

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Pedro Henrique Lopes Matias

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA ARQUITETURA
PADRONIZADA DE CONTROLE PARA BANCADAS AUTOMATIZADAS EM
PROCESSOS DE MONTAGEM AUTOMOTIVA: um estudo de caso**

Betim

2026

Pedro Henrique Lopes Matias

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA ARQUITETURA
PADRONIZADA DE CONTROLE PARA BANCADAS AUTOMATIZADAS EM
PROCESSOS DE MONTAGEM AUTOMOTIVA: um estudo de caso**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de controle e automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de controle e automação.

Orientador: Virgil del Duca Almeida

Betim

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

M433d Matias, Pedro Henrique Lopes

Desenvolvimento e implementação de uma arquitetura padronizada de controle para bancadas automatizadas em processos de montagem automotiva / Pedro Henrique Lopes Matias. – 2026.

124 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Virgil del Duca Almeida

1. Indústria automobilística. 2. Bancada automatizada. 3. Manufatura. 4. Engenharia de Controle e Automação. I. Matias, Pedro Henrique Lopes. II. Título.

CDU: 681.5



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Automação Industrial e Tecnologia da Informação
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 22 dias do mês de Julho do ano de 2026, às dezoito horas, nas dependências do IFMG – *Campus Betim*, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Virgil Del Duca Almeida e demais membros, Deliene Costa Guimarães Barros e Bruno Porto Caetano. Nesta ocasião o discente **Pedro Henrique Lopes Matias** do curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, com registro acadêmico de número **0039112** do IFMG – *Campus Betim* defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA ARQUITETURA PADRONIZADA DE CONTROLE PARA BANCADAS AUTOMATIZADAS EM PROCESSOS DE MONTAGEM AUTOMOTIVA: um estudo de caso**” e foi **APROVADO**, com **100** (Cem) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 20 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às dezenove horas e trinta e cinco minutos. Para constar, eu, Virgil Del Duca Almeida, redigi a presente ata.

Betim, 23 de julho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Virgil Del Duca Almeida, Professor**, em 23/07/2026, às 10:19, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Deliene Costa Guimaraes Barros, Professora Substituta**, em 24/07/2026, às 08:06, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2817754** e o código CRC **7905B5AE**.

23792.000901/2026-75

2817754v1

BRUNO PORTO
CAETANO:0148
5388600

Assinado de forma digital
por BRUNO PORTO
CAETANO:01485388600
Data: 2026.07.29 15:24:23
+03'00'

Dedico aos meus mestres, que tanto
me ensinaram. E aos meus colegas
que auxiliaram a colocar em prática,
muito além do que aprendi.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me deu forças para seguir em frente, pela sabedoria adquirida em cada etapa dessa jornada.

Aos meus pais que me incentivaram a continuar firme e forte independente do que acontecesse.

Ao meu orientador, professor Virgil que esteve comigo desde o técnico me passando grandes ensinamentos e na faculdade não foi diferente, contribuiu muito para o meu desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional.

Aos meus amigos que estiveram comigo nesta jornada chamada faculdade, desde os momentos de ficar até tarde fazendo trabalho até os momentos pós aula.

RESUMO

O presente estudo traz como tema, o desenvolvimento e a implementação de arquiteturas tecnológicas padronizadas enquanto fatores que implicam na competitividade de indústrias sistemistas, dentre elas, as que pertencem ao setor automobilístico atual. Parte-se da premissa de apresentação de um estudo de caso elaborado na Alfa Componentes Automotivos, com o objetivo de projetar e implementar uma arquitetura modular de controle de *hardware* e *software* para bancadas automatizadas de montagem de conjuntos ópticos. O método pautou-se em uma abordagem mista (qualiquantitativa) e de natureza aplicada, amparando-se em procedimentos de observação participante, diários de campo e análise documental de relatórios técnicos coletados entre janeiro e fevereiro de 2026. Os resultados evidenciaram que a substituição de fiações elétricas conjugadas permanentes por tomadas industriais multipolares desconectáveis otimizou as rotinas de manutenção corretiva. Sob a perspectiva do *software*, a automação do carregamento de parâmetros de sensores, torque e ângulo via planilhas estruturadas em Excel eliminou erros de digitação e reduziu a zero as 400 horas de programação externa terceirizada exigidas no modelo antigo (avaliadas sob a taxa técnica de R\$ 130,00/h em nov/2022). Do ponto de vista ergonômico, a fixação rígida de interfaces e comandos à cota antropométrica de 1.200 mm eliminou o histórico crônico de quebras de monitores articulados devido a colisão com objetos da máquina e mitigou a fadiga postural dos operadores. Verificaram-se divergências importantes em relação à literatura de referência, como a rejeição dos *encodes* digitais devido a ruídos eletromagnéticos, demandando o retorno ao *feedback* analógico tradicional de 0 a 10 V para o nivelamento de mesas, e a superioridade do engessamento físico sobre a flexibilidade de ajustes ergonômicos reguláveis. Concluiu-se que a padronização dimensional (1.200 mm/1.500 mm) blindou o patrimônio da empresa contra a obsolescência de produtos comandada pelas montadoras, limitando o investimento futuro estritamente ao desenvolvimento de dispositivos internos de fixação (R\$ 40.000,00 a R\$ 50.000,00) em substituição à aquisição de novas bancadas completas (R\$ 220.000,00).

Palavras-chave: Automação Industrial. Padronização de Bancadas. Engenharia de Manufatura. Arquitetura ISA-88/PackML. Redução de Custos.

ABSTRACT

The present study brings as its theme, the development and implementation of standardized technological architectures as factors that imply the competitiveness of systemist industries, among them, those that belong to the current automotive sector. It is based on the premise of presenting a case study developed at Alfa Componentes Automotivos, with the objective of designing and implementing modular *hardware* and *software* control architecture for automated assembly benches of optical assemblies. The method was based on a mixed approach (quali-quantitative) and of an applied nature, based on participant observation procedures, field diaries, and documentary analysis of technical reports collected between months of January and February 2026. The results showed that the replacement of permanent conjugated electrical wiring by disconnect able multipolar industrial outlets optimized corrective maintenance routines. From the *software's* perspective, the automation of the loading of sensor, torque, and angle parameters via structured Excel spreadsheets eliminated typing errors and reduced to zero the 400 hours of outsourced external programming required in the old model (valued at the technical rate of R\$ 130.00/h in 2025). From an ergonomic point of view, the rigid attachment of interfaces and controls to the anthropometric elevation of 1,200 mm eliminated the chronic history of articulated monitor breakages due to collisions with machine objects and mitigated the operators' postural fatigue. Important divergences were found in relation to academic literature, such as the rejection of *digital encoders* due to electromagnetic noise, requiring the return to traditional analog *feedback* from 0 to 10 V for table leveling, and the superiority of physical plastering over the flexibility of adjustable ergonomic adjustments. It was concluded that the dimensional standardization (1,200 mm/1,500 mm) shielded the company's assets against the obsolescence of products commanded by the automakers, limiting the future investment strictly to the development of internal fixation devices (R\$ 40,000.00 to R\$ 50,000.00) in replacement of the acquisition of new complete benches (R\$ 220,000.00).

Keywords: Industrial Automation. Standardization of Benches. Manufacturing Engineering. Arquiteture ISA-88/PackML. Cost Reduction.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Foto da bancada como um todo antes da aplicação do padrão

FIGURA 2 - Supervisório antes da aplicação do padrão

FIGURA 3 - Painel Elétrico antes da aplicação do padrão

FIGURA 4 - Forma de seleção de produto antes da aplicação do padrão

FIGURA 5 - Dispositivo de montagem antes da aplicação do padrão

FIGURA 6 - Painel elétrico da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 7 - Painel elétrico da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 8 - Interfaces de tomadas da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 9 - Interfaces de tomadas da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 10 - Tela de parametrização de nome dos sensores e leituras da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 11 - Tela de Criação de receita e configuração de leituras da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 12 - Configuração de ciclo máquina da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 13 - Fixação do monitor da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 14 - Bancada como um todo da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 15 - Bancada como um todo da segunda linha aplicada a padronização

FIGURA 16 - Um dos dispositivos de montagem da segunda linha aplicada a padronização

FIGURA 17 - *Checklist* de segurança desenvolvido a partir segunda linha aplicada a padronização

FIGURA 18 - Configuração do ciclo máquina da segunda linha aplicada a padronização

FIGURA 19 - Tela de Criação de receita e configuração de leituras da

primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 20 - Tela de parametrização de nome dos sensores e leituras da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 21 - Tela de exportação de receitas da segunda linha aplicada a padronização

FIGURA 22 - Painel elétrico da segunda linha aplicada a padronização

FIGURA 23 - Interface das tomadas da segunda linha aplicada a padronização

FIGURA 24 - Interface das tomadas da segunda linha aplicada a padronização

FIGURA 25 - Painel elétrico da segunda linha aplicada a padronização

FIGURA 26 - Painel elétrico da segunda linha aplicada a padronização

FIGURA 27 - Bancada como um todo da última linha aplicada a padronização

FIGURA 28 - Um dos dispositivos da última linha aplicada a padronização

FIGURA 29 - Foto da tela de ciclo automático da última linha aplicada a padronização

FIGURA 30 - Configuração do ciclo máquina da última linha aplicada a padronização

FIGURA 31 - Configuração de quais cilindros são ativados em cada passo de bloqueio

FIGURA 32 - Configuração de quais sensores serão esperados na verificação de componentes 1

FIGURA 33 - Configuração de quais sensores serão esperados na verificação de componentes 2

FIGURA 34 - Configuração de quais sensores serão esperados na verificação de componentes 3

FIGURA 35 - Menu que permite selecionar ciclos além dos já presentes na tela de configuração de ciclo

FIGURA 36 - Tela de criação de receitas e configuração das leituras

FIGURA 37 - Configuração das leituras

FIGURA 38 - Tela de nomeação de sensores da última linha aplicada a padronização

FIGURA 39 - Tela de automático durante ciclo de parafusamento

FIGURA 40 - Painel elétrico da última linha aplicada a padronização

FIGURA 41 - Tomada de interface dispositivo com a bancada

FIGURA 42 - Tomada do dispositivo

FIGURA 43 - Tomada da bancada

FIGURA 44 - Bancada da última linha aplicada a padronização sem dispositivo

FIGURA 45 - Bancada da última linha aplicada a padronização sem dispositivo

FIGURA 46 - Dispositivo Bancada da última linha aplicada a padronização fora da bancada

FIGURA 47 - Interfaces das tomadas de conexão da bancada da última linha aplicada a padronização

FIGURA 48 - Interfaces das tomadas de conexão da bancada da última linha aplicada a padronização

FIGURA 49 - Painel elétrico da última linha aplicada a padronização

FIGURA 50 - Painel elétrico da última linha aplicada a padronização

FIGURA 51 - Projeto Kaizen realizado da parte de padronização das bancadas

FIGURA 52 - Seleção de produto da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 53 - Tela de seleção de produto da segunda e última linha aplicada a padronização

FIGURA 54 - Regulagem da altura da bancada

FIGURA 55 - Interface de controle de altura da bancada do supervisor da segunda e última linha aplicada a padronização

FIGURA 56 - Interface de controle de altura da bancada do supervisor da primeira linha aplicada a padronização

FIGURA 57 - Conjunto de elevação da segunda linha aplicada a padronização, motor com sensor para referenciamento do *encoder*

FIGURA 58 - Vista do desenho 3D da bancada em último nível

FIGURA 59 - Vista do desenho 3D da bancada em último nível com legenda

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Síntese da prática vivenciada na empresa Alfa

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT — Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABS — Acrilonitrila Butadieno Estireno
- ANFAVEA — Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
- ANSI — *American National Standards Institute* (Instituto Nacional Americano de Padrões)
- CAPEX — *Capital Expenditure* (Investimento em Bens de Capital / Ativos Fixos)
- CLP — Controlador Lógico Programável
- DIN — *Deutsches Institut für Normung* (Instituto Alemão para Padronização / Padrão de Trilho Elétrico)
- DORT — Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho
- DX — Destro (Lado Direito - Abreviação do italiano)
- EMI — *Electromagnetic Interference* (Interferência Eletromagnética)
- EPI — Equipamento de Proteção Individual
- IEC — *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional)
- IHM — Interface Homem-Máquina
- IIoT — *Industrial Internet of Things* (Internet das Coisas Industrial)
- IoT — *Internet of Things* (Internet das Coisas)
- ISA — *International Society of Automation* (Sociedade Internacional de Automação)
- LED — *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)
- LH — *Left Hand* (Lado Esquerdo - Terminologia Automotiva)
- LOW — *Low Beam* (Farol Baixo - Terminologia Automotiva)
- MDF — *Medium Density Fiberboard* (Chapa de Fibra de Madeira de Média Densidade)
- NR-12 — Norma Regulamentadora N° 12 (Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos)
- OEE — *Overall Equipment Effectiveness* (Eficiência Global do Equipamento)
- PIB — Produto Interno Bruto
- RH — *Right Hand* (Lado Direito - Terminologia Automotiva)
- RL — *Rear Lamp / Running Light* (Lanterna Traseira ou Luz de Rodagem)

ROI — *Return on Investment* (Retorno sobre o Investimento)

STP — Sistema Toyota de Produção

SX — Sinistro (Lado Esquerdo - Abreviação do Italiano)

TI — Tecnologia da Informação

TT — *Table of Tracks / Task Table* (Tabela de Passos / Sequenciamento do Ciclo)

Vcc — Volts de Corrente Contínua

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Contextualização.....	17
1.2 Problematização.....	18
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo Geral.....	19
1.3.2 Objetivos Específicos.....	19
1.4 Justificativa.....	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1 Funcionamento das linhas de montagem modernas e automação.....	22
2.1.1 Evolução e conceito de automação industrial.....	22
2.1.2 Bancadas de controle automatizadas.....	23
2.1.3 O Papel do Controlador Lógico Programável (CLP).....	25
2.1.4 Interface Homem-Máquina (IHM) e a usabilidade industrial.....	26
2.1.5 Sensores industriais e dispositivos de atuação.....	27
2.2 Padronização de processos e arquiteturas modulares.....	28
2.2.1 Filosofia do Kaizen e a Melhoria Contínua.....	28
2.2.2 Modularidade e flexibilidade em linhas de montagem.....	30
2.2.3 Padronização de arquiteturas de hardware e conexões rápidas... 31	
2.2.4 Gerenciamento de receitas de fabricação por sistemas de automação.....	32
2.3 Engenharia de iluminação automotiva e ergonomia no chão de fábrica33	
2.3.1 Processo produtivo de componentes ópticos automotivos.....	34
2.3.2 Ergonomia e antropometria aplicadas ao design de bancadas.....	35
2.3.3 Sistemas de elevação eletromecânicos e controle de nivelamento... 36	
2.3.4 Segurança ocupacional e checklists automatizados de turno.....	37
2.4 Perspectiva histórica e avanços teóricos do caso.....	39
2.4.1 Evolução do Kaizen e do Sistema Toyota de Produção (STP).....	39
2.4.2 Contexto das bancadas industriais - das ilhas ao modelo modular... 40	
2.4.3 Norma ISA-88.....	40
3 METODOLOGIA.....	42
3.1 Classificação da Pesquisa.....	42
3.2 Universo da pesquisa e o sujeito pesquisador.....	43
3.3 Coleta de dados.....	44
3.4 Procedimento de análise dos dados.....	45
4 ESTUDO DE CASO.....	47
5 DISCUSSÃO.....	109
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	115

REFERÊNCIAS.....	118
------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O desenvolvimento da manufatura industrial contemporânea é intensamente reconhecido pelo advento da Automação Industrial e pela alternância para os conceitos da Indústria 4.0, em que a integração de sistemas ciberfísicos opera de modo a otimizar processos produtivos complexos. No escopo industrial, a automação consiste no uso de tecnologias de *hardware* e *software* para controle de equipamentos e processos, suprimindo tarefas fundamentalmente manuais e repetitivas por sistemas autônomos de alta precisão (Bertequine, 2020).

No centro dessa dinâmica operacional encontram-se as chamadas bancadas de controle automatizadas, que funcionam como postos de trabalho eletromecânicos dotados de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), Interfaces Homem-Máquina (IHMs) e sensores (Moraes, 2019). Esses sistemas são projetados especificamente para executar a montagem, o teste de estanqueidade e a verificação de qualidade de componentes complexos em tempo real, mitigando falhas na cadeia produtiva (Silva, 2020).

Há de se considerar aqui, a explanação feita por Miller (2000) e Kaminski et al., (2006) acerca do setor de iluminação automotiva, que abrange a fabricação de faróis e lanternas de alta tecnologia, exemplifica um ambiente fabril que demanda precisão milimétrica em decorrência das regulamentações de segurança viária. Os autores esclarecem que o processo de manufatura desse nicho envolve fases críticas como a injeção plástica de lentes de policarbonato, a metalização por deposição a vácuo dos refletores e a aplicação de tratamentos químicos superficiais especiais, a exemplo do verniz *antifog*, referindo-se a um revestimento interno projetado especificamente para mitigar os efeitos de condensação de umidade no interior do farol.

Entretanto, para além dos processos químicos e físicos de transformação da matéria, Rodrigues (2021) aponta que a eficiência global do sistema fabril reside na flexibilidade e na padronização tecnológica das linhas de montagem onde esses subcomponentes são consolidados. Complementarmente, a adoção de arquiteturas de controle não padronizadas

dificulta a reutilização de software, reduz a flexibilidade para alterações de processo e aumenta o esforço de engenharia e manutenção ao longo do ciclo de vida dos sistemas automatizados, tornando recomendável a utilização de estruturas modulares e padronizadas (Vogel-Heuser et al., 2017; ISA, 2010).

O desenvolvimento de arquiteturas padronizadas alcança escala quando verificada sob a perspectiva econômica do setor automobilístico nacional. Isso encontra respaldo nos dados oficiais da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea, 2026), o setor automotivo significando a aproximadamente 20% do Produto Interno Bruto (PIB) industrial brasileiro, sendo um dos principais motores do desenvolvimento tecnológico do país.

Não obstante, a produção de autoveículos no Brasil tem seguido em crescimento mais robusto nos últimos anos, motivado por toda a cadeia de fornecedores de autopeças (Anfavea, 2026). A mesma Associação ainda publicou que, no ano de 2026, as projeções oficiais da entidade apontam para um avanço de 3,7% na produção industrial, com estimativa de um volume total que supera a marca de 2,741 milhões de veículos montados em território nacional.

