÕES LINEARES E DISPOSITIVOS AUXILIARES

Nos capítulos anteriores, foram explorados tópicos relacionados aos *switches* de campo, *switches* de alimentação e dispositivos de campo Ethernet-APL. Neste subcapítulo, a atenção volta-se para os dispositivos auxiliares Ethernet-APL e as conexões lineares Ethernet-APL. Um exemplo de dispositivo auxiliar é um protetor de surto. Conexões lineares podem incluir caixas de junção ou conectores cabo a cabo, utilizados para unir dois segmentos de cabo, possibilitando a conexão e desconexão de dispositivos para fins de manutenção, por exemplo. Ambos os componentes introduzem reflexões e perda de inserção, portanto, o número desses dispositivos é limitado, conforme indicado na Tabela 3-15 [20][21][22][23].

A Tabela 3-15 apresenta o número máximo permitido de dispositivos auxiliares e conexões por tipo de segmento, considerando que o dispositivo auxiliar também é uma conexão em linha. Se os dispositivos auxiliares estiverem conectados em paralelo a um segmento Ethernet-APL, os fios entre o cabo do segmento e o dispositivo auxiliar são considerados como uma derivação, tendo um comprimento limitado a 10 centímetros [20][21][22][23].

Tabela 3-15 - Número máximo de dispositivos auxiliares e conexões em linha por segmento [20][21][22][23].

Classe de segmento	Comprimento suportado do cabo	Número máximo de dispositivos auxiliares	Número máximo de conexões em linha (dispositivos auxiliares + conectores de cabo)
S	Derivação ( <i>spur</i> )	2	4
T	Tronco	2	10

A Figura 3-18 oferece uma representação visual de um exemplo de rede Ethernet-APL que inclui dispositivos auxiliares e conectores de cabo. [20][21][22][23]

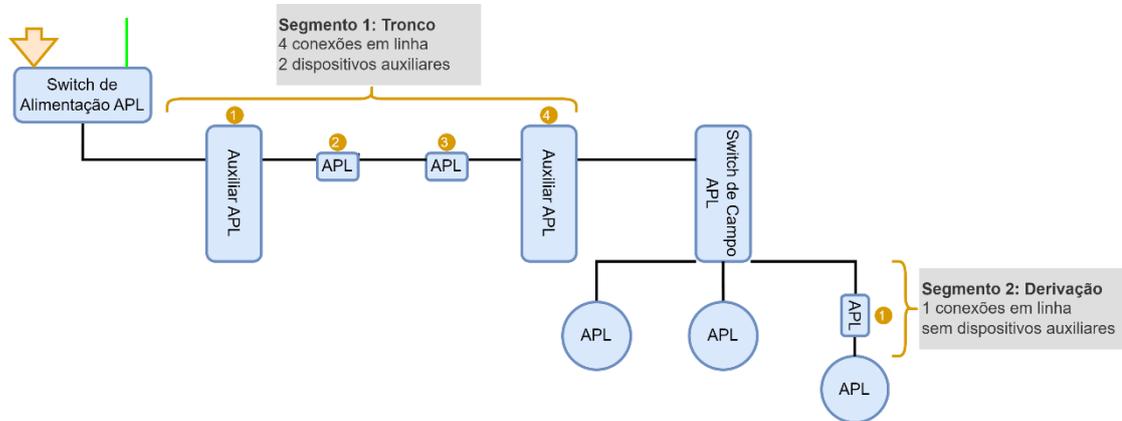


Figura 3-18 - Exemplo de sistema Ethernet-APL com dispositivos auxiliares e conexões em linha [20][21][22][23].

### 3.6. POSSÍVEIS TOPOLOGIAS EM UM SISTEMA ETHERNET-APL

As topologias empregadas na rede Ethernet-APL compreendem *switches* de campo com conexão Ethernet Industrial e *switches* de alimentação Ethernet-APL com cabo tronco [20][21][22][23].

Conforme evidenciado na Figura 3-19, os *switches* de campo são estrategicamente posicionados em proximidade aos dispositivos de campo, atendendo às exigências específicas da disposição na planta industrial. A consideração da Zona/Classe Ex do *switch* de campo é crucial, e a distância máxima entre o dispositivo de campo e o *switch* de campo não deve exceder 200 metros (derivação), utilizando cabo *fieldbus* tipo A de categoria IV [20][21][22][23].

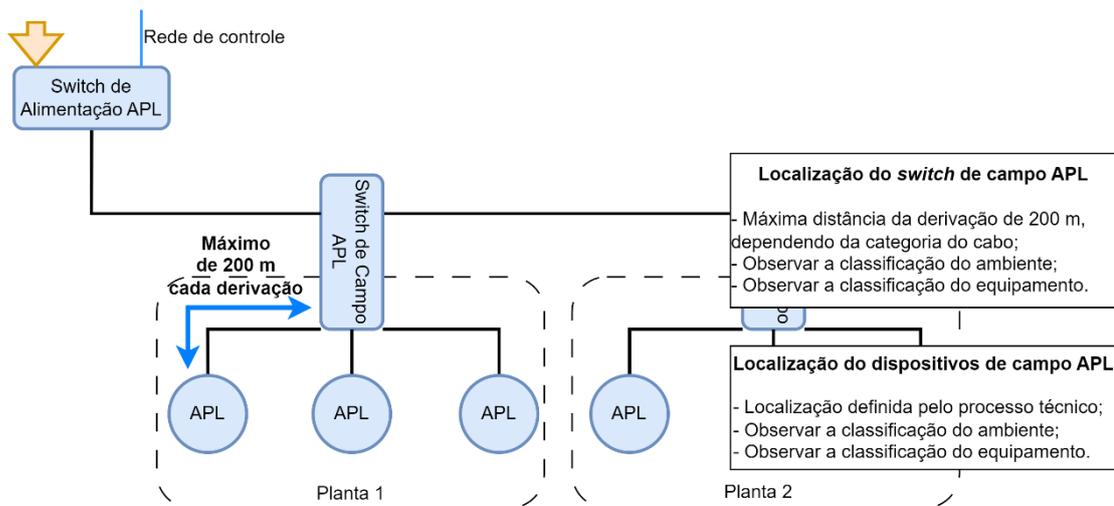


Figura 3-19 - Localização de dispositivos de campo e *switches* de campo [20][21][22][23].

### 3.6.1. TOPOLOGIA COM SWITCHES DE CAMPO E CONEXÃO ETHERNET INDUSTRIAL

A interconexão dos *switches* de campo com a rede de controle é viabilizada por qualquer padrão de rede Ethernet Industrial. O *switch* de campo desempenha o papel de roteador, direcionando a rede de controle através de um cabo de fibra óptica (até 2 km). Alternativamente, a conexão pode ser estabelecida por cabo de cobre, embora com uma restrição de comprimento (até 1000 metros). Nesta configuração, não é necessário um *switch* de alimentação, entretanto, o *switch* de campo Ethernet-APL requer uma fonte de alimentação. A representação desta topologia é ilustrada na Figura 3-20 [20][21][22][23].

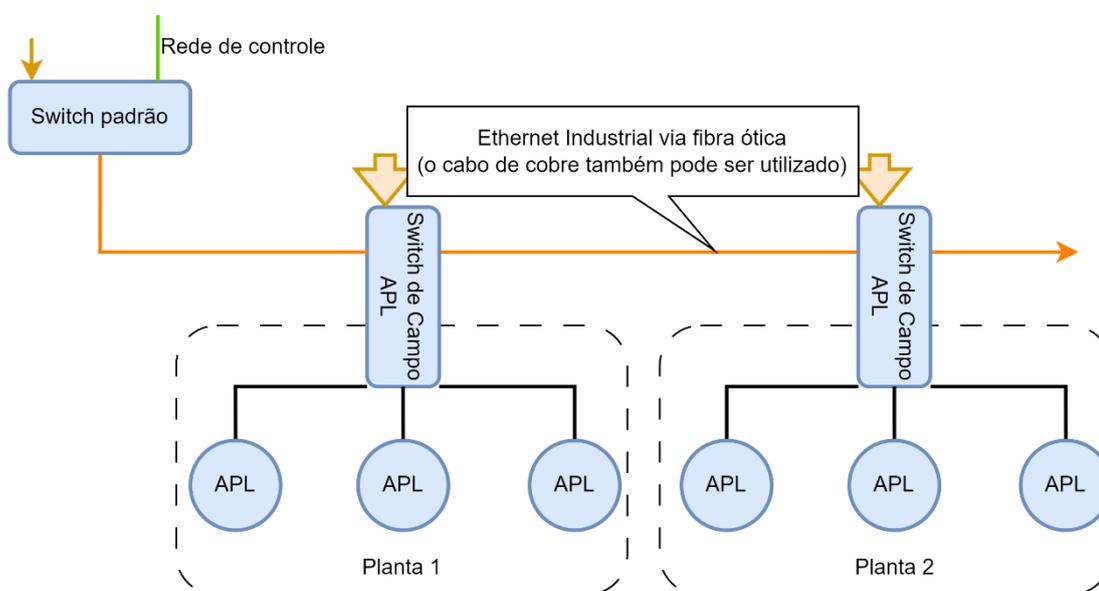


Figura 3-20 - *Switches* de campo com conexão Ethernet industrial [20][21][22][23].

### 3.6.2. TOPOLOGIA COM TRONCO ETHERNET-APL

Na topologia com tronco Ethernet-APL, os segmentos podem estender-se até 1000 metros, levando em conta variáveis como a tensão de alimentação do *switch* de alimentação Ethernet-APL, o número de *switches* de campo Ethernet-APL, a quantidade de dispositivos de campo Ethernet-APL e seu consumo de energia, a seção transversal do cabo tronco utilizado e também a temperatura do cabo tronco, visto que sua resistência está vinculada à temperatura ambiente. É importante observar que os *switches* de campo Ethernet-APL devem possuir uma derivação de, no máximo, 200 metros [20][21][22][23].

### 3.7. MODULAÇÃO PAM-3 PARA ETHERNET-APL

Este subcapítulo introduz a modulação por amplitude de pulso em três níveis (PAM-3), uma técnica chave para melhorar a transmissão de dados na Ethernet-APL. Será apresentada uma descrição breve de como a PAM-3 permite uma transmissão de dados mais eficiente em ambientes industriais, destacando seu principal benefício e a forma de onda do sinal modulado PAM-3, tudo isso dentro do contexto das redes Ethernet adaptadas para uso industrial.

