

Protocolos de Comunicação em Redes Industriais: Desempenho e Aplicações na Indústria 4.0

1st Mariana Moraes Barreto
Universidade Federal de Viçosa
Departamento de Engenharia Elétrica
Viçosa, Brasil
mariana.barreto@ufv.br

2nd Alexandre dos Santos Brandão
Universidade Federal de Viçosa
Departamento de Engenharia Elétrica
Viçosa, Brasil
alexandre.brandao@ufv.br

Abstract—A Indústria 4.0, também conhecida como a Quarta Revolução Industrial, é marcada pela integração de tecnologias avançadas nos processos de produção, resultando em fábricas inteligentes e altamente automatizadas. As redes de automação desempenham um papel central nesse contexto, permitindo a comunicação eficiente e em tempo real entre diversos dispositivos e sistemas, otimizando processos e reduzindo custos operacionais. Este trabalho explora o estado da arte das redes de automação industrial, com foco nos protocolos Profinet, Ethernet/IP e OPC UA. A análise detalha as contribuições e perspectivas futuras de cada protocolo no cenário da automação industrial e da Indústria 4.0, fornecendo uma visão abrangente sobre suas vantagens e limitações. Além disso, foram realizados dois estudos de caso que demonstram a aplicação desses protocolos em diferentes contextos industriais.

Index Terms—Protocolos de comunicação, automação industrial, Indústria 4.0

I. INTRODUÇÃO

A adoção de tecnologias digitais relacionadas à Indústria 4.0 tem crescido significativamente no Brasil. De acordo com a Confederação Nacional da Indústria, no ano de 2021, cerca de 69% das indústrias já haviam adotado ao menos algum tipo de tecnologia digital [1]. Apesar desse elevado índice de adoção, a maioria das empresas ainda utiliza uma quantidade limitada de tecnologias digitais, o que indica que muitas delas se encontram em uma fase inicial do processo de digitalização.

Este cenário revela tanto o potencial quanto os desafios enfrentados pelas indústrias brasileiras. Algumas das principais barreiras incluem o alto custo de implementação dessas tecnologias, a falta de conhecimento técnico especializado e a incerteza em relação aos retornos sobre os investimentos realizados [1]. Tais fatores acabam retardando o avanço do processo de transformação digital em muitas organizações. No entanto, os benefícios proporcionados pela digitalização são inúmeros, como o aumento da produtividade, a redução dos custos de produção e a melhoria da qualidade dos produtos, o que torna essencial a superação desses obstáculos.

Para que os conceitos da Indústria 4.0 sejam efetivamente consolidados, é essencial garantir uma comunicação segura e eficiente entre dispositivos e sistemas. Essa comunicação ocorre principalmente por meio das redes industriais, que estão

em constante evolução para atender às crescentes demandas de conectividade, segurança e velocidade de transmissão de dados. Portanto, é crucial compreender as contribuições e limitações de cada rede e protocolo de comunicação, de forma a garantir a adoção de tecnologias digitais de maneira econômica, eficiente e que preserve o *know-how* existente nas indústrias.

Ademais, a Quarta Revolução Industrial está transformando a maneira como as fábricas operam, tornando-as mais inteligentes, conectadas e capazes de responder rapidamente às mudanças do mercado. Neste contexto, observa-se uma crescente predominância da comunicação por meio das redes de campo, responsáveis por interconectar os diversos dispositivos e sistemas utilizados no ambiente fabril.

Assim, este trabalho explora três diferentes protocolos industriais, analisando suas contribuições e limitações de aplicação, além de discutir como eles desempenham um papel crucial na transformação digital da Indústria 4.0. A compreensão detalhada desses protocolos é fundamental para apoiar as indústrias na tomada de decisões estratégicas sobre a adoção de novas tecnologias e na maximização dos benefícios decorrentes dessa transformação.

II. HISTÓRICO DA AUTOMAÇÃO E INDÚSTRIA 4.0

O primeiro marco significativo da automação foi a invenção da máquina a vapor e do regulador centrífugo por James Watt, no século XVIII, que deu início à Primeira Revolução Industrial [3]. Esse período foi caracterizado pela mecanização dos processos produtivos, substituindo o trabalho manual pela força motriz gerada pelo vapor. No entanto, a comunicação dentro das fábricas era praticamente inexistente, e os processos de produção eram predominantemente manuais e mecânicos, sem integração ou troca de informações entre as diferentes etapas de produção.

No final do século XIX, durante a Segunda Revolução Industrial, ocorreram avanços significativos, como a criação dos relés, que possibilitaram um nível maior de automação dos processos fabris, como ilustrado na Figura 1. No entanto, a utilização dos relés apresentava limitações significativas, pois os painéis de automação baseados em relés exigiam intervenções físicas para qualquer adaptação ou atualização da linha de montagem, tornando o processo rígido e de

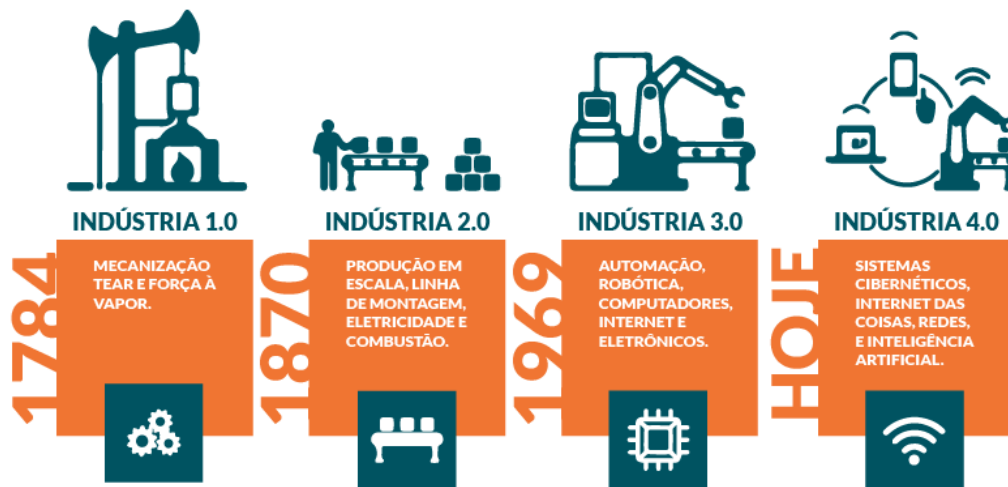


Fig. 1: Histórico da automação industrial. Fonte: [2].

baixa flexibilidade [3]. Além disso, os relés possuíam um desgaste físico elevado devido sua natureza eletromecânica. Durante a Segunda Revolução Industrial, apesar da introdução do telégrafo e do telefone, que facilitavam a comunicação entre funcionários nas fábricas, a comunicação no chão de fábrica ainda era rudimentar e pouco integrada, sem interligar diferentes dispositivos.

A Terceira Revolução Industrial, que começou na segunda metade do século XX, trouxe transformações mais disruptivas. O desenvolvimento de microprocessadores, impulsionado pelos avanços na eletrônica, marcou o início de uma nova era para as telecomunicações e para a automação industrial. Durante este período, a MODICON (atual Schneider Electric) desenvolveu o primeiro Controlador Lógico Programável (CLP), destinado a substituir os relés no controle de processos industriais.

Os CLPs permitiram uma automação mais sofisticada, com maior flexibilidade, redução de custos e melhor adaptabilidade às necessidades da produção. Adicionalmente, surgiram as redes de computadores e sistemas de supervisão SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), que possibilitaram o monitoramento e controle remotos dos processos produtivos. Na Figura 2, observa-se a integração do Controlador Lógico Programável M580 da Schneider Electric, conectando-se a diversos dispositivos de campo, como acionadores de motor, *switches* e uma Interface Homem-Máquina (IHM). Esta configuração ilustra a alta capacidade de integração e centralização da automação de processos proporcionada pelos CLPs.

A Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, está em pleno desenvolvimento e foi pela primeira vez mencionada em 2011. Entre as tecnologias digitais que caracterizam a Indústria 4.0, conforme ilustrado na Figura 3, destacam-se, no contexto

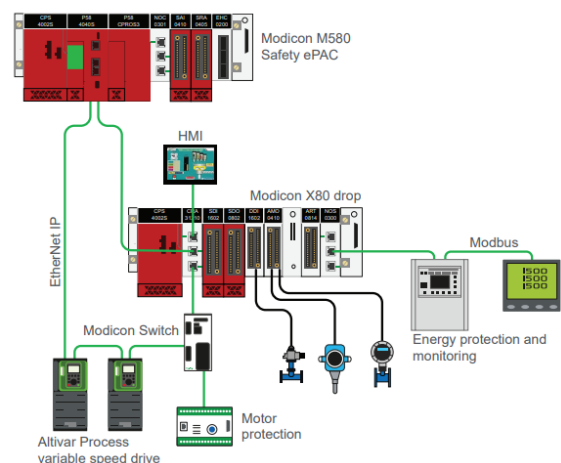


Fig. 2: Integração do CLP M580 com diversos dispositivos: *switches*, sensores e IED's. Fonte: [4].

deste trabalho, o *Big Data*, a Internet das Coisas (IoT) e a segurança cibernética.

