

**SMT LINE CONTROL:
ARQUITETURA DE UMA
PLATAFORMA INTEGRADA
PARA MONITORAMENTO
OPERACIONAL,
AUTOMAÇÃO DE SETUP E
GESTÃO DA CALIBRAÇÃO
EM LINHAS DE
MANUFATURA ELETRÔNICA**

**SMT LINE CONTROL: ARCHITECTURE OF AN INTEGRATED PLATFORM FOR
OPERATIONAL MONITORING, SETUP AUTOMATION, AND CALIBRATION
MANAGEMENT IN ELECTRONIC MANUFACTURING LINES**

Engenharias • 10/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/789008512](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/789008512)

Stephenson Batista de Lima¹

Siomara Dias da Rocha²

RESUMO

Linhas de montagem em superfície (*Surface Mount Technology – SMT*) enfrentam problemas relacionados à baixa visibilidade do estado operacional, à reconfiguração manual de equipamentos de inspeção e à gestão descentralizada de calibração e manutenção. Este artigo apresenta a arquitetura do *SMT Line Control*, uma plataforma de software que integra esses três domínios em uma base comum de dados, controle de acesso e auditoria. Adotou-se uma pesquisa aplicada de natureza tecnológica, conduzida segundo o método *Design Science Research*, envolvendo levantamento de requisitos em ambiente produtivo, modelagem arquitetural e desenvolvimento de um protótipo funcional navegável. A solução contempla três pilares: monitoramento operacional, *setup* automatizado, com verificação de compatibilidade de *pallet* e ajuste de *conveyor*, e gestão de calibração, com derivação automática do estado de conformidade. A infraestrutura transversal inclui controle de acesso baseado em papéis, auditoria e persistência de dados. A avaliação indicou redução das interações manuais no fluxo de troca de programa de 21 para 5, considerando três máquinas, além da eliminação da checagem manual de compatibilidade. Esses resultados são discutidos em relação a estudos de SMED, que reportam reduções de 42% a 46% no tempo de setup. Conclui-se que a integração dos três domínios em um modelo único de dados é tecnicamente viável e constitui a principal contribuição do trabalho.

Palavras-chave: Manufatura eletrônica; Monitoramento operacional; Automação de setup; Gestão da calibração; Pesquisa em ciência do projeto.

ABSTRACT

Surface mount assembly lines (*Surface Mount Technology – SMT*)

face problems related to low visibility of operational status, manual reconfiguration of inspection equipment, and decentralized management of calibration and maintenance. This article presents the architecture of *SMT Line Control*, a software platform that integrates these three domains into a common database, access control, and auditing infrastructure. An applied technological research approach was adopted, following the Design Science Research method, involving requirements gathering in a real production environment, architectural modeling, and development of a functional navigable prototype. The solution comprises three pillars: operational monitoring, automated setup, including pallet compatibility verification and conveyor adjustment, and calibration management, with automatic derivation of compliance status. The cross-functional infrastructure includes role-based access control, auditing, and data persistence. The evaluation indicated a reduction in manual interactions during the program changeover process from 21 to 5, considering three machines, as well as the complete elimination of manual compatibility checking. These results are discussed in relation to SMED studies, which report setup time reductions ranging from 42% to 46%. It is concluded that integrating the three domains into a single data model is technically feasible and constitutes the main contribution of the study.

Keywords: Electronic manufacturing; Operational monitoring; Setup automation; Calibration management; Design Science Research.

1. INTRODUÇÃO

A transformação digital da manufatura, frequentemente reunida sob o termo Indústria 4.0, propõe que os sistemas de produção se tornem progressivamente interconectados, com dados fluindo de

forma contínua entre máquinas, sistemas de gestão e operadores (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Em linhas de montagem em superfície (*Surface Mount Technology* - SMT), contudo, essa integração raramente se realiza de maneira homogênea: o status operacional da linha, o processo de troca de produto e o controle de manutenção dos equipamentos costumam evoluir como sistemas ou como não sistemas separados, cada um com sua própria fonte de verdade, quando alguma existe.

Esse diagnóstico não é apenas anedótico. Apilioğullari (2022), ao analisar a transformação digital em manufatura, mostra que o obstáculo dominante não está na disponibilidade de tecnologia, mas na ausência de integração vertical entre os níveis de equipamento, de controle de linha e de gestão, propondo o modelo ISA-95 como eixo estruturante dessa integração.

Vyskočil et al. (2023) demonstram que sistemas de execução da manufatura (*Manufacturing Execution System* - MES) apoiados em gêmeos digitais só entregam replanejamento em tempo real quando os dados de equipamento estão disponíveis de forma unificada e confiável - condição que uma planta com dados dispersos em planilhas e interfaces homem-máquina isoladas simplesmente não satisfaz.

Especificamente no domínio SMT, Quijano et al. (2025) evidenciam que a otimização de sequenciamento de produção depende de dados estruturados de programas, componentes e setups; sem essa base, qualquer ganho analítico fica bloqueado a montante, por indisponibilidade de dado.

O cenário fragmentado se manifesta em três frentes específicas. A primeira é a visibilidade do estado da linha quais máquinas estão conectadas, o que cada uma processa, se há alguma pendência vencida, normalmente obtida por rondas físicas do supervisor ou por planilhas atualizadas manualmente, sem consolidação em tempo real.

A segunda é a troca de produto, que exige a reconfiguração manual de cada máquina de inspeção óptica (AOI) e de inspeção de pasta de solda (SPI): o operador seleciona o programa correto, verifica se o tamanho do pallette é compatível com o do produto anterior e, quando necessário, ajusta a largura dos trilhos do conveyor atividade diretamente relacionada ao tempo de setup tratado pela metodologia SMED (Single-Minute Exchange of Die) desde a década de 1980 (SHINGO, 2000).

A terceira é o controle de calibração, verificação e manutenção preventiva dos equipamentos, raramente integrado aos dois primeiros domínios, ainda que a literatura de manutenção centrada em confiabilidade sustente, há décadas, que a disponibilidade de um ativo depende da disciplina com que essas atividades são executadas e registradas (MOUBRAY, 1997; NAKAJIMA, 1988).