A modulação PAM-3 é uma técnica onde os dados digitais são representados por três níveis de amplitude distintos: “+1”, “0” e “-1”. Isso permite transmitir mais

informações em um único símbolo em comparação com a modulação binária tradicional, que utiliza apenas dois níveis (“0” e “1”) [20][21][22][23].

A modulação PAM-3 funciona da seguinte forma [20][21][22][23]:

1. Conversão de dados digitais:

Os dados binários são agrupados em conjuntos de bits. No caso da modulação PAM-3, cada símbolo pode representar 2 bits. Por exemplo:

00 → -1

01 → 0

10 → +1

11 → +1

2. Geração do sinal:

Um gerador de sinal analógico cria pulsos com as amplitudes correspondentes aos símbolos mapeados. O sinal resultante é uma série de pulsos com níveis de amplitude +1, 0 ou -1 [20][21][22][23].

A Figura 3-21 representa a forma de onda do sinal modulado PAM-3, onde cada símbolo corresponde a 2 bits [20][21][22][23].

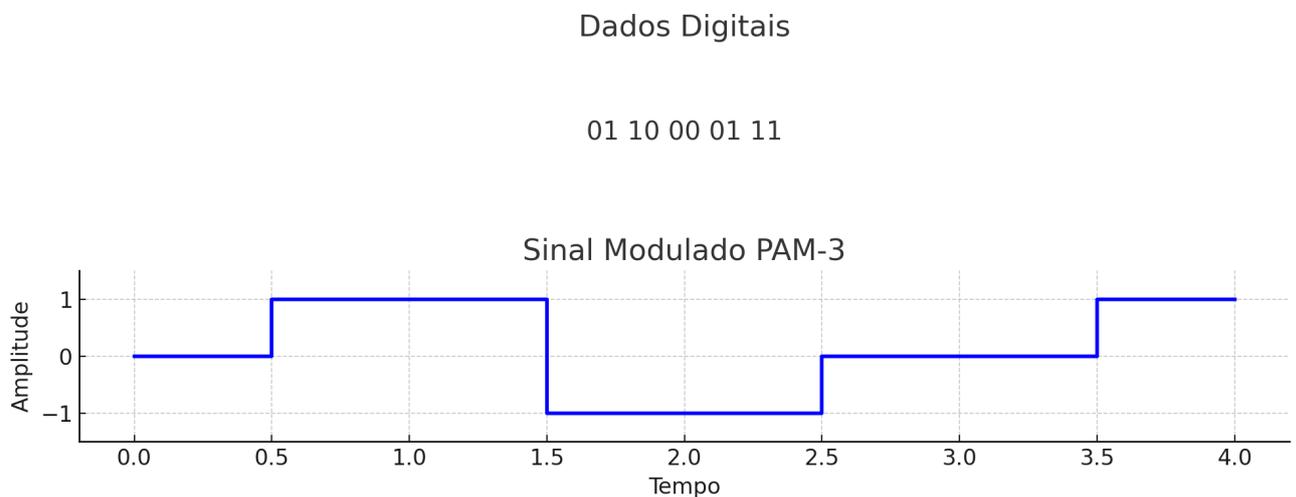


Figura 3-21 - Modulação PAM-3 para Ethernet-APL [20][21][22][23].

### 3.7.1. MODULAÇÃO *FULL DUPLEX* EM DOIS FIOS

Este subcapítulo explora a tecnologia de modulação full duplex em dois fios, uma inovação que revoluciona a comunicação em redes industriais ao permitir que os sinais sejam enviados e recebidos simultaneamente através de um único par de fios. Esta capacidade não apenas aumenta a eficiência da transmissão de dados, mas

---

também aprimora a confiabilidade das comunicações em ambientes industriais [20][21][22][23].

A operacionalidade do full duplex em dois fios no Ethernet-APL depende crucialmente de técnicas sofisticadas de cancelamento de eco, que são essenciais para evitar interferências entre os sinais de transmissão e recepção. O eco, sendo o reflexo do sinal transmitido que retorna ao transmissor, pode potencialmente corromper os dados recebidos. Para combater isso, o sistema emprega um método meticuloso onde cada dispositivo envolvido na comunicação avalia e neutraliza o eco originado de suas próprias transmissões [20][21][22][23].

O processo começa com a transmissão e recepção simultâneas de dados, onde os dispositivos utilizam o mesmo par de fios para enviar e receber informações. Ao mesmo tempo, cada dispositivo realiza uma medição precisa do eco resultante de sua transmissão. Este sinal de eco medido é então subtraído do sinal recebido, efetivamente isolando o sinal de dados desejado das perturbações causadas pelo eco. Finalmente, o sinal agora limpo é processado para extrair os dados transmitidos pelo dispositivo remoto, garantindo que a informação chegue de forma clara e precisa [20][21][22][23].

Esta técnica de cancelamento de eco é um componente chave para assegurar uma comunicação full duplex eficiente e robusta. Ela é especialmente vital em ambientes industriais, onde altos níveis de interferência eletromagnética podem desafiar a integridade dos dados. Detalhando a aplicação dessas técnicas no Ethernet-APL, este subcapítulo ilumina como tais estratégias são fundamentais para a operação de sistemas industriais modernos, proporcionando uma solução robusta e adaptável que atende às crescentes demandas do setor [20][21][22][23].

## **4. COMPARAÇÃO DAS REDES INDUSTRIAIS PARA ÁREAS CLASSIFICADAS**

Este capítulo apresenta uma análise comparativa das redes HART, PROFIBUS-PA e Ethernet-APL em relação a seis características essenciais: desempenho da rede, distância de cabo máxima, faixa de alimentação, quantidade máxima de dispositivos, possíveis topologias, e aplicações em áreas classificadas.

A comparação é apresentada de forma tabular, com explicações detalhadas para facilitar a compreensão das diferenças e aplicações adequadas de cada tecnologia em ambientes industriais classificados.

### **4.1. DESEMPENHO DA REDE**

A taxa de transmissão é um fator crucial que define a quantidade de dados que podem ser transferidos em um determinado intervalo de tempo, impactando diretamente a eficiência da comunicação e a capacidade de resposta do sistema. No contexto de diferentes tecnologias de rede, o protocolo HART opera a uma taxa relativamente baixa de 1200 bps, limitando sua capacidade de comunicação em comparação com tecnologias mais avançadas. Por outro lado, o PROFIBUS-PA oferece uma taxa significativamente maior de 31,25 kbps, proporcionando uma melhoria substancial no desempenho da rede. No entanto, é a Ethernet-APL que se destaca com taxas de transmissão de até 10 Mbps, tornando-a a opção mais eficiente em termos de velocidade de comunicação, especialmente em aplicações que exigem respostas rápidas e grande volume de dados [2][23][24].

### **4.2. DISTÂNCIA MÁXIMA DE CABO**

A distância máxima de cabo é um fator determinante para a cobertura que uma rede pode alcançar sem a necessidade de repetidores ou amplificadores, influenciando diretamente a flexibilidade de instalação e o custo de infraestrutura. O protocolo HART, por exemplo, pode alcançar distâncias de até 1500 metros utilizando cabos padrão de 4-20 mA, tornando-o adequado para

aplicações que não exigem grandes extensões. O PROFIBUS-PA, por sua vez, oferece uma cobertura maior, podendo atingir até 1900 metros com o auxílio de repetidores, expandindo seu alcance em instalações industriais mais amplas. Já a Ethernet-APL proporciona uma distância máxima de 1000 metros por segmento sem a necessidade de repetidores, dependendo da topologia utilizada, o que a torna uma solução flexível e eficiente para ambientes industriais que requerem tanto alta velocidade quanto alcance significativo [2][23][24].

### 4.3. FAIXA DE ALIMENTAÇÃO

A faixa de alimentação dos dispositivos conectados à rede é crucial para garantir uma operação segura e eficiente. No sistema HART, a alimentação é fornecida pelo mesmo par de fios que transmite o sinal, com uma faixa típica de 12 a 36 VCC, permitindo uma integração simplificada sem a necessidade de cabos adicionais para energia. Já o PROFIBUS-PA é geralmente alimentado por um barramento de campo, operando dentro de uma faixa de tensão de 9 a 32 VCC, o que suporta uma distribuição eficaz de energia sem requerer tensões muito altas. Em contraste, a Ethernet-APL oferece uma faixa de tensão de alimentação mais ampla, de 12 a 50 VCC, proporcionando maior flexibilidade e capacidade de fornecer mais energia aos dispositivos conectados. Esta característica da Ethernet-APL é particularmente benéfica em aplicações industriais onde diferentes dispositivos podem exigir níveis de potência mais variados para funcionar de maneira ótima [2][23][24].

### 4.4. QUANTIDADE MÁXIMA DE DISPOSITIVOS

A capacidade de uma rede de conectar múltiplos dispositivos é fundamental para determinar sua escalabilidade e a complexidade na gestão desses dispositivos. Na tecnologia HART, por exemplo, a rede pode suportar até 15 dispositivos em uma configuração *multidrop*, o que limita seu uso em ambientes com maior demanda de conexões. Em contrapartida, o PROFIBUS-PA aumenta essa capacidade, permitindo a conexão de até 32 dispositivos por segmento, com a possibilidade de expansão usando repetidores, o que facilita a gestão em redes mais extensas e complexas [2][24].

Por outro lado, a Ethernet-APL oferece ainda mais flexibilidade e capacidade, com a possibilidade de conectar tipicamente até 100 dispositivos por segmento, dependendo da topologia e do equipamento utilizado, como switches industriais. Essa característica torna a Ethernet-APL particularmente adequada para aplicações industriais de grande escala, onde a necessidade de conectar um número elevado de dispositivos é crítica. A capacidade de expansão sem comprometer a eficiência da rede é um atributo valioso que destaca a Ethernet-APL das outras tecnologias, proporcionando uma solução robusta e escalável para a modernização e expansão de infraestruturas industriais [23].

#### 4.5. POSSÍVEIS TOPOLOGIAS

As topologias de rede desempenham um papel crucial na definição de como os dispositivos são interligados, influenciando diretamente a estrutura, a eficiência e a redundância da rede. No caso do HART, as topologias mais comuns incluem a configuração ponto a ponto, onde há uma conexão direta entre o transmissor e o controlador, e a topologia em barramento, em que vários dispositivos são conectados em paralelo no mesmo par de fios. Essa simplicidade pode limitar a escalabilidade, mas é adequada para aplicações menos complexas [24].