O *Big Data*, em particular, refere-se ao vasto volume de dados gerados e armazenados durante os processos produtivos. Nas indústrias modernas, além da fabricação de produtos, é essencial garantir o armazenamento eficiente e a análise precisa dos dados, a fim de otimizar processos, prever falhas e embasar decisões estratégicas.

A segurança cibernética, por sua vez, refere-se ao conjunto de práticas, tecnologias e processos destinados a proteger sistemas computacionais, redes e dados contra ataques, acessos não autorizados, danos ou roubo. Ela envolve a implementação de medidas para garantir a confidencialidade, integridade e disponibilidade da informação, além de proteger contra

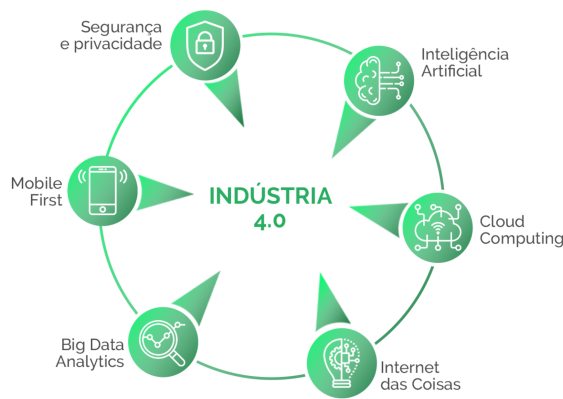


Fig. 3: Conceitos da Indústria 4.0. Fonte: [5]

ameaças como vírus, *malwares* e invasões. A segurança cibernética é essencial para assegurar o funcionamento seguro de infraestruturas críticas, como sistemas financeiros, de saúde e de comunicação, que estão cada vez mais interconectados e expostos a riscos digitais.

A Internet das Coisas (IoT), por fim, é uma tecnologia central na Indústria 4.0, permitindo a interconexão de dispositivos físicos, como sensores e máquinas, à internet, para a coleta e troca de dados em tempo real. Essa conectividade possibilita o monitoramento contínuo dos equipamentos, a manutenção preditiva, a automação de processos e a gestão eficiente de estoques, resultando em maior eficiência operacional e redução de custos. A IoT também contribui para a melhoria da qualidade ao permitir decisões baseadas em dados e uma maior flexibilidade na produção.

No entanto, a adoção massiva da IoT traz desafios consideráveis, especialmente no que se refere à segurança cibernética e à integração de sistemas, pois o grande volume de dados gerados, transmitidos e armazenados exige medidas rigorosas de proteção contra ataques cibernéticos, acessos não autorizados e atualizações indevidas que podem comprometer toda a linha de produção.

A integração de tecnocologias como IoT, computação em nuvem, *Big Data* e inteligência artificial, além de outros pilares da Indústria 4.0, permite uma maior interconectividade entre os níveis hierárquicos bem definidos da pirâmide de automação, mostrada na Figura 4.

Concebida na década de 1980, a pirâmide de automação é uma representação dos níveis de controle e operação em ambientes industriais, sendo estes: campo, controle, supervisão, planejamento e gerenciamento. Na base da pirâmide (nível 1 ou campo), encontram-se os componentes físicos das máquinas, como sensores e atuadores. O nível 2 (controle) abrange os equipamentos de controle, incluindo as Unidades Terminais Remotas (UTRs) e os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). No nível 3 (supervisão), estão localizadas as ferramentas de interface homem-máquina, como os *softwares* de supervisão, bancos de dados e estações de operação. O nível 4 (planejamento) é responsável pelo

planejamento e programação da produção, enquanto o nível 5 (gerenciamento), no topo da pirâmide, compreende o gerenciamento corporativo, envolvendo *softwares* de gestão financeira e administrativa.

Com a chegada das tecnologias digitais da Indústria 4.0, dispositivos de campo como sensores e atuadores são capazes de se comunicar diretamente com sistemas de gerenciamento em tempo real, sem depender exclusivamente de camadas intermediárias. Essa mudança promove uma automação mais vertical e colaborativa, onde os dados fluem de maneira bidirecional e distribuída, permitindo tomadas de decisão mais rápidas e inteligentes. Assim, a estrutura tradicional dá lugar a um sistema mais dinâmico e flexível, alinhado às demandas de eficiência, personalização e adaptabilidade da Indústria 4.0.

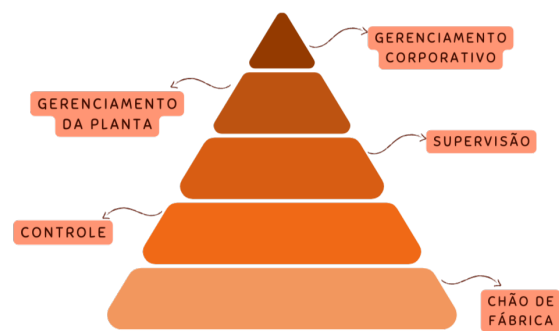


Fig. 4: Pirâmide de automação. Fonte: [6]

Apesar deste avanço, a implementação da Indústria 4.0 enfrenta ainda várias barreiras internas, especialmente no que diz respeito aos custos de implementação [1]. Ademais, destacam-se como obstáculos a cultura interna das indústrias, a falta de conhecimento técnico sobre as tecnologias digitais e infraestrutura de TI apropriada. Somam-se a esses obstáculos barreiras externas, como a falta de trabalhadores qualificados e a dificuldade para identificar tecnologias e parceiros.

Um terceiro desafio externo e impactante é a ausência de uma rede de telecomunicações robusta e moderna no Brasil. A infraestrutura atual enfrenta problemas como falta de acesso à internet de alta velocidade em áreas rurais, transição lenta e cara para tecnologias avançadas como o 5G, altos custos de internet banda larga e necessidade de manutenção e modernização. Esses fatores resultam em uma infraestrutura insuficiente, incapaz de atender às demandas da Indústria 4.0, limitando o crescimento e a inovação no país.

Dessa forma, para garantir uma integração eficiente entre os diferentes níveis da pirâmide de automação, é fundamental compreender o papel de cada protocolo de comunicação, o que será explorado na próxima seção. Esse entendimento é essencial para superar as barreiras existentes e promover a transformação digital completa e eficaz das indústrias rumo à Indústria 4.0.

III. AS REDES INDUSTRIAIS E OS PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

As redes industriais englobam toda a infraestrutura física e lógica necessária para a troca de informações entre dispositivos dentro de um ambiente industrial. Essa infraestrutura inclui diversos componentes essenciais, como cabos de comunicação, roteadores, *switches* e dispositivos finais (computadores, servidores, sensores, controladores), que trabalham em conjunto para garantir a transmissão e o processamento adequado dos dados. A combinação dessas partes permite a interligação de sistemas e equipamentos, criando um ecossistema integrado e interconectado que suporta a automação e a digitalização dos processos produtivos. A Figura 7 mostra uma arquitetura simplificada de automação, englobando toda a rede de comunicação de uma indústria.

Os protocolos de comunicação, por sua vez, representam um conjunto de regras e normas que definem como os dados são transmitidos, recebidos e processados em uma rede de comunicação. Eles são responsáveis por estabelecer a sintaxe, semântica, sincronização e métodos de recuperação de erros na troca de informações entre dispositivos, garantindo a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes e modelos.

Na literatura técnica, as redes de comunicação industrial são classificadas em três categorias principais, de acordo com a complexidade dos instrumentos envolvidos e o nível de controle do processo: *Sensorbus*, *Devicebus* e *Fieldbus*, ilustrado na Figura 5.

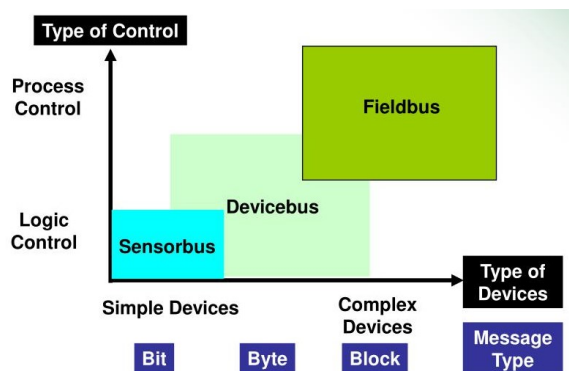


Fig. 5: Classificação das Redes Industriais de acordo com o nível de controle do processo e complexidade dos dispositivos. Fonte: [7]

O *Sensorbus* é uma categoria de rede projetada para conectar sensores e dispositivos de medição diretamente ao sistema de controle. Esse tipo de rede trabalha com dados em formato binário (bits) e exige um baixo nível de processamento dos dispositivos que conecta, mas um tempo de transmissão extremamente crítico, geralmente inferior a 1 milissegundo. Redes *Sensorbus* são ideais para aplicações que requerem respostas rápidas e precisão, como a detecção de eventos em tempo real, sendo o protocolo AS-Interface muito utilizado nesse tipo de rede.