É relevante notar que a própria indústria eletrônica já respondeu à parte desse problema pelo lado dos padrões de comunicação: o IPC-HERMES-9852 padronizou o protocolo de transferência de placas entre máquinas da linha (IPC, 2019) e o IPC-2591, na versão 2.0 da especificação Connected Factory Exchange, padronizou a troca de mensagens de máquina para sistemas de nível superior (IPC, 2025).

Padrões de comunicação, no entanto, resolvem o transporte do dado, não a sua consolidação semântica: uma planta pode estar plenamente aderente ao CFX e ainda assim manter o controle de calibração em uma planilha desconectada do cadastro de máquinas usado pelo setup.

Este trabalho parte da premissa de que monitoramento, setup e calibração não deveriam constituir sistemas isolados, mas pilares de uma mesma plataforma, apoiados sobre um modelo de dados, um mecanismo de controle de acesso e um mecanismo de auditoria comuns. O objetivo geral é apresentar e avaliar a arquitetura de uma plataforma de software o SMT Line Control estruturada em três pilares funcionais integrados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Indústria 4.0 e Integração Vertical em Manufatura Eletrônica

O documento que consolidou a agenda da Indústria 4.0 (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013) formulou a integração horizontal, a integração vertical e a continuidade digital da engenharia como as três condições de realização do conceito. Entre elas, a integração vertical o encadeamento entre sensores e equipamentos, controle de linha, execução da manufatura e planejamento corporativo é a que mais diretamente concerne a este trabalho.

A referência normativa desse encadeamento é a ANSI/ISA-95.00.01 (ISA, 2000), que define terminologia e modelos de objeto para a integração entre sistemas de controle e sistemas de negócio, organizando-a em níveis hierárquicos.

Apilioğullari (2022) aplicou esse modelo a um ambiente de manufatura por projeto e concluiu que a maturidade digital depende menos da adoção pontual de tecnologias do que da consistência do modelo de dados que atravessa os níveis 2 e 3 dessa hierarquia resultado que sustenta, do ponto de vista teórico, a decisão de arquitetura central deste artigo.

No plano da comunicação, o OPC UA (IEC, 2020) firmou-se como camada de interoperabilidade independente de fabricante, enquanto a indústria de montagem eletrônica desenvolveu padrões próprios: o IPC-HERMES-9852 para o protocolo de transferência de placas entre máquinas (IPC, 2019) e o IPC-2591, em sua versão 2.0, para a troca de mensagens entre equipamentos e sistemas de nível superior (IPC, 2025).

Sobre essa base de comunicação, Vyskočil et al. (2023) propuseram um MES distribuído apoiado em gêmeos digitais, capaz de replanejar a produção durante a execução; os próprios autores registram que a viabilidade dessa capacidade depende da existência de representações de equipamento unificadas e continuamente atualizadas.

Quijano et al. (2025), por sua vez, demonstraram em linhas SMT que a otimização de sequenciamento pela comunalidade de carretéis de componentes reduz o número de trocas de setup, mas exige dados estruturados de programas e produtos — insumo que, na prática, é frequentemente indisponível.

2.2. Redução de Tempo de Setup e a Metodologia SMED

A metodologia SMED (SHINGO, 2000) estruturou a redução de tempo de setup em torno da separação entre atividades internas,

executadas com a máquina parada, e atividades externas, executáveis com a máquina em operação, seguidas da conversão sistemática das primeiras nas segundas.

Sua aplicação permanece produtiva: Molla et al. (2024) relatam, em manufatura eletrônica, redução de 80 para 43 minutos, e Keyser, Severin e Geiger (2022) obtiveram redução de 55 para 32 minutos em uma planta de embalagens de papelão ondulado. Em ambos os casos, a intervenção foi majoritariamente organizacional padronização de procedimento, preparação antecipada de ferramental, listas de verificação, sem automação de software da própria decisão de setup.

É justamente essa lacuna que o segundo pilar da plataforma aqui descrita busca ocupar: a verificação de compatibilidade de palletes e o consequente ajuste do conveyor são convertidos de atividade humana de conferência em regra executada pelo sistema.

2.3. Manutenção, Calibração e Conformidade Metrológica

Nakajima (1988) formalizou, no contexto da Manutenção Produtiva Total (TPM), a métrica de eficácia global do equipamento (Overall Equipment Effectiveness — OEE), decompondo o desempenho em disponibilidade, performance e qualidade. Moubray (1997) consolidou a manutenção centrada em confiabilidade (Reliability-Centered Maintenance — RCM), segundo a qual a estratégia de manutenção de um ativo deve derivar sistematicamente de suas funções e de seus modos de falha, e não de reação a ocorrências. Ambas as tradições convergem em um requisito de informação: sem histórico confiável de eventos por equipamento, nem o indicador nem a estratégia se sustentam.

Do lado metrológico, a ISO 10012 (ISO, 2003) estabelece requisitos para sistemas de gestão de medição, incluindo a definição de intervalos de calibração, o registro dos resultados e o tratamento de equipamentos fora de conformidade.

Na manufatura eletrônica, esses requisitos se particularizam na IPC-9716 (IPC, 2024), que trata do controle de processo de inspeção óptica automatizada, incluindo calibração e verificação periódica dos sistemas de AOI. O terceiro pilar da plataforma proposta opera exatamente nesse ponto: transforma intervalos e registros de evento em estado de conformidade derivado, em vez de deixá-lo a cargo do cálculo manual do operador.

2.4. Controle de Acesso e Rastreabilidade em Ambientes Industriais

O controle de acesso baseado em papéis (Role-Based Access Control - RBAC), formalizado por Ferraiolo e Kuhn (1992), substitui a atribuição individual de permissões pela associação de usuários a papéis e de papéis a permissões, tornando a administração de autorizações escalável.

Sua aplicabilidade a ambientes de controle industrial foi avaliada por Figueroa-Lorenzo, Añorga e Arrizabalaga (2019), que implementaram e mediram um modelo RBAC centralizado sobre o protocolo Modbus em sistemas SCADA, demonstrando viabilidade tanto de segurança quanto de latência. Esse resultado é diretamente pertinente ao contexto aqui tratado, pois a comunicação com máquinas de AOI e SPI ocorre em condições técnicas próximas às avaliadas por aqueles autores.