Já o PROFIBUS-PA oferece maior flexibilidade com a topologia em barramento, permitindo uma configuração linear ou em árvore com várias ramificações. Além disso, a topologia em estrela pode ser utilizada, aproveitando hubs ou switches para segmentar e expandir a rede, proporcionando maior capacidade e controle sobre os dispositivos conectados [2].

A Ethernet-APL, por sua vez, oferece uma variedade de topologias que atendem a diferentes necessidades operacionais. A topologia em estrela utiliza switches industriais para conectar dispositivos, facilitando a segmentação da rede e a administração dos dados. A topologia em linha permite conexões em série, com dispositivos derivando de um tronco principal, oferecendo simplicidade e eficiência. A topologia em anel, por fim, destaca-se por proporcionar redundância, garantindo que, em caso de falha em um ponto da rede, o tráfego possa ser redirecionado, assegurando a continuidade da comunicação. Essa flexibilidade e robustez tornam a Ethernet-APL ideal para

ambientes industriais exigentes que requerem alta confiabilidade e escalabilidade [23].

#### **4.6. APLICAÇÕES EM ÁREAS CLASSIFICADAS E TIPOS DE ÁREAS**

As topologias de rede desempenham um papel crucial na definição de como os dispositivos são interligados, influenciando diretamente a estrutura, a eficiência e a redundância da rede. No caso do HART, as topologias mais comuns incluem a configuração ponto a ponto, onde há uma conexão direta entre o transmissor e o controlador, e a topologia em barramento, em que vários dispositivos são conectados em paralelo no mesmo par de fios. Essa simplicidade pode limitar a escalabilidade, mas é adequada para aplicações menos complexas [24].

Já o PROFIBUS-PA oferece maior flexibilidade com a topologia em barramento, permitindo uma configuração linear ou em árvore com várias ramificações. Além disso, a topologia em estrela pode ser utilizada, aproveitando hubs ou switches para segmentar e expandir a rede, proporcionando maior capacidade e controle sobre os dispositivos conectados [2].

A Ethernet-APL, por sua vez, oferece uma variedade de topologias que atendem a diferentes necessidades operacionais. A topologia em estrela utiliza switches industriais para conectar dispositivos, facilitando a segmentação da rede e a administração dos dados. A topologia em linha permite conexões em série, com dispositivos derivando de um tronco principal, oferecendo simplicidade e eficiência. A topologia em anel, por fim, destaca-se por proporcionar redundância, garantindo que, em caso de falha em um ponto da rede, o tráfego possa ser redirecionado, assegurando a continuidade da comunicação. Essa flexibilidade e robustez tornam a Ethernet-APL ideal para ambientes industriais exigentes que requerem alta confiabilidade e escalabilidade [23].

A Tabela 4-1 resume as principais características das redes HART, PROFIBUS-PA e Ethernet-APL, destacando suas taxas de transmissão, distâncias de cabo máximas, faixas de alimentação, quantidades máximas de dispositivos, topologias possíveis e aplicações em áreas classificadas:

Tabela 4-1 - Comparação das redes industriais para áreas classificadas [2][23][24].

Característica	HART	PROFIBUS-PA	Ethernet-APL
Taxa de Transmissão	1200 bps	31.25 kbps	Até 10 Mbps
Distância de Cabo Máxima	1500 m	1900 m com repetidores	1000 m por segmento
Faixa de Alimentação	12-36 VCC	9-32 VCC	12-50 VCC
Máx. de Dispositivos	Até 15	Até 32	Até 100 por segmento
Possíveis Topologias	Ponto a Ponto, Barramento	Barramento, Estrela	Estrela, Linha, Anel
Aplicações em Áreas Classificadas	Zonas 2	Zonas 1, 2 e 0	Zonas 1, 2 e 0

## 5. APLICAÇÃO PRÁTICA ENVOLVENDO ETHERNET-APL

Este capítulo apresenta uma aplicação prática utilizando a rede Ethernet-APL no monitoramento de temperatura. A abordagem central inclui a análise dos telegramas de temperatura e o consumo de rede, com o uso do analisador de telegramas, Wireshark, com a finalidade de capturar e interpretar dados. Além disso, o capítulo explora a parametrização e diagnóstico dos sensores de temperatura e do *switch* de campo Ethernet-APL via servidor web, demonstrando como esses elementos contribuem para uma operação eficiente e segura na rede.

### 5.1. DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO

O monitoramento de temperatura é importante em várias indústrias, como petroquímica, farmacêutica e de alimentos, onde a temperatura precisa ser controlada para garantir a segurança, eficiência e qualidade do produto.

A Ethernet-APL oferece uma solução apropriada para o monitoramento em tempo real, suportando longas distâncias de cabo, fornecendo alimentação através da linha de dados (PoDL), e simplificando a instalação e manutenção. Este capítulo mostra como a Ethernet-APL pode ser utilizada para coletar, monitorar e analisar dados de temperatura, além de configurar e diagnosticar dispositivos, através de um servidor web.

### 5.2. DIAGRAMA EM BLOCOS

O diagrama em blocos mostrado na Figura 5-1 ilustra a interconexão dos diferentes componentes na aplicação do monitoramento de temperatura utilizando Ethernet-APL.

O diagrama ilustra a configuração de uma rede industrial que integra diversos componentes chave para o monitoramento e controle de processos. No centro do sistema, encontra-se uma Estação de Trabalho (PC), essencial para o monitoramento, configuração e análise dos dados coletados. Esta estação é interligada através de um Switch Ethernet Padrão que facilita a comunicação entre o PC e o CLP.

O CLP desempenha um papel crucial no processamento dos dados provenientes dos sensores, além de controlar o processo industrial em questão. Para garantir uma comunicação eficiente e fornecimento de energia dentro do sistema, um Switch de Campo Ethernet-APL é utilizado. Este dispositivo não apenas gerencia a comunicação entre os componentes da rede, mas também fornece alimentação necessária para os dispositivos Ethernet-APL conectados.

No que tange à coleta de dados, um Sensor de Temperatura é utilizado para capturar as medições de temperatura no ambiente ou processo. Os dados capturados pelo sensor são enviados a um Transmissor de Temperatura, que tem a função de converter esses sinais em dados digitais. Estes, por sua vez, são transmitidos pela rede, permitindo que sejam acessados e analisados remotamente através do PC na Estação de Trabalho.

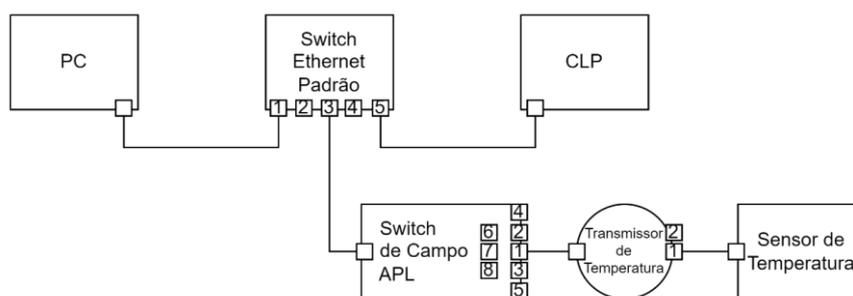


Figura 5-1 - Diagrama em blocos.

### 5.3. DISPOSITIVOS UTILIZADOS

Este subcapítulo apresenta uma descrição detalhada dos dispositivos utilizados no sistema descrito nesta dissertação. Cada dispositivo desempenha um papel fundamental na configuração e operação da rede, garantindo a eficácia da coleta e processamento de dados. A Tabela 5-1 a seguir fornece uma visão clara dos modelos e funções específicas de cada componente dentro do sistema.

Tabela 5-1 - Descrição dos dispositivos utilizados no sistema descrito nesta dissertação

Dispositivo	Modelo	Descrição
Estação de Trabalho (PC)	N/A	Usada para configurar o sistema, monitorar a

		operação e analisar os dados capturados.
Switch Ethernet Padrão	tp-link TL-SF1005D	Conecta o PC e o CLP ao switch de campo Ethernet-APL, gerenciando a comunicação na rede principal.
Controlador CLP	Siemens SIMATIC S7-1214 DC/DC/DC	Controlador programável que processa os dados recebidos e controla o processo.
Switch de Campo Ethernet-APL	PEPPERL+FUCHS ARS11-B2-IC08-1	Distribui a comunicação e a alimentação para os dispositivos Ethernet-APL no campo.
Transmissor de Temperatura	Endress+Hauser TMT86-1014/0	Converte os sinais dos sensores em dados digitais para transmissão pela Ethernet-APL.
Sensor de Temperatura	PT100, IEC607751, a = 0,00385	Captura a temperatura com alta precisão e transmite o sinal para o transmissor.

#### 5.4. TOPOLOGIA

Para o monitoramento de temperatura, optou-se por uma topologia de estrela, que se mostrou eficaz para centralizar a comunicação e a alimentação dos dispositivos Ethernet-APL. Esta abordagem não apenas facilita o gerenciamento e o controle do sistema, mas também simplifica

significativamente a expansão e a manutenção. A centralização permite um controle mais efetivo sobre todos os dispositivos conectados, garantindo que as atualizações, ajustes e diagnósticos possam ser realizados de um ponto central. Além disso, a topologia de estrela oferece excelente expansibilidade, permitindo a incorporação de novos dispositivos à rede sem perturbar a configuração existente. Em termos de manutenção, essa configuração também é vantajosa, pois os problemas podem ser rapidamente isolados e resolvidos, reduzindo o tempo de inatividade e aumentando a eficiência operacional.

### **5.5. MONTAGEM FÍSICA E CONFIGURAÇÃO DA APLICAÇÃO**

A implementação do sistema começou com a instalação física dos componentes essenciais. Primeiramente, o sensor de temperatura foi cuidadosamente instalado no local designado para garantir a precisão das medições. Após a instalação, o sensor foi conectado ao transmissor, que tem a função de converter os sinais de temperatura em dados digitais. Este transmissor, por sua vez, foi conectado ao switch de campo Ethernet-APL, que é responsável pela distribuição e gerenciamento da comunicação e alimentação elétrica dos dispositivos na rede. Finalizando esta etapa, o switch de campo foi interligado ao switch Ethernet padrão, estabelecendo assim a infraestrutura necessária para a comunicação da rede.