Face ao referido cenário altamente competitivo e de alta demanda por volume, as indústrias sistemistas (fornecedoras de componentes) enfrentam o desafio constante de realizar a flexibilização de suas linhas para atender a novos modelos de veículos. O investimento contínuo em modernização e em automação modular é o principal mecanismo utilizado pelo setor para absorver essas flutuações de demanda sem comprometer as margens operacionais.

1.2 Problemática

Em uma exposição histórica, tem-se que o desenvolvimento de maquinários e bancadas de montagem ocorreu de forma customizada e isolada, gerando um fenômeno técnico conhecido como "ilhas de automação" (Groover, 2014). Em linhas de produção não padronizadas, cada posto de trabalho possui uma lógica de programação e uma topologia elétrica exclusivas, o que dificulta manutenções preditivas e corretivas (Thomazini; Albuquerque, 2021).

A citada fragmentação tecnológica manifesta-se negativamente na vertente financeira, pois sob o modelo descentralizado, uma adequação técnica simples em uma linha de produção pode demandar centenas de horas de programação especializada para refinar os parâmetros de ciclo. Em termos de custos de engenharia de automação, tais horas de programação representam um dispêndio financeiro elevado e um gargalo para a eficiência fabril.

Na visão operacional e de manutenção, o vínculo físico rígido entre os painéis elétricos e a estrutura das bancadas impede a substituição rápida ou a remoção do painel para intervenções externas, adicionalmente, a falta de uniformidade nas telas das IHMs eleva a curva de aprendizado do trabalhador, propicia erros na seleção de receitas de fabricação e dificulta a execução de *checklists* diários de segurança.

Considerando o exposto até então, depara-se com o contexto de ineficiência gerada pela fragmentação técnica, emerge a seguinte questão de pesquisa: de que modo a implementação de uma arquitetura de controle padronizada e modular, aplicada a bancadas automatizadas de montagem automotiva, pode reduzir os custos de engenharia de padronização da arquitetura eletromecânica e de controle, podendo otimizar os indicadores de manutenção e flexibilidade operacional?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma proposta de melhoria aplicada ao processo produtivo, com foco em reduzir custos relacionados à engenharia de integração, aumentar a flexibilidade produtiva e otimizar os processos de manutenção industrial.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Registrar alguns dos principais impactos financeiros e operacionais decorrentes da falta de padronização nas linhas de montagem de componentes de iluminação automotiva anteriores ao projeto;

- Propor uma topologia modular de *hardware* e *software* que integre conexões rápidas via tomadas industriais desconectáveis e padronização ergonômica de interfaces homem-máquina; e
Desenvolver uma arquitetura de automação industrial por meio da integração de dispositivos e da otimização dos processos de padronização da arquitetura eletromecânica e de controle e *setup* das receitas de fabricação, visando ampliar a flexibilidade produtiva.

1.4 Justificativa

A construção deste estudo justifica-se pela necessidade premente de otimização de custos e recursos dentro da engenharia de manufatura automobilística atual. O projeto ataca diretamente dores crônicas do setor, fornecendo um modelo de desenvolvimento em que futuras alterações de produtos não demandem a aquisição de novas bancadas eletromecânicas, mas sim apenas a substituição de dispositivos específicos internos de fixação de menor custo.

No âmbito acadêmico, o trabalho preenche uma lacuna documental sobre estudos de caso práticos que detalham a migração de sistemas legados para arquiteturas modulares. A pesquisa pode configurar em mais um material de referência para investigações futuras sobre usabilidade de sistemas e padronização de *software* industrial em ambientes de manufatura avançada como postulado por Thomazini e Albuquerque (2021).

A nível social, a introdução de telas padronizadas e o redesenho ergonômico das bancadas atuam diretamente na melhoria das condições de saúde e segurança do trabalho dos operadores industriais, conforme preceitos de usabilidade (Iida; Guimarães, 2016). Reduz-se o risco de distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho (DORT) através do posicionamento correto de comandos e garante-se a integridade física da equipe por meio de *checklists* digitais automatizados e mandatórios de segurança (Iida; Guimarães, 2016).

Por fim, a sustentabilidade ambiental é favorecida através do prolongamento do ciclo de vida útil das bancadas elétricas e mecânicas existentes por meio de técnicas de reaproveitamento estrutural (Silva, 2020). A

estratégia de *retrofit* e reutilização da base física evita o descarte prematuro de materiais ferrosos e componentes eletroeletrônicos, reduzindo significativamente a pegada de carbono industrial e a geração de resíduos sólidos tecnológicos na cadeia produtiva.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A fundamentação teórica constitui o pilar científico deste estudo, propiciando a ancoragem dos dados empíricos coletados no chão de fábrica às teorias consagradas da engenharia de controle e automação. Com o escopo de tornar este documento acessível a leitores de variados níveis de especialização, este capítulo destrincha os conceitos elementares de maneira progressiva e didática. Compreender a transição entre sistemas puramente mecânicos e sistemas inteligentes integrados é o primeiro passo para mensurar os impactos operacionais e financeiros da padronização tecnológica (Groover, 2014).

2.1 Funcionamento das linhas de montagem modernas e automação

O entendimento de uma proposta de modernização industrial requer o domínio de uma terminologia específica que interliga *hardware*, *software* e fatores humanos. Nas subseções seguintes, são apresentados os pilares conceituais que regem o funcionamento das linhas de montagem modernas, detalhando o papel da automação, a estrutura física das bancadas de trabalho e a relevância das redes e sensores no monitoramento de processos.

2.1.1 Evolução e conceito de automação industrial

Em uma perspectiva histórica, a automação industrial não mais era vista somente como mecanismo de aumento de velocidade de produção, passando a ser encarada como uma estratégia de sobrevivência e competitividade de mercado (Moraes, 2019). No cerne, o termo automação diz respeito ao uso de sistemas de controle, como computadores ou microcontroladores, para gerenciar maquinários e processos industriais, reduzindo a demanda de intervenção humana direta em tarefas perigosas ou repetitivas (Thomazini; Albuquerque, 2021).

Segundo elucida Silva (2020), a mudança mais expressiva de paradigma aconteceu com a substituição dos antigos sistemas fundamentados em relés eletromecânicos rígidos por sistemas programáveis e modulares, confiando às fábricas a competência de se adaptarem a novos produtos sem demandar a reconstrução física toda a sua estrutura.

Nessa linha de pensamento, Groover (2014) detalha que no conjunto atual da Indústria 4.0, a automação industrial ampliou seus limites através da digitalização total do chão de fábrica. Os equipamentos não mais operaram de forma isolada e passaram a compor sistemas ciberfísicos, nos quais o maquinário físico conversa em tempo real com *softwares* de gestão corporativa e bancos de dados.

A referida evolução tecnológica é impulsionada pela necessidade premente de flexibilidade operacional, uma vez que o mercado consumidor moderno exige produtos customizados, ciclos de vida mais curtos e prazos de entrega reduzidos, forçando o setor automotivo a liderar a adoção de tecnologias de ponta (Rodrigues, 2021).

Moraes (2019) defende que é imperativo compreender que a automação não se limita à introdução de robôs antropomórficos complexos na linha de produção. Ela se manifesta de forma sutil e onipresente em pequenos postos de trabalho, onde lógicas matemáticas controlam válvulas pneumáticas, verificam o aperto de parafusos e analisam se uma peça foi montada corretamente por meio de feixes de luz (Thomazini; Albuquerque, 2021).

Portanto, analisar a automação sob a ótica de sistemas integrados permite enxergar a fábrica como um sistema integrado de automação, cujo sistema nervoso é composto por redes de comunicação e o Controlador Lógico Programável (CLP) executa a lógica de controle do sistema.

2.1.2 Bancadas de controle automatizadas

As bancadas de controle automatizadas representam células de manufatura compactas, projetadas estrategicamente para que um operador humano ou um braço mecânico execute tarefas específicas de montagem e teste com o máximo de precisão (Iida; Guimarães, 2016). Fisicamente, uma bancada industrial padrão é constituída por uma estrutura metálica robusta

(geralmente perfis de alumínio estrutural ou aço carbono), que serve de suporte para o dispositivo de fixação da peça, o painel elétrico de comando e as interfaces de visualização.

O sistema de elevação das bancadas automatizadas é responsável pelo ajuste vertical da superfície de trabalho, permitindo sua adaptação às características antropométricas dos operadores e às diferentes necessidades do processo produtivo. Groover (2014) explica que, em aplicações industriais, esse movimento é normalmente realizado por motores elétricos acoplados a mecanismos de transmissão, como fusos ou atuadores lineares, que convertem o movimento rotacional em deslocamento vertical controlado. O acionamento ocorre por meio do sistema de controle da bancada, possibilitando movimentação precisa, sincronizada e segura durante as operações de produção, setup e manutenção.

As referidas estruturas precisam ser dimensionadas para suportar vibrações contínuas, variações térmicas e o desgaste natural decorrente de múltiplos turnos de trabalho ininterruptos, conforme explica Rodrigues (2021). O painel elétrico concentra os principais componentes responsáveis pela alimentação, proteção, distribuição de energia e controle do sistema automatizado. Nesse compartimento encontram-se os dispositivos elétricos, os módulos de controle, as fontes de alimentação, os elementos de proteção e os equipamentos responsáveis pela integração entre o hardware da bancada e a lógica de controle (Moraes, 2019).

Dentro desse compartimento fechado, contadores, disjuntores e bornes de conexão organizam a distribuição de energia elétrica de alta e baixa potência, garantindo que surtos de tensão não danifiquem os circuitos eletrônicos sensíveis (Thomazini; Albuquerque, 2021). É nesse espaço que se consolida a inteligência da máquina, conectando os cabos provenientes dos sensores externos instalados no gabarito de montagem diretamente às placas de entrada e saída do controlador central.

Não obstante, a eficiência de uma bancada de controle está intrinsecamente atrelada à sua capacidade de comunicação com o operador de produção (Iida; Guimarães, 2016). Monitores industriais e botões físicos de acionamento bimanual são posicionados estrategicamente para garantir que o trabalhador execute o ciclo produtivo de forma segura, ergonômica e livre de

ambiguidades (Groover, 2014). Dessa forma, a estrutura física de uma bancada automatizada deve ser vista como a fusão entre a robustez da engenharia mecânica pesada, a precisão da eletroeletrônica e a adequação do design ergonômico voltado ao bem-estar do trabalhador .

2.1.3 O Papel do Controlador Lógico Programável (CLP)

O Controlador Lógico Programável (CLP) constitui o principal elemento de processamento da lógica de controle da bancada automatizada, executando o programa responsável pelo monitoramento das entradas e pelo acionamento dos dispositivos de saída. Entretanto, seu funcionamento depende da integração com os demais componentes do sistema, como sensores, atuadores, painéis elétricos, módulos de comunicação, interfaces homem-máquina e dispositivos de proteção, formando uma arquitetura completa de automação (Thomazini; Albuquerque, 2021).

Silva (2020) assinala que sua função primária consiste em ler continuamente o estado de seus canais de entrada (conectados a sensores), processar essas informações com base em um programa lógico previamente escrito pelo engenheiro e, por fim, acionar os canais de saída (conectados a atuadores, motores e lâmpadas).

Lino (2025) descreve que a arquitetura de processamento de um CLP contemporâneo opera por meio de um ciclo fechado e contínuo, denominado ciclo de varredura (scan). Em uma velocidade que varia na escala dos milissegundos, o controlador executa os passos sequenciais de leitura das entradas físicas, execução da lógica do usuário e atualização das saídas. Na vertente da automação avançada, a estabilidade desse ciclo de varredura é o que viabiliza o mapeamento consistente de variáveis de processo em tempo real, permitindo a integração nativa com gateways e a virtualização de dados de controle para arquiteturas de Internet das Coisas Industrial (IIoT) (Lino, 2025).

Segundo Felix *et al.* (2025), a referida velocidade de resposta em tempo real é crucial no desenvolvimento de sistemas automatizados integrados, uma vez que o atraso de algumas frações de segundo no processamento lógico comprometeria a sincronia mecânica entre atuadores pneumáticos e sensores

de presença no posicionamento de cargas ou módulos de fluxo. Com o avanço tecnológico, os CLPs modernos incorporaram também a capacidade de realizar cálculos matemáticos complexos, gerenciar receitas de fabricação diversificadas e se comunicar nativamente através de redes industriais baseadas no protocolo Ethernet.

Para programar as instruções contidas no CLP, a engenharia utiliza linguagens normatizadas internacionalmente pela IEC 61131-3, sendo a linguagem *Ladder* (Diagrama de Contatos) a mais difundida no ambiente fabril. A referida linguagem visual assemelha-se a diagramas elétricos de relés, facilitando o diagnóstico de falhas tanto por engenheiros de automação quanto por técnicos de manutenção eletromecânica no cotidiano industrial.

Embora a lógica de programação desempenhe papel essencial no funcionamento do sistema, o desempenho operacional da bancada depende igualmente da correta especificação do hardware empregado, incluindo arquitetura elétrica, dispositivos de proteção, módulos de comunicação, sensores, atuadores e interfaces operacionais, que atuam de forma integrada.

2.1.4 Interface Homem-Máquina (IHM) e a usabilidade industrial

Ressalta-se aqui, que a Interface Homem-Máquina (IHM) funciona como a interface de operação visual entre o operador de produção e a inteligência do CLP. A literatura técnica aponta que, geralmente constituída por telas sensíveis ao toque (*touchscreen*) fixadas ao nível dos olhos do trabalhador, a IHM traduz os milhares de bits e dados binários que trafegam dentro do controlador em gráficos amigáveis, textos instrutivos, cores indicativas e alarmes sonoros (ISA, 2015).

Sem a presença de uma IHM bem estruturada, o operador estaria desorientado em relação ao comportamento interno da máquina, sendo incapaz de identificar qual sensor específico está falhando ou qual etapa do ciclo de montagem está travada (Thomazini; Albuquerque, 2021).

Segundo Rodrigues (2021), a usabilidade industrial de uma IHM é um fator determinante para a produtividade e para a segurança no chão de fábrica. Telas poluídas visualmente, com excesso de informações, botões pequenos ou mensagens de erro confusas aumentam a fadiga mental do trabalhador e

propiciam a ocorrência de falhas operacionais graves, como a seleção incorreta de uma variante de produto.

Por essa razão, o design de telas contemporâneo adota paletas de cores sóbrias em estados normais de operação, reservando cores vibrantes como o vermelho e o amarelo exclusivamente para sinalizar situações reais de emergência ou anomalias técnicas que requeiram atenção imediata (Silva, 2020).

Além do monitoramento de status em tempo real, as IHMs modernas desempenham o papel central de gerenciamento operacional das bancadas de montagem. É através de seus menus interativos que o supervisor de produção realiza o *login* de sua equipe, insere parâmetros de controle específicos e comanda a troca de receitas produtivas (Rodrigues, 2021).

Uma interface intuitiva e fluida encurta drasticamente o tempo de treinamento de novos colaboradores, reduz o tempo gasto em trocas de lote (*setup*) e garante que os procedimentos de qualidade padrão da empresa sejam seguidos de forma rigorosa e homogênea.

2.1.5 Sensores industriais e dispositivos de atuação

A integração de sensores industriais no ecossistema fabril contemporâneo transcende a mera emissão de sinais elétricos discretos para o CLP, passando a compor camadas complexas de dados de telemetria voltadas à monitoração de processos (Bolton, 2015). Nesse panorama, o design e a modelagem de interfaces aplicadas à coleta dessas variáveis físicas devem priorizar a usabilidade técnica e a clareza analítica das representações gráficas em ambientes operacionais fabris, otimizando os fluxos informacionais em infraestruturas industriais e em sistemas baseados em Internet das Coisas (IoT) (Ficagna; Dos Reis, 2024).

Bolton (2015) destaca que a seleção de sensores industriais deve considerar fatores como o tipo de material a ser detectado, a distância de atuação, a precisão requerida e as condições ambientais de operação, incluindo poeira, umidade e temperatura. Na outra extremidade do sistema de automação, os atuadores constituem os elementos finais de controle,

convertendo energia elétrica, pneumática ou hidráulica em movimento mecânico para executar as ações determinadas pelo controlador.

Cilindros pneumáticos empurram travas mecânicas para prender a carcaça de um farol no gabarito, enquanto motores elétricos de passo ou servomotores rotacionam fusos de esferas com precisão microscópica para erguer ou abaixar a altura da bancada de trabalho. A sincronia entre a leitura do sensor e a resposta do atuador é o que define a estabilidade e a repetibilidade de um ciclo produtivo automatizado (Thomazini; Albuquerque, 2021).

Deve-se refletir aqui, sobre o conceito de calibração e fim de curso é fundamental para compreender as dores da manutenção industrial. Se um sensor de referência mecânica perde sua calibração ou sofre um deslocamento milimétrico devido a uma vibração, o CLP receberá uma informação falsa sobre a real posição de um motor. Essa perda de referência faz com que o atuador continue se movimentando além dos limites físicos permitidos, gerando colisões mecânicas severas que danificam o gabarito de montagem, quebram componentes caros e paralisam a linha de produção por longas horas (Anes, 2024).

2.2 Padronização de processos e arquiteturas modulares

A competitividade na manufatura automobilística moderna, como dito por Costa (2021), exige que as organizações industriais operem sob a égide da máxima eficiência produtiva e da eliminação sistemática de desperdícios. Para atingir esse patamar de excelência, a Engenharia de Manufatura apoia-se em conceitos fundamentais de padronização técnica e em sistemas modulares flexíveis.

Adiante, esses princípios serão explorados de forma didática, demonstrando como a filosofia do *Kaizen*, a modularidade e o gerenciamento de receitas estruturam uma fábrica inteligente capaz de responder rapidamente às oscilações do mercado consumidor.

2.2.1 Filosofia do Kaizen e a Melhoria Contínua

Segundo descrevem Assis e Casagrande (2024), a palavra *Kaizen* tem origem japonesa e traduz-se conceitualmente como "mudança para melhor" ou "melhoria contínua", representando uma filosofia de gestão que envolve todos os colaboradores da empresa, desde a alta administração até os operadores do chão de fábrica.

No ecossistema de engenharia, o *Kaizen* manifesta-se através de pequenos passos incrementais que buscam, de maneira diária e incansável, otimizar processos, eliminar movimentos desnecessários e reduzir tempos de ciclo (*lead time*). Porto (2025) postula que, mais do que demandar investimentos multimilionários imediatos, a mentalidade prega a criatividade e a reengenharia de recursos internos pré-existentes como o principal motor de evolução da competitividade fabril.

