

PROPOSTA DE ARQUITETURA DE SISTEMA MES BASEADA EM UNIFIED NAMESPACE PARA MONITORAMENTO DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

Luiz Otávio Gemmer¹, Pedro Augusto Scheid², Edson Moacir Ahlert³

Resumo: As empresas estão enfrentando mercados cada vez mais competitivo, forçando as empresas a buscarem incessantemente a melhoria contínua e redução dos desperdícios e ineficiências. No contexto industrial, a indústria 4.0 vem com a promessa de aumentar a velocidade de tomada de decisão das empresas, conferindo mais agilidade na identificação, análise e correção dessas ineficiências. Contudo, sistemas de digitalização, em especial na indústria, no formato de Sistemas MES, apresentam design monolítico, confiáveis, porém rígidos, custosos e por vezes frágeis devido ao imenso número de dispositivos com os quais estes devem se comunicar. Neste contexto, a arquitetura Unified Namespace vem com a proposta de mitigar esses problemas, fornecendo uma fonte única de verdade, comunicação e integração simplificada entre dispositivos. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo propor uma arquitetura de um sistema de execução de manufatura, baseado na arquitetura UNS, para monitoramento de processos industriais. Nessa primeira abordagem, iniciou-se pela construção de um MVP para monitoramento de equipamentos, buscando avaliar a viabilidade técnica e a capacidade da arquitetura em atender os objetivos propostos. Dessa forma, implantou-se a arquitetura com software e hardware de baixo custo ou open source em uma linha de envase de bebidas em PET. Apesar do caráter ainda experimental, pode-se evidenciar os benefícios potenciais da maior visibilidade operacional, registro estruturado de falhas e suporte a tomada de decisão, contudo, desafios como a construção de indicadores de OEE, contextualização robusta dos dados, governança e interação operador-sistema ainda seguem em aberto para serem tratados na segunda fase deste trabalho.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Unified Namespace; MES.

1 Estudante de Engenharia de Software - Universidade do Vale do Taquari - Univates.
E-mail: luiz.gemmer@universo.univates.br

2 Estudante de Engenharia de Software - Universidade do Vale do Taquari - Univates.
E-mail: pedro.scheid@universo.univates.br

3 Professor da Universidade do Vale do Taquari - Univates.

Abstract: Businesses are facing markets becoming increasingly more competitive over the years, forcing them to seek incessant continuous improvement and decrease in waste and inefficiencies. In an industrial context, industry 4.0 comes with the goal of increasing the speed at which these inefficiencies are detected, analyzed and fixed. However, digital systems, in industry in the format of MES systems, have a monolithic design, trustworthy, but costly, rigid and sometimes frail given the sheer number of different devices they need to communicate with. In this context, the architecture Unified Namespace comes with the goal of solving these problems by creating a single source of truth, facilitating the communication and integration of devices. On this note, the present study aims to propose MES architecture based on the Unified Namespace to monitor industrial processes. In this first approach, the study began by building an MVP to monitor industrial equipment, with the goal of evaluating the technical feasibility and the architecture ability to meet the proposed objectives. Thus, the architecture was implemented using low-cost or open-source software and hardware on a PET beverage bottling line. Despite its experimental nature, the potential benefits of greater operational visibility, structured fault logging, and decision support are evident. However, challenges such as the construction of OEE indicators, robust data contextualization, governance, and operator-system interaction remain open and will be addressed in the second phase of this work.

Keywords: Industry 4.0; Unified Namespace; MES.

1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

As empresas atuais estão inseridas em ambientes altamente competitivos e em constante transformação, Bornia (2009) já destacava esse cenário ao afirmar que o aumento da concorrência tem provocado profundas mudanças nos sistemas produtivos. O autor diferencia as empresas “tradicionais”, caracterizadas por poucos produtos, grandes lotes e alta produção, das “modernas”, que exigem flexibilidade, prazos curtos e qualidade elevada.

Enquanto as organizações tradicionais podiam se apoiar na baixa concorrência para absorver ineficiências, as empresas modernas precisam buscar continuamente eficiência e produtividade, reduzindo desperdícios e aprimorando seus processos (Bornia, 2009).

Em 2011, surgiu o termo Indústria 4.0, que descreve a integração das tecnologias de informação e comunicação aos processos produtivos. O “4.0” simboliza seu caráter revolucionário, em continuidade às três revoluções industriais anteriores. Desde então, diversas iniciativas têm explorado o conceito de produção industrial conectada digitalmente (Schuh *et al.*, 2020).

Segundo Schuh *et al.* (2020), o principal potencial econômico da Indústria 4.0 está na capacidade de acelerar decisões e adaptações organizacionais, aumentando a eficiência em setores como engenharia, manufatura e serviços. A utilização de grandes volumes de dados e comunicação em tempo real permite reações rápidas a mercados dinâmicos, aproximando essa visão da “empresa moderna” descrita por Bornia (2009).

Atualmente, observa-se uma virada de chave na manufatura. Manditereza (2025) destaca que as organizações buscam digitalizar seus processos e explorar o valor dos dados por meio da inteligência de negócios orientada a dados. No entanto, a prática predominante, consolidar informações em Data Warehouses ou Data Lakes, apresenta desafios significativos. A diversidade de sistemas de Tecnologia da Automação (TA) e Tecnologia da Informação (TI), somada à multiplicação de dispositivos geradores de dados, torna a integração uma tarefa complexa e pouco escalável.

Hofmann (2025) reforça essa dificuldade ao afirmar que o design monolítico das arquiteturas tradicionais da Indústria 3.0, muitas vezes baseadas na ISA-95, limita a visibilidade dos dados. Nesses modelos, o fluxo hierárquico - do sensor ao ERP - exige integrações específicas e custosas entre camadas. Assim, “Essas que foram as forças do modelo da indústria 3.0 se tornaram as limitações para a transformação digital” (Hofmann, 2025, p. 33).

Nesse contexto, autores como Hofmann (2025) e Manditereza (2025) apontam a arquitetura Unified Namespace (UNS) como um novo paradigma da Indústria 4.0. Essa abordagem propõe uma troca de dados uniforme e centralizada, baseada em eventos, que desacopla produtores e consumidores de informações. O UNS cria uma “única fonte de verdade” para toda a organização, substituindo as integrações ponto a ponto por uma estrutura escalável, evitando silos de dados e promovendo uma visão holística da produção.

Diante disso, o presente estudo propõe a implementação da arquitetura UNS para o monitoramento de equipamentos industriais em ambientes de manufatura. Busca-se demonstrar como essa arquitetura pode aproximar as organizações dos ideais da Indústria 4.0, promovendo maior integração e governança de dados. Além da implantação do UNS, pretende-se desenvolver aplicativos satélites que facilitem a gestão da arquitetura e a interação dos profissionais com os dados, permitindo adaptar e otimizar processos conforme as necessidades de cada indústria.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho aborda os principais conceitos que sustentam o desenvolvimento do Sistema de Execução de Manufatura proposto, baseado nos princípios do Unified Namespace (UNS). São apresentados os fundamentos relacionados a sistemas MES, suas competências e funcionalidades, bem como padrões que foram e são seguidos para seu desenvolvimento. Também é explorado o conceito e limitações da UNS e suas tecnologias habilitadoras.