Seguiu-se a configuração dos dispositivos. Os parâmetros necessários para o funcionamento correto dos sensores e transmissores foram ajustados, configurando-se também os canais de entrada no Controlador Lógico Programável (CLP) para que este pudesse receber e processar os dados adequadamente.

Na etapa de configuração de rede, os endereços IP e outros parâmetros de comunicação essenciais foram estabelecidos para todos os dispositivos conectados. O switch de campo foi configurado para gerenciar eficientemente tanto a comunicação quanto a alimentação, assegurando a integridade e a estabilidade da rede.

Para monitoramento e análise, o software Wireshark foi utilizado para capturar e analisar os telegramas de temperatura e o consumo da rede, fornecendo insights valiosos sobre o desempenho do sistema. Paralelamente, o

TIA Portal foi empregado para aprimorar a integração e o controle do sistema, facilitando ajustes e otimizações em tempo real.

Finalmente, a configuração e diagnóstico via servidor web foram realizados para um ajuste fino do sistema. Acessou-se o servidor web integrado ao sensor de temperatura e ao switch de campo, onde os parâmetros operacionais foram configurados e os diagnósticos dos dispositivos foram verificados. Essa etapa é crucial para garantir que todos os componentes estejam funcionando conforme o esperado e que qualquer problema possa ser prontamente identificado e corrigido.

A Tabela 5-2 ilustra os endereços de rede configurados nos dispositivos do projeto.

Tabela 5-2 - Nome e IP dos dispositivos da rede Ethernet-APL.

Nome dos dispositivos	IP
CLP Modelo: Siemens SIMATIC S7-1200	192.168.0.1
Switch de campo Ethernet-APL Modelo: PEPPERL+FUCHS ARS11-B2-IC08-1	192.168.0.11
Sensor de temperatura Modelo: PT100 IEC607751, a = 0,00385	192.168.0.31

No desenvolvimento deste projeto, várias figuras foram preparadas para ilustrar de forma clara e detalhada os diversos aspectos da implementação da rede Ethernet-APL. Estas imagens são fundamentais para proporcionar uma compreensão visual dos conceitos discutidos e dos procedimentos realizados durante o estudo. A seguir, serão apresentadas figuras que incluem desde a configuração física dos dispositivos no laboratório até representações gráficas do desempenho e operação do sistema.

A Figura 5-2 apresenta uma visão geral da configuração física estabelecida no Laboratório de Redes Industriais do Inatel. Mostra o arranjo prático dos dispositivos, como sensores, switches e controladores, montados para simular uma aplicação real de monitoramento de temperatura em um ambiente industrial controlado. A imagem destaca como os componentes estão interconectados, fornecendo uma base visual para entender a integridade e a funcionalidade da rede.

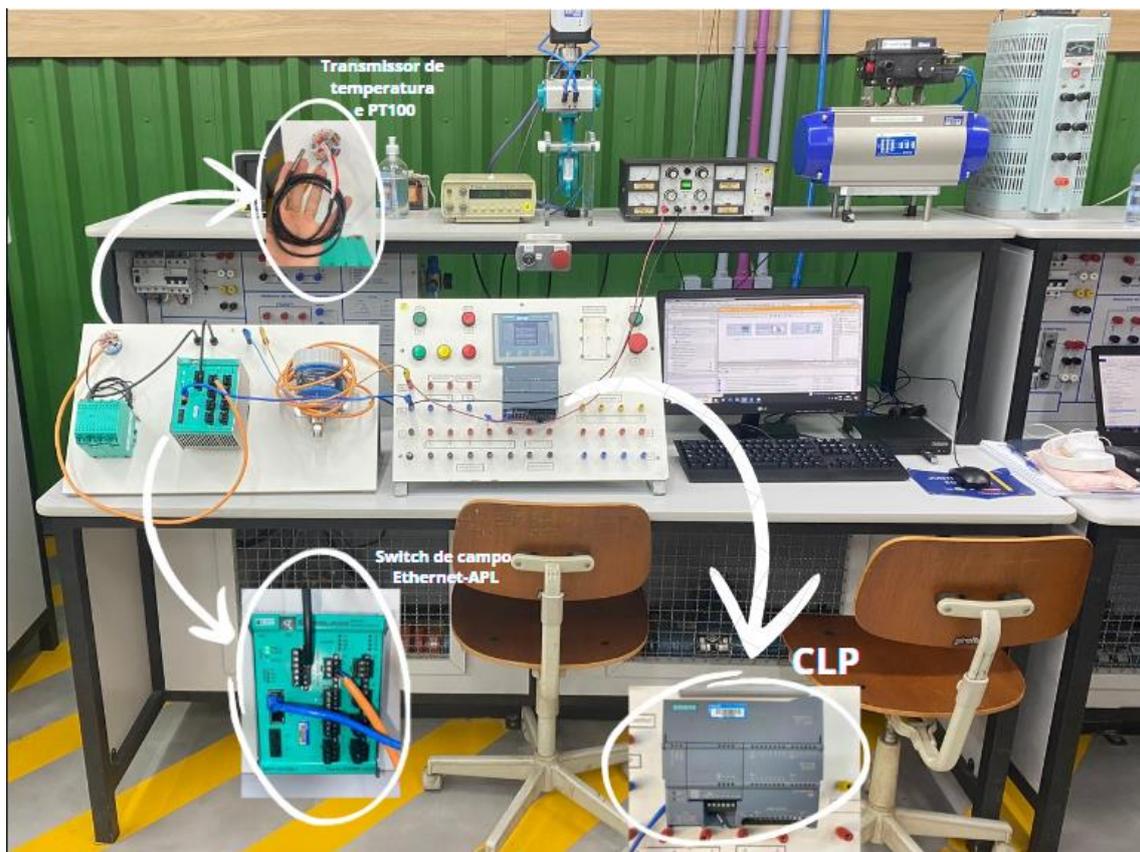


Figura 5-2 - Montagem Física no Laboratório de Redes Industriais do Inatel.

A Figura 5-3 exibe a tela inicial do software utilizado no projeto, que serve como ponto de partida para o monitoramento e a configuração da rede. Ela mostra a interface gráfica através da qual os usuários interagem com o sistema, incluindo menus de navegação, ferramentas de configuração e visualização de status dos dispositivos conectados à rede.

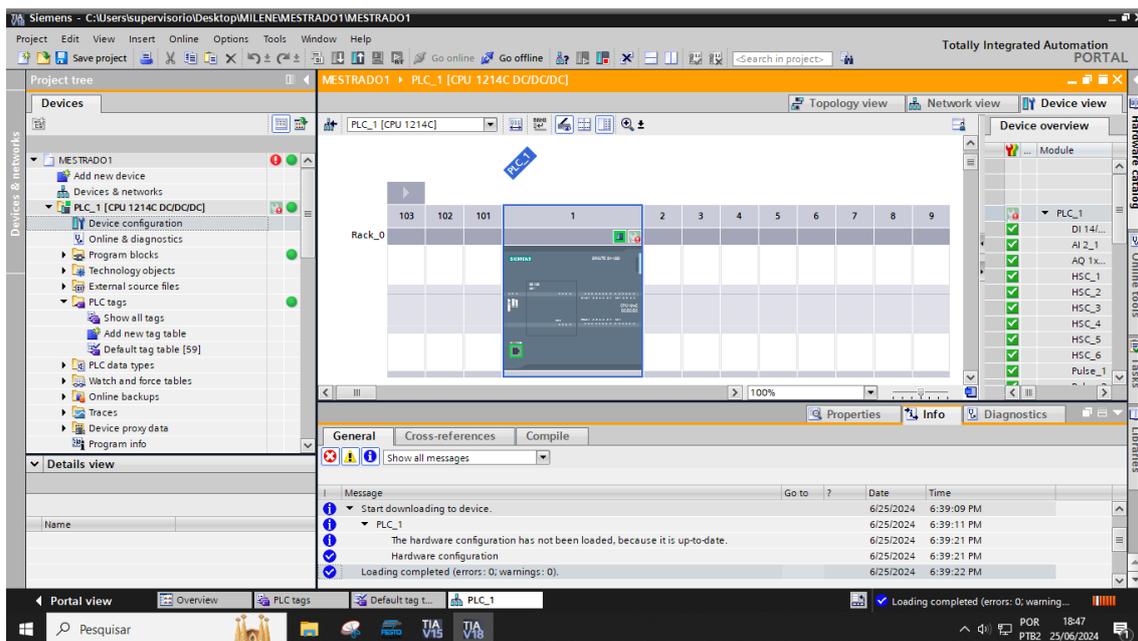


Figura 5-3 - Tela inicial do projeto.

A Figura 5-4 ilustra o diagrama em blocos do sistema, detalhando os componentes da rede e suas conexões. Este diagrama é essencial para compreender a arquitetura da rede e o fluxo de dados entre os diferentes dispositivos, como CLP, switches de campo e sensores, mostrando como as informações são processadas e transmitidas dentro do sistema.

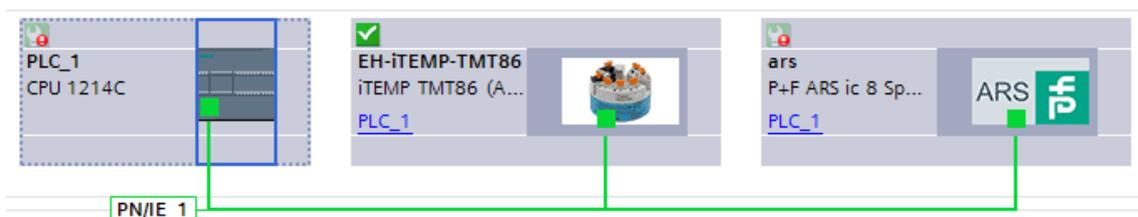


Figura 5-4 - Diagrama em Blocos.

A Figura 5-5 mostra uma captura de tela da configuração dos endereços de rede atribuídos aos dispositivos dentro do projeto. Ela detalha como cada dispositivo é identificado e comunicado na rede, proporcionando insights sobre a estrutura de endereçamento IP e outros parâmetros de rede essenciais para a operação e a segurança da comunicação.



Figura 5-5 - Endereços de rede configurados.

A Figura 5-6 captura a rede de controle enquanto está em operação, ilustrando o funcionamento dinâmico do sistema em um ambiente real ou simulado. Esta imagem pode mostrar gráficos de desempenho, dados de monitoramento em tempo real ou outras métricas operacionais, evidenciando a eficácia da rede em gerenciar e controlar o processo industrial.