Quando aplicado especificamente à Engenharia de Controle e Automação, o conceito de melhoria contínua materializa-se no redesenho físico e lógico de postos de trabalho que apresentam falhas crônicas ou ineficiências ocultas. Vilardouro (2024) sustenta que um projeto *Kaizen* no chão de fábrica mapeia detalhadamente o estado atual de um processo (identificando perdas como quebras frequentes de componentes, paradas de linha por falta de calibração ou dificuldades de manutenção) e propõe um estado futuro idealizado baseado na eliminação dessas dores operacionais. A referida prática é indispensável no ambiente automotivo, pois o refinamento contínuo dos postos de trabalho estabiliza as taxas de produtividade e garante a padronização das rotinas de manufatura.

Coelho (2020) argumenta que é importante destacar que o *Kaizen* não se limita a relatórios teóricos ou planilhas de indicadores organizacionais. Ele ganha vida na modificação de uma calha elétrica para facilitar a passagem de fiação, no ajuste de altura de um monitor para evitar lesões musculares no trabalhador ou na criação de uma tomada de engate rápido que transforma uma manutenção demorada em uma troca instantânea.

Portanto, a aplicação do *Kaizen* ao desenvolvimento de bancadas automatizadas consolida um ambiente de manufatura flexível, onde o aprendizado prático decorrente dos erros operacionais cotidianos é convertido em inovações técnicas permanentes e de alto valor agregado.

2.2.2 Modularidade e flexibilidade em linhas de montagem

A modularidade em sistemas de automação industrial refere-se à estratégia de projeto que divide um sistema complexo em partes independentes e menores, denominadas módulos, que interagem entre si através de interfaces padronizadas, como explicado por Castilho (2025). Esse conceito opõe-se diretamente às antigas arquiteturas rígidas e centralizadas, nas quais qualquer pequena alteração estrutural ou lógica exigia a paralisação completa e o retrabalho de todo o rol fabril.

Em uma linha de montagem essencialmente modular, Ferreira *et al.*, (2023) os descrevem com painéis elétricos, os gabaritos mecânicos e as lógicas de programação funcionam como blocos independentes que podem ser conectados, desconectados ou substituídos sem afetar a integridade das demais células de produção.

Segundo Rodrigues (2021), o benefício imediato da adoção de sistemas modulares reside no ganho exponencial de flexibilidade operacional, uma característica vital para indústrias sistêmicas que atendem a múltiplos modelos de veículos simultaneamente.

Há de se refletir que a automação flexível permite que uma mesma bancada de controle seja rapidamente reconfigurada para processar diferentes variantes de um produto (como faróis do lado esquerdo e do lado direito ou versões para veículos compactos e utilitários), bastando realizar a troca física de um dispositivo fixação dos produtos.

A referida abordagem modular mitiga a necessidade de expandir fisicamente a área útil da fábrica (*layout*), otimizando a ocupação do solo industrial e reduzindo drasticamente os custos associados à aquisição de novas máquinas a cada lançamento de produto.

Sob a perspectiva econômica e de engenharia de ciclo de vida, a modularidade estende a longevidade dos ativos industriais através de processos eficientes de modernização (*retrofit*). Sob a perspectiva da gestão do ciclo de vida dos ativos industriais, a arquitetura modular otimiza a viabilidade econômica de projetos de modernização tecnológica (*retrofit*) (Castilho, 2025).

Em eventos de descontinuação ou obsolescência de produtos na linha de montagem, a dissociação e a independência dos blocos de controle

permitem o reaproveitamento da infraestrutura fixa principal, como painéis elétricos, computadores industriais e estruturas de elevação (Ferreira *et al.*, 2023).

Assim, a intervenção de engenharia restringe-se à reconfiguração ou substituição pontual dispositivos específicos, mitigando a necessidade de novos investimentos vultosos em bens de capital (CAPEX) e estendendo a longevidade dos recursos produtivos (Rodrigues, 2021).

Na proposta desenvolvida neste estudo, conforme será tratado mais adiante, a modularidade foi aplicada não apenas à programação do CLP, mas também à arquitetura física da bancada, contemplando a padronização estrutural, elétrica e de controle. Essa abordagem possibilitou o reaproveitamento de componentes existentes, simplificou futuras adaptações para novos produtos e reduziu significativamente a necessidade de reconstrução completa das bancadas.

2.2.3 Padronização de arquiteturas de *hardware* e conexões rápidas

A padronização de *hardware* em ambientes industriais consiste no estabelecimento de critérios técnicos rígidos e unificados para a escolha de componentes elétricos, eletrônicos e mecânicos que compõem o maquinário de produção (Thomazini; Albuquerque, 2021). Em fábricas fragmentadas tecnologicamente, a coexistência de variados modelos de contadores, bornes, sensores e cabos de diferentes fabricantes cria um cenário de caos operacional para as equipes de manutenção e engenharia de processos.

Ao unificar esses elementos sob um padrão técnico comum, a indústria otimiza a gestão de almoxarifado de autopeças, reduz o custo unitário de aquisição através de compras em escala e acelera as intervenções técnicas de reparo (Gomes, 2024).

Carneiro (2025) menciona como ponto crítico da padronização de *hardware* contemporânea a substituição de vínculos físicos permanentes por sistemas de conexões rápidas desconectáveis através de tomadas industriais multipolares multipinos. Tradicionalmente, as fiações elétricas e de comunicação que ligam o painel de comando à estrutura física da bancada

passam por eletrodutos plásticos ou metálicos flexíveis contínuos, formando um conjunto de conexões permanentes entre o painel elétrico e a bancada.

A referida configuração inflexível cria um forte vínculo de dependência física, forçando os técnicos de manutenção a realizarem diagnósticos complexos de fiação diretamente no chão de fábrica, estendendo o tempo de máquina parada e expondo componentes sensíveis à poeira e à umidade (Costa, 2021).

Para melhor entendimento, a introdução de tomadas industriais desconectáveis assemelha-se ao conceito de plugues elétricos domésticos, mas redimensionada para suportar correntes elevadas, sinais de dados blindados e proteção contra jatos de água (Marques, 2021).

Ao implementar essa tecnologia, o painel elétrico de comando pode ser desconectado da bancada em poucos segundos através de travas mecânicas simples, permitindo que a peça defeituosa seja removida para reparo especializado em uma oficina centralizada fora da linha de produção. Salles (2024) analisa que a mencionada dissociação imediata entre a inteligência elétrica e a estrutura mecânica revoluciona os indicadores de manutenibilidade, minimizando o impacto econômico decorrente do *downtime* na cadeia produtiva automotiva. Nesse contexto, a padronização deixa de estar restrita aos componentes elétricos isolados e passa a compreender toda a arquitetura física da bancada, incluindo estruturas metálicas, painéis elétricos, conexões rápidas, sistemas de movimentação, dispositivos mecânicos e a lógica de controle.

2.2.4 Gerenciamento de receitas de fabricação por sistemas de automação

No jargão da automação industrial, uma "receita de fabricação" é um conjunto predefinido de parâmetros numéricos, lógicas de ciclo, tempos de processo e sequências de sensores que ditam exatamente como a máquina deve se comportar para produzir uma variante específica de produto (Santos Filho *et al.*, 2025). Em uma bancada de controle automatizada flexível, o gerenciamento de receitas permite que o mesmo *hardware* execute tarefas completamente distintas ao longo do mesmo turno de trabalho.

Por exemplo, ao selecionar a receita de um farol com farol de milha integrado, o CLP ativa sensores adicionais de corrente e testes pneumáticos específicos que ficariam desativados caso a receita selecionada fosse a de um modelo de farol básico.

Segundo Sabadini (2026), a evolução técnica dos sistemas de gerenciamento de receitas migrou de métodos rudimentares de cópia manual de arquivos para sistemas integrados automatizados de alta confiabilidade. Em sistemas legados e obsoletos, a criação de uma nova variante de produto exigia que o técnico utilizasse comandos complexos de transferência de dados (*Transfer*), copiando integralmente a lógica de uma receita anterior e modificando os parâmetros linha por linha diretamente no *software* do controlado.

De acordo com Gomes (2024), essa prática arcaica elevava drasticamente a incidência de erros de digitação humanos, gerava confusão na nomenclatura de arquivos de sensores e estendia o tempo necessário para homologação de novos componentes nas linhas de montagem.

O patamar tecnológico atual das indústrias sistemistas adota interfaces homem-máquina dotadas de botões de importação e exportação de dados estruturados nativamente em planilhas de Excel ou bancos de dados relacionais. Sob esse modelo moderno, toda a configuração das etapas do ciclo, o sequenciamento esperado dos sensores e o mapeamento das imagens de câmeras de visão artificial ficam armazenados em arquivos de fácil edição externa (Sabadini, 2026).

O operador ou engenheiro seleciona a receita desejada através de menus visuais interativos (*Select Menu*) na tela da IHM, e o sistema carrega instantaneamente os parâmetros para a memória de trabalho do CLP, assegurando a flexibilidade produtiva e eliminando o risco de falhas humanas operacionais.

2.3 Engenharia de iluminação automotiva e ergonomia no chão de fábrica

A manufatura de componentes ópticos para o setor automobilístico representa um dos segmentos mais complexos e exigentes da cadeia de

autopeças, uma vez que tais itens desempenham funções cruciais na segurança ativa dos veículos (Marçal et al., 2020).

Faróis e lanternas contemporâneos vão além da função de iluminação de vias para se tornarem sistemas tecnológicos integrados de alta complexidade estética, mecânica e eletrônica. O ambiente fabril que abriga a montagem e o teste desses componentes necessita, simultaneamente, de processos físico-químicos altamente controlados e de postos de trabalho que respeitem as limitações físicas do trabalhador (Ribeiro, 2022).

Nas subseções seguintes, esses aspectos serão minuciosamente esmiuçados, revelando a integração indissociável entre a engenharia química dos materiais ópticos e a bioengenharia dos postos de trabalho.

2.3.1 Processo produtivo de componentes ópticos automotivos

De acordo com Kaminsky et al., (2006), o fluxo de manufatura de um farol automotivo moderno inicia-se em células robotizadas de moldagem por injeção plástica, onde polímeros de engenharia de alta performance são transformados nos principais componentes estruturais da peça. A carcaça traseira do farol é comumente injetada em polipropileno reforçado com carga mineral ou acrilonitrila butadieno estireno (ABS), garantindo a robustez mecânica e a resistência ao estresse térmico gerado pelo motor do veículo.

Paralelamente, as lentes externas, que exigem transparência absoluta e resistência ao impacto de detritos nas rodovias, são moldadas a partir do policarbonato óptico, um polímero que recebe aditivos específicos para suportar a radiação ultravioleta sem amarelar ao longo do ciclo de vida útil do automóvel (Rodrigues, 2021).

Após a etapa de injeção, os refletores internos do farol, responsáveis por direcionar e concentrar o feixe luminoso gerado pelas lâmpadas ou diodos emissores de luz (LEDs), passam por um processo crítico de tratamento chamado metalização por deposição a vácuo (Balieiro, Máximo, 2023).

Dentro de câmaras herméticas sob pressões extremamente reduzidas, filamentos de alumínio de alta pureza são sublimados por efeito Joule, fazendo com que os átomos do metal vaporizado se depositem homogeneamente sobre a superfície plástica do refletor. Esse revestimento metálico microscópico é o

responsável por conferir o aspecto espelhado e o alto índice de refletividade necessários para que o conjunto óptico atenda às rigorosas normas internacionais de intensidade e distribuição de luz viária (Perdão, 2023).

De acordo com Kuranaka (2020), para leitores que não são especialistas na área de manufatura de autopeças, o grande segredo da durabilidade de um farol reside na aplicação interna de um verniz protetor especial de última geração conhecido internacionalmente no jargão técnico como *antifog*.

De acordo com Balieiro, Máximo (2023), trata-se de uma resina química líquida aplicada por meio de spray robotizado ou imersão controlada estritamente na face interna da lente de policarbonato, agindo como um agente hidrofílico permanente. A principal função do tratamento *antifog* é quebrar a tensão superficial das microgotas de água resultantes das variações bruscas de temperatura entre o motor quente e o ambiente externo frio; em vez de se condensarem em forma de névoa opaca que prejudica a transmissão de luz e a estética do veículo, a umidade espalha-se na forma de uma película líquida invisível e contínua.

2.3.2 Ergonomia e antropometria aplicadas ao design de bancadas

A introdução de conceitos ergonômicos no projeto de postos de trabalho industriais baseia-se na premissa fundamental de que a máquina deve se adaptar às capacidades físicas e cognitivas do ser humano, e jamais o contrário (Netto, 2023). Dentro do ambiente de chão de fábrica automotivo, onde operadores realizam movimentos repetitivos durante jornadas de até oito horas contínuas, o design antropométrico das bancadas de montagem dita diretamente os níveis de produtividade e os índices de absenteísmo.

Segundo Balsadi (2024), a antropometria, ramo da ciência que estuda as dimensões e proporções do corpo humano, fornece as tabelas de percentis populacionais que os engenheiros de controle e automação utilizam para balizar a geometria física das estruturas metálicas fabris.

O dimensionamento antropométrico de postos de trabalho deve considerar os percentis populacionais para adequar as interfaces às características físicas dos operadores (Balsadi, 2024). Na concepção de linhas de montagem ortostáticas, a literatura indica que a variabilidade de regulagens

mecânicas e suportes de fixação de telas deve ser projetada de forma a priorizar a estabilidade visual e a manutenção de uma postura neutra (Tirelli; Röhm, 2022).

O posicionamento inadequado de componentes de interface homem-máquina (IHM) atua como um fator de risco ergonômico, podendo induzir inclinações excessivas do tronco e flexões cervicais repetitivas, o que eleva a fadiga neuromuscular e a propensão ao desenvolvimento de Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT) (Iida; Guimarães, 2016).

Para mitigar esses problemas crônicos de manutenção e saúde ocupacional, a engenharia contemporânea adota o padrão de fixação rígida de monitores, comandos bimanuais e botoeiras a uma altura geométrica fixa de aproximadamente 1.200 milímetros em relação ao solo (Silva, 2020).

É preciso obedecer a uma relação matemática à zona de conforto ergonômico para a grande maioria da população trabalhadora em posição ortostática (em pé), posicionando a IHM na linha de visão natural e mantendo os botões de ciclo na chamada "área de alcance ótimo" (Iida; Guimarães, 2016).

Ao estabilizar os componentes críticos de interface nessa cota espacial, elimina-se o estresse mecânico sobre as articulações dos braços articulados, zera-se o índice de quebra de telas por queda e assegura-se que operadores de diferentes estaturas trabalhem sob condições de postura neutra e segura.

2.3.3 Sistemas de elevação eletromecânicos e controle de nivelamento

A variação de estatura entre diferentes operadores exige que as bancadas de montagem modernas incorrem mecanismos dinâmicos de ajuste de altura para salvaguardar a saúde laboral da equipe. Como menciona Lorenzo (2020), esse ajuste é viabilizado por meio de sistemas de elevação eletromecânicos, compostos por colunas telescópicas acionadas por motores elétricos de corrente contínua ou alternada acoplados a fusos de esferas recirculantes de alta precisão.

Contudo, Wagner (2024) destaca que a evolução desses sistemas revela um histórico complexo de desafios de engenharia mecânica e eletrotécnica, especialmente no que tange ao gerenciamento e à sincronização quando a bancada utiliza múltiplos pontos de força motorizados.

Nas primeiras versões dessas bancadas reguláveis, era comum o emprego de um único comando elétrico centralizado para gerenciar dois motores dispostos em extremidades opostas da mesa de trabalho (Thomazini; Albuquerque, 2021).

Essa topologia simplificada apresentava uma vulnerabilidade técnica severa: qualquer assimetria na distribuição de peso dos dispositivos de montagem, ou mesmo o acúmulo de poeira e desgaste mecânico desigual nas guias lineares, resultava em pequenos atrasos de movimentação entre as colunas (Wagner, 2024). O fenômeno de dessincronização em questão gerava um desalinhamento angular na mesa, culminando em travamentos mecânicos severos que torciam a estrutura de alumínio, sobrecarregavam eletricamente os motores por excesso de torque e paralisavam o posto de trabalho (Thomazini; Albuquerque, 2021).

Para solucionar a ineficiência do comando único, a engenharia de automação implementou arquiteturas avançadas baseadas em sinais analógicos de *feedback* de posição operando na faixa clássica de tensão de 0 a 10 Volts. Nesse arranjo, potenciômetros lineares de alta fidelidade medem continuamente a altura real de cada extremidade da mesa e enviam essas informações em tempo real para as entradas analógicas do CLP (Thomazini; Albuquerque, 2021).

O algoritmo de controle lógico processa o desnível instantâneo e ajusta individualmente a velocidade de cada motor por meio de inversores de frequência (Thomazini; Albuquerque, 2021). Embora os encoders digitais ofereçam alta resolução por pulsos discretos, os sistemas com feedback analógico tradicional continuam sendo amplamente utilizados na indústria devido à sua simplicidade de parametrização (Silva, 2020). Em ambos os cenários, a literatura aponta que a estabilidade do sinal depende diretamente de técnicas adequadas de blindagem e aterramento para mitigar interferências eletromagnéticas presentes no ambiente fabril.

2.3.4 Segurança ocupacional e *checklists* automatizados de turno

A segurança do trabalho em células automatizadas de manufatura automotiva é regida por normas regulamentadoras nacionais e internacionais

extremamente rígidas, a exemplo da NR-12 no cenário brasileiro (Silva, 2020). Uma bancada de controle moderna deve ser projetada para ser intrinsecamente segura, o que significa que o sistema de automação deve prever e bloquear qualquer comportamento perigoso do operador ou falha catastrófica dos atuadores (Groover, 2014).

Elementos de proteção física, cortinas de luz fotoelétricas, botões de parada de emergência monitorados por relés de segurança de duplo canal e botões de acionamento bimanual síncrono compõem o aparato básico para evitar acidentes graves (Borges, 2023).

Como relaciona Silva (2020), tradicionalmente, a verificação diária dessas condições de segurança era realizada de forma puramente burocrática por meio de *checklists* impressos em papel, preenchidos manualmente pelos operadores no início de cada turno de trabalho. Tal método manual sofria com a falta de confiabilidade, visto que os trabalhadores frequentemente preenchiam os campos por mera formalidade, sem de fato testar se o botão de emergência ou o reset elétrico estavam operantes.

O referido hiato de fiscalização expunha a organização a riscos jurídicos e, pior, colocava em perigo iminente a integridade física do trabalhador caso um componente de segurança falhasse silenciosamente durante a produção.

A engenharia de controle contornou essa fragilidade operacional através do desenvolvimento de rotinas de *checklists* automáticos embutidas diretamente na lógica de inicialização do CLP e da IHM. Sob essa nova arquitetura digital, assim que o operador realiza o seu login na máquina no início da jornada, a IHM bloqueia a liberação do ciclo produtivo e exibe telas instrutivas mandatórias (Neves *et al.*, 2022).