3. METODOLOGIA

3.1. Delineamento da Pesquisa

Trata-se de pesquisa aplicada, de natureza tecnológica e abordagem qualitativa com elementos quantitativos descritivos, conduzida segundo a lógica do *Design Science Research*, cujo produto de conhecimento é um artefato neste caso, a arquitetura de software e o protótipo que a materializa avaliado quanto à sua utilidade para o problema que o motivou.

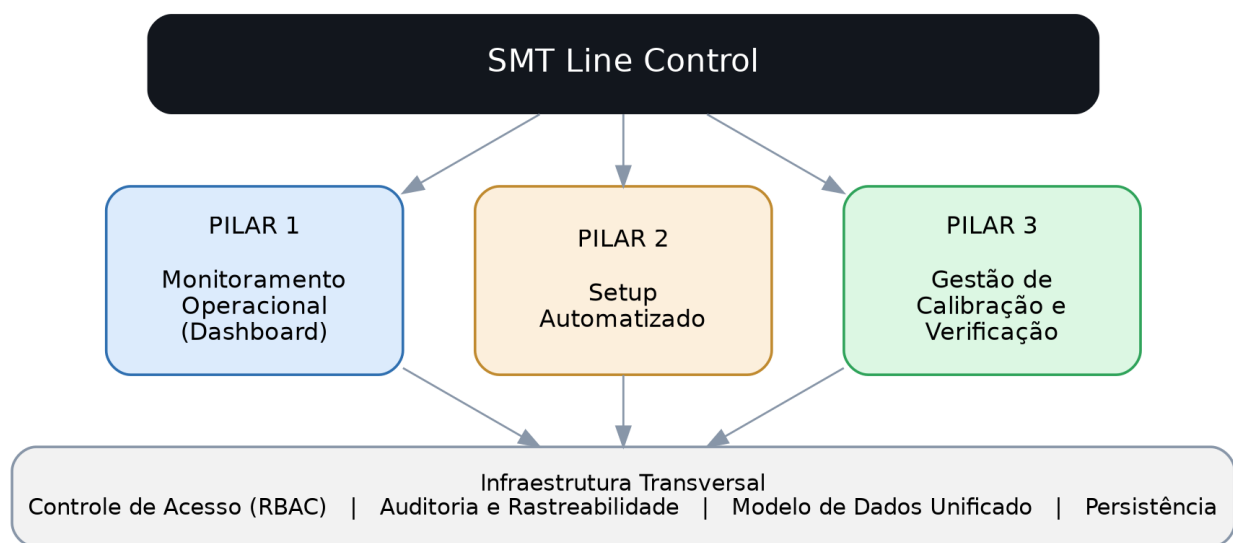
O trabalho foi executado em cinco etapas encadeadas: (i) identificação e delimitação do problema, a partir da observação direta do fluxo de troca de produto e do controle de calibração em uma linha SMT em operação; (ii) revisão da literatura e dos padrões técnicos aplicáveis, apresentada na seção anterior; (iii) modelagem da arquitetura e do modelo de dados unificado; (iv) construção de um protótipo funcional navegável dos três pilares, com a camada de comunicação com equipamentos simulada; e (v) avaliação do artefato por comparação estruturada entre o procedimento manual atual e o procedimento suportado pela plataforma.

O levantamento de requisitos foi conduzido por observação do trabalho de operadores e supervisores e por análise dos registros existentes planilhas de controle de calibração, quadros físicos de status e as interfaces homem-máquina de cada equipamento. Desse levantamento resultou o conjunto de requisitos funcionais que estruturou os três pilares, além dos requisitos não funcionais de controle de acesso, auditoria e persistência tratados como infraestrutura transversal.

3.2. Visão Geral da Arquitetura Projetada

A Figura 1 apresenta a plataforma em sua estrutura de três pilares: Monitoramento Operacional, *Setup* Automatizado e Gestão de Calibração e Verificação, todos apoiados sobre uma infraestrutura transversal comum: controle de acesso baseado em papéis, auditoria e rastreabilidade, um modelo de dados unificado e persistência. Essa disposição reflete uma decisão de arquitetura deliberada: em vez de tratar cada domínio como um sistema à parte, os três pilares compartilham as mesmas entidades de dados, linhas, máquinas, produtos, programas e o mesmo mecanismo de autorização, de modo que uma alteração cadastral feita para fins de *setup*, como o cadastro de uma nova máquina, esteja imediatamente disponível para o painel de monitoramento e para o módulo de calibração, sem duplicação de registro.

Figura 1. Arquitetura da plataforma SMT Line Control em três pilares sobre infraestrutura transversal comum.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

3.3. Modelo de Dados Unificado

O modelo de dados foi desenhado em torno de cinco entidades principais, detalhadas no Quadro 1 e representadas graficamente na Figura 2. A entidade Máquina é o ponto de convergência dos três

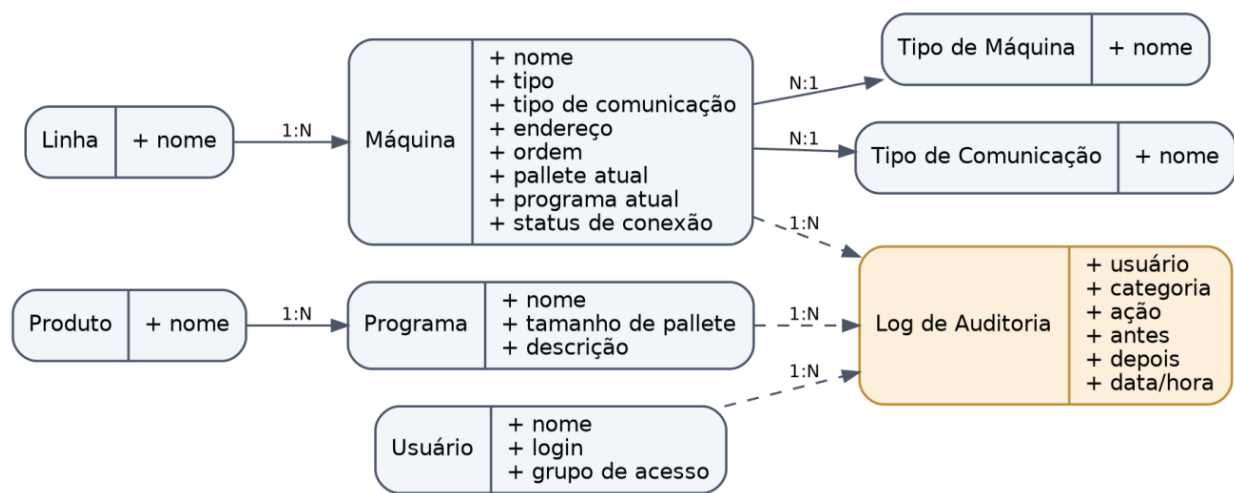
pilares: o mesmo registro consultado pelo painel para exibir conectividade e status de calibração é o registro atualizado pelo módulo de setup ao concluir um envio de programa e o registro ao qual o módulo de calibração vincula seus eventos.