Atuando como intermediário entre sensores e controladores, a rede *Devicebus* conecta dispositivos de nível médio, como módulos de entrada e saída (módulos de I/O), *gateways* e conversores de protocolo. A rede *Devicebus* é fundamental para garantir a interoperabilidade de dispositivos de diferentes fabricantes, permitindo que sistemas heterogêneos possam operar em conjunto de forma eficiente.

Os protocolos operantes no *Devicebus* oferecem maior capacidade de dados e flexibilidade de configuração em comparação ao *Sensorbus*, embora ainda mantenham uma exigência moderada em termos de capacidade de transmissão e latência.

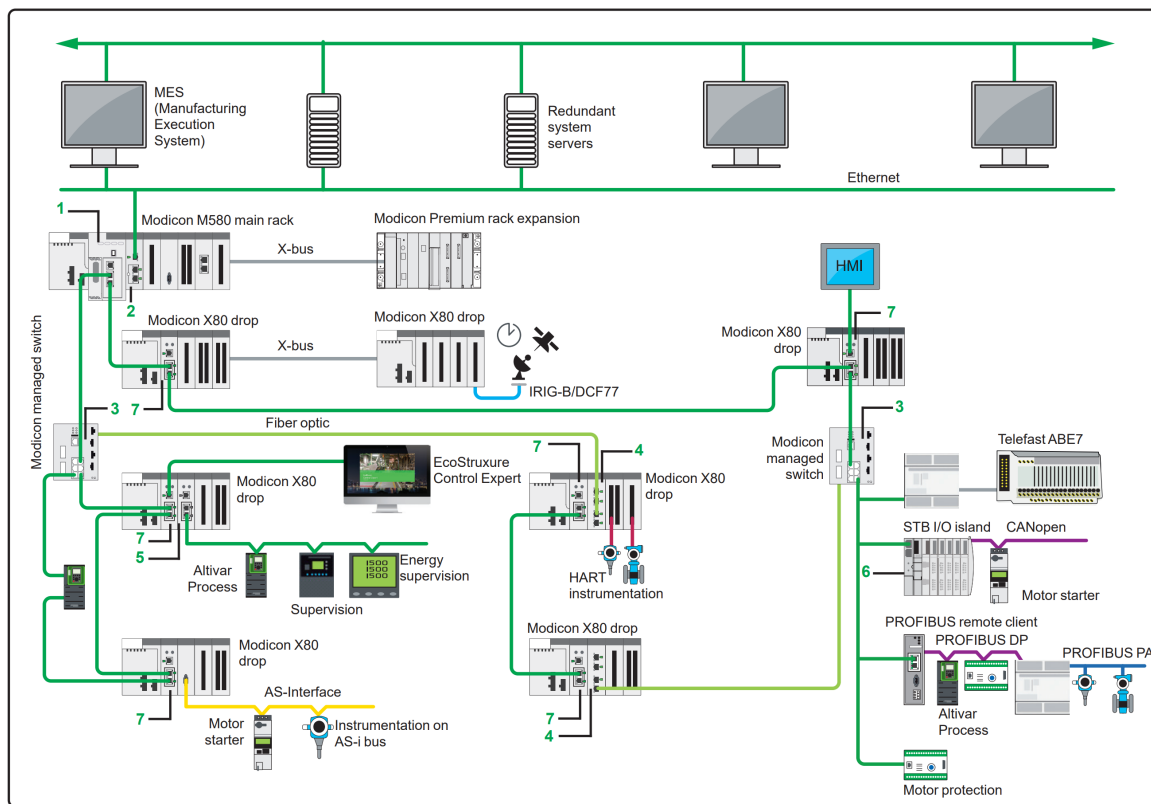
O *Fieldbus* é uma rede mais avançada, trabalhando com pacotes de mensagens de dados mais complexos e interligando dispositivos de controle, como controladores programáveis (CLPs) e sistemas SCADA. Esse tipo de rede exige alta capacidade de transmissão de dados e oferece maior flexibilidade na configuração e integração de dispositivos. O *Fieldbus* permite a comunicação bidirecional entre dispositivos e sistemas, facilitando a gestão centralizada e a otimização dos processos produtivos.

Embora as redes industriais sejam classificadas em *Sensorbus*, *Fieldbus* e *Devicebus* para fins didáticos, e seja necessário entender essas distinções ao trabalhar com comunicação na indústria, essa categorização não é rígida. Protocolos industriais modernos, como serão mostrados a seguir, frequentemente transcendem essas camadas, sendo capazes de operar em múltiplos níveis hierárquicos de acordo com a necessidade do sistema. Essa flexibilidade reflete o avanço tecnológico e a transição para arquiteturas mais integradas na Indústria 4.0.



Fig. 6: Camadas do modelo OSI. Fonte: [8]

A evolução tecnológica e demandas por escalabilidade e flexibilidade impulsionaram protocolos mais avançados, onde cada protocolo busca atender requisitos únicos da automação industrial e integrar sistemas complexos, além de garantir a compatibilidade com tecnologias legadas. Este trabalho explora três protocolos com crescente uso e aplicação na indústria diante das inovações tecnológicas: Profinet, Ethernet/IP e OPC UA. Estes protocolos serão analisados e comparados com base em parâmetros relevantes para a Indústria 4.0, como interoperabilidade, suporte ao *Big Data*, conectividade com a nuvem e eficiência energética. Além



Example of a complex architecture

Fig. 7: Exemplo de arquitetura de rede industrial. Fonte: [4].

disso, será utilizada a estrutura do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) como base para a análise, considerando as camadas específicas de cada protocolo e sua adequação aos requisitos de comunicação industrial.

O modelo OSI é uma referência teórica desenvolvida em 1970 pela ISO (*International Organization for Standardization*) para padronizar a comunicação entre sistemas de computadores em uma rede. Ele organiza a comunicação em sete camadas hierárquicas, como observa-se na Figura 6. O principal objetivo desse modelo é reduzir a complexidade das redes, dividindo suas funções em camadas específicas e complementares. Cada camada é responsável por um conjunto de serviços que contribuem para o funcionamento da rede como um todo. As camadas são divididas da seguinte forma:

- **Camada física:** trata da transmissão de sinais elétricos ou ópticos.
- **Camada de enlace:** responsável por assegurar a transmissão de dados livres de erros.
- **Camada de rede:** determina as rotas e endereçamento dos dados.
- **Camada de transporte:** garante a entrega confiável e ordenada das informações.
- **Camada de sessão:** gerencia as conexões entre dispositivos.
- **Camada de apresentação:** encarregada da tradução e criptografia de dados.

- **Camada de aplicação:** conecta os serviços da rede aos softwares utilizados pelos usuários finais.

A escolha desses parâmetros reflete a necessidade de avaliar a capacidade dos protocolos em atender às demandas modernas de automação industrial, como a integração de dispositivos heterogêneos, comunicação em tempo real e suporte a sistemas de análise avançada. Já o uso do modelo OSI é justificado por sua abordagem sistemática, que permite identificar com clareza como cada protocolo lida com aspectos como transporte de dados, segurança e interoperabilidade em diferentes camadas de comunicação. Essa combinação de critérios técnicos e estruturais é essencial para compreender as vantagens e limitações de cada protocolo no contexto da Indústria 4.0, onde eficiência, conectividade e escalabilidade são fundamentais.

IV. PROTOCOLO PROFINET

Profinet (*Process Field Network*) é um protocolo de comunicação em tempo real que utiliza Ethernet Industrial. Desenvolvido pela PROFIBUS & PROFINET International (PI) nos anos 2000, ele expande o protocolo Profibus (*Process Field Bus*), amplamente usado na indústria para comunicação entre dispositivos de automação. O sistema Profinet permite a interconexão de dispositivos em uma rede Ethernet padrão, proporcionando uma solução flexível e escalável para comunicação.