O sistema força o operador a executar uma sequência de testes práticos controlados: pressionar o botão bimanual, acionar o botão de emergência físico e simular uma invasão de área; o CLP monitora eletronicamente se os relés de segurança responderam adequadamente aos comandos. Somente após a validação eletrônica automática de todos os dispositivos protetivos é que a bancada é liberada para iniciar a produção, unindo a automação avançada à salvaguarda da vida humana.

2.4 Perspectiva histórica e avanços teóricos do caso

O entendimento aprofundado de uma transição tecnológica exige a contextualização histórica das ferramentas de gestão de qualidade e das normas de arquitetura de *software* (Liker, 2021). Nas subseções seguintes, detalha-se a evolução das metodologias de melhoria contínua, a evolução dos modelos de bancadas industriais nas últimas décadas e a normatização internacional que rege o ciclo de receitas digitais em ambientes automatizados (Ribeiro, 2020).

2.4.1 Evolução do Kaizen e do Sistema Toyota de Produção (STP)

A consolidação do conceito de melhoria contínua remonta ao período pós-Segunda Guerra Mundial, quando o Japão enfrentava uma severa crise de escassez de recursos e infraestrutura industrial devastada (Chiavenato, 2022). Sob a liderança de engenheiros como Taiichi Ohno, a fabricante de automóveis Toyota desenvolveu o Sistema Toyota de Produção (STP), focando na eliminação implacável de desperdícios como superprodução, tempos de espera e defeitos de fabricação (Liker, 2021).

O *Kaizen* emergiu desse ecossistema não como uma ferramenta isolada de engenharia mecânica, mas como uma mudança cultural profunda em que os próprios operários de linha ganharam autonomia para identificar falhas e propor adaptações imediatas em seus postos de trabalho (Cesário, 2024).

Ao longo das décadas de 1970 e 1980, o STP foi internalizado pelo ocidente sob a denominação de *Lean Manufacturing* (Manufatura Enxuta), transformando permanentemente as diretrizes de desenvolvimento de projetos industriais globais (Liker, 2021). Na engenharia contemporânea, a aplicação do *Kaizen* evoluiu da simples reorganização física de ferramentas (metodologia 5S) para a integração direta com sistemas digitais e algoritmos de automação (Ribeiro, 2020).

A citada fusão histórica demonstra que a otimização de uma linha de produção atual depende da capacidade de capturar a vivência prática do trabalhador e convertê-la em rotinas de programação capazes de blindar o

processo contra falhas operacionais e desperdícios de tempo técnico (Cesário, 2024).

2.4.2 Contexto das bancadas industriais - das ilhas ao modelo modular

No curso do auge da Terceira Revolução Industrial, a automação das linhas de montagem baseava-se no conceito de "ilhas de automação", em que cada posto de trabalho era projetado de maneira isolada por fornecedores distintos. Embora essa abordagem descentralizada permitisse resolver problemas localizados rapidamente, a longo prazo ela gerou um cenário de obsolescência complexa e custos de manutenção exponenciais para as montadoras (Da Cás, 2020).

De acordo com Amuy (2022), a fiação rígida e permanente, os chamados sistemas conjugados, era o reflexo de uma era em que as modificações de veículos eram raras e as linhas de montagem permaneciam estáticas por mais de uma década.

Vilardouro (2024) destaca que, com a aceleração dos ciclos de lançamentos automobilísticos no início do século XXI, a flexibilidade estrutural passou a ditar a sobrevivência das empresas sistêmicas de autopeças. A engenharia de manufatura percebeu que manter conexões elétricas e mecânicas fixas inviabilizava o atendimento rápido às demandas das montadoras, forçando a transição para o modelo de arquiteturas abertas e modulares.

Historicamente, a bancada de trabalho deixou de ser um bloco monolítico e indissociável para se transformar em uma plataforma de automação padronizada, na qual a inteligência de controle (painel) opera de forma independente do gabarito físico de montagem, permitindo o reaproveitamento quase integral dos ativos industriais da organização (Da Cás, 2020).

2.4.3 Norma ISA-88

Para compreender a mecânica por trás da automação de processos flexíveis e do gerenciamento de receitas citado no relato, a comunidade técnica

internacional apoia-se nas diretrizes estabelecidas pela norma ANSI/ISA-88 (comumente referida como ISA-88) (Moraes, 2019).

Desenvolvida originalmente para padronizar sistemas de controle de processos em lote (*batch control*), a ISA-88 fornece a terminologia e os modelos de referência universais que separam fisicamente o modelo de equipamento (capacidade mecânica da bancada) do modelo de receita (estratégia de fabricação do produto específico) (Ribeiro, 2020). Essa separação lógica é o que garante que um programa de CLP genérico funcione em qualquer máquina, necessitando apenas da carga de parâmetros específicos externos (ISA, 2010).

A norma ISA-88 define rigorosamente a hierarquia das receitas, estabelecendo que uma receita de controle deve conter a estrutura de etapas lógicas e os parâmetros numéricos necessários para guiar a automação sem margem para ambiguidades técnicas (Ribeiro, 2020).

Quando uma IHM utiliza recursos como o *Select Menu* ou importação via planilhas estruturadas, ela está materializando os conceitos de modularidade de *software* previstos na norma, transformando sensores e atuadores em "módulos de controle" acionáveis sob demanda (Carvalho, 2026).

A adoção histórica desse padrão normativo eliminou a necessidade de técnicos realizarem programações pesadas e retrabalhos de código a cada novo produto, viabilizando o *setup* instantâneo e garantindo a rastreabilidade total de qualidade exigida pelas auditorias automotivas globais.

Importante explicar aqui que, ainda que o escopo original de desenvolvimento da norma ANSI/ISA-88 seja voltado estritamente ao controle de processos em batelada (*batch control*), a transposição de seus modelos conceituais de separação entre receitas (*recipes*) e equipamentos (*equipment*) tem se mostrado altamente eficaz no domínio da manufatura discreta (ISA, 2015). Essa convergência conceitual e aplicação prática fora do ambiente clássico de batelada encontram amparo técnico e normativo no relatório técnico ISA-TR88.00.02, amplamente difundido pelo padrão PackML (*Packaging Machine Language*). O referido relatório estende a filosofia de estados de máquina e modularidade da ISA-88 para linhas de montagem e empacotamento, justificando o empréstimo metodológico adotado nesta pesquisa para a estruturação lógica do software do CLP na bancada híbrida.

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação da Pesquisa

A presente investigação assume o caráter de pesquisa aplicada em que a premissa foi solucionar um problema concreto vivenciado na linha de produção automobilística no que tange aos elevados custos de engenharia e a falta de flexibilidade de *hardware* e *software* em postos de trabalho legados.

O conhecimento técnico mobilizado envolveu o desenvolvimento integrado da arquitetura mecânica, elétrica e de controle das bancadas automatizadas, contemplando estruturas metálicas, painéis elétricos, dispositivos de conexão rápida, sistemas de elevação, controladores lógicos programáveis (CLPs), interfaces homem-máquina (IHMs) e a padronização da lógica de controle. Dessa forma, a proposta ultrapassa a simples programação do sistema, abrangendo a padronização completa do hardware e do software utilizados nas bancadas.

A modelagem do problema adota uma abordagem mista, integrando os pontos de vista qualitativo e quantitativo. O viés qualitativo está na análise das percepções dos operadores, no mapeamento da usabilidade das interfaces, no cansaço gerado por ajustes ergonômicos incorretos e na complexidade das rotinas manuais de manutenção. Paralelamente, o caráter quantitativo solidifica-se pela medição e comparação de indicadores numéricos reais colhidos nos relatórios de engenharia da empresa.

Trata-se de uma pesquisa descritiva e exploratória, ou seja, o estudo é descritivo ao detalhar minuciosamente as características técnicas e físicas das bancadas antes e depois da padronização (a substituição do conjugado flexível por tomadas, a fixação do monitor e o funcionamento das telas antigas e novas). É também exploratório, pois investiga os limites práticos e as falhas operacionais do sistema de elevação de bancadas por controle analógico (0 a 10 V) e por *encoders* de forma empírica no cotidiano, propondo soluções adequadas à realidade da empresa sistemista.

O procedimento operacional eleito para a condução desta pesquisa foi o estudo de caso. A pesquisa volta-se de forma focada sobre o processo de montagem e controle de uma única unidade fabril especializada no desenvolvimento e fornecimento de sistemas de iluminação automotiva. Devido a rígidos critérios de conformidade comercial e acordos de confidencialidade industrial, a organização não pode ter sua identidade civil revelada, sendo tratada ao longo deste trabalho pelo nome fictício.

O estudo de caso permitiu isolar as variáveis específicas dessa empresa (processos de injeção, metalização, tratamento *antifog* e montagem de faróis) para propor melhorias customizadas que servem de modelo para o setor.

Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos por meio de observação participante realizada pelo pesquisador em seu ambiente profissional, considerando sua atuação direta no processo analisado.

Como complemento às observações de campo, foram realizadas conversas técnicas de caráter informal com colaboradores envolvidos nas atividades produtivas, com o objetivo de esclarecer aspectos operacionais e validar informações relacionadas ao funcionamento do processo. Essas interações não foram conduzidas como entrevistas estruturadas, mas como suporte qualitativo à compreensão do contexto fabril estudado.

3.2 Universo da pesquisa e o sujeito pesquisador

O cenário de desenvolvimento desta pesquisa foi a planta industrial da empresa fictícia Alfa Componentes Automotiva, nome este dado para preservar a identidade e o sigilo, sendo inserida na cadeia produtiva de autopeças como fornecedora sistemista de grandes montadoras instaladas no Brasil. O

ecossistema fabril em questão abriga desde o design inicial das peças até a montagem final de faróis e lanternas, integrando engenharias mecânica, elétrica e de *software*.

O sujeito condutor deste estudo de caso possui características metodológicas ímpares, uma vez que atuou sob a condição de pesquisador-observador interno dada a atuação deste autor como profissional técnico que atua diretamente no setor de manutenção e automação da referida planta, unindo a visão acadêmica de um estudante de Engenharia de Controle e Automação à experiência prática diária de quem lida diretamente com os gargalos gerados pelas paradas de máquina e modificações de receitas de produção.

3.3 Coleta de dados

A coleta de evidências empíricas ocorreu de forma intensiva e concentrada durante um período de dois meses, abrangendo os meses de janeiro e fevereiro de 2026. Para garantir a validade científica do estudo de caso por meio da triangulação de dados, foram combinados quatro instrumentos principais de coleta de dados.

Foi considerada a própria inserção profissional diária na empresa Alfa deste autor para acompanhar de perto a operação das bancadas, as reclamações ergonômicas dos operadores e os desafios físicos enfrentados pelas equipes de manutenção corretiva nas trocas de painéis.

Diariamente, ao longo de janeiro e fevereiro de 2026, o pesquisador registrou de forma manuscrita e digital um diário de campo contendo anotações contextuais sobre o comportamento das bancadas automatizadas. Foram catalogados os travamentos mecânicos decorrentes do desnivelamento do sistema de elevação da mesa, os episódios de quebra de braços articulados de suporte dos monitores e as dificuldades de comunicação nas trocas de turnos.

Sobre os aspectos éticos, a pesquisa foi conduzida considerando os princípios de confidencialidade, respeito aos participantes e preservação das informações organizacionais. As contribuições obtidas durante as interações com colaboradores ocorreram mediante concordância dos envolvidos, de forma voluntária e sem identificação individual dos participantes. Além disso, foram preservados quaisquer dados que pudessem permitir a identificação da

empresa, dos colaboradores ou de informações estratégicas relacionadas ao processo produtivo analisado.

Foi estruturado um acervo visual composto por um conjunto de fotografias apresentados no presente trabalho. Essas imagens registraram a evolução real dos componentes: as lógicas das telas de IHM (telas antigas versus telas novas com menus de seleção de receitas e botões de importação de planilhas Excel), a disposição interna dos componentes no painel elétrico (bornes, contadores e módulos de CLP) e a estrutura física das tomadas industriais desconectáveis. Complementarmente, foram analisados relatórios internos de horas técnicas de programação do ano de 2022 para fundamentar o cálculo dos custos operacionais pré-padronização.

3.4 Procedimento de análise dos dados

Os dados brutos coletados, de natureza visual, textual e numérica, passaram por um processo de sistematização e categorização para fins de interpretação científica. O método adotado dividiu-se em três etapas lógicas: os relatos verbais e as observações práticas colhidas pelo pesquisador no cotidiano industrial foram organizados em arquivos digitais em formato de áudio técnico e, posteriormente, transcritos integralmente. Vale ressaltar que as gravações são apenas deste autor, como observador participante, e não de outros. Essas transcrições foram confrontadas com as descrições das fotografias para garantir que as evidências visuais coincidissem com os relatos de campo.

As bancadas foram analisadas comparativamente sob critérios de flexibilidade, custos e ergonomia. Isolaram-se os dados da "bancada antiga" (comprimento reduzido, fiação rígida conjugada, monitor móvel e dependência de 200 horas de programação externa por linha) face aos dados da "bancada padronizada" (comprimento unificado de 1.200 a 1.500 mm, tomadas de engate rápido, monitor fixo a um cálculo antropométrico baseado em zonas de alcance ótimo para trabalho em pé., *checklist* digital mandatório de EPIs/emergência e receitas automatizadas).

Os dados de custos extraídos de documentos internos da empresa Alfa foram considerados apenas para cálculos financeiros simples de

custo-benefício. Essa etapa quantitativa permitiu mensurar a economia real gerada pela substituição do modelo antigo pelo novo padrão modular.

4 ESTUDO DE CASO

O desenvolvimento realizado nesta pesquisa não traz apenas a programação de controladores lógicos programáveis. A proposta contempla a padronização completa da arquitetura das bancadas automatizadas, abrangendo aspectos mecânicos, elétricos e de controle, permitindo que diferentes dispositivos fossem instalados sobre uma mesma plataforma física com reduzida necessidade de modificações estruturais. As informações apresentadas foram obtidas diretamente por meio de observação participante, conversas com a equipe técnica e análise de relatórios durante os meses de janeiro e fevereiro de 2026. As seções a seguir detalham a realidade operacional da linha de montagem, traduzindo as transcrições dos áudios e correlacionando o texto diretamente ao acervo dos registros fotográficos técnicos apresentados mais adiante.

4.1 Cenário corporativo e processo produtivo de iluminação

O estudo de caso foi conduzido na planta industrial da Alfa. A empresa atua no desenvolvimento e fornecimento de sistemas de iluminação para o setor automobilístico, integrando internamente as engenharias de design, mecânica e elétrica. A parte de desenvolvimento da placa eletrônica é realizada 100% internamente pela engenharia da Alfa.

O fluxo de manufatura da planta contempla as seguintes etapas verticais: a injeção plástica, que é a confecção de todos os moldes e definição das peças que serão injetadas internamente e o que será injetado em parceiros externos; o tratamento de componentes do Kit, referindo-se ao processamento focado na metalização por deposição a vácuo (no caso dos refletores) e no tratamento das lentes externas.

Sobre a aplicação de verniz antifog, tem-se que se tratar de um verniz especial estritamente do lado de dentro da lente (na parte interna do farol), cuja função química é evitar a condensação de umidade e o embaçamento do conjunto óptico. Posto onde ocorre a consolidação de todos os componentes injetados, metalizados e eletrônicos nas bancadas automatizadas.

4.2 Diagnóstico da linha legada (antes da padronização)

A configuração original das bancadas antes da implementação do padrão técnico apresentava sérias limitações físicas, ergonômicas e financeiras. Essas características estão documentadas no acervo visual do trabalho através da macroestrutura original do posto de trabalho (Figura 1).

FIGURA 1 - Foto da bancada como um todo antes da aplicação do padrão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

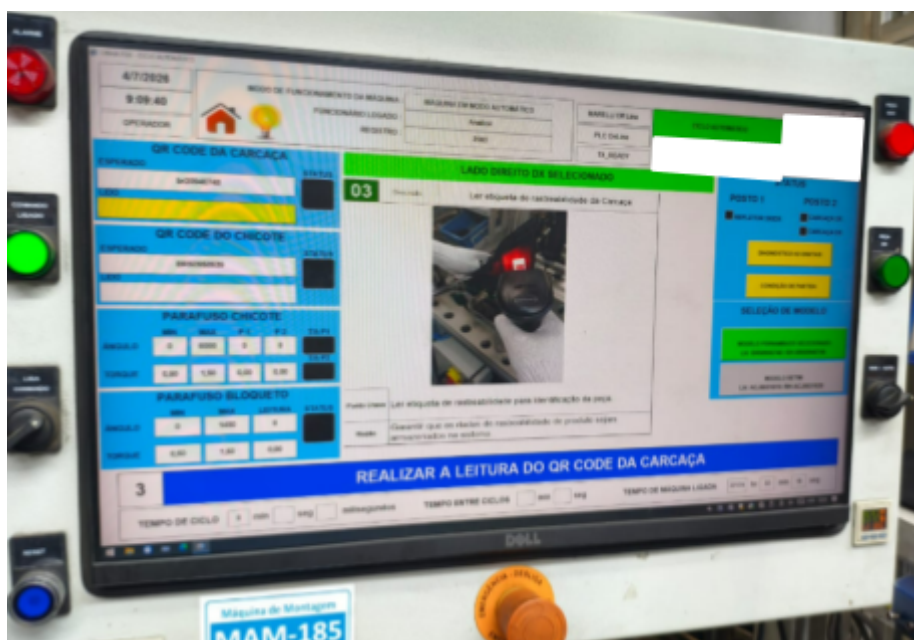
A observação detalhada do posto original expõe o cenário de fragmentação e rigidez característico das chamadas ilhas de automação. O arranjo físico limitava as ações de manutenção devido à fiação exposta e à dependência mecânica, validando os relatos técnicos de paradas frequentes por falta de flexibilidade estrutural e operacional.

4.2.1 Especificidade de *layout* e falta de flexibilidade

As últimas máquinas utilizadas antes da padronização eram extremamente específicas para determinados produtos. Se o farol a ser montado fosse pequeno, a bancada era construída sob medida para ele, o que trazia um ganho inicial de layout em planta.

Contudo, essa configuração eliminava a flexibilidade operacional: a seleção de defeitos no painel e o gabarito, entendido como dispositivos de montagem, eram dedicados exclusivamente para o lado esquerdo (LH) ou para o lado direito (RH), inviabilizando o uso de outros produtos nessa mesma estrutura. A tela da interface operava em uma configuração antiga, limitando a interação e a troca de informações (Figura 2).