Quadro 1. Entidades principais do modelo de dados unificado.

Entidade	Atributos-chave	Observações
Linha	Nome	Escalável: novas linhas sem alteração de código.
Máquina	Nome, tipo, linha, comunicação, endereço, ordem, programa e palletes atuais, status de conexão, atividades habilitadas	Compartilhada pelos três pilares. Tipo parametrizável (AOI, SPI, impressora, pick and place, forno, conveyor).
Produto	Nome	Agrupar os programas de uma mesma placa.
Programa	Nome, produto, tamanho de palletes, descrição	Um produto pode ter vários programas (TOP/BOTTOM, revisões).
Usuário	Nome, login, grupo de acesso	Grupos: Administrador, Supervisor, Manutenção e Operador, com telas configuráveis.

Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

Figura 2. Modelo de dados unificado: entidades principais e seus relacionamentos.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

3.4. Camada de Comunicação com os Equipamentos

A camada de comunicação com AOI e SPI foi projetada para implementação em C#, operando sobre os protocolos disponibilizados pelo fabricante do equipamento — majoritariamente TCP/IP, com suporte a RS-232 para equipamentos legados. O atributo de tipo de comunicação foi mantido aberto, e não restrito a esses dois protocolos, para acomodar padrões de integração industrial mais recentes, como o OPC UA (IEC, 2020) e o CFX (IPC, 2025), amplamente recomendados como camada de comunicação em cenários de Indústria 4.0. A especificação exata dos comandos de cada protocolo depende da documentação técnica do fabricante das máquinas, não disponível no momento da concepção da plataforma; por essa razão, no protótipo essa camada é simulada por um adaptador que reproduz respostas de sucesso, de erro e de tempo esgotado, permitindo validar a arquitetura e o fluxo de operação sem depender da integração física.

3.5. Procedimento de Avaliação

A avaliação do artefato foi conduzida por três instrumentos complementares. O primeiro é a verificação de cobertura de

requisitos: cada requisito funcional levantado na etapa (i) foi confrontado com o protótipo e classificado como atendido, parcialmente atendido ou não atendido. O segundo é a comparação estruturada de procedimento, na qual o fluxo manual documentado em campo e o fluxo suportado pela plataforma foram decompostos em interações elementares do operador: cliques, digitações e conferências visuais e contados sobre um cenário padronizado de troca de produto em três máquinas de uma mesma linha.

O terceiro é o teste de cenário, no qual foram executados cinco roteiros no protótipo: envio bem-sucedido de programa, envio com *pallet* divergente, falha de comunicação, registro de evento de calibração e tentativa de acesso por usuário sem permissão. Cada roteiro foi verificado quanto ao comportamento funcional e quanto ao conteúdo do registro de auditoria gerado.

Cabe delimitar o alcance desses instrumentos: eles avaliam a arquitetura e o fluxo de interação, não o desempenho da plataforma em produção. Nenhuma medição de tempo de setup em linha real foi realizada, uma vez que a camada de comunicação com os equipamentos permanece simulada. Os números apresentados na seção 4.5, portanto, são contagens de procedimento e não medições de tempo de ciclo produtivo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

Esta seção apresenta os três pilares tal como implementados no protótipo, a infraestrutura transversal que os sustenta, a avaliação obtida pelos instrumentos descritos na seção 3.5 e a discussão desses resultados frente à literatura.

4.1. Pilar 1: Monitoramento Operacional

O primeiro pilar é a tela apresentada ao operador imediatamente após o login: um painel que consolida, por linha de produção, quais máquinas estão online, qual programa cada uma executa e um resumo agregado de quantas atividades de manutenção estão vencidas, próximas do vencimento ou em dia em toda a planta. O critério de projeto foi que uma decisão de prioridade, por exemplo, para onde direcionar um técnico de manutenção possa ser tomada a partir dessa única tela, sem depender de ronda física. Na verificação de cobertura de requisitos, os quatro requisitos funcionais deste pilar foram classificados como atendidos, com a ressalva de que os estados de conectividade exibidos provêm do adaptador simulado.

Do ponto de vista de indicadores, o painel reporta contagens simples: máquinas online e *offline*, atividades vencidas, próximas do vencimento e em dia. A extensão natural desses dados, uma vez acumulado histórico suficiente, é o cálculo de indicadores consolidados de disponibilidade nos moldes do OEE, métrica formalizada por Nakajima (1988) no contexto da TPM e hoje adotada como referência de desempenho de equipamento na manufatura discreta. O painel foi projetado considerando essa evolução: os eventos que alimentariam o cálculo — mudanças de estado de conexão, trocas de programa e registros de manutenção — já são persistidos com marcação temporal.