2.1 Sistemas de Execução de Manufatura (MES)

Os Sistemas de Execução de Manufatura (MES) são sistemas de informação que atuam como elo entre o Enterprise Resource Planning (ERP) e

os sistemas de automação do chão de fábrica, integrando o nível de negócios ao nível operacional (Govindaraju; Putra, 2016; Meyer; Fuchs; Thiel, 2009).

Conforme a MESA (apud Govindaraju; Putra, 2016), o MES é um sistema dinâmico que utiliza dados em tempo real para direcionar, acionar e registrar as operações de manufatura conforme elas ocorrem. Situado no Nível 3 do modelo hierárquico industrial, o MES desempenha o papel de gerenciamento da produção, conectando-se tanto ao Nível 4 (planejamento e logística) quanto aos Níveis 0, 1 e 2 (controle e automação) (Mantravadia; Møller, 2019).

O principal objetivo do MES é otimizar os processos de manufatura em tempo real, garantindo visibilidade e controle sobre todo o ciclo produtivo (Govindaraju; Putra, 2016). Suas funcionalidades incluem a coleta e rastreabilidade de dados de produção, o gerenciamento de recursos, a programação de tarefas e o acompanhamento de desempenho por meio de Key Performance Indicators (KPIs). Essas funções abrangem o planejamento detalhado da produção, o despacho de ordens, a aquisição de dados operacionais e o gerenciamento de documentos e recursos (Meyer; Fuchs; Thiel, 2009).

2.2 Indústria 4.0

A Indústria 4.0 descreve a integração abrangente das tecnologias de informação e comunicação (TIC) na produção industrial, marcando o início da quarta revolução industrial (Schuh *et al.*, 2020).

Este fenômeno, cujo termo foi introduzido em 2011, concentra-se em três fatores interconectados essenciais: a digitalização e integração de relações técnico-econômicas simples em redes complexas, a digitalização de produtos e serviços oferecidos e o surgimento de novos modelos de mercado (Zezulka *et al.*, 2016).

O objetivo final da I4.0 é a criação de fábricas hiper conectadas, inteligentes e autônomas, que se caracterizam pela alta adaptabilidade e pelo uso otimizado de recursos (Schuh *et al.*, 2020). O conceito da “fábrica inteligente” (smart factory) é central, onde uma cópia virtual do ambiente físico é estabelecida, e Sistemas Ciber-Físicos (CPSs) coletam dados dos processos físicos para tomar decisões descentralizadas (Jaskó *et al.*, 2020).

As características centrais da Indústria 4.0 dependem fundamentalmente da integração horizontal e vertical (Jaskó *et al.*, 2020). A integração vertical busca unificar todas as camadas lógicas dentro da organização, começando no nível de campo (chão de fábrica). Essa integração permite que os dados fluam livre e transparentemente entre as camadas, o que é crucial para reduzir drasticamente o tempo de reação da empresa e garantir uma vantagem competitiva (Jaskó *et al.*, 2020). Por sua vez, a integração horizontal conecta múltiplas instalações de produção ou, de maneira mais ampla, toda a cadeia de suprimentos (Jaskó *et al.*, 2020).

Neste ambiente, as unidades de comunicação se transformam em objetos com propriedades definidas, capazes de compartilhar dados importantes e reagir autonomamente às demandas dinâmicas de produção (Jaskó *et al.*, 2020). O princípio de design da I4.0 é a transparência da informação, que é alcançada através da integração de sistemas de TI para permitir a troca de dados em tempo real para além dos limites da empresa, fornecendo soluções de ponta a ponta (Mantravadia e Møller, 2019).

O desenvolvimento da I4.0 é impulsionado por tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (IoT), a Internet Industrial das Coisas (IIoT), a Internet de Serviços (IoS), a computação em nuvem e a análise de big data (Jaskó *et al.*, 2020).

Os CPSs e CPPSs integram tecnologias de informação e processos físicos, exibindo comportamentos ciber-físicos complexos (Jaskó *et al.*, 2020). Os CPPSs, que envolvem equipamentos de manufatura, possuem alta inteligência e configuram redes interconectadas que conseguem fazer decisões independentes, conhecendo sua capacidade e estado (Jaskó *et al.*, 2020).

Arquiteturas de referência foram desenvolvidas para mapear essa transformação; inicialmente, o conceito se baseou na pirâmide de automação ISA-95, que definia uma hierarquia clara e comunicação restrita às camadas adjacentes (Salcher *et al.*, 2024). Posteriormente, foi introduzido o Modelo de Arquitetura de Referência Indústria 4.0 (RAMI 4.0), que, sendo um modelo tridimensional, abrange mais aspectos da manufatura inteligente e propõe um fluxo de comunicação mais livre entre as camadas (Salcher *et al.*, 2024; Zezulka *et al.*, 2016).

No contexto industrial, a I4.0 tem a importância de possibilitar a criação de produtos inovadores de forma rápida e eficiente, além de aumentar a automação, otimizar a qualidade do produto, melhorar o controle de custos e acelerar a tomada de decisões (Salcher *et al.*, 2024).

A otimização da capacidade, por exemplo, é direcionada para a rentabilidade e valor da organização, e não apenas para a maximização tradicional (Santana *et al.*, 2017). Para que a fábrica inteligente se concretize, os sistemas MES são cruciais, pois facilitam a visibilidade operacional e a rastreabilidade, objetivos primários da I4.0 (Mantravadia e Møller, 2019).

2.3 Unified Namespace (UNS)

O Unified Namespace (UNS) é uma abordagem arquitetural, e não um software ou dispositivo físico, cujo propósito é criar uma base de dados centralizada e consistente para toda a organização, independentemente da origem da informação (Hofmann, 2025; Salcher *et al.*, 2024; Pillai *et al.*, 2024).

O UNS busca agir como uma “fonte única de verdade” (single source of truth), consolidando dados em tempo real de máquinas, sensores e sistemas corporativos (Hofmann, 2025; HiveMQ, 2024). Sua arquitetura funciona como

um hub central de comunicação, facilitando a extração e distribuição eficiente de dados em toda a empresa (Kelkar, 2024).

Estruturalmente, o UNS organiza informações em tópicos hierárquicos, como empresa/local/departamento/linha/máquina/datapoint, inspirando-se na ISA-95 (HiveMQ, 2024; Salcher *et al.*, 2024). Essa organização permite assinaturas seletivas de dados via modelo Publish-Subscribe (Pub-Sub), garantindo flexibilidade e escalabilidade na troca de informações (Hofmann, 2025; Kelkar, 2024).

A arquitetura UNS é agnóstica a fornecedores e plataformas, exigindo apenas uma camada de transformação que harmonize dados provenientes de diferentes sistemas industriais (HiveMQ, 2024). Sua adoção representa uma mudança de paradigma em relação aos modelos tradicionais da Indústria 3.0, superando limitações como silos de dados e integrações ponto a ponto complexas (Kelkar, 2024; Salcher *et al.*, 2024).