FIGURA 2 - Supervisório antes da aplicação do padrão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A análise visual da interface antiga confirma o diagnóstico de alta saturação cognitiva relatado nas entrevistas informais de campo. A poluição visual e a disposição confusa dos comandos comprometiam a identificação ágil de alarmes de processo, o que justificava os erros frequentes na seleção manual de receitas e a elevada curva de aprendizado exigida dos novos trabalhadores.

Na Figura 3, tem-se uma demonstração da condição representando a falta de padronização observada nas interfaces de operação reproduzia-se,

com igual gravidade, na infraestrutura interna responsável pela distribuição de potência e processamento de sinais de controle da célula legada.

FIGURA 3 - Painel Elétrico antes da aplicação do padrão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Pode-se enxergar uma elevada densidade de condutores dispostos sem o devido alinhamento técnico nos trilhos DIN. A ausência de identificação clara de bornes e a organização complexa da fiação dificultavam o rastreamento físico de falhas, força a equipe de manutenção a se dedicar em longos períodos de interrupção para realizar intervenções corretivas simples.

4.2.2 Dependência de programação e custos de integração

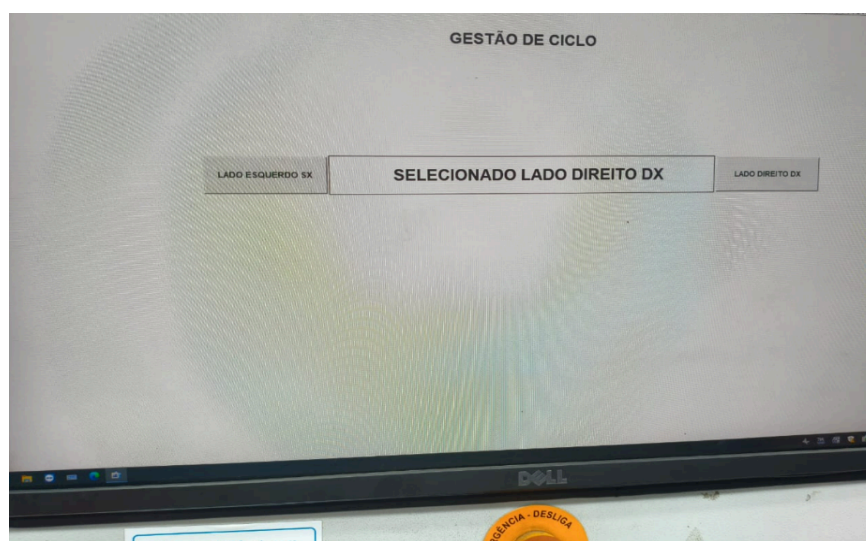
Antes da padronização, a empresa sofria com uma severa dependência de mão de obra terceirizada para automação e integração de sistemas. Como as interfaces eram parecidas, mas não idênticas, qualquer modificação ou adequação técnica exigia alterar todas as bancadas individualmente, máquina por máquina, até concluir a linha.

Para cada linha de produção, contratava-se um pacote padrão de aproximadamente 200 horas de programação externa para realizar os refinamentos. Esse volume de horas escalava de acordo com o tamanho da linha.

O último projeto instalado antes do novo padrão era composto por 12 máquinas em uma linha e 8 em outra, demandando um total de 400 horas de programação para refinar o sistema. Baseado em relatórios internos da empresa Alfa de horas de nov/2022, o custo da hora técnica era de R\$ 130,00, tornando as modificações de engenharia um processo excessivamente caro para a empresa.

Na Figura 4, tem-se a tela demonstrando a gestão de ciclo, com a possibilidade de seleção do lado do produto em questão, em uma realidade anterior a aplicação da padronização e que se refletia diretamente nas telas operacionais, que dependiam de parametrizações manuais complexas.

FIGURA 4 - Forma de seleção de produto antes da aplicação do padrão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Evidencia-se que o formato de seleção anterior obrigava o operador a navegar por menus pouco intuitivos ou a realizar ajustes mecânicos diretos no dispositivo. Essa dinâmica corrobora as anotações do diário de campo, provando que a falta de um carregamento automatizado gerava desperdícios crônicos de tempo de setup e propiciava falhas humanas por inserção incorreta de dados.

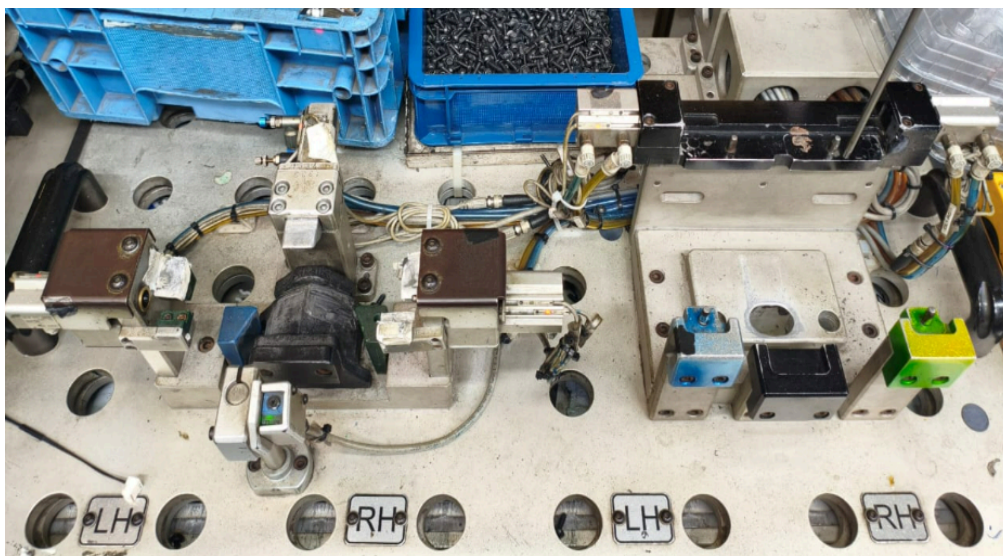
4.2.3 Gargalo do sistema elétrico conjugado

O ajuste de altura da bancada é realizado por motores elétricos instalados na estrutura inferior do equipamento. Esses motores acionam o mecanismo de elevação responsável pelo deslocamento vertical da superfície de trabalho, permitindo adequar a posição operacional às características ergonômicas dos diferentes usuários. O controle do movimento ocorre por meio do sistema de automação da bancada, garantindo acionamento uniforme, estabilidade estrutural e repetibilidade do posicionamento durante as atividades produtivas.

Nas bancadas antigas, a ligação entre a estrutura mecânica e o painel elétrico era feita por um "corrugado", que consiste em um tubo plástico flexível preto por onde passava toda a fiação. Essa configuração gerava um vínculo físico direto e indissociável entre o painel e a bancada.

Caso a equipe de manutenção precisasse remover o painel elétrico para realizar um reparo corretivo ou uma intervenção pesada, era impossível retirá-lo da máquina. Embora a necessidade de remoção completa nunca tivesse ocorrido na prática, o sistema corrugado limitava a manutenibilidade e prendia o técnico ao chão de fábrica. Essa rigidez física estendia-se à base mecânica de fixação, que era projetada de forma estática como visto na Figura 5.

FIGURA 5 - Dispositivo de montagem antes da aplicação do padrão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O registro mecânico confirma que o dispositivo de montagem operava como uma estrutura monolítica e sem flexibilidade para acomodar variações dimensionais. Qualquer nova especificação exigida pelas montadoras demandava a substituição completa ou usinagem pesada do dispositivo, validando os relatos do autor sobre os altos custos de ferramentaria externa antes da implementação da arquitetura modular.

4.2.4 Instabilidade no sistema de elevação e suportes de monitores

Sob a ótica da ergonomia, as bancadas originais apresentavam limitações em dois pontos críticos. O primeiro refere-se ao suporte de monitor industrial Dell que, antes da aplicação do padrão, era montado de forma fixa diretamente na própria estrutura de base da bancada e trazia as lâmpadas sinalizadas posicionadas junto a ele, conforme a configuração inicial apresentada na Figura 2 anteriormente citada.

Esse arranjo rígido limitava o ajuste postural dos operadores, o que motivou a engenharia a introduzir o braço articulado móvel somente a partir do desenvolvimento da primeira linha aplicada ao padrão. Contudo, essa movimentação contínua gerava a constante possibilidade de levar o monitor

para uma área de colisão física com as ferramentas de montagem ou com as caixas de alimentação de componentes ópticos, resultando em danos frequentes por impacto.

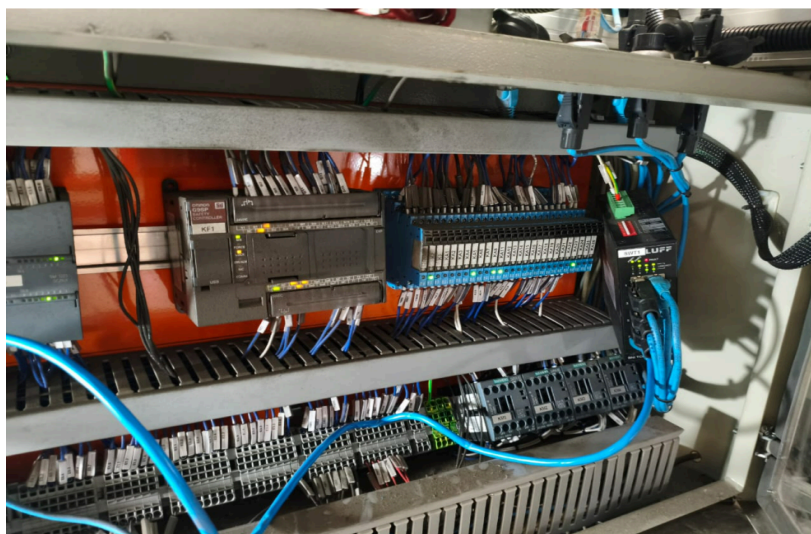
Para o desnivelamento da mesa, tem-se que o sistema de elevação da bancada contava com apenas um comando para gerenciar dois motores elétricos. Devido a travamentos mecânicos ou distribuição desigual de carga, a mesa frequentemente ficava desnivelada. Todos esses motores originais trabalhavam com um sinal analógico de retorno de posição operando na faixa de 0 a 10 Volts.

4.3 Evolução para o padrão de bancada (resultados práticos)

A engenharia da Alfa desenvolveu e aplicou um padrão de arquitetura de controle unificado. As melhorias físicas e de hardware estão documentadas detalhando as alterações de painéis, tomadas, dispositivos e ergonomia, correspondendo diretamente às fotos do acervo. Além da padronização dos painéis elétricos, tomadas industriais, interfaces de operação e lógica de controle, também foram padronizados os componentes relacionados ao sistema de elevação das bancadas, garantindo uniformidade no funcionamento dos motores, facilidade de manutenção e intercambialidade entre equipamentos.

A reorganização interna do painel elétrico na primeira linha piloto é apresentada tal como se vê na Figura 6.

FIGURA 6 - Painel elétrico da primeira linha aplicada a padronização

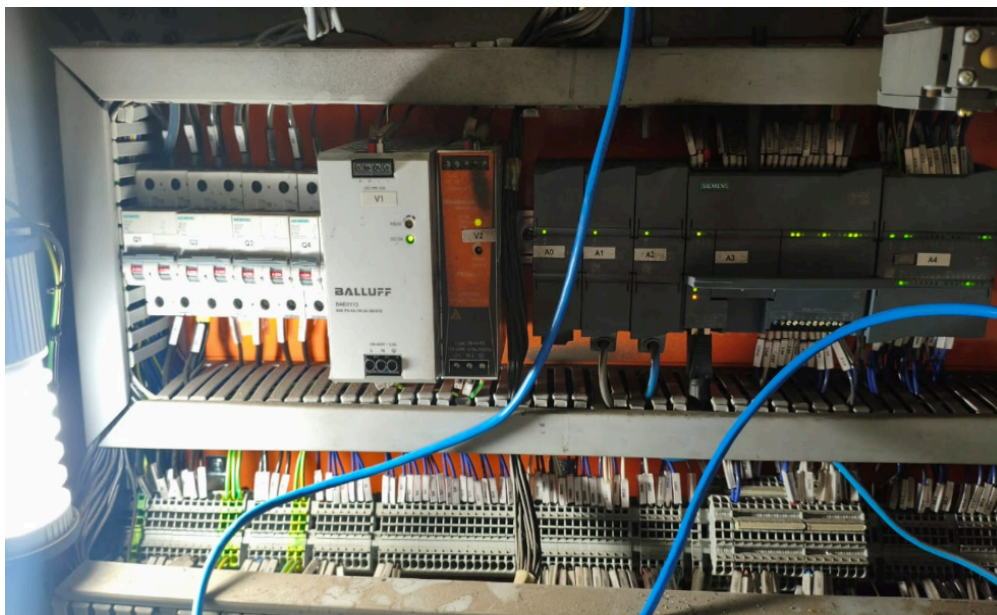


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A análise visual do painel revela o alinhamento inicial dos componentes nos trilhos DIN e a separação dos circuitos de potência. Essa distribuição espacial válida a eficácia do padrão de hardware adotado para a primeira linha, reduzindo a complexidade em relação ao modelo legado.

Para além da reorganização dos disjuntores e bornes internos, a face frontal e a integridade de acabamento da caixa elétrica também foram revistas na implantação da linha inicial, conforme Figura 7.

FIGURA 7 - Painel elétrico da primeira linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Esta segunda perspectiva do conjunto elétrico evidencia o cuidado com o invólucro protetivo externo, minimizando a exposição dos componentes a resíduos industriais. Esse avanço técnico assegurou o patamar de confiabilidade necessário para a transição modular da célula piloto.

Com o novo padrão, o comprimento da bancada foi unificado em 1.200 mm, independentemente do tamanho do produto. Para a última linha instalada, foi desenvolvida uma versão maior com 1.500 mm, uma vez que o comprimento do produto era de aproximadamente 1.200 mm. Contudo, mesmo com o aumento dimensional do chassi mecânico nessa ramificação, o painel elétrico continuou sendo rigorosamente o mesmo para garantir a flexibilidade das bancadas e a total intercambialidade dos ativos. Os componentes internos do painel elétrico (como bornes, contadores, fontes Balluff e o Controlador Lógico Programável Siemens) foram padronizados em sua totalidade, abrindo exceções apenas para componentes fixos sem alternativas de mercado, conforme registrado nas fotos internas dos painéis.

Para solucionar o problema do tubo plástico flexível corrugado, a última versão da bancada padronizada passou a utilizar um sistema de tomada industrial multipolar de engate rápido. A interface dessas tomadas na primeira linha pode ser vista (Figura 8).

FIGURA 8 - Interfaces de tomadas da primeira linha aplicada a padronização

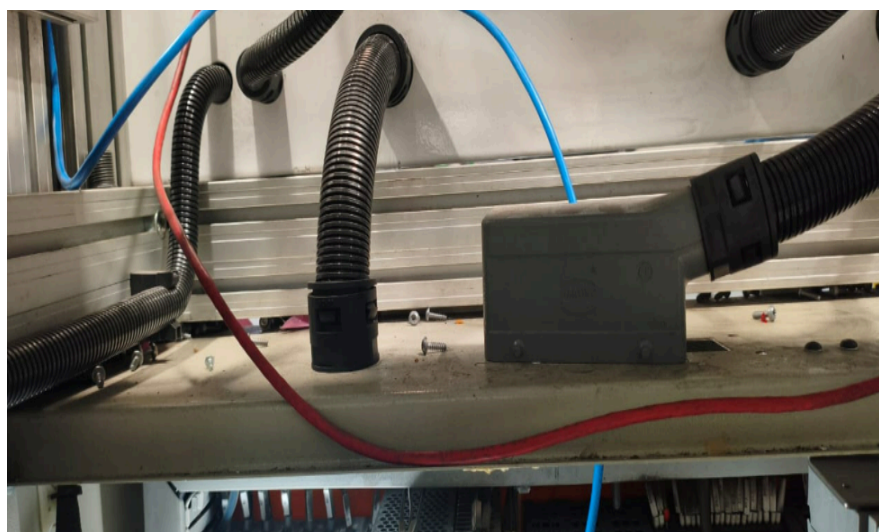


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Tem-se uma visão da quebra do vínculo permanente entre comando e chassi através da instalação dos conectores rápidos. Essa alteração técnica permitiu à equipe de manutenção a possibilidade teórica de isolar os circuitos elétricos principais de forma externa.

O detalhamento e o posicionamento dessas tomadas multipolares na base mecânica da primeira linha piloto são exibidos (Figura 9).

FIGURA 9 - Interfaces de tomadas da primeira linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O registro foca nos invólucros metálicos e na vedação das conexões desconectáveis da primeira fase do projeto. Esse arranjo de hardware garantiu a proteção dos pinos de sinal contra a agressividade do chão de fábrica, validando o ganho inicial em manutenibilidade.

Na primeira fase da padronização, o sistema ainda apresentava limitações: o ciclo contava com apenas quatro sensores disponíveis, exigindo ajustes específicos no menu de passos (TT) e na nomeação de componentes para cada posto de trabalho.

Embora reduzisse a complexidade e desse mais autonomia à equipe interna, a padronização completa não ocorria de forma imediata apenas descarregando o programa. A interface de tela desenvolvida nessa etapa inicial para o mapeamento das poucas variáveis disponíveis é apresentada conforme Figura 10.

FIGURA 10 - Tela de parametrização de nome dos sensores e leituras da primeira linha aplicada a padronização

NOME DOS COMPONENTES

Seleção de Receita LH RH RL 2910 LOW DX

PRESENÇA DE PEÇAS

COMPONENTE 1: CARCAÇA

COMPONENTE 2: / FECHA MASCARA

COMPONENTE 3: Componente 3

COMPONENTE 4: Componente 4

LEITURAS

LEITURA 1: CARCAÇA

LEITURA 2: PCB E-SHAPE

LEITURA 3: CARCAÇA

LEITURA 4: CARCAÇA

EDITAR SALVAR

MENU RECEITAS RELATÓRIO PROD. DOCUMENTAÇÃO

CICLO AUTOMÁTICO GESTÃO USUÁRIO PARAFUSAMENTO ALARMES

CÂMERA MOV. MANUAL GESTÃO DE CICLO

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A interface gráfica de primeira geração ilustra a área em que o técnico inseria manualmente as tags de identificação dos sensores. Apesar do avanço em relação ao modelo sem tela, a parametrização restrita a quatro canais lógicos fixos evidencia o gargalo técnico que antecedeu o desenvolvimento da carga automática de dados.

A configuração de receitas e as regras de controle de leituras estruturadas na tela da IHM dessa primeira linha piloto são exibidas como se vê na Figura 11.