4.2. Pilar 2: Setup Automatizado

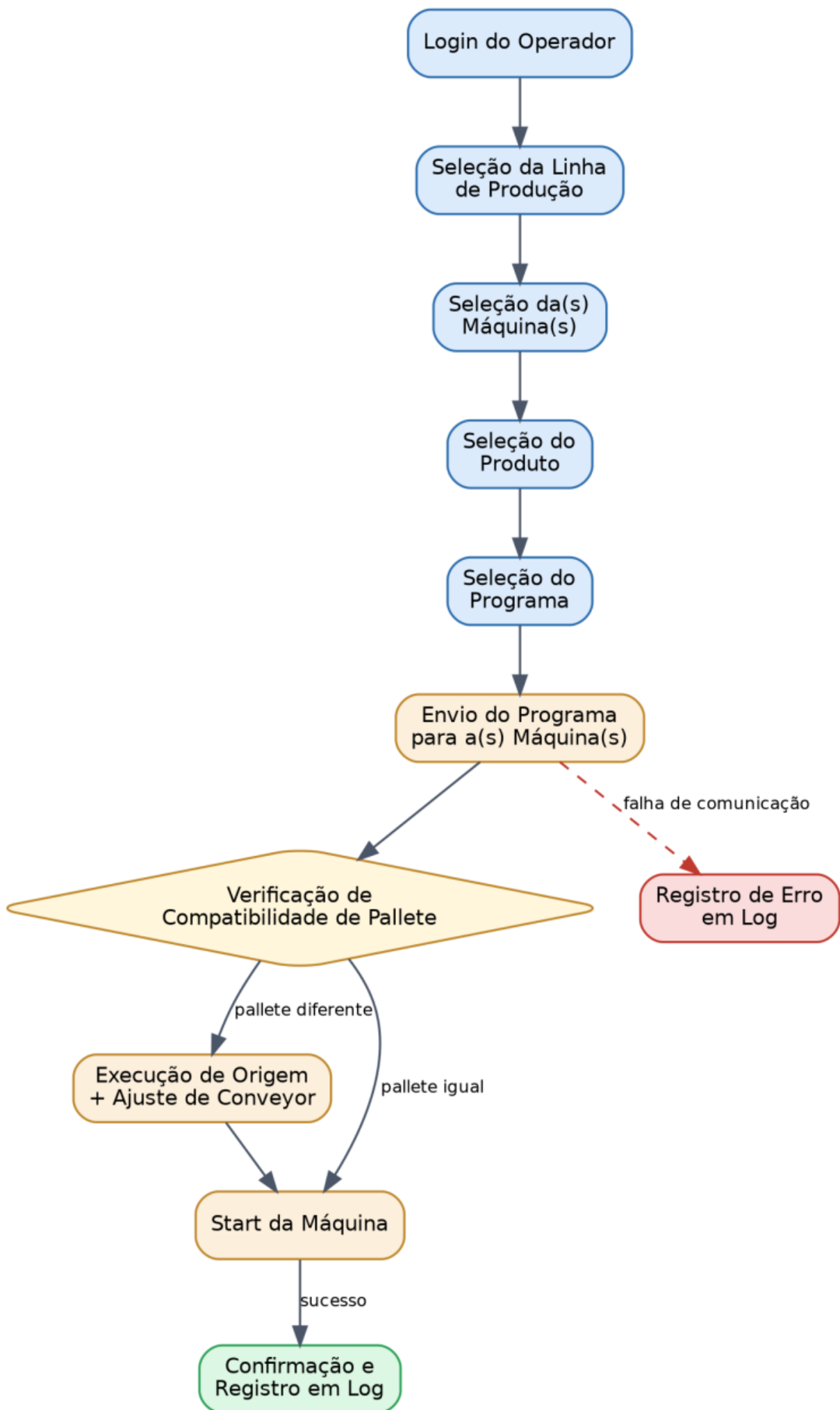
O segundo pilar está relacionado ao processo de *setup* da linha e foi estruturado para tornar a troca de produto mais simples e controlada. A partir do sistema, o operador realiza o login e seleciona o produto e o programa que serão utilizados na produção. Antes do

envio, são verificadas as informações necessárias para garantir que o programa selecionado seja compatível com o equipamento e com o *pallet* utilizado.

Após essa etapa, o programa pode ser encaminhado de forma remota para uma ou mais máquinas, evitando que o operador precise realizar a mesma configuração individualmente em cada equipamento. O sistema também informa o resultado do envio, permitindo identificar situações de sucesso ou de erro.

As operações realizadas ficam registradas, o que facilita o acompanhamento do processo e a rastreabilidade das alterações. Com essa abordagem, o *setup* deixa de depender exclusivamente de ações manuais e passa a seguir um fluxo previamente definido, reduzindo etapas repetitivas e contribuindo para maior padronização da preparação da linha. A Figura 3 resume esse fluxo, do login à confirmação ou ao erro do envio.

Figura 3. Fluxo do módulo de setup automatizado, do login à confirmação (ou erro) do envio de programa.



O núcleo funcional deste pilar é a rotina executada ao enviar um programa para uma máquina, que verifica a compatibilidade de *palletes* antes de autorizar o envio, conforme o pseudocódigo do Quadro 2.

Quadro 2. Lógica de verificação de *palletes* e disparo do ajuste de *conveyor*.

```
SE palletes_atual_da_maquina != palletes_do_novo_programa ENTÃO
    executar_origem()
    ajustar_conveyor(largura_alvo = palletes_do_novo_programa)
FIM SE
trocar_programa(novo_programa)
iniciar_producao()
```

Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

Essa verificação automática é a resposta de arquitetura ao problema de setup descrito na introdução: evita tanto o esquecimento do ajuste de *conveyor* quando o *palletes* muda quanto a execução desnecessária da rotina de origem quando o *palletes* é o mesmo do programa anterior, eliminando por construção uma das fontes de tempo não produtivo que a metodologia SMED busca suprimir (SHINGO, 2000). No teste de cenário, os roteiros de envio bem-sucedido, de *palletes* divergente e de falha de comunicação produziram o comportamento especificado; no terceiro caso, a operação foi reportada como falha ao operador e registrada como tal na auditoria, sem que o programa exibido na máquina fosse atualizado condição verificada explicitamente para evitar falsa impressão de sucesso.