Baseado em comunicação orientada a eventos e protocolos leves, como o MQTT, o UNS viabiliza a troca de dados bidirecional em tempo real entre os níveis de planejamento e o chão de fábrica (Hofmann, 2025; Kelkar, 2024). Estruturas conceituais como o framework de Walker Reynolds (2023) têm sido adotadas como referência para a implementação dessa arquitetura (Hofmann, 2025).

Em termos práticos, o UNS permite a integração de sistemas e equipamentos legados, viabilizando a modernização gradual das indústrias sem substituição imediata de infraestrutura (Kelkar, 2024; Pillai *et al.*, 2024). Isso torna a arquitetura particularmente atraente para pequenas e médias empresas (PMEs), que podem adotar práticas da Indústria 4.0 com menor barreira de entrada. Entre suas aplicações mais relevantes estão o monitoramento em tempo real, a manutenção preditiva e prescritiva e a digitalização de fluxos de trabalho, eliminando redundâncias e processos baseados em papel (Hofmann, 2025; Pillai *et al.*, 2024).

Apesar de seus benefícios, a implementação do UNS apresenta desafios técnicos e organizacionais. Sua natureza ainda recente resulta em escassez de literatura formal e ausência de padrões consolidados, o que pode levar à dependência de documentações de fornecedores e vieses comerciais (Hofmann, 2025; Salcher *et al.*, 2024). A arquitetura orientada a eventos pode não atender a aplicações de missão crítica que exigem latência ultrabaixa ou comportamento determinístico, comuns em setores como saúde e energia nuclear (Hofmann, 2025).

Questões de segurança cibernética também se destacam: a convergência TI/TO amplia a superfície de ataque e exige medidas como criptografia TLS e autenticação por certificados, que podem impactar o desempenho e demandam gestão complexa em ambientes industriais (Hofmann, 2025; Pillai *et al.*, 2024).

2.4 MQTT

O protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) constitui uma tecnologia essencial para a comunicação na Quarta Revolução Industrial, sendo definido como um protocolo de rede leve, orientado a eventos e baseado no modelo de publicação e assinatura (publish-subscribe) (Kelkar, 2024; Hofmann, 2025). Desenvolvido originalmente em 1999, o MQTT ganhou destaque como um dos principais pilares da Internet das Coisas Industrial (IIoT) devido à sua alta eficiência na transmissão de dados e baixo consumo de recursos computacionais (Hofmann, 2025; Kelkar, 2024).

Sua arquitetura simples e desacoplada é composta por três elementos centrais: publicadores (publishers), que enviam dados como leituras de sensores; assinantes (subscribers), que consomem informações de interesse; e um broker, que atua como servidor de mensagens, recebendo e roteando os dados conforme as subscrições de tópicos (Hofmann, 2025; Kelkar, 2024). Esse modelo assíncrono garante a independência entre produtores e consumidores de dados, promovendo escalabilidade e flexibilidade na comunicação (HiveMQ, 2024).

A eficiência do MQTT decorre de sua comunicação orientada a eventos, que segue o princípio de “publicar na exceção” (publish on exception), em que os dados são transmitidos apenas quando ocorrem mudanças relevantes (Hofmann, 2025). Essa característica reduz drasticamente o tráfego de rede em comparação com métodos tradicionais de polling cíclico, tornando o protocolo especialmente adequado para dispositivos com recursos limitados ou redes com baixa largura de banda (Hofmann, 2025; HiveMQ, 2024).

No contexto da arquitetura UNS, o MQTT exerce um papel fundamental como camada de transporte e publicação de dados (Hofmann, 2025; Salcher *et al.*, 2024). Implementado em um broker central, o protocolo hospeda o UNS como um repositório unificado e hierárquico de informações (Hofmann, 2025; HiveMQ, 2024).

Uma estrutura de tópicos hierárquicos, frequentemente organizada segundo a norma ISA-95 (Enterprise/Site/Area/Line/Cell), confere contexto e inteligibilidade aos dados, permitindo tanto o acesso granular a pontos específicos quanto a subscrição a grupos de dados por meio de curingas (wildcards) (Hofmann, 2025; HiveMQ, 2024; Salcher *et al.*, 2024).

Ao servir como espinha dorsal do UNS, o MQTT promove a integração em tempo real entre os domínios de Tecnologia Operacional (OT) e Tecnologia da Informação (IT), superando limitações de integrações ponto a ponto e possibilitando uma arquitetura vendor-agnostic e orientada a eventos (Hofmann, 2025). Dessa forma, contribui diretamente para os princípios de interoperabilidade e transparência da Indústria 4.0, ao unificar dados de sistemas legados e plataformas digitais modernas sob um mesmo espaço de nomes (Jaskó *et al.*, 2020; Schuh *et al.*, 2020; Hofmann, 2025).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo descreve os métodos adotados para o desenvolvimento do presente projeto, assim como as tecnologias que deram suporte à sua construção.

A pesquisa está sendo conduzida com foco em sua aplicação prática no contexto industrial, utilizando métodos qualitativos e quantitativos, além de um delineamento experimental para o desenvolvimento e validação da solução. A proposta será testada com base em critérios objetivos e subjetivos, buscando analisar tanto a capacidade da solução de simplificar a coleta de dados industriais, comunicação entre equipamentos, quanto sua capacidade de integrar dados de sistemas de TI, porém tais testes serão realizados em uma segunda fase do trabalho.

A pesquisa foi conduzida por meio da busca de artigos científicos, site e livros voltados ao tema, primariamente no google acadêmico, utilizando os termos em inglês, *“Manufacturing Execution Systems”*, *“Industry 4.0”* e *“Unified Namespace”*, selecionando, por meio da leitura do resumo, os artigos que foram julgados relevantes, para posterior leitura completa.

Neste capítulo, são descritas as soluções tecnológicas que estão compondo o projeto, sua arquitetura e programas usados/desenvolvidos para atingir os objetivos propostos. Também são discutidas soluções de monitoramento e atualização dos dispositivos envolvidos, bem como governança de acesso e modificação dos dados gerados.

3.1 Desenvolvimento

Nesta etapa inicial, priorizou-se o desenvolvimento de um Produto Mínimo Viável (MVP) com o objetivo de validar a viabilidade da solução proposta e sua capacidade de atender aos objetivos definidos. Para isso, o escopo do projeto foi deliberadamente reduzido, concentrando-se exclusivamente no monitoramento de equipamentos industriais.

Os dados utilizados para essa validação foram obtidos diretamente dos CLPs dos equipamentos, sendo posteriormente disponibilizados em tempo real. Essa estratégia permitiu avaliar de forma ágil o funcionamento da arquitetura e identificar eventuais ajustes necessários antes de uma implementação em larga escala.