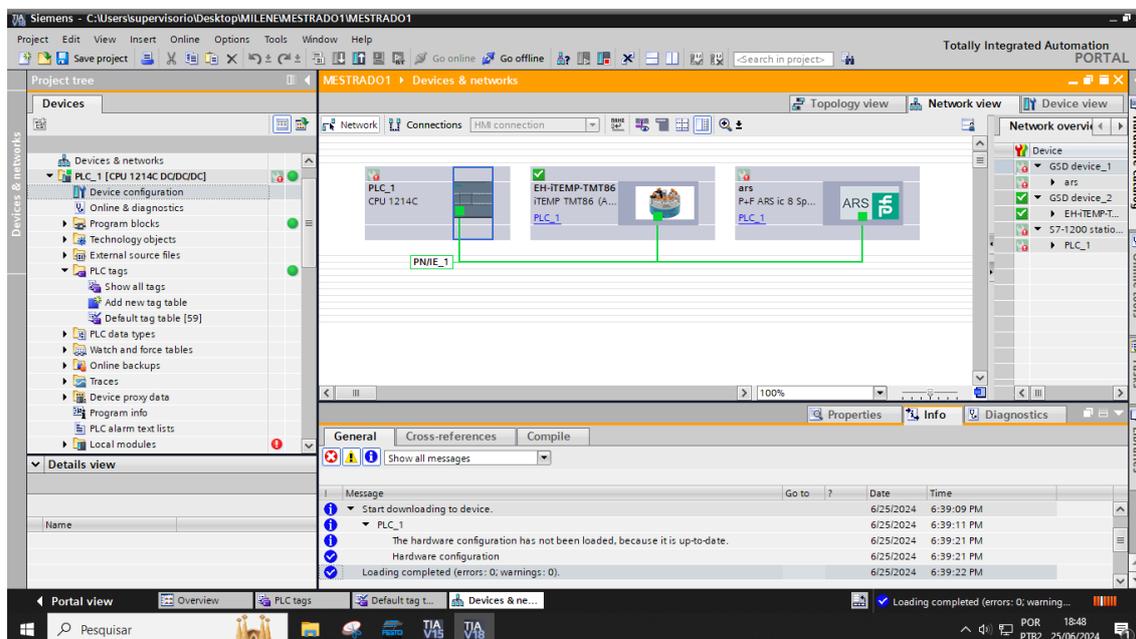


Figura 5-6 - Rede de controle em operação.

Esta Figura 5-7 exibe uma tabela contendo as temperaturas medidas em tempo real pelos sensores da rede. Ela oferece uma visão quantitativa das leituras de temperatura, que são cruciais para monitorar e ajustar os processos industriais. A tabela pode incluir *timestamps*, valores de temperatura, e possivelmente alarmes ou notificações de desvios, permitindo uma análise detalhada das condições operacionais.

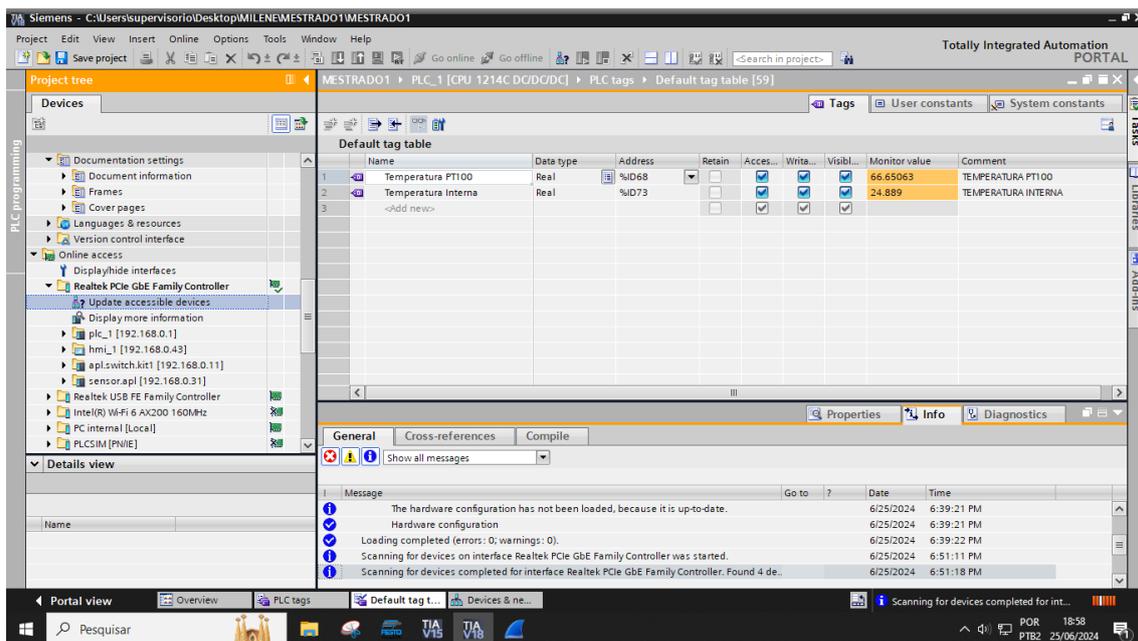


Figura 5-7 - Tabela das temperaturas medidas em tempo real.

## 5.6. CONFIGURAÇÃO DA REDE

O processo de configuração da rede Ethernet-APL em um aplicativo computacional é composto por várias etapas críticas que garantem a integração e funcionalidade efetiva dos dispositivos dentro da rede. Inicialmente, a etapa de Importação de Dispositivos envolveu a adição do Controlador CLP, do *switch* de campo e do transmissor Ethernet-APL ao projeto no software de gestão da rede. Esta ação é crucial para estabelecer uma base digital que reflita com precisão a configuração física dos dispositivos.

Após a importação, procedeu-se à Configuração de Rede, uma etapa onde foram definidos os endereços de rede e os parâmetros de comunicação para cada dispositivo na rede Ethernet-APL. Este processo incluiu a atribuição de endereços IP estáticos, a configuração de gateways e a definição de sub-redes, garantindo que todos os dispositivos pudessem comunicar-se sem interrupções ou conflitos de dados. A precisão nesta etapa é fundamental para evitar problemas de conectividade e garantir uma rede coesa e segura.

A fase final, Teste e Validação, foi implementada para assegurar que toda a configuração havia sido realizada corretamente. Durante os testes, foram realizadas verificações para garantir a comunicação fluente entre todos os dispositivos. Isso incluiu a transmissão de pacotes de dados entre o CLP, o

switch de campo e o transmissor para verificar a integridade e a segurança dos dados transmitidos. Eventuais ajustes foram feitos com base nos resultados desses testes, otimizando a configuração para desempenho ideal.

Cada uma dessas etapas foi cuidadosamente monitorada e ajustada para garantir que a rede Ethernet-APL funcionasse de maneira eficiente e confiável, oferecendo uma plataforma robusta para operações contínuas e seguras dentro do ambiente industrial.

### **5.7. MONITORAMENTO**

O monitoramento da rede é efetuado em tempo real, utilizando ferramentas sofisticadas como o analisador de rede Wireshark e servidores web que facilitam a parametrização e os diagnósticos. O Wireshark é empregado para capturar e analisar os telegramas de comunicação, que incluem dados sobre temperatura e consumo de rede, oferecendo uma visão aprofundada do tráfego para identificar falhas de transmissão e avaliar a eficiência comunicacional. Paralelamente, os servidores web são configurados para cada dispositivo, como sensores e switches de campo, permitindo não apenas a configuração dos parâmetros operacionais, mas também a realização de diagnósticos em tempo real.

A análise dos dados abrange várias frentes: verifica-se a precisão dos telegramas de temperatura para assegurar que as medições são exatas; o consumo de rede é monitorado para detectar possíveis ineficiências; e a condição dos dispositivos é constantemente avaliada através dos diagnósticos acessados via servidor web. Este monitoramento detalhado ajuda a manter a integridade e a operacionalidade do sistema.

Para responder a condições específicas em tempo real, o sistema está equipado com funcionalidades automáticas. Alarmes são configurados para alertar sobre quaisquer desvios nas leituras de temperatura, promovendo uma intervenção rápida quando necessário. Adicionalmente, ajustes automáticos são feitos para manter as condições operacionais dentro dos parâmetros desejados, garantindo assim a estabilidade do processo.

Os servidores web desempenham um papel crucial na parametrização e nos diagnósticos. Através destes, é possível ajustar as configurações dos sensores e do switch de campo conforme necessário, além de monitorar o status dos dispositivos para identificar e resolver problemas rapidamente. Este acesso direto aos parâmetros operacionais e diagnósticos via servidor web permite uma gestão eficiente e adaptativa, essencial para a manutenção da funcionalidade da rede em ambientes industriais.

A seguir são apresentadas várias figuras que ilustram de maneira detalhada os diversos aspectos do sistema de monitoramento de temperatura implementado utilizando a tecnologia Ethernet-APL. Essas imagens fornecem uma visão clara das funcionalidades do sistema, desde diagnósticos de rede até configurações específicas do servidor web, destacando a capacidade e flexibilidade do sistema em termos de monitoramento e ajustes em tempo real. A seguir, cada figura é descrita para garantir a compreensão completa de seu conteúdo e importância.