4.3. Pilar 3: Gestão de Calibração e Verificação

O terceiro pilar permite habilitar, por máquina, um subconjunto de tipos de atividade calibração, verificação, manutenção preventiva, manutenção corretiva e troca de equipamento e, para cada uma, registrar eventos realizados e prazos. O estado de cada atividade, representado na Figura 4, é derivado automaticamente da data do último evento registrado e de uma janela de proximidade configurável, sem exigir que o operador calcule ou atualize o status manualmente.

Figura 4. Estados de uma atividade de calibração/verificação, derivados da data do último evento registrado.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

A existência de requisitos de calibração e verificação como parte do controle de processo de equipamentos de inspeção óptica automatizada é reconhecida pela própria indústria e formalizada em norma técnica específica (IPC, 2024), e o tratamento de intervalos, registros e equipamentos fora de conformidade encontra referência normativa mais ampla na ISO 10012 (ISO, 2003).

A lógica de estado por tempo decorrido e não por inspeção pontual é consistente com o princípio central da manutenção centrada em confiabilidade, segundo o qual a estratégia de manutenção de um ativo deve ser determinada de forma sistemática a partir de suas funções e de seus modos de falha, e não executada de maneira reativa (MOUBRAY, 1997). Do ponto de vista de modelo de dados, este pilar compartilha a mesma entidade Máquina utilizada pelo

painel de monitoramento e pelo módulo de setup: nenhum cadastro é duplicado entre os três pilares.

4.4. Infraestrutura Transversal: Acesso, Auditoria e Persistência

O sistema implementa controle de acesso baseado em papéis (RBAC), com quatro grupos padrão: Administrador, Supervisor, Manutenção e Operador, cada um com visibilidade configurável sobre os três pilares e sobre as telas de cadastro. O grupo administrativo possui acesso irrestrito e é o único autorizado a alterar cadastros de usuário. No teste de cenário, a tentativa de acesso por usuário sem permissão foi bloqueada na camada de autorização e registrada na auditoria, e não apenas ocultada na interface distinção relevante, pois a ocultação de elemento visual não constitui controle de acesso.

Toda alteração relevante no sistema, em qualquer um dos três pilares, é registrada em um *log* de auditoria contendo usuário responsável, grupo de acesso, categoria da alteração, ação realizada, estado anterior e estado posterior. No envio de programa, o log registra o programa carregado antes e depois da operação, inclusive em caso de falha de comunicação. No módulo de calibração, cada evento registrado gera entrada de auditoria, compondo um histórico único de rastreabilidade por máquina, independentemente de qual pilar originou a alteração. Essa unicidade do histórico é consequência direta do compartilhamento da entidade Máquina entre os pilares e seria inviável em uma arquitetura de sistemas separados sem uma etapa adicional de consolidação de dados.

Os cadastros de linhas, máquinas, produtos e programas e os eventos do módulo de calibração são persistidos por meio de uma

API de armazenamento de sessão, o que eliminou a perda de dados a cada atualização de página, limitação presente nas primeiras versões do protótipo, quando todo o estado existia apenas em variáveis de memória do navegador. Essa persistência não equivale ao banco de dados relacional de uma arquitetura de produção não oferece integridade referencial nem autenticação no servidor, mas sustentam os três pilares de forma consistente enquanto essa evolução está em andamento.

4.5. Avaliação do Protótipo

A verificação de cobertura de requisitos indicou dezesseis dos dezoito requisitos funcionais levantados como atendidos e dois como parcialmente atendidos, ambos dependentes da integração real de comunicação: a leitura automática do programa efetivamente carregado na máquina e a detecção de perda de conexão por ausência de resposta do equipamento. Os cinco roteiros do teste de cenário foram executados com o comportamento especificado, e em todos eles a entrada de auditoria correspondente foi gerada com o conteúdo esperado.

A comparação estruturada de procedimento, aplicada ao cenário padronizado de troca de produto em três máquinas de uma mesma linha, está sintetizada no Quadro 3. A contagem de interações refere-se a ações elementares do operador: cada seleção em interface, cada digitação e cada conferência visual de compatibilidade foi contada como uma interação.

Quadro 3. Comparação estruturada entre o procedimento manual e o procedimento suportado pela plataforma (cenário: troca de produto em três máquinas de uma linha).

Aspecto avaliado	Procedimento manual	Com a plataforma	Variação
Interações do operador na troca de programa	21 (7 por máquina)	5	-76%
IHM acessadas fisicamente	3	0	-100%
Conferências manuais de palletes	3	0 (regra automática)	-100%
Fontes consultadas para o status da planta	4 (planilha, quadro, IHM, contato verbal)	1 (painel único)	-75%
Status consolidado de manutenção	Ronda física e planilha	Tela inicial, sem ação extra	—
Vencimento de calibração	Cálculo manual em planilha	Derivado do último evento	—
Auditoria das trocas de programa	Inexistente	100% das operações, inclusive falhas	—

Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

Dois resultados merecem destaque. O primeiro é a redução de interações do operador, de vinte e uma para cinco, obtida sobretudo pela centralização do envio: a plataforma permite selecionar o programa uma única vez e despachá-lo para as três máquinas, em vez de repetir a sequência completa em cada interface homem-máquina. O segundo é a eliminação das conferências manuais de compatibilidade de *palletes*, que deixam de existir como atividade humana e passam a ser regra avaliada pelo sistema. Essa diferença é qualitativamente distinta da primeira: reduzir interações abrevia o *setup*, enquanto eliminar a conferência manual remove uma classe

de erro, a do esquecimento, cuja ocorrência não é proporcional ao número de cliques.

4.6. Discussão Frente aos Resultados da Literatura

Como o sistema opera em ambiente de prototipagem, sem volume de produção real que permita gerar indicadores de tempo próprios, cabe situar o ganho esperado do segundo pilar em relação a resultados publicados de implementações de SMED, a mesma família de intervenção sobre tempo de setup, ainda que naqueles estudos realizada de forma majoritariamente organizacional, sem suporte de automação de software. O Quadro 4 reúne esses resultados.

Quadro 4. Resultados publicados de redução de tempo de setup por aplicação de SMED.