3.1.1 Contexto da Implantação

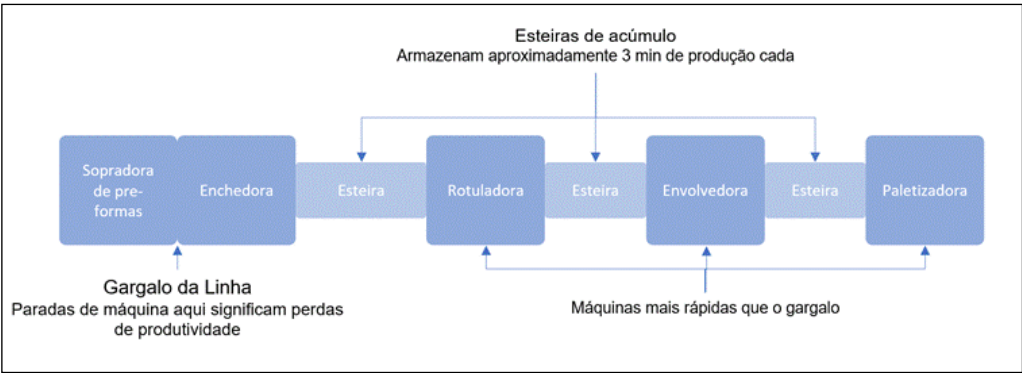
A arquitetura desenvolvida foi implantada em uma linha de envase de bebidas em garrafas de polietileno tereftalato (PET), caracterizada pela interconexão de todos os equipamentos em uma única rede de comunicação. Muitos desses equipamentos já possuíam, de fábrica, funcionalidades que facilitam a coleta de dados em tempo real. Contudo, devido a restrições

contratuais, não foi possível realizar modificações diretas no código dos equipamentos, pois requer o envolvimento formal do fabricante.

Na linha de produção considerada, os equipamentos estão dispostos de forma sequencial, de modo que a saída de cada equipamento está conectada à entrada do próximo por meio de esteiras de acúmulo. Essa configuração faz com que uma parada em determinado equipamento possa resultar na parada subsequente de outros, de forma gradual.

Essa interrupção em cadeia é controlada por sensores presentes nas esteiras, que monitoram o nível de ocupação e enviam sinais para desligar ou religar os equipamentos quando detectam excesso ou falta de acúmulo. A figura 1 dispõe de uma versão simplificada do esquema da linha em questão:

Figura 1: Simplificação do Layout dos Equipamentos Monitorados



Fonte: Dos Autores (2025).

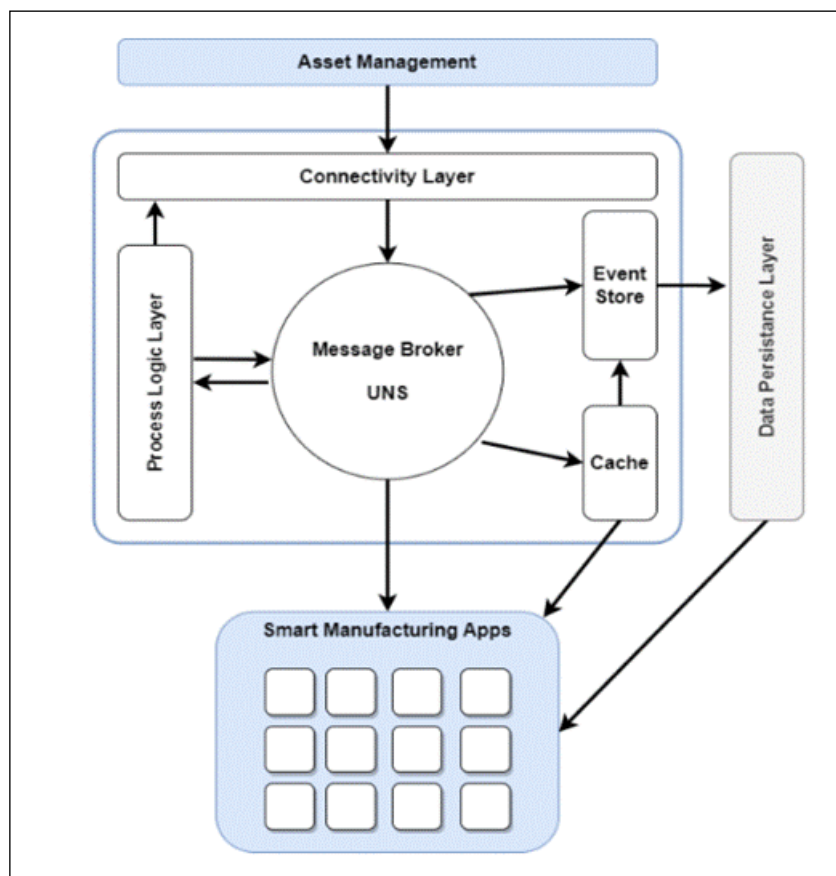
3.1.2 Definição da Arquitetura

A arquitetura da solução para o MVP foi inspirada no trabalho de Salcher, Finck e Hellwig (2024), que propõem uma estrutura modular para sistemas de monitoramento industrial, conforme ilustrado na Figura 2. Essa arquitetura é composta pelos seguintes componentes:

- Gerenciamento de Ativos – Responsável pela conectividade e comunicação com os equipamentos industriais.
- Broker de Mensagens – Atua como ponto central de comunicação entre os diferentes sistemas, distribuindo as informações para os dispositivos interessados, geralmente por meio de um algoritmo publish-subscribe.
- Cache – Permite consultas rápidas aos dados que estão transitando pelo broker.

- Camada de Lógica de Processo – Avalia e executa as regras de negócio com base nas mensagens recebidas do broker.
- Camada de Persistência de Dados – Armazena toda a comunicação que transita pelo broker para fins de histórico e auditoria.

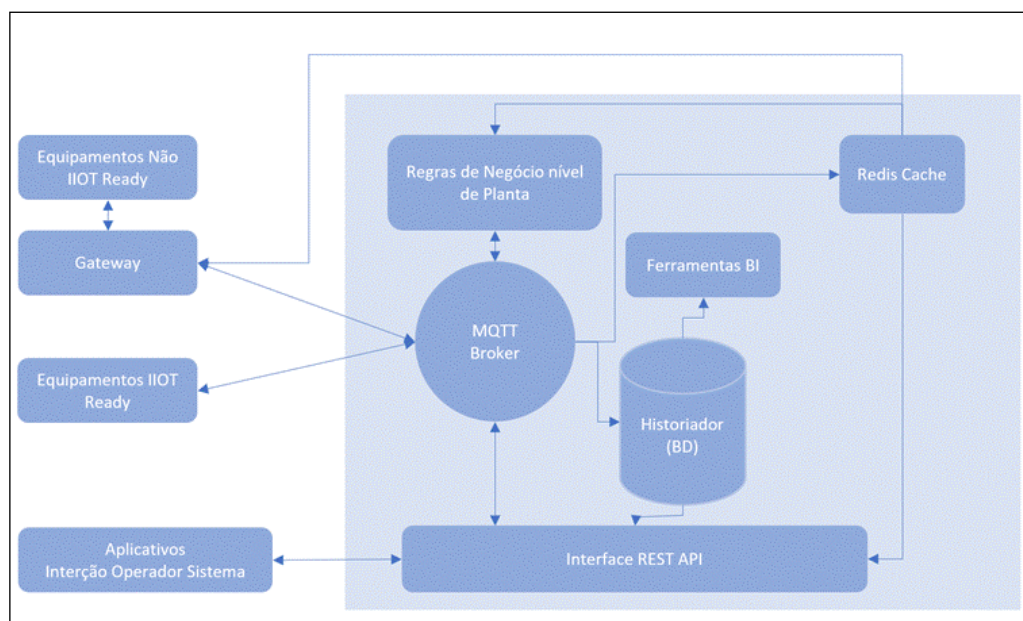
Figura 2: Arquitetura Proposta para Implantação do UNS



Fonte: Salcher, Finck e Hellwig (2024).