O Profinet oferece várias vantagens em relação ao Profibus, como operação em alta velocidade, estrutura de rede simplificada, custos reduzidos, cabeamento único, expansão de rede facilitada, configurações personalizáveis e integração com sistemas *Fieldbus*. Além disso, o Profinet lidera o segmento de Ethernet Industrial, apresentando crescimento exponencial de nós desde sua criação, como observa-se na Figura 8. No contexto de redes de comunicação, os "nós" ou "*nodes*" referem-se aos dispositivos conectados que participam da comunicação na rede. Esses nós podem incluir uma variedade de dispositivos industriais, como controladores lógicos programáveis, sensores, atuadores, *switches* e outros equipamentos de automação.

Em relação às camadas do modelo OSI, o Profinet utiliza quatro camadas, excluindo-se as camadas de sessão e de apresentação (5 e 6, respectivamente). As camadas física e enlace combinam-se para formar o nível mais baixo, que compreende a Ethernet, e são definidas pela norma técnica IEEE802.3 [9]. Além disso, utiliza na camada de rede o protocolo IP (*Internet Protocol*), fazendo a definição do percurso dos pacotes de dados desde a origem até o destino. Por fim, utiliza na camada de transporte o protocolo TCP ou UDP. Apesar de utilizar as camadas TCP/IP para configuração e diagnóstico, o Profinet pode "saltar" essas camadas para manter o desempenho determinístico (um requisito industrial, que significa entregar dados no tempo certo, repetidamente). Na camada de aplicação, utiliza um conjunto de protocolos, a depender da aplicação, podendo estes ser HTTP, SNMP e SMTP.

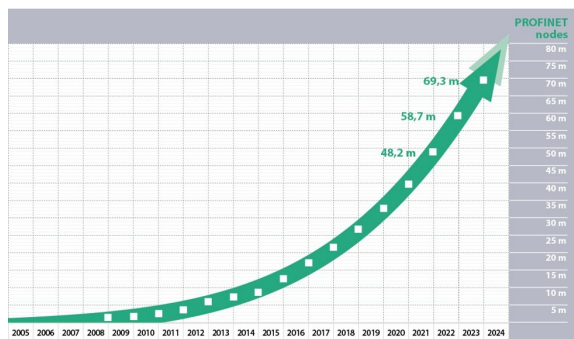


Fig. 8: Evolução do número de nós na rede Profinet ao longo dos anos. Fonte: [10]

Como meio físico, o Profinet utiliza principalmente o cabo Ethernet CAT 5, onde consegue atingir velocidades de transmissão de até 100Mbps (100BASE-TX). Para conexão, pode utilizar conectores RJ45 e M12, e alcançar a distância máxima de 100 metros por segmento. No caso de utilização de fibra óptica, essa distância pode atingir milhares de metros, a depender do tipo de fibra e da configuração da rede. Em relação a topologia de rede, o Profinet permite o uso de topologias em estrela, árvore e anel, além da topologia em barramento. A Figura 9 mostra uma combinação possível das topologias da rede [11].

O Profinet oferece três modalidades de comunicação para atender a diferentes requisitos industriais: dados de engenharia e dados não urgentes são transferidos por TCP/IP. Aplicações que exigem comunicação em tempo real e baixa latência, como controle de processos e sincronização entre dispositivos, utilizam o Profinet RT (*Real-Time*). Já o Profinet IRT (*Isochronous Real-Time*) é projetado para cenários de altíssima precisão temporal como sistemas de controle de movimento, de forma a garantir sincronização isócrona e comunicação determinística.

No que tange eficiência energética, por solicitação do grupo de fabricantes de automotivos alemães composto por Audi, BMW, Mercedes-Benz, Porsche e Volkswagen, foi lançado em 2009 o PROFIenergy, que permite um controle e administração do consumo de energia elétrica dos componentes da rede através da rede Profinet. Dessa forma, o PROFIenergy opera sobre o mesmo protocolo, sem necessidade de *hardware* adicional. O sistema funciona por meio de comandos enviados pelo CLP para os dispositivos, por exemplo solicitando a redução de consumo ou o desligamento parcial, além de possibilitar o monitoramento do consumo de energia em tempo real. Como ele segue padrões industriais abertos, o PROFIenergy é interoperável entre dispositivos de diferentes fabricantes, promovendo flexibilidade na implementação.

O Profinet possui segurança integrada com o PROFIsafe, um perfil de comunicação que utiliza técnicas de redundância e verificação para detectar erros na comunicação, implementação de medidas de segurança como paradas emergenciais e monitoramento de dispositivos críticos. Um dos grandes diferenciais do PROFIsafe é sua compatibilidade com padrões internacionais de segurança, como a IEC 61508 e a ISO 13849, que especificam os requisitos para sistemas seguros. Ao integrar funções de segurança e automação em uma única rede, o PROFIsafe reduz a complexidade dos sistemas industriais e os custos de instalação e manutenção [9].

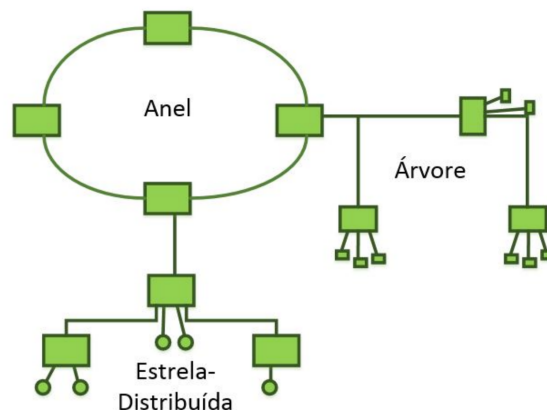


Fig. 9: Topologias de rede Profinet. Fonte: [11]

V. PROTOCOLO OPC UA

O protocolo *Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control*, (OPC) surgiu da necessidade de criar um padrão de comunicação entre dispositivos de chão de fábrica, uma vez que cada fornecedor possuía seus protocolos específicos e a conectividade entre esses dispositivos era impossibilitada [12].

Desenvolvido pela OPC Foundation, um organização fundada em 1995 que reúne grandes empresas do setor industrial, dentre elas Rockwell, Toshiba, Siemens e Intel-lution, o protocolo foi construído com base na tecnologia da *Microsoft*, utilizando o COM/DCOM (*Component Object Model/Distributed Component Model*), que permitia a troca de informações entre diferentes *softwares* e dispositivos em ambientes *Windows*. O OPC funcionava como um "driver de dispositivo", habilitando controladores lógicos programáveis a fornecerem dados em tempo real, alarmes e históricos para sistemas supervisórios e de monitoramento. Essa abordagem padronizou a integração entre dispositivos e *softwares* industriais, simplificando a comunicação em ambientes de automação e abrindo caminho para o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas.

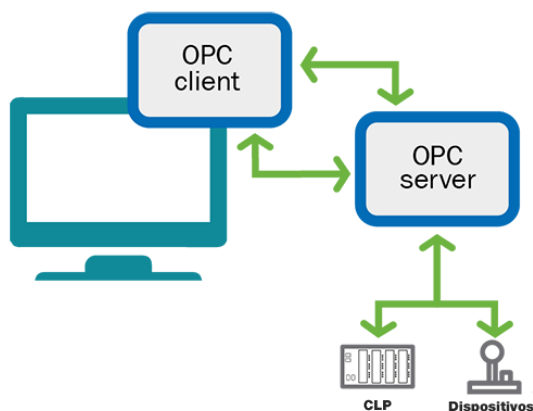


Fig. 10: Comunicação rede OPC UA. Fonte: [12]

O primeiro padrão foi o *OPC Classic*, tendo rápida aceitação no mercado por resolver o problema de interconexão entre dispositivos. No entanto, devido a restrição da sua atuação ao sistema *Windows* e outros problemas técnicos como dificuldade na configuração, surgiu em 2008 o *OPC UA (Unified Architecture)*. Este possui todas as funcionalidades do *OPC Classic*, é extensível para qualquer sistema operacional e possui ainda outros avanços tecnológicos.

O *OPC UA* pode ser descrito como um protocolo multicamadas, onde várias funcionalidades abrangem mais de uma camada do modelo OSI, o que reflete sua flexibilidade e sua adaptação para operar de forma eficiente em diferentes infraestruturas de rede. Ele opera principalmente na camada de aplicação, onde define os protocolos e serviços de comunicação para troca de dados entre dispositivos e sistemas. Na camada de apresentação, faz tradução dos dados entre o formato usado pela aplicação e o formato usado na rede,

garantindo que a informação seja interpretada corretamente pelos diferentes sistemas. O *OPC UA* utiliza ainda a camada de sessão para estabelecer, gerenciar e encerrar sessões de comunicação entre dispositivos. Por fim, a camada de transporte é usada para a transmissão de dados através de protocolos como *TCP/IP*, garantindo a entrega confiável dos pacotes de dados.