A Figura 5-8 mostra a interface de diagnóstico da rede Ethernet, que é utilizada para verificar o status da comunicação entre os dispositivos conectados. A tela exibe os telegramas de rede trafegados com os seus respectivos endereços de rede e informações trafegadas.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
2240	181.964866	192.168.10.94	192.168.60.162	TLSv1.2	88	Application Data
2241	181.965096	192.168.60.162	192.168.10.94	TLSv1.2	88	Application Data
2242	182.001291	192.168.10.94	192.168.60.162	TCP	60	443 → 57432 [ACK] Seq=443 Ack=443 Win=1027 Len=0
2243	182.252621	192.168.60.50	239.255.255.250	SSDP	212	M-SEARCH * HTTP/1.1
2244	183.269343	192.168.60.50	239.255.255.250	SSDP	212	M-SEARCH * HTTP/1.1
2245	183.375671	192.168.60.162	192.168.10.94	TLSv1.2	88	Application Data
2246	183.376673	192.168.10.94	192.168.60.162	TLSv1.2	88	Application Data
2247	183.422354	192.168.60.162	192.168.10.94	TCP	54	57432 → 443 [ACK] Seq=477 Ack=477 Win=4104 Len=0
2248	183.670794	RealtekSemic_36:1d:...	Broadcast	ARP	60	Who has 192.168.60.153? Tell 192.168.61.15
2249	183.607238	Dell_04:32:52:...	Broadcast	ARP	60	Who has 192.168.60.107? Tell 192.168.61.0
2250	183.706492	Dell_01:19:14:...	Broadcast	STP	50	Spanning tree (for...) Cost = 40000 Port = 0x0000
2251	183.775830	192.168.60.78	192.168.63.255	UDP	82	54696 → 1947 Len=40
2252	183.939915	192.168.61.9	192.168.63.255	UDP	82	57214 → 1947 Len=40
2253	184.059081	Dell_ee:d6:cc:...	Broadcast	ARP	60	Who has 192.168.60.102? Tell 192.168.60.198
2254	184.209891	192.168.60.162	52.226.139.185	TCP	55	62281 → 443 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=515 Len=1 [TCP segment of a reassembled PDU]
2255	184.278712	192.168.60.50	239.255.255.250	SSDP	212	M-SEARCH * HTTP/1.1
2256	184.335788	52.226.139.185	192.168.60.162	TCP	60	443 → 62281 [ACK] Seq=1 Ack=2 Win=7796 Len=0 SLE=1 SRE=2
2257	184.413947	RealtekSemic_36:1d:...	Broadcast	ARP	60	Who has 192.168.60.153? Tell 192.168.61.15
2258	184.587940	Dell_04:32:52:...	Broadcast	ARP	60	Who has 192.168.60.107? Tell 192.168.61.0
2259	184.755067	Dell_ee:d6:cc:...	Broadcast	ARP	60	Who has 192.168.60.102? Tell 192.168.60.198
2260	185.290755	192.168.60.50	239.255.255.250	SSDP	212	M-SEARCH * HTTP/1.1
2261	185.417215	RealtekSemic_36:1d:...	Broadcast	ARP	60	Who has 192.168.60.153? Tell 192.168.61.15
2262	185.514404	192.168.60.79	192.168.63.255	BROWSER	263	Host Announcement LPESQ-069460, Workstation, Server, NT Workstation
2263	185.587450	Dell_04:32:52:...	Broadcast	ARP	60	Who has 192.168.60.107? Tell 192.168.61.0
2264	185.690548	192.168.60.39	192.168.63.255	UDP	82	49666 → 1947 Len=40
2265	185.749308	Dell_01:19:14:...	Broadcast	STP	60	Spanning tree (for...) Cost = 40000 Port = 0x0000
2266	185.755012	Dell_ee:d6:cc:...	Broadcast	ARP	60	Who has 192.168.60.102? Tell 192.168.60.198
2267	185.726172	RealtekSemic_36:19:...	LDP Multicast	LDP	172	LA/1auto-046421:LA/port-001:20 SysD=LAU70-046421 SysD=LENOVO 113K001C80,ThinkCentre M75q Gen 2,PE072XDQ RT...
2268	186.284131	192.168.60.162	255.255.255.250	UDP	82	56817 → 1947 Len=40
2269	186.307495	192.168.60.79	192.168.63.255	UDP	82	58988 → 1947 Len=40
2270	186.697267	RealtekSemic_36:1d:...	Broadcast	ARP	60	Who has 192.168.60.153? Tell 192.168.61.15

Frame 2250: 60 bytes on wire (48000 bits) captured (48000 bits) on eth0 interface 0:0:0:0:0:0

Ethernet II, Src: RealtekSemic\_36:1d:81:01:19:14, Dst: Broadcast

ARP Request, Op: 1, Src MAC: 08:00:00:02:02:02, Dst MAC: ff:ff:ff:ff:ff:ff

Figura 5-8 - Diagnóstico da rede Ethernet.

A Figura 5-9 é um gráfico que apresenta a análise do consumo temporal de dados na rede Ethernet-APL, destacando os picos de tráfego e padrões de uso ao longo do tempo. Este gráfico é essencial para entender como a rede responde durante operações normais e eventos específicos que requerem maior troca de dados.

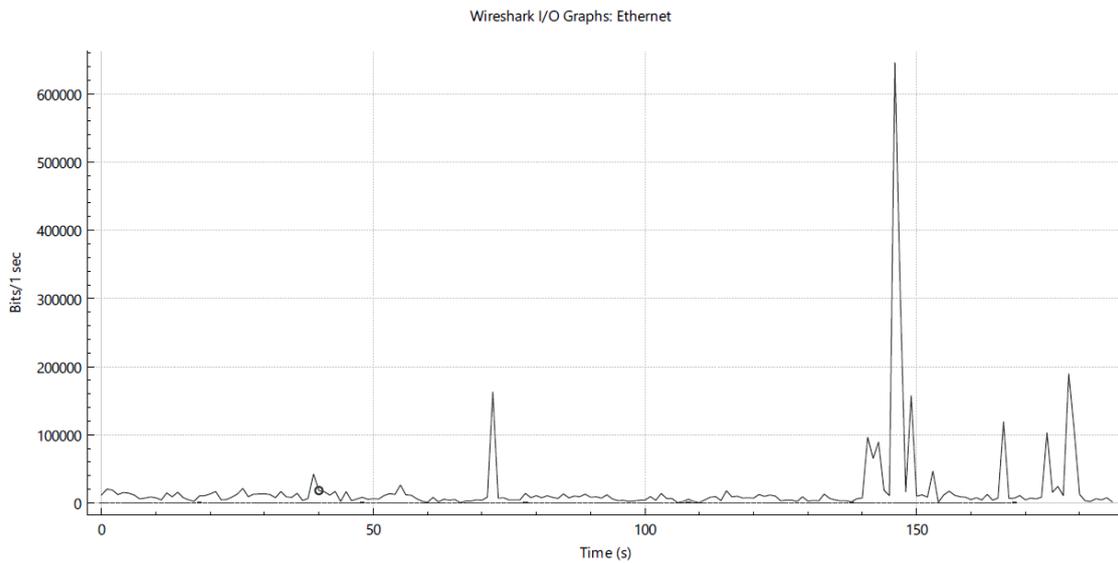


Figura 5-9 - Gráfico gerado do consumo temporal da rede Ethernet-APL.

A Figura 5-10 mostra a tela inicial do servidor web integrado ao transmissor de temperatura, fornecendo uma interface acessível para visualizar e gerenciar as configurações do dispositivo diretamente através de um navegador web.

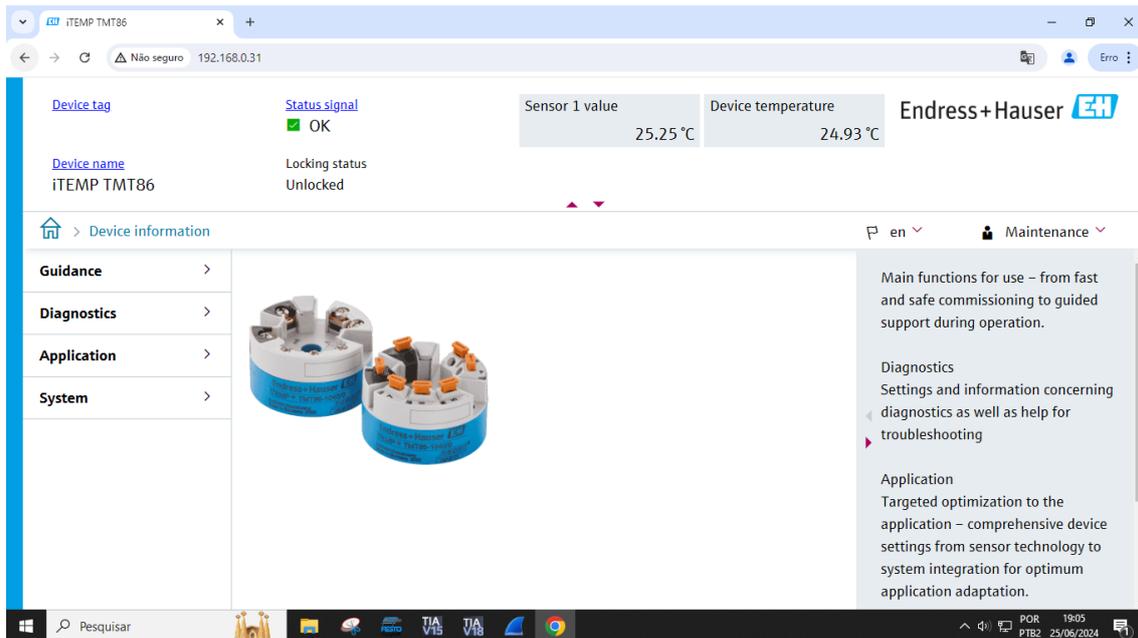


Figura 5-10 - Tela inicial do servidor web do transmissor de temperatura.

A Figura 5-11 A figura ilustra a seção do servidor web que permite aos usuários selecionar entre diferentes tipos de conexões de rede disponíveis para o transmissor, facilitando a integração do dispositivo em diversos ambientes de rede.

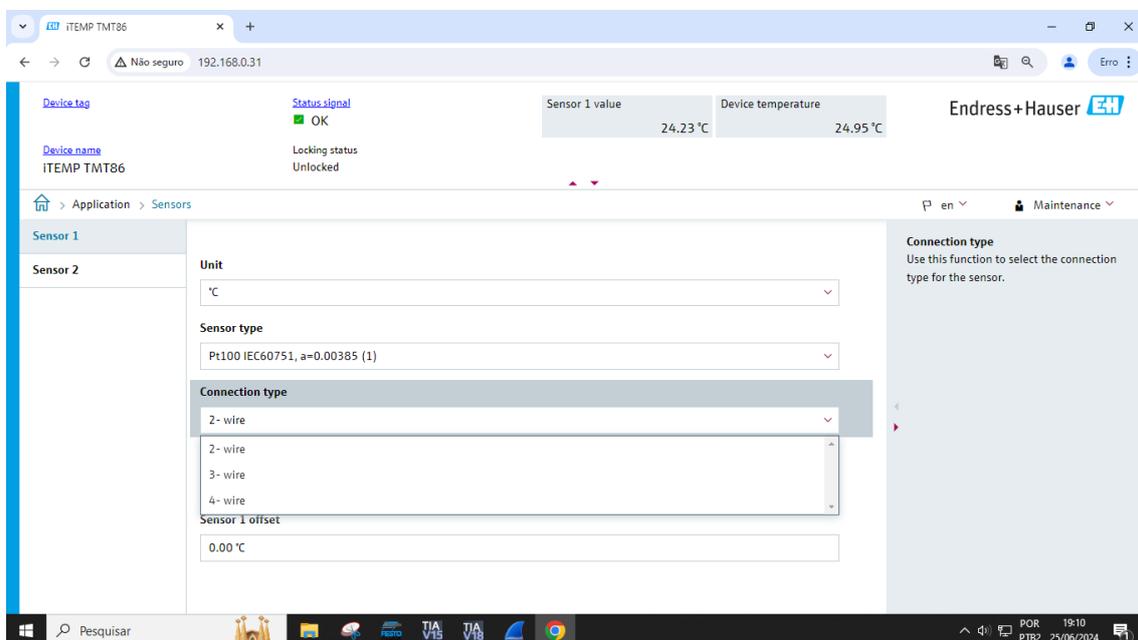


Figura 5-11 - Servidor web demonstrando os tipos de conexões disponíveis para o transmissor de temperatura.