Tendo em vista os objetivos do presente trabalho, que visa conectar o sistema UNS com sistemas de TI para fornecer uma indústria conectada, as seguintes alterações são propostas frente a arquitetura proposta por Slacher, Finck e Hellwig (2024), dispostas na Figura 3:

Figura 3: Arquitetura Final Proposta de MES



Fonte: Dos Autores (2025).

Na arquitetura proposta na Figura 3, removeu-se a Event Store Layer, uma vez que o Broker MQTT e o Cache juntos foram vistos como capazes de executar a função dessa camada.

A camada de conectividade e Asset Management foram movidas para uma camada Gateway que ficaria disposta no chão de fábrica, cujo objetivo é de se comunicar com equipamentos legado e permitir descentralizar a lógica do negócio para mais próximo do equipamento. Equipamentos mais novos, capazes de se comunicar diretamente via MQTT, poderiam se comunicar diretamente com o broker, caso faça sentido no contexto.

Adicionou-se uma interface REST API, visando fazer a integração com sistemas de TI (ERP, Warehouse Management System ou outros). O objetivo dessa camada é realizar a tradução de protocolos desses sistemas, como Hypertext Transfer Protocol (HTTP), para protocolos aceitos pelo broker e vice-versa, garantindo, dessa forma, que toda a comunicação do sistema passe pelo broker e que todos os integrantes do sistema tenham acesso a esses dados.

A camada de regra de negócios se refere ao fluxo de processos específicos da empresa, planta ou linha de produção, visando garantir a unificação, tratamento e controle dos dados que passam pelo broker. O objetivo geral dessa camada da arquitetura é fornecer um espaço onde as indústrias possam implementar seus processos específicos.

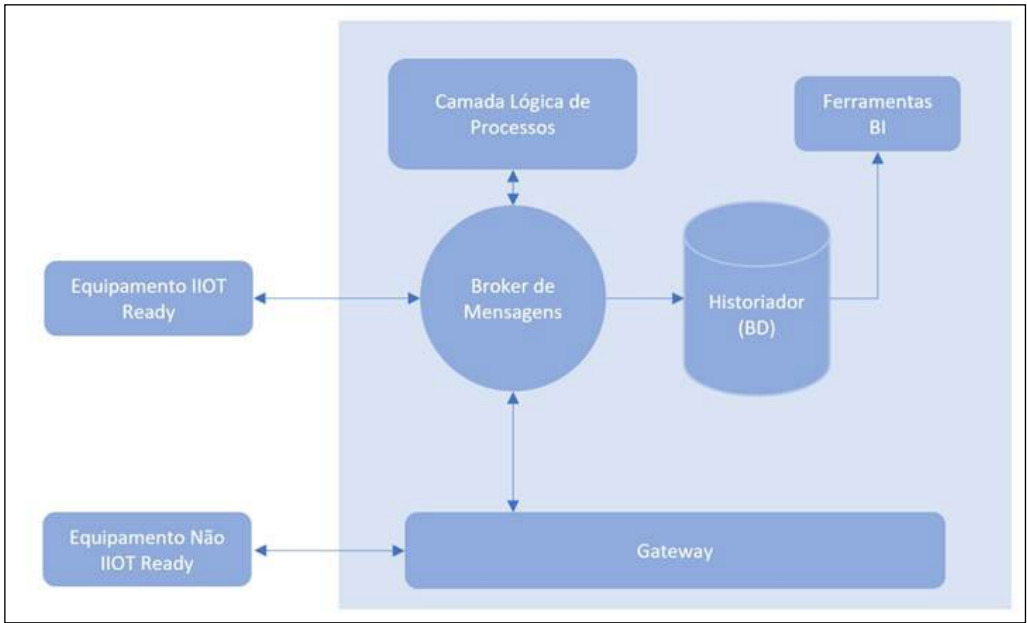
3.1.3 Adequações para o MVP

Considerando as limitações de escopo do MVP, que visa apenas avaliar a viabilidade da arquitetura para monitoramento de equipamentos, a arquitetura do MVP foi adaptada para contemplar os seguintes elementos:

- Gerenciamento de Ativos/Gateway – Atuando como um gateway, essa camada conecta-se aos equipamentos industriais, cujos códigos-fonte não puderam ser alterados. A coleta de dados é realizada via protocolo Siemens S7, e, após o devido tratamento, os dados são disponibilizados por meio do protocolo MQTT.
- Broker de Mensagens – Responsável por centralizar a comunicação entre os diversos componentes do sistema.
- Historiador / Camada de Persistência de Dados – Armazena todos os eventos e medições para consultas futuras e análises históricas.
- Camada de Lógica de Processo – Processa as informações recebidas e aplica as regras de negócio pertinentes.
- Ferramenta de Business Intelligence (BI) – Utilizada para visualização e análise dos dados de forma interativa e intuitiva.

A arquitetura desenvolvida para o MVP está representada na Figura 4, apresentada a seguir:

Figura 4: Arquitetura Implementada no MVP



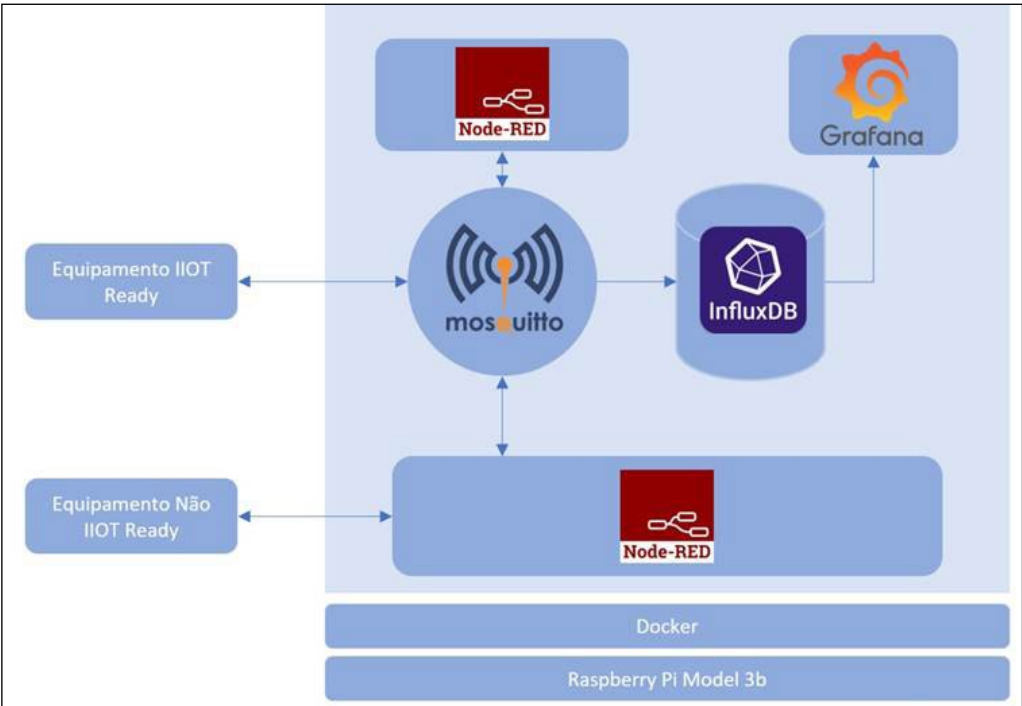
Fonte: Dos Autores (2025).

3.1.4 Ferramentas e Softwares

A arquitetura do MVP foi implementada em um single-board computer Raspberry Pi Model 3b, escolhido principalmente pela sua disponibilidade e baixo custo. Para o desenvolvimento da solução, foram utilizados os seguintes softwares:

- Node-RED: Responsável pela comunicação com os equipamentos e pela aplicação das regras básicas de negócio. A escolha se deu pela ampla variedade de protocolos suportados e pela versatilidade na manipulação dos dados coletados.
- Mosquitto MQTT Broker: Utilizado para centralizar a comunicação entre os diferentes componentes do sistema. Foi escolhido por ser open source e por sua capacidade eficiente de transmissão de mensagens.
- InfluxDB e Telegraf: Implementados para a persistência de dados. O InfluxDB foi selecionado por ser um banco de dados adequado para séries temporais – característica dos dados monitorados – e por sua integração eficiente com brokers MQTT via Telegraf.
- Grafana: Ferramenta de visualização de dados. Optou-se pelo Grafana por ser open source, permitir execução local e apresentar baixo consumo de recursos.
- Todos os softwares foram instalados e configurados por meio de containers Docker, operando dentro de uma mesma Docker Network. Essa abordagem facilita os processos de deploy, atualização e monitoramento da solução, alinhando-se aos objetivos propostos, embora tais funcionalidades avancem em etapas posteriores do projeto. A figura 5 dispõe da arquitetura da figura 4, demonstrando onde cada uma das ferramentas escolhidas entra na arquitetura.

Figura 5: Função das Ferramentas Escolhidas na Arquitetura



Fonte: Dos Autores (2025).

3.1.5 Construção do MVP

Para a construção do MVP, a arquitetura e as ferramentas propostas foram utilizadas para a coleta automatizada de dados em equipamentos de envase de bebidas em PET de diferentes tamanhos. Todos os equipamentos operam em linha de produção e se comunicam via protocolo Siemens S7, com os CLPs conectados em uma mesma rede. Dessa forma, ao conectar o Raspberry Pi à mesma rede, foi possível obter acesso completo a toda a linha de produção.

3.1.5.1 Coleta de Dados

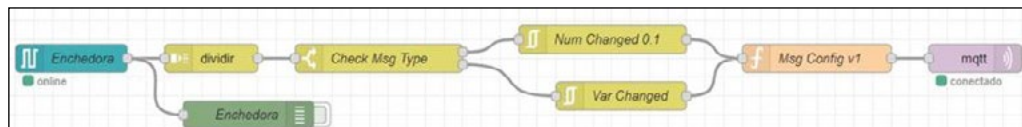
No Node-RED, foi desenvolvido um fluxo para a coleta periódica de dados de cada CLP. O processo consistiu em:

1. Buscar os dados diretamente do CLP via protocolo Siemens S7;
2. Separar o JSON recebido, de modo que cada propriedade se tornasse uma mensagem individual;
3. Aplicar um filtro de report by exception, enviando dados apenas quando houve alteração em relação ao valor anterior;

4. Publicar as mensagens filtradas no broker MQTT.

Esse processo foi replicado para cada CLP da linha. Um exemplo do fluxo implementado pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6: Fluxo de Coleta de Dados



Fonte: do Autor.

3.1.5.2 Estrutura de Tópicos MQTT

Para enviar dados ao broker MQTT, adotou-se uma estrutura hierárquica de tópicos inspirada em Manditereza (2025) e alinhada à semântica da ISA-95. O objetivo dessa construção é permitir que qualquer sistema identifique rapidamente a origem, o contexto e o tipo do dado, além de facilitar consultas semânticas e futuras evoluções da arquitetura.

A estrutura do tópico funciona como um “caminho” que descreve de onde o dado vem e como deve ser interpretado:

Ambiente / Versão / Empresa / Área / Estabelecimento / Linha / Máquina / Namespace / Medida

Justificativa de cada parte da estrutura:

- Ambiente – separa dados de produção, homologação e teste, evitando misturas acidentais.
- Versão – permite evoluir a estrutura de tópicos sem quebrar compatibilidades; várias versões podem conviver.
- Empresa, Área, Estabelecimento, Linha, Máquina – seguem a ISA-95, garantindo uma localização organizacional e física padronizada da origem do dado.
- Namespace – indica como o dado deve ser interpretado. Três categorias foram definidas:
 - > edge: dado bruto coletado diretamente do equipamento;
 - > funcional: dado já tratado, calculado ou contextualizado;
 - > documentação: metadados e informações estáticas.
- Medida – especifica o tipo de informação transmitida (ex.: temperatura, velocidade, produção).

Um exemplo de tópico de um sensor de velocidade de um equipamento, sem tratamento, poderia ser: homologação / v2.0 / empresa_01 / manufatura /

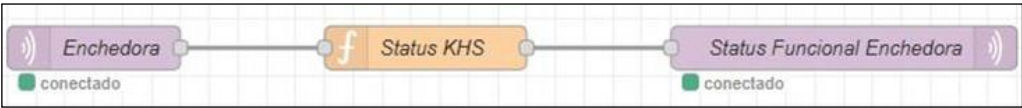
berlim_alemanha / linha_pet_01 / enchedora / edge / velocidade, identificando que esse é um dado de velocidade, não tratado (edge), da enchedora da linha um da planta de Berlim, na versão 2.0 do ambiente de homologação.

3.1.5.3 Regras de Negócio

Foram implementadas regras de negócio simples, voltadas para tratamento de status e definição de paradas de máquina:

- Tratamento de Status: toda mudança no código de status do equipamento, recebida pelo broker (como número inteiro do CLP), era contextualizada com uma string descritiva. O status contextualizado era então publicado novamente no broker. O fluxo construído está representado na Figura 7.