No que diz respeito à segurança no *OPC UA*, esta é fundamentada em uma estrutura de chave pública (KPI), que utiliza o padrão industrial de certificados digitais X.509 para proteger as comunicações. Essa estrutura garante que apenas dispositivos ou usuários autenticados possam acessar a rede, validando suas identidades por meio de certificados confiáveis. Além disso, o protocolo implementa mecanismos de autorização e criptografia para proteger a confidencialidade dos dados, e realiza verificação de integridade, assegurando que as informações não sejam alteradas durante a transmissão.

Com relação a velocidade alcançada, esta depende do meio físico e da infraestrutura utilizada. Em redes Ethernet, pode variar de 10Mbps a 100Gbps. O mesmo acontece para a distância, que depende do meio físico e pode atingir 100 metros, quando utilizando cabos Ethernet (CAT 5e ou CAT6, por exemplo), 550 metros quando utiliza fibra óptica multimodo e até 40 quilômetros quando operando sob o meio físico fibra óptica monomodo. O *OPC UA* não possui um limite rígido para o número de dispositivos conectados, e suporta várias topologias, incluindo estrela, anel, linha e malha, o que proporciona flexibilidade na configuração da rede.

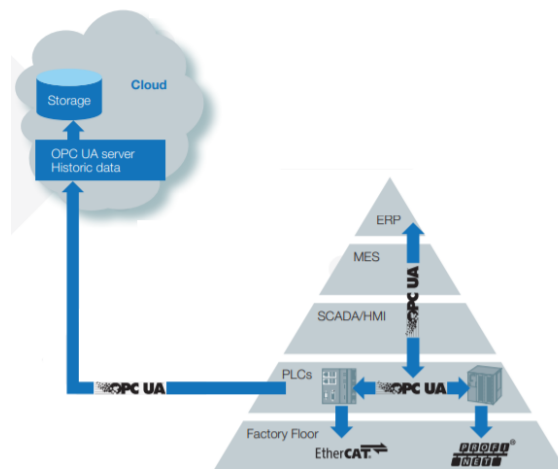


Fig. 11: Atuação do protocolo OPC UA na Pirâmide de Automação. Fonte: [13]

No *OPC UA*, a troca de mensagens entre dispositivos ocorre por meio do modelo de comunicação Cliente-Servidor. Neste modelo, o servidor fornece informações, recursos e serviços enquanto o cliente realiza solicitações para acessar ou manipular dados, como observa-se na Figura 10. Para realizar essa comunicação corretamente, são necessários três elementos: o formato da mensagem (define como os dados são

estruturados, podendo ser UA Binary ou XML), o protocolo de transporte (responsável por enviar as mensagens, como OPC TCP e SOAP /HTTP(S)) e as medidas de segurança do canal (que incluem autenticação, criptografia e controle de acesso) [14].

O OPC UA possibilita a integração vertical na pirâmide de automação, conectando diretamente dispositivos de controle, como CLPs e UTRs, aos níveis mais altos da hierarquia, incluindo sistemas de gestão e a nuvem, conforme ilustrado na Figura 11. Essa integração elimina a necessidade de camadas intermediárias de comunicação, permitindo que dados coletados nos níveis de chão de fábrica sejam disponibilizados em tempo real para análise, monitoramento e tomada de decisão em níveis estratégicos.

Por fim, o OPC UA pode ser diretamente relacionado à eficiência energética na indústria devido à sua arquitetura interoperável, a qual permite que sensores, medidores de energia e controladores enviem informações detalhadas sobre consumo energético diretamente para sistemas supervisórios ou para a nuvem. Essa conectividade facilita a identificação de desperdícios de energia e a implementação de estratégias de otimização. Além disso, o OPC UA suporta perfis como o PROFIenergy para realizar o gerenciamento ativo de energia em ambientes industriais.

VI. PROTOCOLO ETHERNET/IP

Presente em milhões de residências e empresas, o Ethernet comum já é conhecido por sua simplicidade, velocidade e confiabilidade. Na Indústria 4.0, o Ethernet/IP (*Industrial Protocol*) se destaca ao adaptar essa tecnologia para ambientes industriais, oferecendo suporte a comunicações em tempo real, integração de dispositivos heterogêneos e alta escalabilidade. Essa versatilidade tem impulsionado o crescimento do Ethernet/IP como um dos protocolos mais usados em redes industriais, conectando sensores, atuadores, controladores e sistemas de supervisão em aplicações que exigem alto desempenho e interoperabilidade.

O Ethernet/IP surgiu da necessidade de criar um padrão aberto para utilização em diversas aplicações industriais, de forma a aproveitar a popularidade e versatilidade do Ethernet convencional às exigências específicas de ambientes industriais, como confiabilidade, determinismo e suporte a tempo real. Foi desenvolvido pela ODVA (*Open DeviceNet Vendor Association*) no final dos anos 90, sendo amplamente adotado desde então [15]. De acordo com a análise anual da *Hardware Meets Software*, o Ethernet/IP acelera seu crescimento e continua a capturar participação de mercado, com um crescimento de 12% no ano de 2024. Atualmente, a Ethernet Industrial responde por 71% do mercado global de nós recém-instalados em automação de fábrica (comparado a 68% no ano de 2023).

A partir do gráfico na Figura 12, observa-se também a predominância do Profinet, com uma participação de mercado de 23%, superando o Ethernet/IP, que responde por 21% dos novos nós instalados no ano de 2024.

O Ethernet/IP oferece suporte a diversas velocidades de operação, incluindo 10 Mbps, 100 Mbps e até 1 Gbps, dependendo das exigências de aplicação e do meio físico utilizado. O meio mais comum é o cabo de par trançado, como padrões CAT5e, CAT6 ou superiores, geralmente acompanhado de conectores RJ45. Nesse tipo de cabeamento, a transmissão alcança distâncias de até 100 metros por segmento, sem a necessidade de repetidores. Em aplicações que demandam maiores distâncias, é comum o uso de fibra óptica, que pode atingir até 550 metros com fibras multimodo e entre 10 a 40 quilômetros com fibras monomodo, dependendo da qualidade e da especificação do sistema.

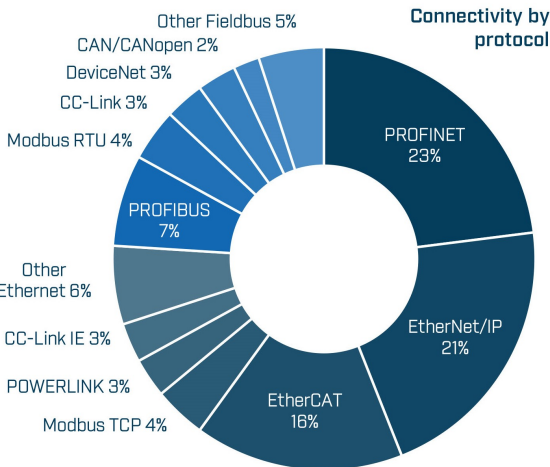


Fig. 12: Gráfico de participação de diferentes protocolos na comunicação industrial. Fonte: [16]

O Ethernet/IP suporta uma variedade de topologias de rede, incluindo linear, estrela e anel. Além disso, permite a topologia híbrida, como pode ser observada na Figura 7, onde o protocolo Ethernet/IP é representado pelo cabos verdes, combinando características das topologias barramento, estrela e *daisy chain*, de forma a oferecer flexibilidade e redundância na rede.

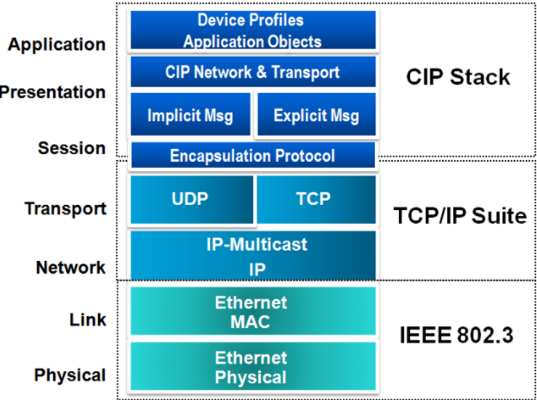


Fig. 13: Camadas do Ethernet/IP no modelo OSI. Fonte: [17]

O Ethernet/IP é composto pelas camadas física, enlace, rede, transporte e aplicação do modelo OSI, com forte dependência do Ethernet padrão para as camadas inferiores e o CIP (*Common Industrial Protocol*) para a camada de aplicação. Na Figura 13 pode-se observar como ele se comunica através da Ethernet padrão e a integração com o CIP. Esse arranjo garante a interoperabilidade e a flexibilidade necessárias para aplicações industriais, da seguinte forma:

- **Camada Física:** conexão física e transmissão de bits, utiliza os cabos de par trançado ou fibra óptica e determina as velocidades de comunicação.
- **Camada de Enlace:** utiliza o Ethernet padrão, que inclui o controle de acesso ao meio (MAC) e a detecção/correção de erros em *frames*.
- **Camada de Rede:** baseia-se no protocolo IP (*Internet Protocol*) para endereçamento lógico, permitindo comunicação em redes locais (LANs) e redes maiores, como WANs (*Wide Area Network*)
- **Camada de Transporte:** Utiliza os protocolos TCP para transmissões confiáveis e orientadas à conexão e UDP para comunicações rápidas e com menor sobrecarga, ideal para tempo real.
- **Camada de Aplicação:** Implementa o CIP, que permite a troca de informações entre dispositivos industriais de maneira padronizada. É a camada na qual o Ethernet/IP se diferencia, ao integrar funções específicas para a automação industrial.