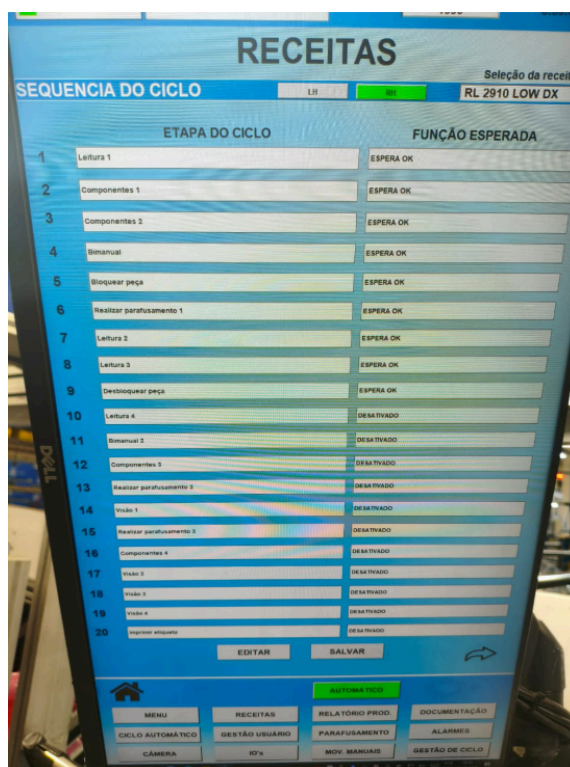
FIGURA 11 - Tela de Criação de receita e configuração de leituras da primeira linha aplicada a padronização

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Pode-se então entender que se trata de um ambiente de desenvolvimento de receitas original, operando de forma semiautomática. O operador dispunha de comandos locais para salvar parâmetros de lote, porém o processo ainda demandava inserções manuais textuais repetitivas para cada variante óptica.

O sequenciamento cronológico e o andamento dos passos operacionais configurados para a máquina de primeira geração são visualizados como representado na Figura 12.

FIGURA 12 - Configuração de ciclo máquina da primeira linha aplicada a padronização

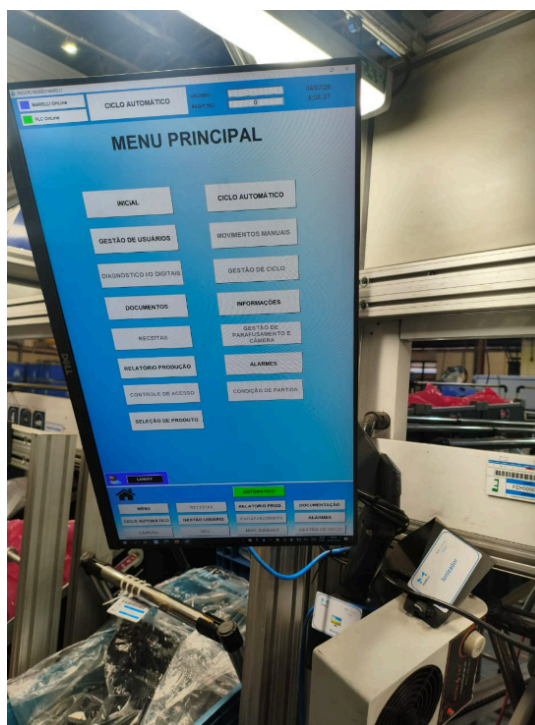


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A tela técnica de ciclo detalha a ordem temporal executada pelo CLP na linha inicial. A exibição linear das etapas de montagem agilizou a operação, mas a rigidez lógica forçava a equipe a ajustar valores linha por linha no terminal a cada nova especificação de farol.

Buscando mitigar as limitações de interface de vídeo mapeadas no cenário original, a engenharia realizou alterações no suporte mecânico das telas. Como contrapartida ao antigo modelo rígido, a primeira linha modificada sob as novas diretrizes de projeto marcou a primeira vez em que se resolveu utilizar o braço articulado móvel no layout da estação, como tratado na Figura 13.

FIGURA 13 - Fixação do monitor da primeira linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A fixação rígida adotada na primeira linha, documentada na **Figura 13**, foi projetada para mitigar falhas crônicas identificadas no histórico da planta da Alfa. No desenho arcaico anterior, constatou-se que a utilização de suportes e braços articulados móveis para os monitores atuava como um vetor contínuo de quebras e avarias, devido à força mecânica excessiva aplicada pelos operadores na tentativa de ajustar o ângulo de visão ao longo dos turnos.

Além do dano patrimonial frequente ao hardware, a oscilação descontrolada dos braços gerava desalinhamento postural sistemático nos trabalhadores, induzindo flexões de pescoço e inclinações severas de tronco. Desse modo, o engessamento físico por meio do suporte fixo blindou as

interfaces contra colisões de caixas e ferramentas, estabilizando as condições de operação

No entanto, a flexibilidade desse arranjo inicial gerou problemas crônicos de colisões periféricas. Para erradicar em definitivo essa vulnerabilidade técnica e operacional, o braço articulado foi eliminado nas frentes de expansão subsequentes do projeto. O monitor industrial Dell retornou a uma fixação totalmente rígida, estática e definitiva sobre o chassi do equipamento (Figura 15 mais adiante).

A engenharia estabeleceu uma altura padrão fixa que atende rigorosamente aos critérios de ergonomia, posicionando a maior parte dos comandos de acionamento e a interface de visualização a aproximadamente 1.200 mm de altura em relação ao solo. Essa alteração de layout eliminou o manuseio inadequado e extinguiu o histórico de danos físicos causados por impactos mecânicos acidentais.

O registro mecânico confirma o engessamento intencional do monitor Dell ao chassi estrutural da bancada. A eliminação completa do suporte articulado móvel protegeu o ativo industrial contra impactos severos e garantiu uma postura ortostática neutra e ergonômica para os operadores.

A consolidação física macro e o layout completo dessa primeira estação de trabalho modificada podem ser visualizados em sua totalidade, como ilustrado na Figura 14.

FIGURA 14 - Bancada como um todo da primeira linha aplicada a padronização

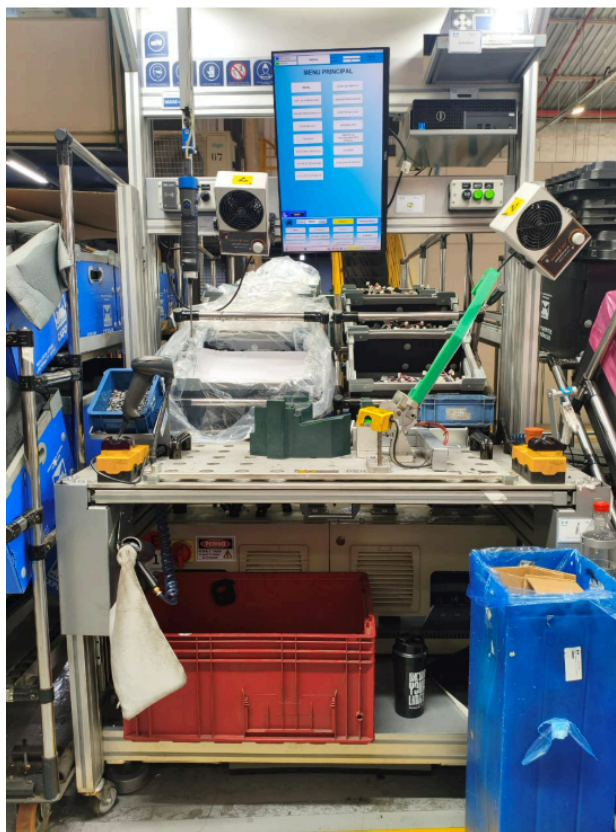


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A visão panorâmica da primeira bancada padronizada atesta a uniformidade dimensional alcançada no início do projeto. A disposição dos periféricos e dos botões bimanuais na estrutura metálica unificada estabeleceu a base geométrica padrão de 1.200 mm adotada pela planta.

A evolução do projeto seguiu para o desenvolvimento de uma segunda geração de postos de trabalho, onde a maturidade estrutural e a flexibilidade foram refinadas como se vê na Figura 15.

FIGURA 15 - Bancada como um todo da segunda linha aplicada a padronização

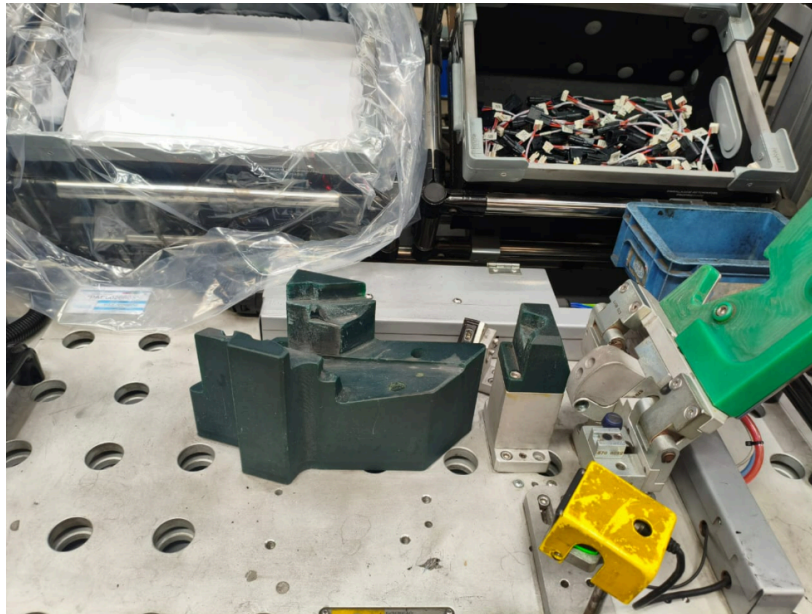


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A panorâmica da estação de segunda geração revela o aperfeiçoamento do design físico, destacando a organização dos chicotes elétricos e periféricos integrados. A estrutura limpa consolida o conceito de modularidade avançada, eliminando calhas sobressalentes e otimizando o espaço útil no chão de fábrica.

A flexibilização mecânica dessa segunda linha piloto foi amparada pela construção de gabaritos de ferramentaria interna intercambiáveis e altamente adaptáveis, como mostra a Figura 16.

FIGURA 16 - Um dos dispositivos de montagem da segunda linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A imagem exhibe o dispositivo de fixação modular instalado na bancada de segunda geração. Ao invés do bloco monolítico do passado, o gabarito conta com garras ajustáveis e sensores dedicados para acomodar novas variantes com simples ajustes rápidos de encaixe, reduzindo a dependência de usinagem externa.

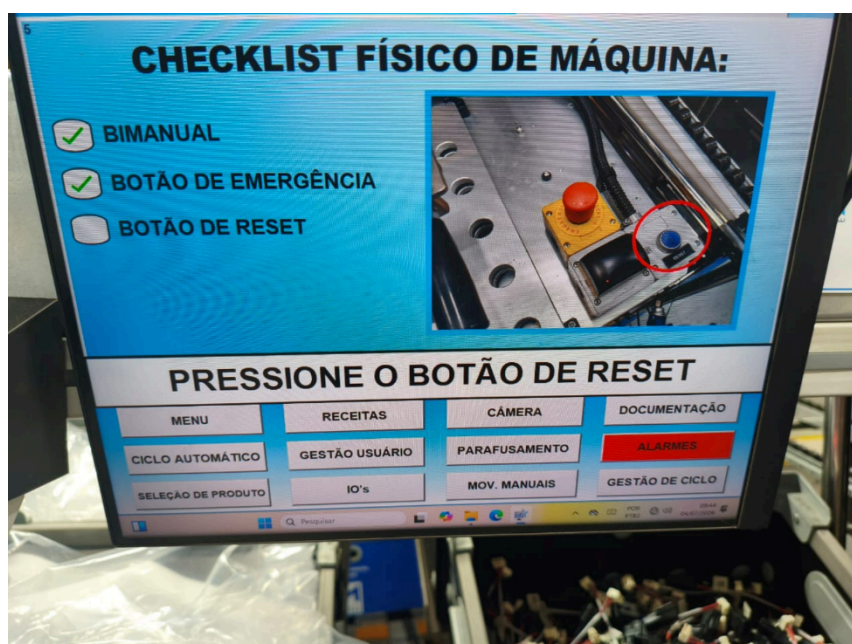
4.4 Inovação e evolução do *software* industrial

As modificações de lógica e telas de Interface Homem-Máquina (IHM) permitiram flexibilizar a operação da fábrica, documentadas na evolução da interface e nas telas de receitas coletadas *in loco*.

A segunda geração da bancada padronizada eliminou a fragilidade das verificações manuais de segurança, tornando-se a pioneira na implementação do *checklist* automático de turno. Quando o operador realiza o primeiro login no terminal no início do turno, a IHM bloqueia a máquina e exige o preenchimento de um pequeno *checklist* manual simples na tela, verificando o uso correto de EPIs.

Logo em seguida, o sistema executa o *checklist* automático obrigatório: a máquina força o operador a acionar fisicamente os comandos de emergência, realizar o reset elétrico e testar o acionamento bimanual. A tela de validação dessa rotina de segurança eletrônica mandatária é exibida como mostra a Figura 17.

FIGURA 17 - *Checklist* de segurança desenvolvido a partir segunda linha aplicada a padronização



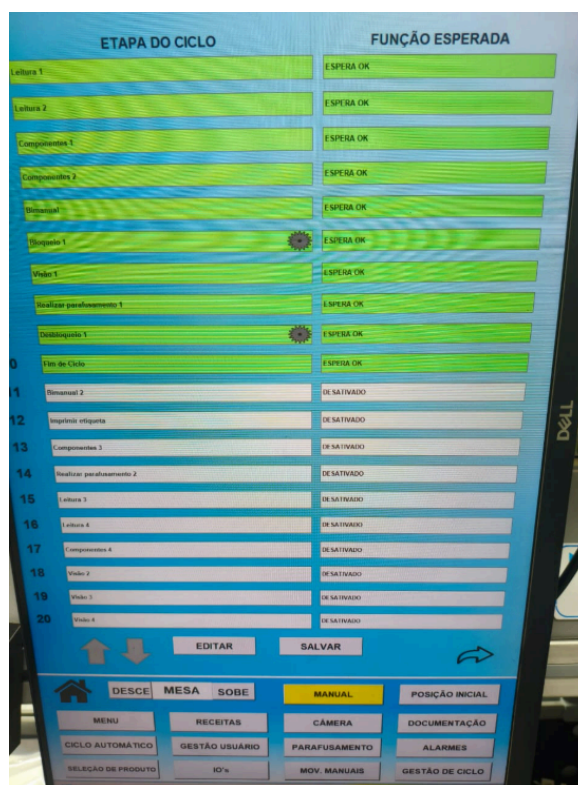
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A interface gráfica de proteção atesta a eficiência do intertravamento eletrônico do *software*. Ao travar as funções de ciclo até que o operador acione os dispositivos de emergência, o CLP mitiga riscos de acidentes causados por falhas elétricas ocultas e assegura a conformidade estrita do posto às normas de segurança ocupacional.

As telas atuais exibem o sequenciamento completo das etapas do ciclo de montagem (como "Leitura 1", "Componentes 1", "Bimanual", "Bloqueio 1", "Aperto" e "Fim de Ciclo") e mostram o status dinâmico em tempo real de cada fase, indicando estados de espera ou atuação ("Espera OK", "Desativado") através de sinalizações coloridas e intuitivas. Importante ressaltar que nesse ponto, tem-se o auxílio visual para quem vai configurar o que está ativado no ciclo fica em "verde".

A configuração do ciclo máquina desenvolvida na segunda linha aplicada ao padrão é visualizada como mostra a Figura 18.

FIGURA 18 - Configuração do ciclo máquina da segunda linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Nas bancadas de primeira geração, a criação de receitas era inflexível: cada campo ("Componente 1", "Componente 2") correspondia rigidamente a um único sensor físico fixo no ciclo. Para criar uma receita nova, o sistema operava sem automação externa, dependendo exclusivamente da função *Transfer* integrada à interface gráfica (Figura 19).

O acionamento desse comando de transferência funcionava na prática como se fosse um "salvar como" da receita ativa: o algoritmo realizava a cópia integral de todos os parâmetros lógicos, temporizações e mapeamentos de sensores daquele modelo para uma nova memória aberta. A partir dessa replicação idêntica dos dados no terminal, o operador ou técnico de manutenção executava manualmente as alterações pontuais exigidas pelo

novo componente óptico, contornando o engessamento sistêmico antes da evolução para a importação de planilhas.

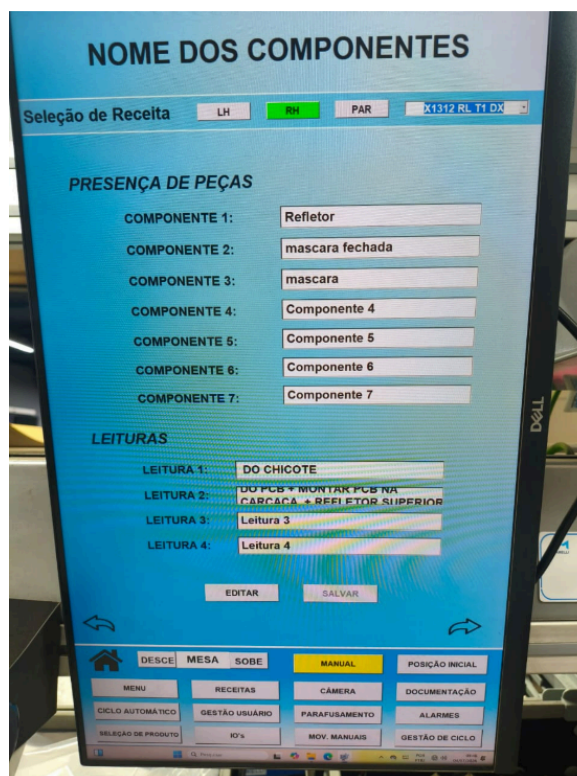
FIGURA 19 - Tela de Criação de receita e configuração de leituras da primeira linha aplicada a padronização

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A visualização do terminal confirma o engessamento mecânico-lógico da interface de primeira fase. O preenchimento ponto a ponto de variáveis e a digitação manual de matrizes de dados fixavam as leituras no terminal, atuando como o gargalo técnico que impulsionou o desenvolvimento do sistema automatizado de planilhas.

O detalhamento e a nomenclatura dos sensores de presença associados a essa etapa de desenvolvimento da primeira linha piloto são exibidos como mostra a Figura 20.