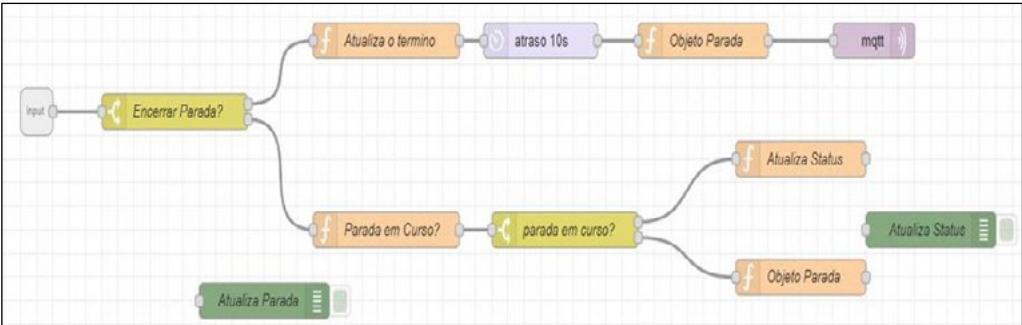
Figura 7: Fluxo de Tratamento de Status



Fonte: do Autor.

- Tratamento de Paradas de Máquina: o status do equipamento era avaliado para identificar o início e o fim de uma parada, fluxo apresentado na figura 8, distinguindo entre:
 - > Paradas por falha do equipamento;
 - > Paradas externas, causadas por outro equipamento na linha (bloqueando a saída de produtos) ou por falta de matéria-prima.

Figura 8: Fluxo de Tratamento de Parada de Máquina



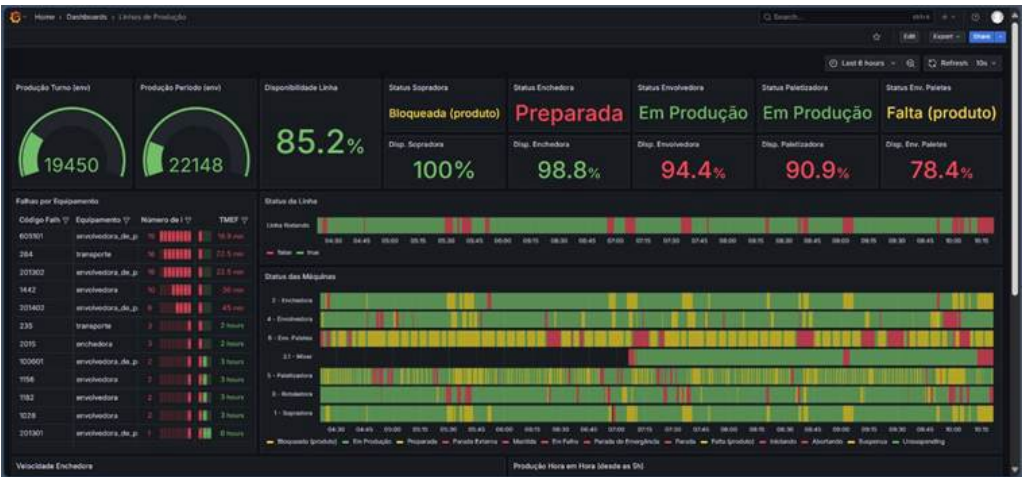
Fonte: do Autor.

3.1.5.4 Visualização e Monitoramento

Com os dados coletados e processados, foi construído um dashboard no Grafana, representado na figura 9, permitindo o monitoramento em tempo real de:

- Status da linha de produção;
- Produção e desempenho dos equipamentos;
- Mettricas de Overall Equipment Effectiveness (OEE);
- Outras telemetrias relevantes para a operação (como o apresentado na figura 10).

Figura 9: Dashboard de Monitoramento da Linha



Fonte: Dos Autores (2025).

Figura 10: Telemetria de Servos Motores



Fonte: Dos Autores (2025).

3.2 Próximos Passos

Com base nas evidências coletadas avaliando o desempenho do MVP (discussão no próximo capítulo), a arquitetura final proposta na Figura 2 e os objetivos deste trabalho, foram identificados os seguintes passos para melhoria da MVP e atingimento dos objetivos da solução.

3.2.1 Contextualização e Governança de dados

- Implementar um banco de dados de cache para armazenar o estado do broker, permitindo consultas históricas e cálculo de indicadores em tempo real.
- Alterar o método de contextualização, entregando dados já tratados ao broker MQTT, reduzindo tráfego de rede e simplificando análises.
- Criar um sistema de monitoramento de tópicos publicados, garantindo padronização, validação de schemas e documentação, além de servir como base para controle de acesso.

3.2.2 Fluxo de Implantação

- Utilizar Docker para implantação padronizada da arquitetura, com imagens pré-configuradas e fluxos comuns instalados por padrão.
- Pesquisar soluções para atualização sem perda de estado do broker e sem duplicidade de dados, considerando práticas como Blue-Green Deployment adaptadas ao contexto industrial.

3.2.3 Integração Operador Sistema

- Desenvolver funcionalidades para integração das atividades do operador ao sistema, incluindo: seleção e finalização de ordens de produção, baixa de matérias-primas, rastreabilidade de lotes, inspeções de qualidade, checklists de setup, controle de ferramentas e justificativas de paradas e refugos.
- Garantir que entradas manuais sejam publicadas em tempo real na UNS, possibilitando o consumo desses dados por diferentes sistemas

4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS PARCIAIS

Nesta etapa, busca-se analisar e avaliar o desempenho do MVP desenvolvido, considerando os objetivos propostos inicialmente no trabalho, onde, apesar de seu escopo reduzido, pode-se avaliar os fundamentos da arquitetura, bem como ajustar os próximos passos para solucionar os problemas encontrados.

4.1 Benefícios Observados

No período em que a solução esteve em operação, pode-se destacar os seguintes benefícios para a gestão da linha:

- Visibilidade em tempo real do status da linha, permitindo gestores se distanciarem da linha para tarefas administrativas, sem perder a capacidade de atuação rápida;
- Atuação proativa nos equipamentos com base nos dados, reduzindo a dependência de “feeling” ou de relatos do operador;
- Registro sistemático de falhas, consolidando os principais códigos de falhas dos equipamentos, fornecendo uma base objetiva para a atuação;

Além disso, a arquitetura demonstrou alta versatilidade na coleta de dados, permitindo registrar diferentes tipos de informações, como mensagens de status e quantidades produzidas, com estruturação flexível para atender necessidades específicas da empresa. O modelo de tópicos proposto por Manditereza (2025), baseado nos padrões ISA-95, mostrou-se eficiente, oferecendo simplicidade e intuição na busca dos dados.

4.2 Limitações Identificadas

Quanto ao monitoramento de indicadores, apenas o indicador de disponibilidade, que mensura o tempo que o equipamento esteve disponível, foi construído. Os outros dois componentes do OEE (Performance e Qualidade), não foram contemplados devido a dados não disponíveis sem intervenção direta no código fonte do controlador.