VII. COMPARAÇÃO ENTRE PROTOCOS DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL: PROFINET, ETHERNET/IP E OPC UA

A transformação digital proporcionada pela Indústria 4.0 exige redes de comunicação industrial que sejam flexíveis, escaláveis e interoperáveis, além de atenderem às crescentes demandas por conectividade e análise avançada de dados. Os protocolos Profinet, Ethernet/IP e OPC UA desempenham papéis cruciais nesse cenário, cada um com características e aplicações específicas que os tornam adequados para diferentes necessidades industriais. Esta seção apresenta uma análise comparativa entre os três protocolos, considerando aspectos técnicos e operacionais relevantes para a Indústria 4.0. Uma síntese dessa análise é apresentada com o auxílio da Tabela 1.

A. Velocidade e Latência

O desempenho de comunicação é um fator essencial na automação industrial. Tanto o Profinet quanto o Ethernet/IP oferecem alta velocidade de transmissão, com suporte a taxas de até 1 Gbps ou mais, dependendo da configuração da rede. O Profinet, entretanto, se destaca pela latência extremamente baixa em aplicações determinísticas, como o controle de movimento, graças à modalidade IRT (*Isochronous Real-Time*). Por outro lado, o OPC UA, embora tenha um desempenho robusto, apresenta latência moderada devido à sua arquitetura baseada em TCP/IP, sendo mais indicado para integração com sistemas corporativos e aplicações que priorizam análise de dados sobre resposta em tempo real.

B. Interoperabilidade e Escalabilidade

A interoperabilidade é um dos pilares da Indústria 4.0, permitindo que dispositivos de diferentes fabricantes se conectem e troquem dados de maneira eficiente, além de ser uma exigência forte do mercado. Nesse aspecto, o OPC UA é o mais flexível, pois foi projetado para integrar dispositivos heterogêneos, desde sensores até sistemas corporativos e plataformas em nuvem. O Profinet e o Ethernet/IP também oferecem alta interoperabilidade, no entanto estão mais focados em ambientes industriais específicos, com o Profinet tendo maior penetração na Europa e o Ethernet/IP sendo amplamente utilizado nas Américas. Ambos os protocolos também apresentam escalabilidade elevada, suportando redes de diferentes tamanhos, mas o OPC UA se destaca pela sua capacidade de integrar sistemas distribuídos em múltiplos níveis da pirâmide de automação.

C. Segurança Cibernética

A segurança cibernética é uma preocupação crescente na automação industrial. O OPC UA implementa medidas avançadas, como criptografia e autenticação baseada em certificados digitais, tornando-o altamente seguro para aplicações que envolvem conectividade com a nuvem e troca de grandes volumes de dados. O Profinet e o Ethernet/IP também oferecem mecanismos de segurança, como o PROFI-safe no caso do Profinet, porém ambos dependem mais da configuração da rede e de dispositivos externos, como *firewalls*, para proteção contra ataques.

D. Conectividade com a Nuvem e Big Data

O OPC UA é o protocolo mais alinhado às demandas de conectividade com a nuvem e suporte ao *Big Data*, sendo projetado para integrar dispositivos industriais a plataformas de análise avançada e IoT. Ele suporta a comunicação vertical entre o chão de fábrica e sistemas corporativos, eliminando camadas intermediárias. O Profinet e o Ethernet/IP também podem se conectar à nuvem, mas de forma menos direta, geralmente necessitando de *gateways* ou dispositivos adicionais como CLPs para traduzir e encaminhar os dados.

Alguns CLPs mais modernos possuem recursos integrados para a comunicação direta com a nuvem, como módulos de comunicação OPC UA, permitindo que dados de dispositivos Profinet e Ethernet/IP conectados ao CLP sejam enviados diretamente para a nuvem. Esses elementos adicionais não comprometem a eficiência da comunicação, mas requerem planejamento e configuração cuidadosa para garantir que a integração com a nuvem atenda aos requisitos de segurança, desempenho e confiabilidade da Indústria 4.0.

No que tange ao *Big Data*, o Profinet, por si só, não foi projetado para manipular grandes volumes de dados diretamente ou integrá-los com plataformas de análise avançada. De maneira semelhante, o Ethernet/IP não processa grandes volumes de dados diretamente, mas ambos permitem que informações sejam extraídas e integradas com plataformas IoT ou sistemas de análise avançada por meio de CLPs modernos ou *gateways*.

TABELA I: Tabela comparativa entre protocolos, com insights para engenheiros e projetistas sobre a escolha do protocolo mais adequado, considerando os parâmetros exigidos no contexto da aplicação.

Parâmetro	Ethernet/IP	OPC UA	Profinet
Velocidade de Comunicação	Alta	Moderada a Alta	Alta
Latência	Baixa	Moderada	Muito Baixa
Custo de Implementação	Moderado	Moderado a Alto	Moderado
Facilidade de Integração	Alta	Alta	Alta
Escalabilidade	Alta	Muito Alta	Alta
Segurança	Moderada	Alta	Moderada
Complexidade de Configuração	Moderada	Alta	Moderada
Interoperabilidade	Moderada	Alta	Alta
Suporte a Big Data e Análise em Tempo Real	Alta	Muito alta	Alta
Capacidade de Conectividade com a Nuvem	Moderada	Muito Alta	Alta
Sustentabilidade e Eficiência Energética	Moderada	Alta	Alta
Adequação a Ambientes Críticos	Moderada a Alta	Alta	Muito Alta

E. Sustentabilidade e Eficiência Energética

No contexto da sustentabilidade, o Profinet se destaca pelo suporte ao perfil PROFIenergy, que permite monitorar e gerenciar o consumo energético em tempo real, reduzindo desperdícios durante períodos de inatividade. O OPC UA também contribui para a eficiência energética ao integrar sensores e sistemas de monitoramento com plataformas de análise. O Ethernet/IP, embora eficiente, depende da configuração e do *hardware* utilizado para alcançar resultados semelhantes.

F. Adequação a Setores e Aplicações

Em termos de aplicação, o Profinet é amplamente utilizado em setores que exigem controle preciso e alta confiabilidade, como o automotivo, farmacêutico e químico. O Ethernet/IP é popular em aplicações de manufatura e sistemas de controle distribuído, enquanto o OPC UA é ideal para indústrias que priorizam conectividade global, análise avançada e integração com IoT, como petróleo e gás, alimentos e bebidas.

VIII. ESTUDOS DE CASO: APLICAÇÕES PRÁTICAS DE PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

Nesta seção, serão apresentados dois estudos de caso teóricos que ilustram a aplicação dos protocolos analisados ao longo deste trabalho. O primeiro caso aborda a revitalização de um parque industrial existente, explorando como tecnologias modernas podem ser integradas a sistemas legados para melhorar a eficiência e conectividade. O segundo caso trata da concepção de uma infraestrutura de automação em um projeto *greenfield*, considerando as demandas atuais de conectividade.

Ambos os estudos têm caráter teórico e foram desenvolvidos para exemplificar como os protocolos Profinet, Ethernet/IP e OPC UA podem ser utilizados em cenários distintos, destacando seus benefícios e desafios de implementação.

A. Estudo de Caso 1: Revitalização de um Parque Industrial Existente na Indústria de Mineração

1) Contexto

Uma planta de beneficiamento de minério opera há mais de 15 anos utilizando uma infraestrutura de automação baseada em tecnologias legadas, como redes Profibus e dispositivos de controle descentralizados.

Apesar de funcional, a planta enfrenta problemas de falhas frequentes, dificuldade na manutenção e falta de integração entre os sistemas de controle e os níveis corporativos. Além disso, a falta de conectividade com a nuvem impede o uso de soluções modernas de análise preditiva e otimização.

2) Objetivo do Projeto

Modernizar o sistema de comunicação e automação da planta, alinhando-o aos princípios da Indústria 4.0, com foco em maior eficiência operacional, integração de dados e redução de falhas.