FIGURA 20 - Tela de parametrização de nome dos sensores e leituras da primeira linha aplicada a padronização

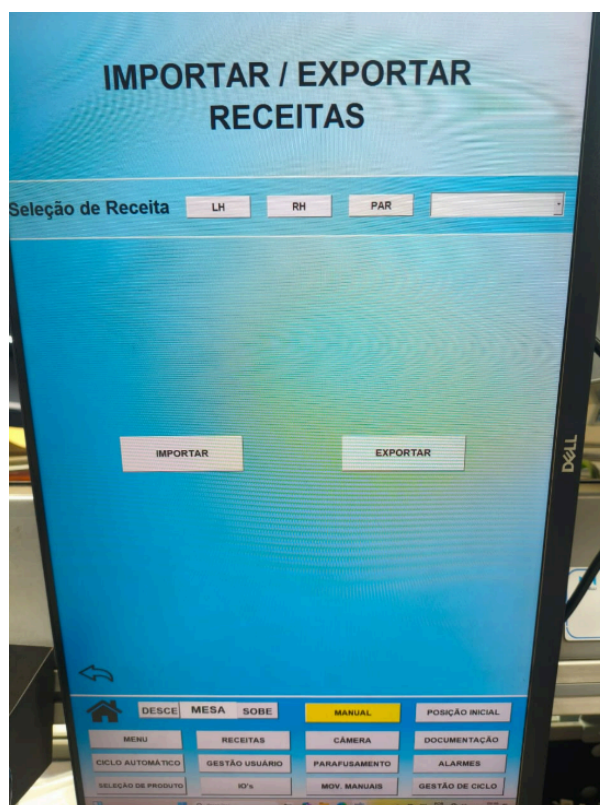


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O ambiente de configuração exibido corrobora o esforço inicial de padronização do dicionário de dados locais. A edição direta das tags na tela mitigou o problema de alteração no código-fonte do CLP, pavimentando o caminho para o recurso de exportação externa de matrizes.

A evolução do *software* implementou o botão *Importar* diretamente nas telas de receita. Ao selecionar o modelo da lanterna (ex: RL 2910 LOW DX ou X1312 RL T1 DX) e acionar o comando, o sistema importa e exporta automaticamente planilhas estruturadas em formato Microsoft Excel contendo os números de peças (*Part Numbers*), códigos de rastreabilidade, sequenciamento de leitura de código QR de carcaças e chicotes, além das tolerâncias de torque e ângulo para as parafusadeiras. A interface de gerenciamento e movimentação de dados desenvolvida na segunda linha para esse fim é apresentada como mostra a Figura 21.

FIGURA 21 - Tela de exportação de receitas da segunda linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A tela expõe o mecanismo de integração que automatizou a carga de limites operacionais. O acionamento digital substituiu a digitação manual, garantindo que tolerâncias de torque e ângulo das parafusadeiras sejam transferidas instantaneamente à memória do CLP sem propensão a erros de digitação.

Nas linhas de montagem mais recentes, o CLP realiza a identificação do dispositivo mecânico através de uma combinação específica de duas saídas elétricas. O operador executa a seleção da receita diretamente na tela atualizada da IHM. O painel elétrico da segunda linha responsável por processar essa inteligência de dados é exibido como mostra a Figura 22.

FIGURA 22 - Painel elétrico da segunda linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A análise técnica do painel de segunda geração atesta o amadurecimento físico do projeto. A disposição dos cartões de entrada e saída Siemens e a organização dos bornes refletem a estabilidade da topologia elétrica modular unificada desenvolvida para a planta.

A unificação física desse painel de segunda geração é integrada pelas conexões elétricas desconectáveis dispostas em sua base, como mostra a Figura 23.

FIGURA 23 - Interface das tomadas da segunda linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O registro fotográfico valida a transição conceitual para o modelo de acoplamento rápido da caixa de comando, embora com restrições nesta etapa do projeto. Ao contrário das versões posteriores plenamente modulares, a interface desenvolvida para a segunda linha ainda não era totalmente dissociativa em relação ao chassi da máquina, uma vez que mantinha a presença do tubo plástico flexível corrugado instalado à sua esquerda, conforme se vê na Figura 23.

O arranjo periférico complementar e o acoplamento mecânico seguro dessas interfaces na fiação externa da segunda linha são ilustrados como mostra a Figura 24.

FIGURA 24 - Interface das tomadas da segunda linha aplicada a padronização

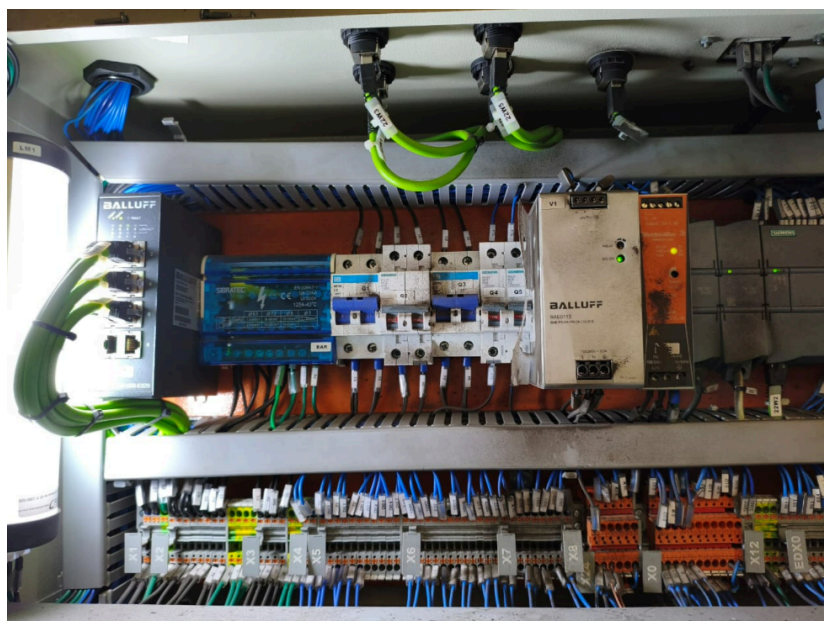


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A aproximação das tomadas multipolares detalha o mecanismo de travamento lateral assistido. Os invólucros garantem estanqueidade e integridade física aos sinais elétricos sob regime de vibração contínua do chão de fábrica, evitando mau contato.

Para complementar as evidências de montagem elétrica desse conjunto, uma perspectiva lateral interna do painel elétrico de segunda geração é exposta como mostra a Figura 25.

FIGURA 25 - Painel elétrico da segunda linha aplicada a padronização

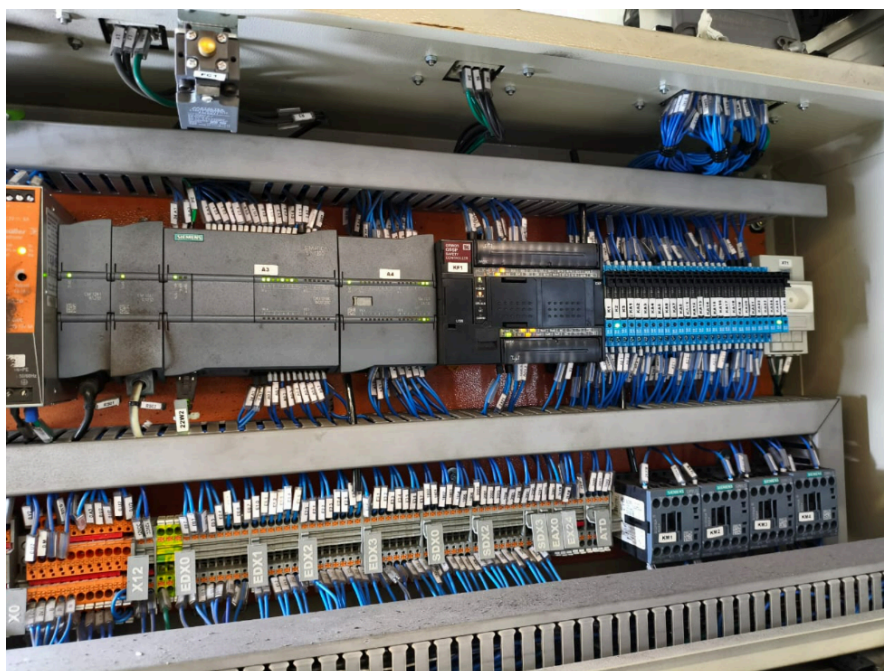


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A visualização confirma o rigor dimensional e a unificação dos canais de cabeamento estruturado. O isolamento dos condutores de potência impede surtos de tensão nos circuitos eletrônicos sensíveis, preservando os ativos industriais da organização.

O fechamento e o alinhamento geométrico dos componentes internos que guiam o barramento elétrico na segunda fase piloto são detalhados como mostra a Figura 26.

FIGURA 26 - Painel elétrico da segunda linha aplicada a padronização

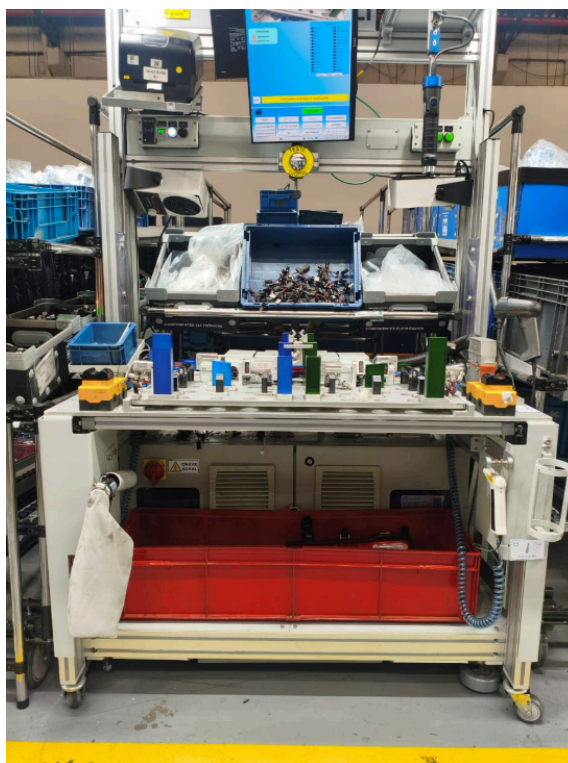


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A imagem foca nos trilhos DIN e bornes identificados da segunda bancada. Essa constância na topologia de hardware facilitou as intervenções rápidas das equipes de eletricitistas, reduzindo o tempo de máquina parada (*downtime*) na linha de montagem da Alfa.

A engenharia expandiu essas diretrizes físicas e de *software* para a implantação de uma última ramificação de bancadas automatizadas na planta, cujo layout macro unificado pode ser observado como mostra a Figura 27.

FIGURA 27 - bancada como um todo da última linha aplicada a padronização

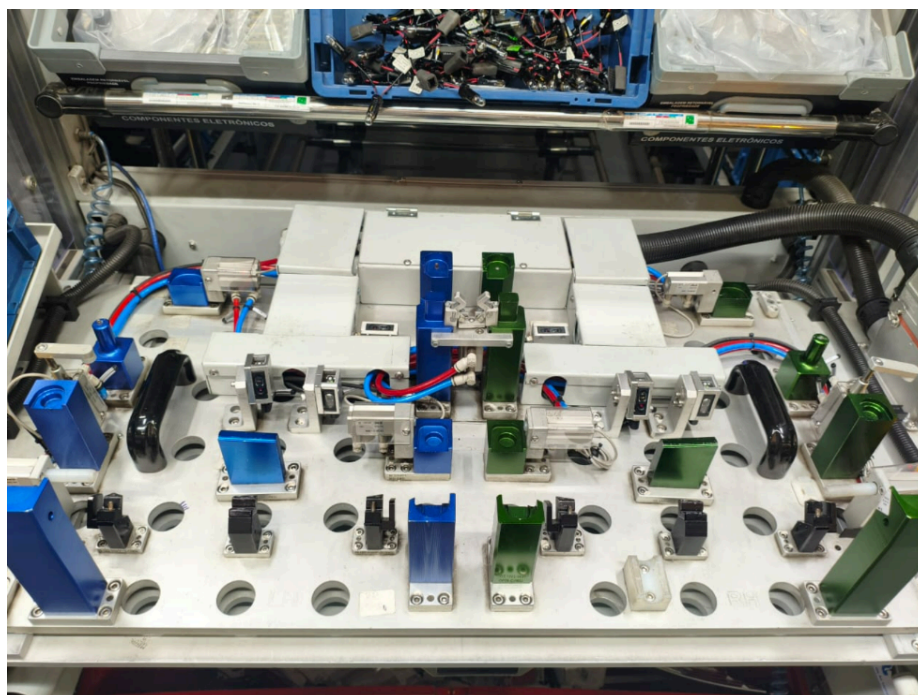


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A visão panorâmica dessa estação padronizada materializa a maturidade geométrica alcançada pelo projeto. Diferente das projeções dimensionais ampliadas para peças excepcionais, o registro fotográfico exhibe a estrutura da bancada convencional unificada em 1.200 mm de comprimento, uma vez que o maior componente óptico montado nela possui aproximadamente 900 mm de extensão. Esse chassi atende à volumetria do produto e integra de forma rígida o monitor industrial Dell e os periféricos de acionamento ergonômico, assegurando um posto de trabalho compacto, enxuto e otimizado para o fluxo de manufatura.

A flexibilidade mecânica dessa última linha de montagem é consolidada pela ferramentaria modular instalada diretamente sobre a mesa regulável, como mostra a Figura 28.

FIGURA 28 - Um dos dispositivos da última linha aplicada a padronização



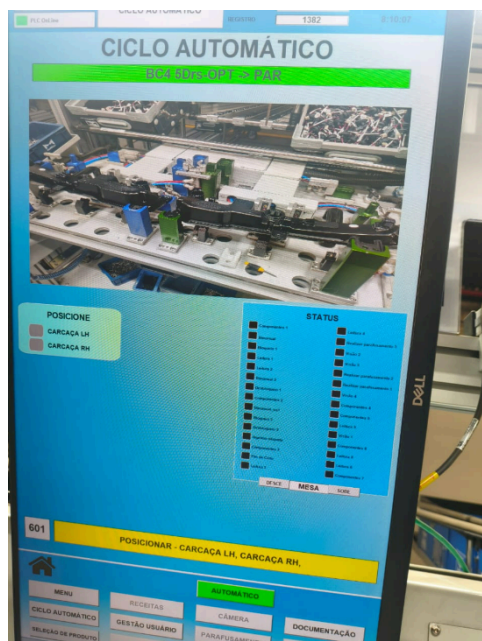
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O registro técnico exhibe o dispositivo de fixação específico da última linha fora de sua estrutura de base, evidenciando o conceito de intercambialidade mecânica. A presença de sensores de proximidade e conexões rápidas integradas ao próprio gabarito válida a dissociação física entre a estrutura e a ferramenta proposta no estudo.

Ademais, esse mesmo dispositivo foi projetado de forma híbrida para atender e processar dois produtos distintos na mesma base: o primeiro modelo óptico roda nas subdivisões estruturais identificadas em verde e azul (representando os lados direito e esquerdo, respectivamente), enquanto o segundo modelo roda no ferramental posicionado na cor preta na parte frontal do dispositivo. Essa flexibilidade de ferramentaria otimiza a área útil da bancada e evita a necessidade de construir gabaritos isolados para cada variante comercial.

Ao acionar o ciclo automático na última linha de produção padronizada, o monitor industrial Dell exhibe a tela de processamento dinâmico em tempo real, como mostra a Figura 29.

FIGURA 29 - Foto da tela de ciclo automático da última linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A imagem da IHM operacional atesta o comportamento estável do *software* em regime de produção de alto volume. Alertas de texto discretos e um design sóbrio guiam o operador de forma transparente, eliminando a ocorrência de ambiguidades operacionais.

O sequenciamento eletrônico das etapas (*Task Table*) parametrizado para coordenar a lógica de montagem nessa última ramificação é apresentado como mostra a Figura 30.

FIGURA 30 - Configuração do ciclo máquina da última linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

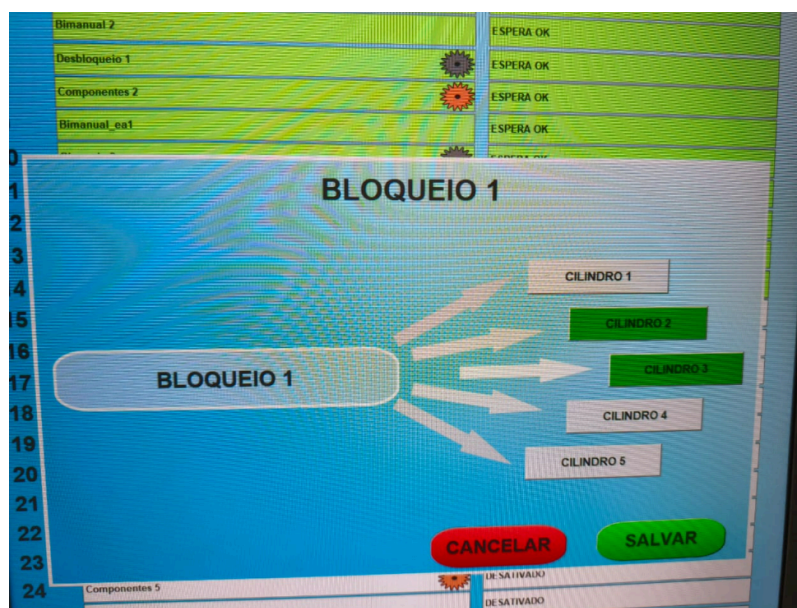
A tela gráfica de passos válida a reprodutibilidade da lógica de padronização da arquitetura eletromecânica e de controle unificada na última linha de montagem. As etapas são listadas linearmente, garantindo alto padrão de repetibilidade industrial e controle contínuo sobre o avanço dos cilindros.

Durante a execução real desse ciclo automatizado na última linha, a interface gráfica fornece o monitoramento dinâmico das funções e o status de execução de cada passo ativo.

A análise visual do terminal confirma a eficácia do sistema de sinalização cromática por etapas lógicas (*Espera OK* em verde, *Desativado* em cinza, disponível desde a segunda linha padronizada). O operador acompanha o progresso instantâneo da montagem do modelo óptico selecionado, o que diminui sensivelmente a fadiga cognitiva em campo.

A edição e configuração detalhada dos cilindros pneumáticos de travamento e intertravamento que são ativados no passo de bloqueio são ajustadas como mostra a Figura 31.

FIGURA 31 - Configuração de quais cilindros são ativados em cada passo de bloqueio



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A interface ilustra o ambiente onde a engenharia define as regras de fixação da carcaça plástica do farol. A atribuição digital elimina a necessidade de retrabalhos em linhas de código do CLP, conferindo flexibilidade para a inclusão de novas travas de segurança.