- Performance: a diversidade de embalagens, cada qual com sua velocidade de engenharia, exigirá integração de informações externas ao sistema, que não estavam disponíveis na MVP;
- Qualidade: similarmente, não foi contemplado devido à falta de dados acessíveis de forma padronizada para o MVP.

Apesar das lacunas já previstas, a arquitetura demonstrou ser bastante competente na entrega de dados contextualizados conforme a necessidade da indústria. Vale ressaltar que, nos testes realizados, a contextualização do dado se limitava a dados do equipamento, não dispondo informações como ordem de produção, lote do produto acabado, embalagem sendo produzida e outras informações similares, que poderiam agregar ainda mais para a análise posterior do dado.

Outro ponto limitante foi a separação do JSON recebido do protocolo Siemens S7 em mensagens distintas, o que dificultou o tratamento dos dados nas camadas de borda (gestão de ativos), delegando essa carga para ferramentas de BI.

De forma geral, o MVP demonstrou capacidade satisfatória na coleta e visualização dos dados, além de evidenciar o potencial de simplificar a comunicação entre equipamentos. Embora a comunicação máquina-máquina ainda não tenha sido testada, a metodologia de contextualização adotada sinaliza que sua implementação será viável tão logo os dados necessários estejam disponíveis no broker MQTT.

4.3 Plano de Avaliação

Quanto ao uso de recursos do sistema, serão monitorados variáveis como uso de memória, consumo médio de CPU, uso de disco frente ao número de dispositivos e tags observadas. Outras métricas avaliadas serão o número de tags/medidas, média de tags por dispositivo/equipamento e número de mensagens por período de tempo, além de uma estimativa do número de integrações ponta a ponta que deixaram de ser realizadas devido ao modelo *single source of truth* do UNS.

Quanto ao impacto do sistema na indústria, tendo em vista a necessidade de um estudo longitudinal para realizar esse tipo de avaliação quantitativamente, a avaliação desses tópicos ficaram limitadas a opiniões e observações subjetivas dos profissionais da planta.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido apresentou uma arquitetura voltada ao aumento do nível de maturidade digital da indústria, oferecendo uma visão holística do chão de fábrica em tempo real e estabelecendo uma base para a

integração entre equipamentos de automação e sistemas de tecnologia da informação.

O MVP implementado atingiu o primeiro objetivo do estudo – conectar a arquitetura aos equipamentos industriais e disponibilizar os dados em tempo real. Também evidenciou os benefícios potenciais de maior visibilidade operacional, registro estruturado de falhas e suporte a decisões proativas baseadas em dados.

Contudo, o escopo reduzido e a implantação limitada do protótipo deixaram desafios em aberto, como a construção completa dos indicadores de OEE, a contextualização mais robusta dos dados e a governança sobre tópicos e acessos. Ainda assim, os conhecimentos adquiridos ao longo do processo fornecem uma base sólida para enfrentar essas lacunas.

Conclui-se que a arquitetura proposta possui potencial de escalar para além do protótipo, servindo como alicerce para soluções de MES mais abrangentes e flexíveis, alinhadas aos princípios da Indústria 4.0. A evolução futura deverá focar no aprimoramento da contextualização, no fortalecimento da governança de dados e na integração entre máquina, sistema e operador, garantindo confiabilidade, rastreabilidade e eficiência.

Assim, este estudo contribui tanto no plano prático, ao demonstrar a viabilidade de uma arquitetura de baixo acoplamento baseada em MQTT para o ambiente fabril, quanto no plano acadêmico, ao indicar caminhos para pesquisas futuras sobre interoperabilidade, padronização e maturidade digital no contexto da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

BORNIA, Antônio Cesar. **Análise gerencial de custos**: aplicação em empresas modernas. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

GOVINDARAJU, Rajesri; PUTRA, Krisna. **A methodology for manufacturing execution systems (MES) implementation**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/114/1/012094/meta>. Acesso em: 12 set. 2025.

HIVEMQ. **Unified namespace (UNS) essentials**: your one-stop guide to understanding UNS in totality. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.hivemq.com/mqtt/unified-namespace-uns-essentials-iiot-industry-40/>. Acesso em: 14 set. 2025.

HOFMANN, Eduardo Luis. **Digital transformation through unified namespace: a cyber security perspective**. [S. l.: s. n.], 2025. Disponível em: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/883074/Hofmann_Eduardo.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Acesso em: 14 set. 2025.

JASKÓ, Szilárd; SKROP, Adrienn; HOLCZINGER, Tibor; CHOVÁN, Tibor; ABONYI, János. **Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements**: a review of standard- and ontology-based methodologies and tools. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361520305340>. Acesso em: 14 set. 2025.

KELKAR, Aniket Sachin. **Microcontroller-based unified namespace approach for efficient device integration and management in a small-scale IIoT system**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://scholarworks.calstate.edu/downloads/37720m964>. Acesso em: 14 set. 2025.

KOPROV, Pavel; RAMACHANDRAN, Ashwin; LEE, Yuan-Shin; COHEN, Paul; STARLY, Binil. **Streaming machine generated data via the MQTT Sparkplug B protocol for smart factory operations**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846322000451?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=97f1463ffd3e8538. Acesso em: 14 set. 2025.

MANDITEREZA, Kudzai. **Architecting a unified namespace for IIoT with MQTT**. [S. l.: s. n.], [20--?]. Disponível em: <https://www.hivemq.com/resources/download-architecting-unified-namespace-for-iiot-with-mqtt-ebook/>. Acesso em: 10 out. 2025.

MANTRAVADI, Soujanya; MØLLER, Charles. **An overview of next-generation manufacturing execution systems**: how important is MES for industry 4.0? [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919301155>. Acesso em: 14 set. 2025.

Meyer, Heiko; Fuchs, Franz; Thiel, Klaus. **Manufacturing Execution Systems (MES): Optimal Design, Planning, and Deployment**. 1. ed. New York: McGraw Hill, 2009. ISBN 978-0-07-1623834.

PILLAI, Renjithkumar Surendran; DENNY, Patrick; O'CONNELL, Eoin. **Optimizing predictive and prescriptive maintenance using unified namespace (UNS) for industrial equipment**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: https://www.preprints.org/frontend/manuscript/6097c9dd37af85ad116a4cba7c136ed4/download_pub. Acesso em: 10 out. 2025.

REYNOLDS, W. D. **Unified Namespace for Industrial IoT: The Masterclass**. [S. l.: s. n.], 30 mar. 2023. 1 vídeo (1h22min29s). YouTube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=dy1OcoCigml>. Acesso em: 13 out. 2025.

SALCHER, Felix; FINCK, Steffen; HELLWIG, Michael. **A smart shop floor information system architecture based on the unified namespace**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10794387>. Acesso em: 14 set. 2025.

SCHUH, Günther; ANDERL, Reiner; DUMITRESCU, Roman; KRÜGER, Antonio; TEN HOMPEL, Michael. (Ed.). **Industrie 4.0 maturity index**: managing the digital transformation of companies. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/>. Acesso em: 12 set. 2025.