A Figura 5-12 destaca a flexibilidade do transmissor de temperatura em suportar diferentes unidades de medida, como Celsius e Fahrenheit, permitindo aos usuários configurar a unidade desejada através da interface web.

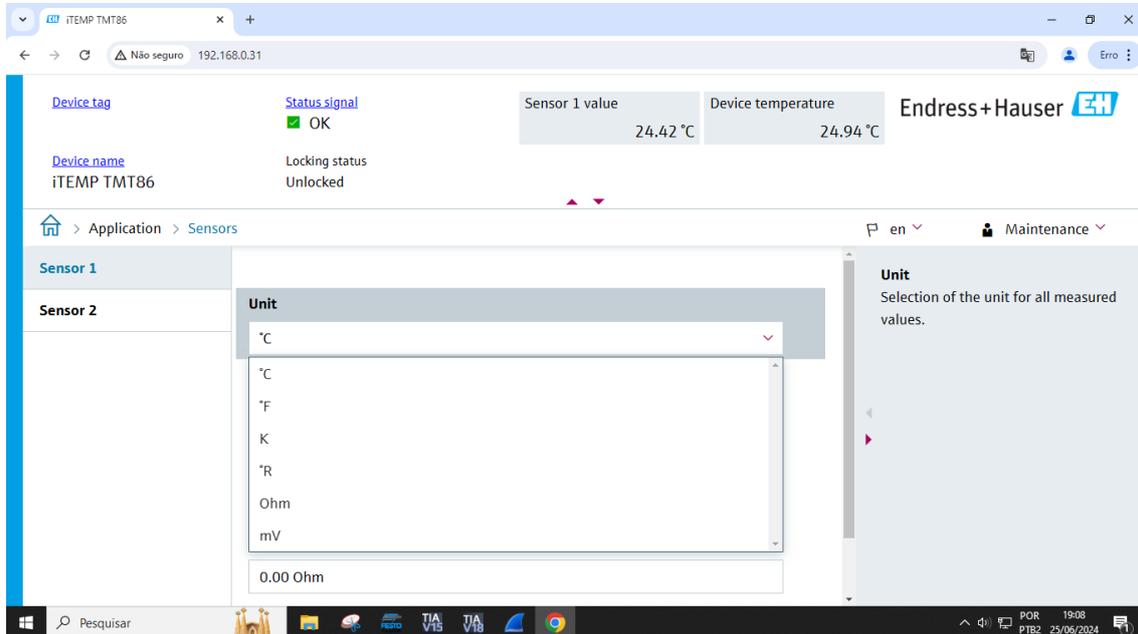


Figura 5-12 - Servidor web demonstrando as unidades de medida de temperatura possíveis do transmissor de temperatura.

A Figura 5-13 apresenta a interface do servidor web mostrando a leitura em tempo real da temperatura medida pelo sensor PT100, expressa em graus Celsius, proporcionando evidências diretas da funcionalidade do sensor em operação.

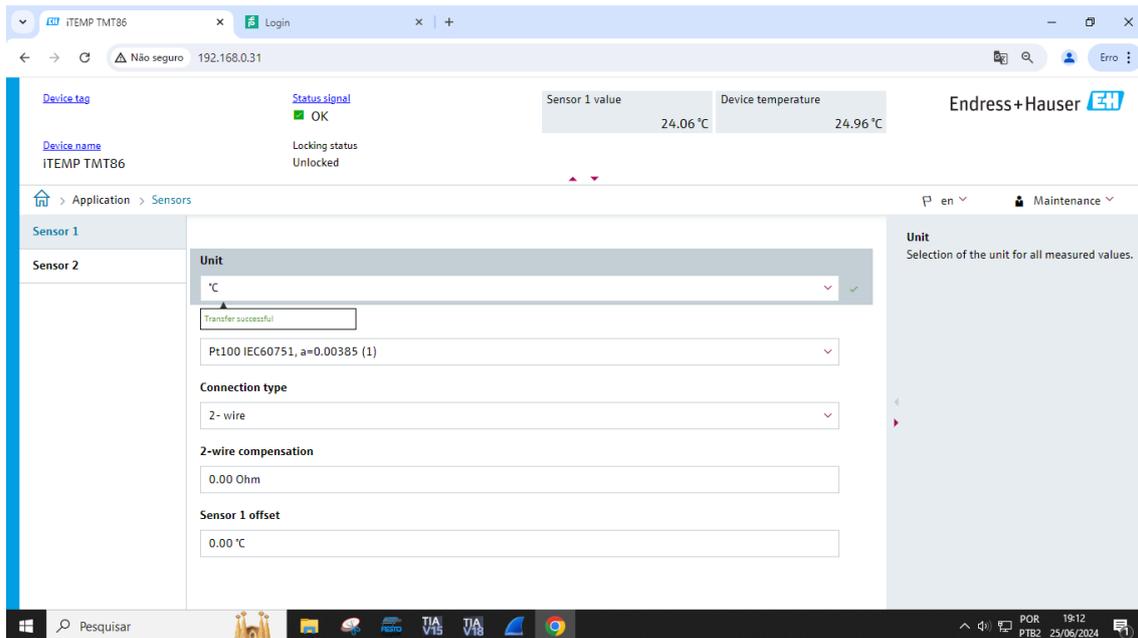


Figura 5-13 - Servidor web demonstrando a medida do sensor de temperatura PT100 em °C conectado no transmissor de temperatura.

A Figura 5-14 exibe as opções de sensores de temperatura que podem ser conectados ao transmissor, permitindo aos usuários escolher o sensor mais adequado para suas necessidades específicas de monitoramento.

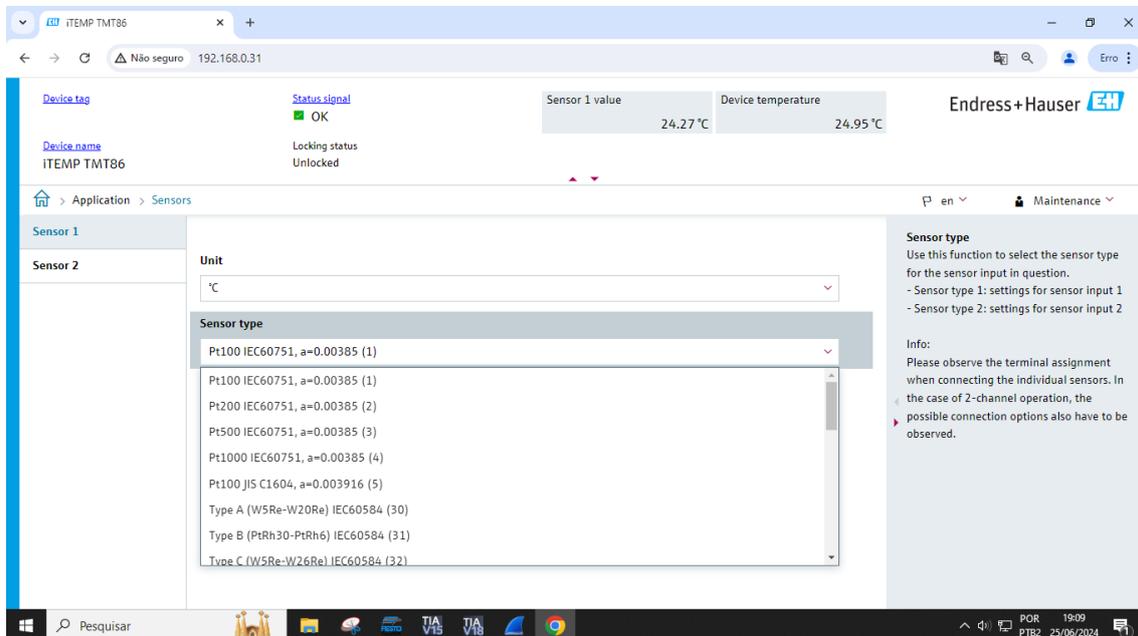


Figura 5-14 - Servidor web demonstrando os tipos possíveis de sensores de temperatura para conexão no transmissor de temperatura.

A Figura 5-15 mostra a tela de configurações do transmissor de temperatura no servidor web, onde os usuários podem ajustar parâmetros como

limites de alarme, frequência de leitura e outras configurações operacionais para otimizar o desempenho do dispositivo.

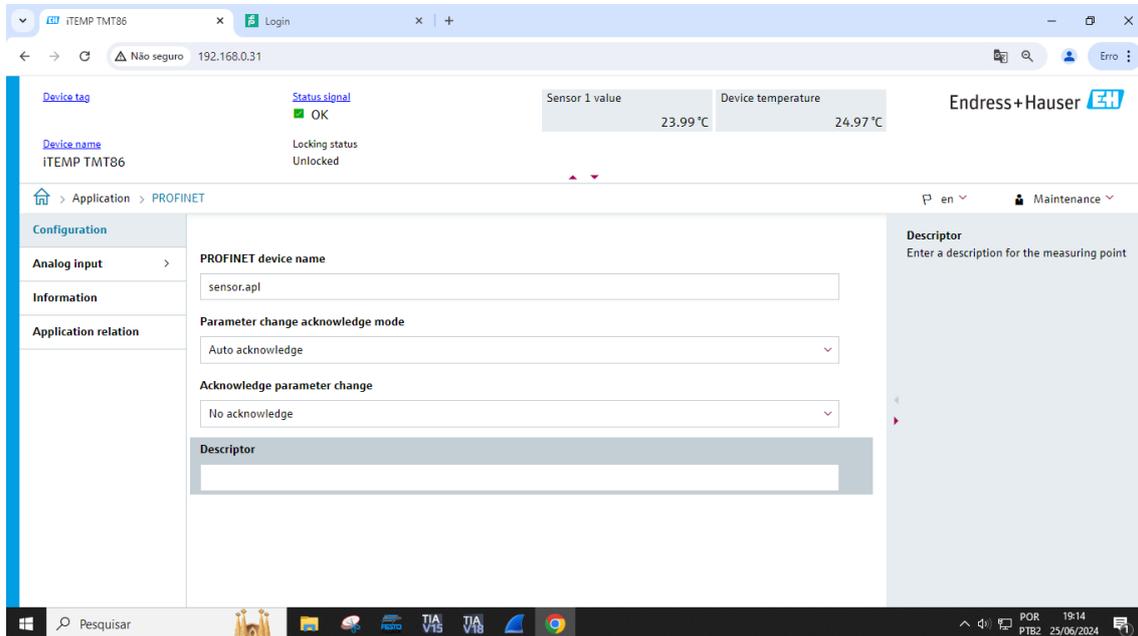


Figura 5-15 - Servidor web na tela de configurações do transmissor de temperatura.