Estudo	Setor	Antes	Depois	Redução
Molla et al. (2024)	Manufatura eletrônica	80 min	43 min	≈46%
Keyser, Severin e Geiger (2022)	Embalagens de papelão ondulado	55 min	32 min	≈42%
Literatura de SMED (múltiplos setores)	—	—	—	18% a 90%

Fonte: Elaborado pelos Autores (2026), com base em Keyser, Severin e Geiger (2022) e Molla et al. (2024).

É necessário demarcar essa comparação com precisão: os números do Quadro 4 provêm de implementações de SMED em contextos organizacionais distintos do apresentado neste artigo, sem envio automatizado de programa nem verificação eletrônica de *palletes*. Não são, portanto, medições do SMT *Line Control* em produção, mas referência de ordem de grandeza já alcançada por intervenções de menor grau de automação.

O que a comparação permite afirmar é que a etapa remanescente naqueles estudos a conferência manual de compatibilidade, que o Quadro 3 mostra eliminada pela plataforma constitui margem adicional de ganho ainda não explorada por eles. A validação quantitativa dessa margem, com dados de produção da própria plataforma, permanece como etapa necessária de trabalho futuro.

Em relação ao terceiro pilar, os resultados de Quijano et al. (2025) oferecem uma perspectiva complementar relevante: ao demonstrarem que a redução do número de trocas de setup em linhas SMT depende de dados estruturados de programas e componentes, esses autores reforçam que o modelo de dados unificado aqui proposto não é apenas conveniência de implementação, mas pré-condição para qualquer camada analítica subsequente. Na mesma linha, Vyskočil et al. (2023) mostram que capacidades avançadas de MES, como replanejamento em tempo real apoiado em gêmeos digitais, pressupõem representações de equipamento unificadas e continuamente atualizadas exatamente o insumo que a entidade Máquina compartilhada pelos três pilares produz.

Quanto ao controle de acesso, a comparação com a literatura é mais direta. Figueroa-Lorenzo, Añorga e Arrizabalaga (2019) propõem e

avaliam um modelo RBAC aplicado especificamente a sistemas SCADA industriais sobre o protocolo Modbus, demonstrando viabilidade tanto em segurança quanto em latência em ambiente de teste industrial. Esse resultado reforça, em contexto tecnicamente próximo ao da comunicação com AOI e SPI aqui descrita, que o RBAC é aplicável sem penalidade de desempenho relevante em ambientes de controle industrial, e não apenas em sistemas corporativos de tecnologia da informação, domínio original do modelo (FERRAILOLO; KUHN, 1992).

Para o primeiro pilar, Anapa, Güzel e Yozgatligil (2025) oferecem um ponto de comparação academicamente rigoroso: os autores implementaram um sistema de monitoramento e previsão de OEE em tempo real em uma planta reconhecida pela Global Lighthouse Network, iniciativa do Fórum Econômico Mundial que identifica fábricas de referência mundial em Indústria 4.0, obtendo ganho de 7,4% no OEE total da planta após a implantação. Embora o foco daquele trabalho seja a previsão estatística de OEE, e não um painel de status como o aqui descrito, o resultado corrobora a premissa geral deste artigo: a consolidação de dados operacionais em tempo real é, por si só, fonte mensurável de ganho de desempenho, antes mesmo de qualquer intervenção sobre o processo físico.

4.7. Posicionamento em Relação aos Padrões e Limitações

A plataforma descrita atua nos níveis de controle de linha e de equipamento, próximos do que a ANSI/ISA-95.00.01 (ISA, 2000) descreve como os níveis 2 e 3 da hierarquia de integração entre sistemas de controle e sistemas de negócio. A integração futura com um MES de nível superior se beneficiaria diretamente da aderência a essa norma, que já define terminologia e modelos de objeto

consolidados, e da adoção do CFX (IPC, 2025) como formato de troca de mensagens com os equipamentos evolução coerente com o achado de Apilioğullari (2022) sobre a centralidade da integração vertical na maturidade digital.

Três limitações delimitam o alcance dos resultados. A primeira, já assinalada, é que a integração real de comunicação depende da documentação de protocolo específica de cada fabricante de AOI e SPI, não disponível no momento da concepção da plataforma; os fluxos aqui descritos simulam essa camada para fins de validação de arquitetura e de experiência de uso. A segunda é que as contagens do Quadro 3 medem procedimento, não tempo de ciclo: convertê-las em redução de minutos de setup exige medição em linha, com a integração implementada. A terceira é que a persistência em armazenamento de sessão, adequada ao protótipo, não atende aos requisitos de integridade e de autenticação de um ambiente produtivo, o que restringe a avaliação atual ao plano arquitetural.

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou a arquitetura do SMT Line Control, plataforma que integra monitoramento operacional, setup automatizado e gestão de calibração de máquinas de AOI e SPI em linhas SMT sobre uma base comum de dados, controle de acesso e auditoria. A viabilidade técnica dos três pilares foi demonstrada em protótipo funcional, e a decisão de compartilhar um único modelo de dados entre eles, em vez de tratá-los como sistemas separados, mostrou-se sustentável ao longo da evolução incremental do sistema.

A avaliação do artefato indicou dezesseis dos dezoito requisitos funcionais atendidos, redução das interações do operador de vinte e uma para cinco no cenário padronizado de troca de produto em três máquinas, eliminação integral das conferências manuais de compatibilidade de pallet e geração de registro de auditoria para todas as operações executadas, inclusive as que falharam. Confrontados com resultados publicados de SMED, que relatam reduções de tempo de setup entre 42% e 46% em intervenções sem automação de software, esses achados sugerem que a automação da decisão de setup e não apenas a reorganização do procedimento que representa margem adicional de ganho ainda pouco explorada na literatura da área.

A contribuição central do trabalho, portanto, não está em automatizar cada domínio isoladamente, possibilidade já disponível em sistemas comerciais, mas em sustentar os três sobre um modelo de dados, um mecanismo de autorização e um mecanismo de auditoria únicos, de modo que uma máquina cadastrada uma única vez esteja simultaneamente disponível para ser monitorada, para receber programas e para ter sua calibração rastreada.