3) Estratégia de Implementação

- **Integração dos Dispositivos Existentes:** utilizar *gateways* para conectar os dispositivos legados que operam em Profibus a uma rede moderna baseada em Profinet, mantendo a compatibilidade com o parque industrial já instalado.
- **Adoção de Profinet no Chão de Fábrica:** Implementar o Profinet nos locais onde é mais vantajoso a substituição de dispositivos obsoletos do que a integração por meio de conversores e/ou *gateways*. Com isso, busca-se permitir o gerenciamento da comunicação em tempo real entre sensores, atuadores e CLPs, garantindo alta confiabilidade e desempenho determinístico para controle de processos.
- **Conexão com a Nuvem via OPC UA:** adicionar módulos OPC UA nos CLPs para conectar a planta diretamente aos sistemas corporativos e à nuvem, permitindo monitoramento remoto, análise preditiva e centralização de dados.
- **Eficiência Energética:** Implementar o perfil *PROFIenergy* nos dispositivos compatíveis, otimizando o consumo de energia durante períodos de inatividade, como paradas programadas.

4) Resultados Esperados

- **Redução de Custos:** Menor gasto com manutenção corretiva devido à redução de falhas e maior confiabilidade do sistema como um todo.
- **Aumento da Conectividade:** Integração do chão de fábrica com sistemas de gestão e plataformas de

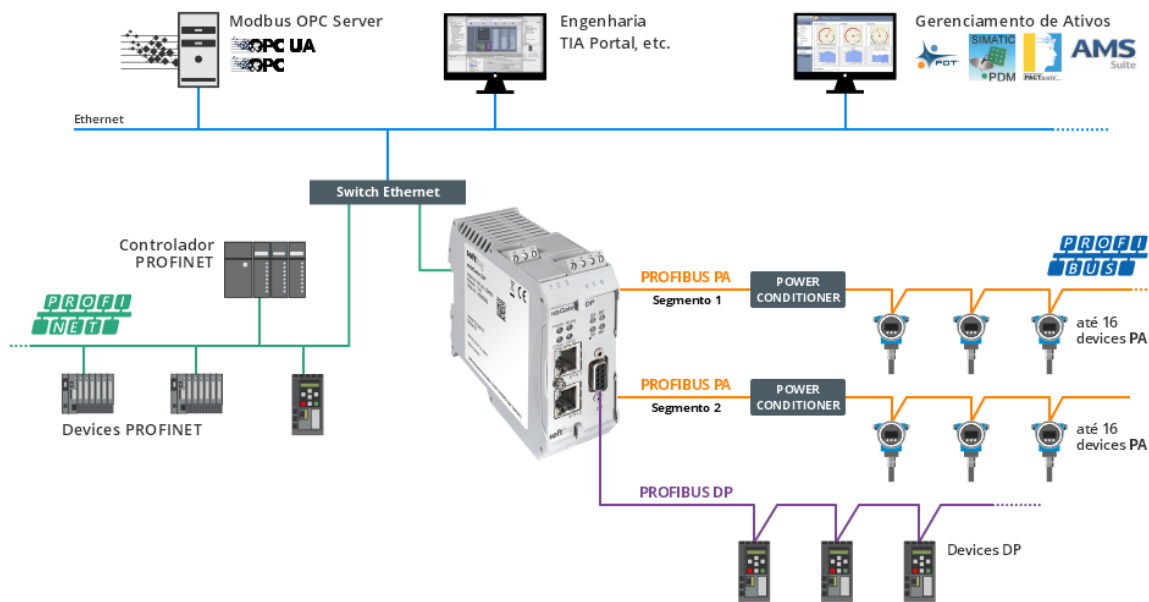


Fig. 14: Integração de redes Profibus com Profinet por meio de gateway Westcon. Fonte: [18].

análise.

- **Eficiência Energética:** Menor consumo de energia e redução de paradas de manutenção.

B. Estudo de Caso 2: Implementação de um Sistema de Automação Greenfield em uma Indústria de Bebidas

1) Contexto

Uma nova planta industrial de bebidas será construída para atender a demandas de alta produção, flexibilidade de produtos e rastreabilidade. A planta exige uma infraestrutura de automação que integre sensores, atuadores e equipamentos de linha em um ambiente conectado e escalável. Além disso, é essencial a integração com plataformas de IoT e *Big Data* para otimizar o processo produtivo.

2) Objetivo do Projeto

Desenvolver uma infraestrutura de automação moderna e alinhada à Indústria 4.0, com foco em alta flexibilidade, integração horizontal e vertical e eficiência operacional.

3) Estratégia de Implementação

- **Infraestrutura Baseada em Ethernet/IP:** Utilizar Ethernet/IP no chão de fábrica para conectar sensores, atuadores e CLPs em uma rede de alta velocidade, garantindo comunicação em tempo real e flexibilidade na configuração.
- **Integração Vertical com OPC UA:** Adotar servidores OPC UA para conectar os dispositivos do chão de fábrica diretamente a sistemas de análise e gestão na nuvem. Essa integração permite a rastreabilidade total, monitoramento remoto e análise preditiva de dados.
- **Conectividade Iot:** Implementar dispositivos de borda para facilitar a conexão com plataformas de

IoT, utilizando protocolos como MQTT e HTTP para enviar dados em tempo real para a nuvem.

4) Resultados esperados

- **Alta Rastreabilidade:** Monitoramento detalhado de cada etapa do processo produtivo.
- **Otimização de Processos:** Utilização de dados em tempo real para ajustes automáticos e aumento da eficiência em sistema SCADA.
- **Escalabilidade:** Infraestrutura preparada para expansão e integração futura com novas tecnologias.
- **Sustentabilidade:** Redução de desperdícios e alta eficiência energética.

Os estudos de caso apresentados demonstram, de forma teórica, como os protocolos Profinet, Ethernet/IP e OPC UA podem ser aplicados em diferentes cenários industriais, evidenciando suas características e benefícios. No caso da revitalização de um parque industrial, observou-se a importância de integrar tecnologias modernas e sistemas legados, de forma que pode-se observar na Figura 14 a utilização de um *gateway* Profibus/Profinet para fazer a conversão dos protocolos e integrar áreas da planta que utilizam sistema legados aos novos dispositivos e tecnologias. Além disso, observa-se também a presença do OPC UA integrando toda a planta à nuvem.

No cenário de implementação do projeto *greenfield*, a escolha de dispositivos e protocolos é principalmente limitada pelo orçamento e orientada pela estratégia da empresa. No entanto, espera-se que a arquitetura de rede comporte-se de forma semelhante ao mostrado na Figura 15, onde o OPC UA desempenha um papel crucial na integração de todos os níveis de gerenciamento e controle, enquanto protocolos *fieldbus*, como Ethernet/IP e Profinet, integram os dispositivos do chão de fábrica.

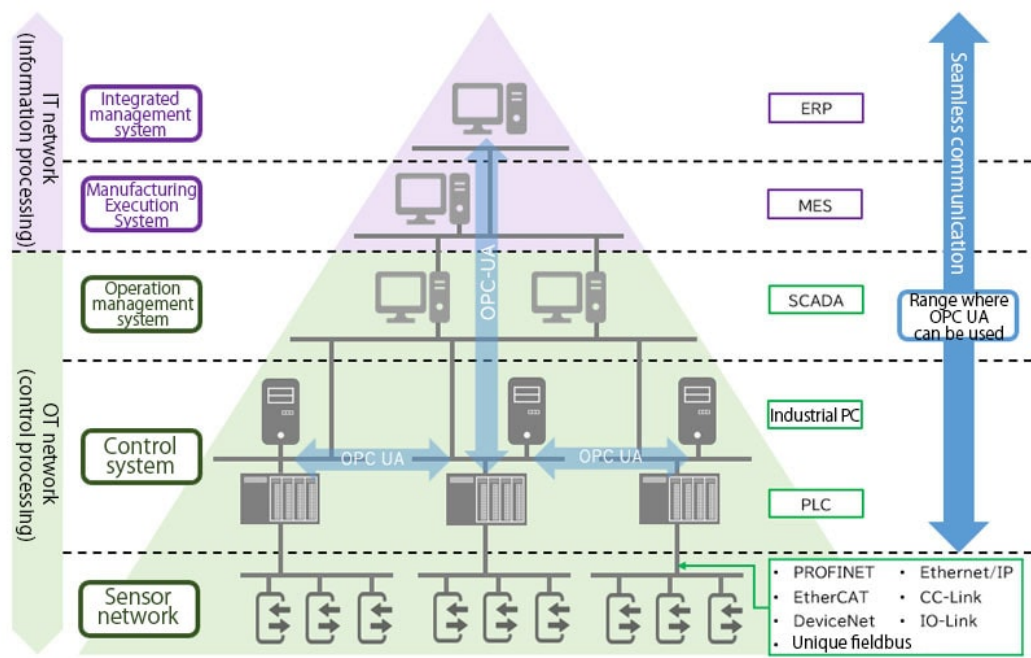


Fig. 15: Representação de uma arquitetura de rede robusta nos diferentes níveis da pirâmide de automação. Fonte: [19].