## 6. RESULTADOS

Os resultados obtidos dos testes apresentados nos capítulos 4 e 5 confirmam que a comunicação via Ethernet-APL foi eficaz e alinhada com a configuração estabelecida da rede. A análise do desempenho temporal, representada no gráfico da Figura 5-9, revela uma eficiência relativamente baixa, atribuída ao tráfego gerado por apenas um dispositivo. Esse gráfico destaca picos que correspondem a comunicações assíncronas, marcando momentos específicos de parametrização remota. Um exemplo ilustrativo ocorreu quando a escala de leitura do sensor de temperatura foi alterada de graus Celsius para Fahrenheit, uma mudança que foi capturada e visualizada no gráfico da Figura 5-9. Durante essa operação, o tráfego na rede atingiu picos de mais de 600 kbps, evidenciando o intenso fluxo de dados necessário para executar a alteração.

O gráfico, com bits por segundo no eixo vertical e tempo em segundos no eixo horizontal, serve como uma ferramenta crucial para visualizar a dinâmica da comunicação na rede e identificar potenciais pontos de congestionamento ou falhas na transmissão de dados.

Embora a análise temporal da carga de rede e a investigação detalhada do conteúdo dos telegramas não fossem objetivos deste estudo, o foco principal foi conduzir uma avaliação abrangente da rede Ethernet-APL. O trabalho comparou essa tecnologia com outras redes de campo similares e demonstrou sua funcionalidade prática por meio de testes com elementos reais de comunicação. A ênfase foi colocada na demonstração da configuração da rede, parametrização e diagnósticos efetuados através do servidor web, destacando a robustez e a flexibilidade da Ethernet-APL em aplicações práticas.

## 7. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a implementação da Ethernet-APL no monitoramento de temperatura em ambientes industriais, ressaltando suas vantagens sobre os protocolos HART e PROFIBUS-PA. Em termos de velocidade, os resultados práticos mostraram que a Ethernet-APL não apenas atendeu, mas superou as velocidades máximas definidas pelos fabricantes para os protocolos Profibus-PA e Hart. A Ethernet-APL se destacou por seu desempenho superior, oferecendo maior flexibilidade de topologia e uma integração eficaz entre as tecnologias da informação (TI) e da automação (TA). Essas características confirmam sua eficiência e segurança para comunicação em áreas classificadas, apresentando-se como uma solução robusta e confiável.

As principais contribuições deste estudo incluem a demonstração de uma taxa de transmissão superior e uma latência significativamente reduzida em comparação com os protocolos tradicionais, o que é essencial para o monitoramento em tempo real onde rapidez e precisão são cruciais. A capacidade de suportar maiores distâncias de cabo e adaptar-se a diversas topologias, como anel e estrela, permite uma flexibilidade incomparável na implementação da rede, adaptando-se perfeitamente às necessidades específicas do ambiente industrial.

A integração de TI e TA foi realizada de forma eficaz, utilizando um servidor web para parametrização e diagnóstico, aprimorando a capacidade de gerenciamento e manutenção do sistema. Isso facilita a operação contínua e permite uma resposta rápida a eventuais falhas. A validade da implementação foi confirmada através da análise dos telegramas de comunicação, e a facilidade de parametrização e diagnóstico, proporcionada pela integração com ferramentas de diagnóstico via servidor web, simplificou a manutenção dos dispositivos. Este recurso se provou especialmente útil para o monitoramento contínuo e a identificação rápida de falhas.

Além disso, a Ethernet-APL mostrou-se eficiente no consumo de largura de banda e na capacidade de corrente, mantendo a integridade e a segurança da comunicação. A conformidade com normas como a ABNT NBR 60079-47,

IEC 63444 e IEEE 802.3cg reforça sua adequação para operações seguras em áreas classificadas. Este estudo fornece uma base sólida para a Ethernet-APL como uma solução viável e superior, superando as limitações dos protocolos tradicionais em termos de desempenho e flexibilidade, e destacando a importância da Ethernet-APL na evolução das redes industriais. Ele oferece informações valiosas para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área.

### **7.1. TRABALHOS FUTUROS**

Este estudo abre caminho para futuras investigações, tais como o desenvolvimento de um aplicativo para dispositivos móveis para o monitoramento remoto das variáveis do sistema. Essa aplicação pode aumentar a flexibilidade e eficiência na gestão dos sistemas industriais, oferecendo acesso em tempo real aos dados e facilitando a tomada de decisões.

Também é sugerido como trabalhos futuros uma análise mais apurada do telegrama de comunicação e das métricas temporais da rede, além da realização de testes de carga para verificação dos limites temporais de comunicação da rede.

---

## REFERÊNCIAS

- [1] COUTO, Ronaldo Teixeira. *Ethernet Industrial*. 60f. Monografia apresentada à disciplina trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Computação da Universidade São Francisco, 2010.
- [2] LUGLI, Alexandre Baratella; SANTOS, Max Mauro Dias. *Redes Industriais para Automação Industrial: AS-I, PROFIBUS e PROFINET*. 2ª edição. São Paulo: Érica, 2019, 196p.
- [3] LUGLI, Alexandre Baratella; SANTOS, Max Mauro Dias. *Redes Industriais: Características, Padrões e Aplicações*. 1º edição. São Paulo: Érica, 2014, 128p.
- [4] ZURAWSKI, Richard. *Industrial Communication Technology Handbook*, 2ª edição. Boca Raton: CRC Press, 2017, 1756p.
- [5] WILAMOWSKI, Bogdan M.; IRWIN, J. David (Eds.). *The Industrial Electronics Handbook: Industrial Communication Systems*. 2ª edição. Boca Raton: CRC Press, 2011, 962p.
- [6] SEN, Sunit Kumar. *Fieldbus and Networking in Process Automation*. 2ª edição. Boca Raton: CRC Press, 2021, 462p.
- [7] CISCO PRESS. *Network Media (The Physical Layer)*. Pearson Education. Disponível em: <[www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=169686](http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=169686)>. Acesso em: 19 abr. 2024.
- [8] VOSS, Wilfried. *A Comprehensible Guide to Industrial Ethernet*. Copperhill, 27 jun. 2019. Disponível em: <<https://copperhilltech.com/blog/industrial-Ethernet-guide-clientserver-vs-masterslave/>>. Acesso em: 19 abr. 2024.
- [9] KNAPP, Eric D.; LANGILL, Joel Thomas. *Industrial Network Security: Securing Critical Infrastructure Networks for Smart Grid, SCADA, and Other Industrial Control Systems*. 2ª edição. Syngress, 2014, 360p.
- [10] DAVIES, Gordon. *Networking Fundamentals*. 2ª edição. Packt, 2019, 510p.

- 
- [11] POPP, Manfred. *Comunicação Industrial com o PROFINET*. Pinheiros: PI Brasil, 2018, 257p.
- [12] SPURGEON, Charles E.; ZIMMERMAN, Joann. *Ethernet: The Definitive Guide*. 2ª edição. Sebastopol: O'Reilly Media, 2014, 508p.
- [13] POPP, Manfred. *Industrial communication with PROFINET*. PROFIBUS & PROFINET International (PI), 2014. Disponível em: <<https://www.profibus.com/download/technical-descriptions-books/>>. Acesso em: 19 abr. 2024.
- [14] RINALDI, John S.; WENDORF, Jamin. *EtherNet/IP: The Everyman's Guide to EtherNet/IP*. Columbia, SC, 2019, 153p.
- [15] ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP. *EtherCAT: the Ethernet Fieldbus*. Disponível em: <<https://www.ethercat.org/en/technology.html>>. Acesso em: 21 abr. 2024.
- [16] RINALDI, John S.. *MODBUS: The Everyman's Guide to a Protocol That Has Stayed Relevant in Automation for Over 30 years*. Brookfield, WI, 2015, 90p.
- [17] BORGES, Giovanni Hummel. *Manual de segurança intrínseca: Ex i: do projeto a instalação*. Rio de Janeiro: Fatima Agra, 1997, 220p.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR IEC 60079-14 Atmosferas explosivas - Parte 14: Projeto, seleção e montagem de instalações elétricas*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016, 52p.
- [19] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. *NFPA 70: NEC 2011*. Quincy: NFPA, 2011.
- [20] IEEE. *IEEE Standard for Ethernet - Amendment 5: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Mb/s Operation and Associated Power Delivery over a Single Balanced Pair of Conductors*, IEEE Std 802.3cg™-2019. IEEE, 2019.
- [21] IEC. *IEC TS 63444 - Industrial networks – Ethernet-APL port profile specification*. Geneva: IEC, 2023.

- [22] ABNT. *ABNT IEC/TS 60079-47 - Atmosferas explosivas Parte 47: Proteção de equipamentos pelo conceito da Ethernet intrinsecamente segura a dois fios (2-WISE)*. Rio de Janeiro. ABNT, 2021.
- [23] NIEMANN, Karl-Heinz. *Engineering Guideline Ethernet-APL: Planning, installation and commissioning of Ethernet-APL networks*. Karlsruhe: FieldComm Group, ODVA, OPC Foundation, PROFIBUS & PROFINET International (PI), 2021.
- [24] HART Communication Foundation: *HART Communication Application Guide*. Austin: HART Communication Foundation, 2013. 194p.