Como trabalhos futuros, destacam-se: a implementação da camada real de comunicação com os equipamentos, mediante especificação de protocolo do fabricante, preferencialmente aderente ao OPC UA (IEC, 2020) e ao CFX (IPC, 2025); a migração da persistência de sessão para banco de dados relacional com autenticação no servidor; o cálculo de indicadores de disponibilidade nos moldes do OEE (NAKAJIMA, 1988) a partir do histórico acumulado de operação e calibração; a medição experimental do tempo de setup em linha, comparando o procedimento manual e o automatizado; e a integração com sistemas MES de nível superior, aderente à

ANSI/ISA-95 (ISA, 2000), de modo que os três pilares passem a operar em conjunto com o planejamento de produção da planta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAPA, Korkut; GÜZEL, İsmail; YOZGATLIGİL, Ceylan. Robust short-term OEE forecasting in Industry 4.0 via topological data analysis. Ithaca: arXiv, 2025. arXiv:2507.02890. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2507.02890>. Acesso em: 12 abr. 2026.

APILIOĞULLARI, Lütfi. Digital transformation in project-based manufacturing: developing the ISA-95 model for vertical integration. International Journal of Production Economics, v. 245, art. 108413, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108413>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527322000068>. Acesso em: 18 abr. 2026.

FERRAILOLO, David F.; KUHN, D. Richard. Role-based access controls. In: NATIONAL COMPUTER SECURITY CONFERENCE, 15., 1992, Baltimore. Proceedings [...]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1992. p. 554–563. Disponível em: <https://www.nist.gov/publications/role-based-access-controls>. Acesso em: 31 ago. 2026.

FIGUEROA-LORENZO, Santiago; AÑORGA, Javier; ARRIZABALAGA, Saioa. A role-based access control model in Modbus SCADA systems: a centralized model approach. Sensors, v. 19, n. 20, art. 4455, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19204455>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/20/4455>. Acesso em: 27 abr. 2026.

IEC — INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62541: OPC unified architecture. Geneva: IEC, 2020. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/en/publication/34376>. Acesso em: 5 maio 2026.

IPC — ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. IPC-2591: connected factory exchange (CFX). Version 2.0. Bannockburn: IPC, 2025. Disponível em: <https://www.ipc.org/news-release/ipc-releases-version-20-ipc-2591-connected-factory-exchange-expanded-device-coverage-and-smarter-data>. Acesso em: 3 jun. 2026.

IPC — ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. IPC-9716: requirements for automated optical inspection (AOI) process control for printed board assemblies. Bannockburn: IPC, 2024. Disponível em: <https://www.ipc.org/solutions/ipc-factory-future>. Acesso em: 22 maio 2026.

IPC — ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. IPC-HERMES-9852: the global standard for machine-to-machine communication in SMT assembly. Bannockburn: IPC, 2019. Disponível em: <https://www.ipc.org/solutions/ipc-factory-future>. Acesso em: 14 maio 2026.

ISA — INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. ANSI/ISA-95.00.01: enterprise-control system integration — part 1: models and terminology. Research Triangle Park: ISA, 2000. Disponível em: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/ansi-isa-95-00-01>. Acesso em: 11 jun. 2026.

ISO — INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10012: measurement management systems — requirements for

measurement processes and measuring equipment. Geneva: ISO, 2003. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/26033.html>. Acesso em: 19 jun. 2026.

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Frankfurt: acatech — National Academy of Science and Engineering, 2013. Disponível em: <https://www.acatech.de/publikation/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>. Acesso em: 28 jun. 2026.

KEYSER, Robert S.; SEVERIN, Renee S.; GEIGER, Matthew J. Setup time reduction with SMED in a corrugated box plant. Journal of Applied Research on Industrial Engineering, v. 9, n. 2, p. 264–271, 2022. DOI: <https://doi.org/10.22105/jarie.2022.317908.1405>. Disponível em: <https://doaj.org/article/f19cdd7dca9d4d3c8aa71b9c8300f776>. Acesso em: 7 jul. 2026.

MOLLA, Selim; HASAN, MD Rakib; SIDDIQUE, Anamika Ahmed; SIDDIQUE, Iqtiaar Md. SMED implementation for setup time reduction: a case study in the electronics manufacturing landscape. European Journal of Advances in Engineering and Technology, v. 11, n. 1, p. 1–15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10624095>. Disponível em: <https://zenodo.org/records/10624095>. Acesso em: 15 jul. 2026.

MOUBRAY, John. Reliability-centered maintenance. 2. ed. New York: Industrial Press, 1997. Disponível em: <https://books.industrialpress.com/9780831131463/reliability-centered-maintenance/>. Acesso em: 31 ago. 2026.

NAKAJIMA, Seiichi. Introduction to TPM: total productive maintenance. Portland: Productivity Press, 1988. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Introduction_to_TPM.html?id=XKc28H3JeUUC. Acesso em: 31 ago. 2026.

QUIJANO, Jorge; TORRES CRUZ, Nohemi; QUIJANO-QUIAN, Leslie; POBLANO-OJINAGA, Eduardo Rafael; NORIEGA MORALES, Salvador A. Data-driven scheduling optimization for SMT lines using SMD reel commonality. Data, v. 10, n. 2, art. 16, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/data10020016>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5729/10/2/16>. Acesso em: 23 jul. 2026.

SHINGO, Shigeo. Sistema de troca rápida de ferramenta: uma revolução nos sistemas produtivos. Tradução de Eduardo Schaan e Cristina Schumacher. Porto Alegre: Bookman, 2000. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Sistema_de_Troca_Rapida_de_Ferramenta.html?id=LtwNgZQ6CA8C. Acesso em: 31 ago. 2026.

VYSKOČIL, Jiří; DOUDA, Petr; NOVÁK, Petr; WALLY, Bernhard. A digital twin-based distributed manufacturing execution system for Industry 4.0 with AI-powered on-the-fly replanning capabilities. Sustainability, v. 15, n. 7, art. 6251, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15076251>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/7/6251>. Acesso em: 4 ago. 2026.

¹ Discente do Curso Superior de Engenharia Elétrica na Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica – Fucapi, Manaus-AM. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Docente do Curso Superior de Engenharia Elétrica na Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica – Fucapi,

Manaus-AM. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)