IX. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou os principais protocolos de comunicação industrial – Profinet, Ethernet/IP e OPC UA –, destacando suas características, aplicações e relevância no contexto da Indústria 4.0. A análise comparativa realizada ao longo do texto evidencia que, embora esses protocolos compartilhem semelhanças em aspectos como interoperabilidade, escalabilidade e suporte à conectividade, suas diferenças específicas os tornam mais adequados para determinados cenários industriais. Além disso, foram realizados dois estudos de caso que demonstraram a aplicação desses protocolos em diferentes contextos industriais.

O Profinet se destaca em aplicações que exigem alta precisão e comunicação determinística, como controle de movimento e automação de processos contínuos, sendo amplamente utilizado em setores tradicionais da indústria. Já o Ethernet/IP se destaca pela flexibilidade e integração com dispositivos baseados em CIP, oferecendo uma solução robusta para manufatura e sistemas de controle distribuído. Por sua vez, o OPC UA é o protocolo mais alinhado às demandas da Indústria 4.0, permitindo integração vertical, conectividade com a nuvem e suporte a *Big Data* e IoT.

O uso dos diferentes protocolos é comum numa mesma indústria, porém em diferentes ambientes. Por exemplo, Profinet pode ser usado na linha de montagem, enquanto o Ethernet/IP faz a integração com os demais sistemas e o OPC UA faz a integração dos bancos de dados. A coexistência desses protocolos em um mesmo ambiente industrial reflete a necessidade de redes de comunicação flexíveis e complementares, capazes de atender a diferentes níveis e exigências dentro de uma planta automatizada.

Essa integração é fundamental para alcançar os objetivos da Indústria 4.0, que demandam interoperabilidade entre dispositivos, escalabilidade para futuras expansões e conectividade com sistemas de análise avançada.

Além disso, o estudo ressalta a importância de uma escolha criteriosa do protocolo de comunicação, que deve considerar não apenas as características técnicas de cada tecnologia, mas também o contexto operacional, as demandas específicas do processo e os objetivos estratégicos da organização. A análise comparativa realizada neste trabalho, consolidada na tabela-resumo (Tabela I), busca servir como um guia para auxiliar engenheiros e gestores na tomada de decisão, oferecendo uma visão clara sobre as vantagens e limitações de cada protocolo.

Por fim, este trabalho reforça que, embora os protocolos estudados sejam robustos e consolidados, a contínua evolução tecnológica exige que as redes industriais sejam adaptadas para enfrentar novos desafios, como segurança cibernética, sustentabilidade e integração com tecnologias emergentes. Nesse cenário, o papel de protocolos como Profinet, Ethernet/IP e OPC UA será cada vez mais estratégico, contribuindo para a construção de sistemas industriais mais conectados, inteligentes, seguros e eficientes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por cuidar de mim e me fortalecer durante toda a trajetória universitária.

Agradeço aos meus pais, Mara e Marcus, que sob muito sol, me fizeram chegar até aqui, na sombra.

Ao meu companheiro, Vitor Resende, por me ensinar tanto sobre a vida, sobre a engenharia elétrica e sobre o amor. Seu apoio foi essencial para que eu chegasse onde você sempre acreditou que eu chegaria. Por isto, obrigada.

Aos meus colegas de curso, obrigada pelas amizades verdadeiras cultivadas durante esses anos de UFV. Agradeço especialmente Michelle Martins, Renata Gomes, Juliana Alicawa, Nívea Fugolin, Victor Machado e Anderson Gabriel. Caminhar com vocês deixou tudo mais leve nesta jornada.

Por fim, ao professor Alexandre Brandão por me orientar nesta etapa final da minha graduação, obrigada pela paciência e dedicação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

REFERENCES

- [1] C. N. da Indústria., “Sondagem especial - ano 21, n. 83 (abril 2022) / confederação nacional da indústria. – Brasília : Cni, 2022. v. : il.”
- [2] T. A. Industrial, “Indústria 4.0. o que é e como chegamos até aqui?” disponível em <https://tcas.com.br/industria-4-0-o-que-e-e-como-chegamos-ate-aqui/>. Acesso em : 19 ago 2024.
- [3] J. P. dos Reis Matias, “A evolução dos sistemas de automação e controle na indústria,” 2020.
- [4] S. Electric, *Catalog - Modicom M580 PLC/PAC for process, high-availability, and safety solutions*, 2024, disponível em: <https://www.se.com/br/pt/>. Acesso em: 19 ago. 2024.
- [5] T. A. Industrial, “O que é indústria 4.0 e como aplicar em seu negócio,” disponível em <https://www.bytebio.com/blog/o-que-e-industria-4-0> Acesso em: 19 ago 2024.
- [6] V. A. Industrial, “Pirâmide da automação: A função de cada nível,” disponível em <https://www.vpautomacao.com.br/post/piramide-da-automacao-a-funcao-de-cada-nivel>. Acesso em: 20 ago 2024.
- [7] T. Shadle, “Fieldbus technology,” disponível em <https://www.slideserve.com/orlando/fieldbus-technology-powerpoint-ppt-presentation>. Acesso em: 8 set 2024.
- [8] M. B. do Nascimento, “4 motivos para aprender modelo osi,” disponível em <https://www.dltec.com.br/blog/redes/4-motivos-para-aprender-modelo-osi/> Acesso em: 8 set 2024.
- [9] Fertron, “Redes profinet: performance, segurança, diagnóstico proteção de investimento para sua indústria,” acesso em ; 08 dez. 2020, Disponível em <https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms>
- [10] P. . P. International, “Find out all about the benefits of profinet!” disponível em <https://www.profibus.com/profinet-technology> em: 08 ago. 2024.
- [11] V. de Souza Lima Oliveira, “Protocolo de comunicação profinet para redes de automação,” Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- [12] L. Sistemas, “Guia definitivo: Entenda tudo sobre o que é opc ua e como isso pode impactar a sua indústria,” disponível em <https://logiquesistemas.com.br/blog/opc-ua/>. Acesso em: 19 ago. 2024.
- [13] E. Cravo, “Opc ua: o que é, como funciona e uso na automação industrial,” disponível em <https://blog.kalatec.com.br/opc-ua/> Acesso em: 9 set 2024.
- [14] Altus, “Conheça o opc ua e seus diferenciais para a conectividade na indústria,” disponível em <https://www.altus.com.br/post/216/conheca-o-opc-ua-e-seus-diferenciais-para-a-conectividade-na-industria>. Acesso em: 19 ago. 2024.
- [15] C. Tecnologia, “O que é: Ethernet/ip,” disponível em <https://tecnologia.credited.com.br/glossario/o-que-e-ethernet-ip-entenda-o-protocolo-industrial/>. Acesso em: 19 ago. 2024.
- [16] H. M. Software, “Annual analysis reveals steady growth in industrial network market,” disponível em <https://www.hms-networks.com/news/news-details/17-06-2024-annual-analysis-reveals-steady-growth-in-industrial-network-marketf> Acesso em: 2 out 2024.
- [17] Lantronix, “The importance of ethernet switches in today’s iot industry,” acesso em: 2 out 2024.
- [18] Westcon, “Gateway profinet profibus dp/pa,” <https://wii.com.br/produtos/gateway-profinet-x-profibus-dp-pa/downloads> Acesso em: 12 dez. 2024.
- [19] CONTEC, “Advancing business iot standardization with conprosys iot gateway,” acesso em: 12 dez. 2024.

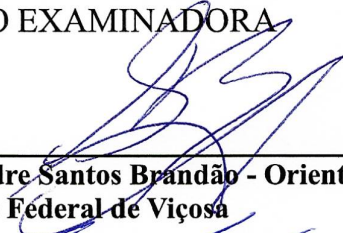
MARIANA MORAES BARRETO

**PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO EM REDES INDUSTRIAIS:
DESEMPENHO E APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA 4.0**

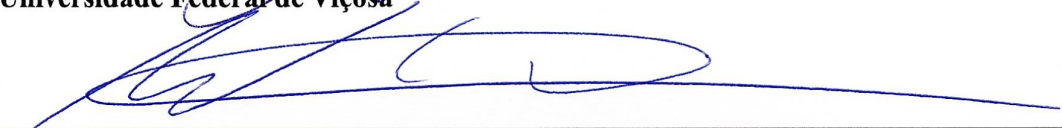
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 - Projeto de Engenharia II e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 19 de dezembro de 2024.

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Alexandre Santos Brandão - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. André Gomes Tôres - Membro
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Ketia Soares Moreira - Membro
Universidade Federal de Viçosa