A automação do carregamento de parâmetros de sensores via planilhas externas constitui uma das premissas de flexibilidade da arquitetura unificada, permitindo mapear graficamente os componentes esperados na validação de ciclo. Contudo, embora essa integração de dados remotos proceda e seja plenamente viável pela estrutura do *software*, as evidências de campo colhidas na célula de trabalho demonstram que, nesse caso específico de engenharia, o mapeamento e a amarração lógica das variáveis foram realizados de forma direta na própria interface física da máquina, como mostra a Figura 32.

Essa dinâmica de configuração local assegura que o preparador ou técnico de processo realize o balizamento fino de presença e leitura das tags em tempo real no terminal, ajustando as janelas de checagem fotoelétrica com base nas condições imediatas do ferramental.

FIGURA 32 - Configuração de quais sensores serão esperados na verificação de componentes 1



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A tela gráfica apresenta a associação lógica das variáveis de entrada do primeiro grupo de componentes. É importante ressaltar que, no cenário específico documentado nesta etapa, esse processamento de dados e os limites de tolerância permanecem armazenados de forma interna no próprio supervisor da bancada. Todavia, a arquitetura desenvolvida preserva a capacidade de estender essa flexibilidade operacional para fora do terminal físico, sendo viável realizar essa mesma parametrização em ambiente de escritório por meio da exportação e importação da receita via arquivos Excel, o que simplifica setups futuros em larga escala.

A expansão e o sequenciamento dessa matriz lógica para a checagem das variáveis e sensores do segundo grupo de componentes do farol são detalhados como mostra a Figura 33.

FIGURA 33 - Configuração de quais sensores serão esperados na verificação de componentes 2

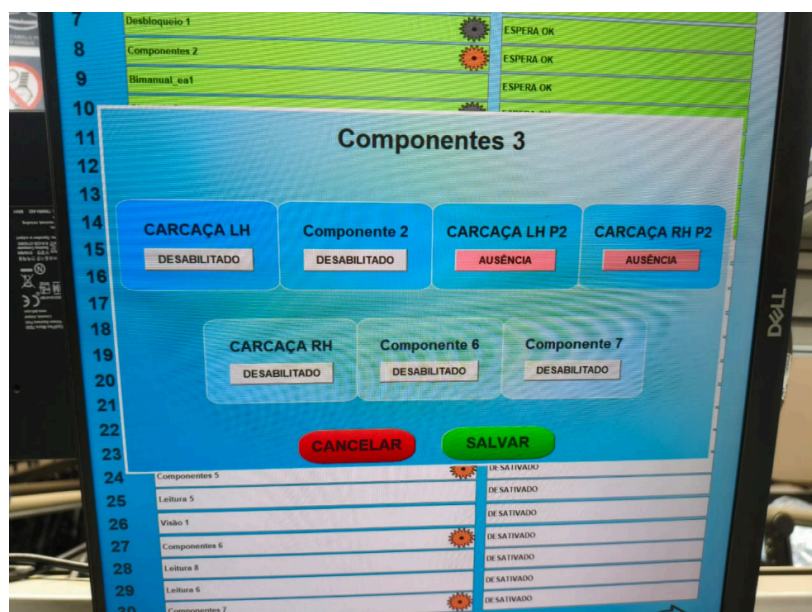


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A imagem exibe o menu complementar de controle de entradas da Task Table. No caso específico das variáveis apresentadas nesta tela, os identificadores de controle de campo p1 e p2 não se referem a componentes soltos, mas sim a posições de encaixe mecânico estritas mapeadas diretamente no berço do dispositivo. A flexibilidade de associar e monitorar essas coordenadas e novas condições de encaixe diretamente pela tela confirma a quebra do engessamento das bancadas legadas, garantindo que o ciclo máquina só avance quando o farol estiver assentado em sua posição geométrica correta.

A unificação final da malha de monitoramento de entradas digitais para o terceiro grupo de componentes ópticos da última linha piloto é configurada como mostra a Figura 34.

FIGURA 34 - Configuração de quais sensores serão esperados na verificação de componentes 3

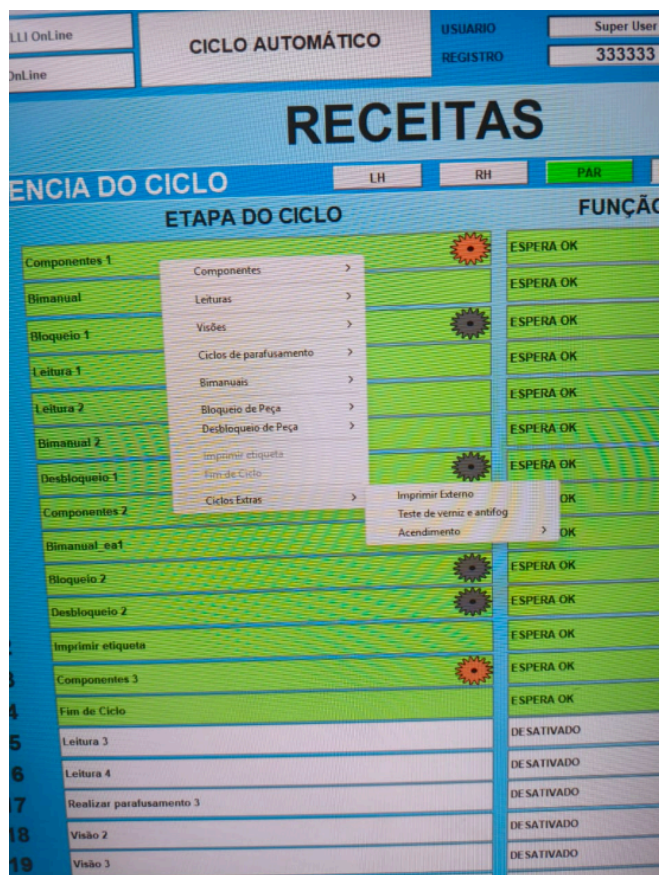


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O registro visual foca no fechamento da árvore de checagem eletrônica de sensores do dispositivo. Essa configuração unificada garante a estabilidade de qualidade exigida pelas auditorias automotivas, bloqueando o avanço de peças incompletas.

Visando conferir universalidade à arquitetura de *software*, o sistema disponibiliza um menu secundário que permite selecionar e carregar subciclos lógicos sob demanda, como visto na Figura 35:

FIGURA 35 - Menu que permite selecionar ciclos além dos já presentes na tela de configuração de ciclo



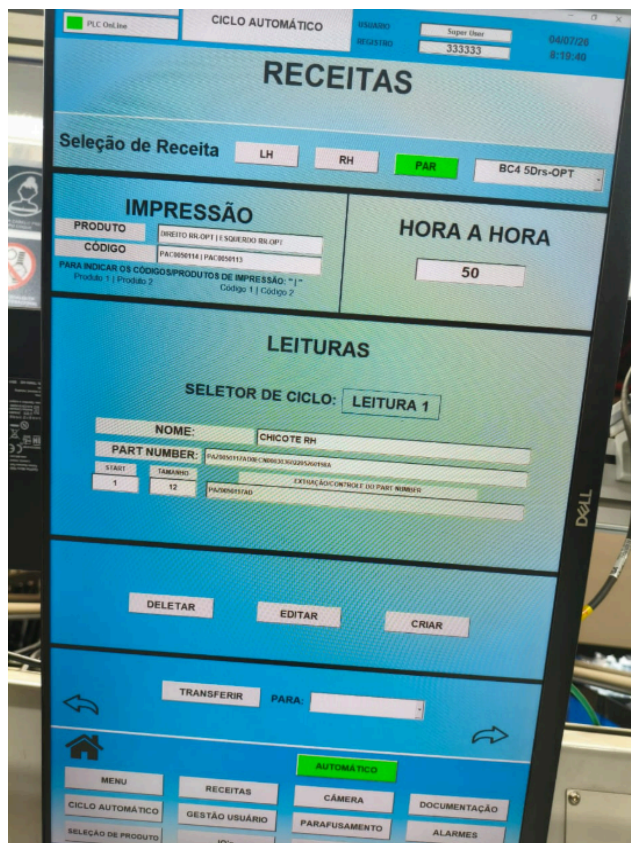
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

É fundamental ressaltar que o desenvolvimento e a implementação dessa função específica não ocorreram com o objetivo primário de otimizar o tempo de setup da máquina. Na realidade, essa ferramenta lógica foi concebida para aumentar a abrangência do *software* padrão, permitindo que a inteligência de controle englobe o maior número possível de processos e rotinas de manufatura distintos dentro do ecossistema fabril da Alfa, garantindo que variações complexas de montagem sejam absorvidas pela mesma estrutura de código.

A interface gráfica ilustrada atesta a aplicação prática das diretrizes de modularidade de *software*. O menu interativo expande a capacidade de reconfiguração rápida do posto de trabalho, permitindo a validação de ramificações mecânicas específicas na mesma célula.

A criação completa de receitas de fabricação e o ajuste do controle de caracteres das leituras na última linha ocorrem de forma integrada, como mostra a Figura 36.

FIGURA 36 - Tela de criação de receitas e configuração das leituras



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O ambiente de tela apresentado demonstra a evolução frente às primeiras versões semiautomáticas. Através do acionamento direto na IHM, o operador interage localmente com a máquina para gerenciar e supervisionar as informações do processo. É relevante pontuar que, embora a engenharia também viabilize e permita a automação dessas tarefas pelo Microsoft Excel, a interface visual exibida atua de forma direta no terminal físico; as planilhas do Excel operam de forma isolada nos bastidores lógicos, sendo empregadas estritamente na rotina periférica de exportação e importação das receitas para carregar os números de peças (*Part Numbers*) e as tolerâncias de maneira transparente e segura.

O detalhamento matemático dos limiares de aceitação e faixas de controles associados a essas variáveis digitais é refinado pelo técnico, como mostra a Figura 37.

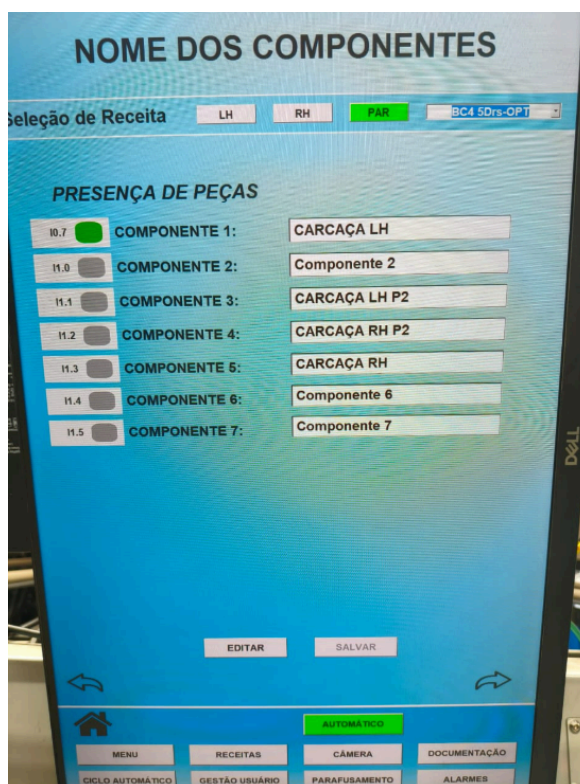
FIGURA 37 - Configuração das leituras

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A tela técnica de leituras confirma o rigor no controle estatístico do processo. O *software* monitora continuamente as grandezas físicas vindas de campo e as compara com os controles importados, blindando o sistema contra avaliações subjetivas de qualidade.

A autonomia conferida à equipe interna de manutenção para realizar a nomeação e associação lógica das tags de novos sensores na última linha é consolidada como mostra a Figura 38.

FIGURA 38 - Tela de nomeação de sensores da última linha aplicada a padronização



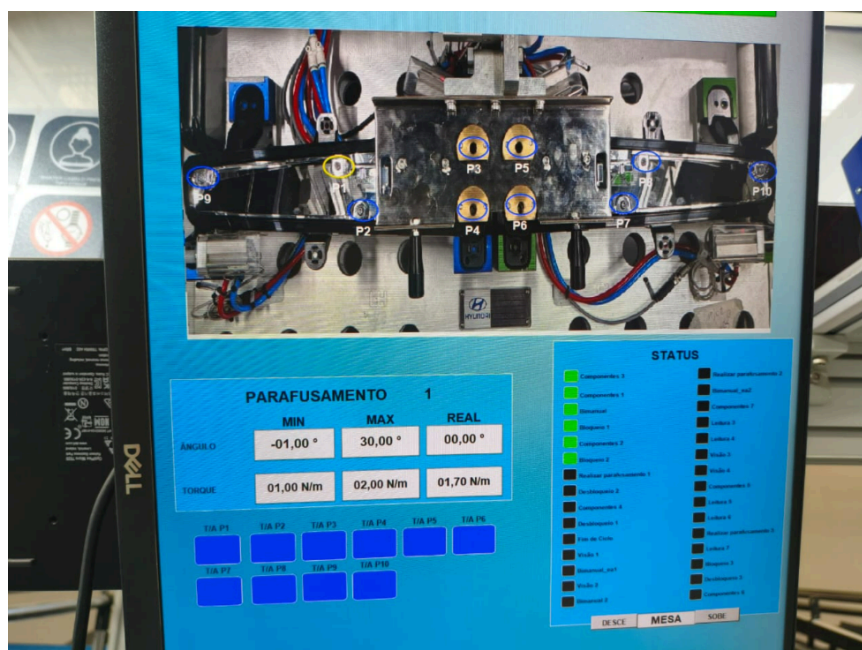
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A interface gráfica de nomenclatura expõe o dicionário de variáveis unificado da última geração. A facilidade em identificar as entradas por nomes explícitos acelera o diagnóstico preventivo de rede e elimina o suporte de engenharia especializada externa. Além disso, o sistema agora possui o sinóptico do sensor exibido diretamente na tela para auxiliar o processo de nomeação técnica.

A referida inovação lógica faz-se indispensável visto que cada dispositivo de fixação acoplado à bancada universal pode utilizar sensores mapeados em entradas físicas completamente diferentes das demais estações, exigindo uma interface dinâmica capaz de balizar o posicionamento elétrico exato de cada componente de campo em tempo real.

Durante o ciclo de aperto de parafusos críticos do conjunto óptico, a tela do automático exibe graficamente os relatórios de torque e ângulo coletados pelas ferramentas elétricas, como mostra a Figura 39.

FIGURA 39 - Tela de automático durante ciclo de parafusamento



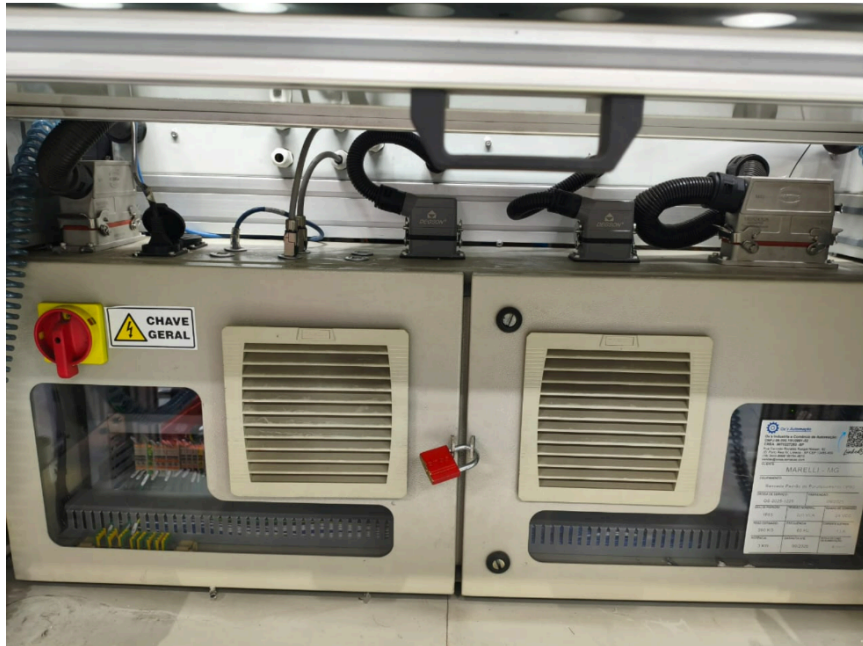
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O registro visual da tela de fixação comprova a coleta de dados contínua em tempo real. O status de aprovação (OK/NOK) exibido na interface assegura a total rastreabilidade exigida pelas montadoras de veículos, retraindo peças com apertos deficientes, além de auxiliar visualmente o operador com qual parafuso ele deve apertar naquele momento (círculo apresentado em amarelo dentro da imagem).

Toda essa massa de dados gerada pelos apertos elétricos e pelas rotinas do ciclo não fica isolada na interface; o gerenciamento do *software* direciona esses registros para o nível de supervisão de arquivos da máquina. Assim, na mesma pasta correspondente do sistema operacional, ficam armazenadas e organizadas todas as imagens de auxílio visual e câmeras de visão artificial utilizadas na validação daquele ciclo produtivo específico, consolidando a centralização da rastreabilidade.

Para que toda essa inteligência computacional e processamento de dados operem com estabilidade no chão de fábrica, faz-se necessária uma infraestrutura robusta de hardware. A composição interna do painel elétrico que abriga esses módulos e componentes responsáveis pelo processamento dessa última linha aplicada ao padrão é exibida como se vê na Figura 40.

FIGURA 40 - Painel elétrico da última linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A imagem técnica do painel elétrico de geração final consolida o ápice da maturidade de hardware do projeto. O arranjo limpo dos disjuntores-motores, fontes Balluff e cartões de expansão Siemens reflete a padronização dimensional estrita, atestando que a arquitetura modular alcançou um formato universal capaz de ser replicado em qualquer posto de montagem da empresa.

Para assegurar a intercambialidade universal e a dissociação física proposta, o dispositivo de montagem se conecta eletricamente à bancada por meio de uma tomada rápida dedicada, como mostra a Figura 41.

FIGURA 41 - Tomada de interface dispositivo com a bancada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A observação do ponto de acoplamento rápido valida o conceito de manutenibilidade avançada. A substituição das fiações permanentes por plugues multipolares pesados permite desacoplar a ferramenta em poucos segundos, agilizando a troca de campanhas de fabricação.

O detalhamento e o arranjo dos pinos de comunicação, potência e pneumáticos integrados à fiação móvel do próprio dispositivo mecânico são exibidos como mostra a Figura 42.

FIGURA 42 - Tomada do dispositivo

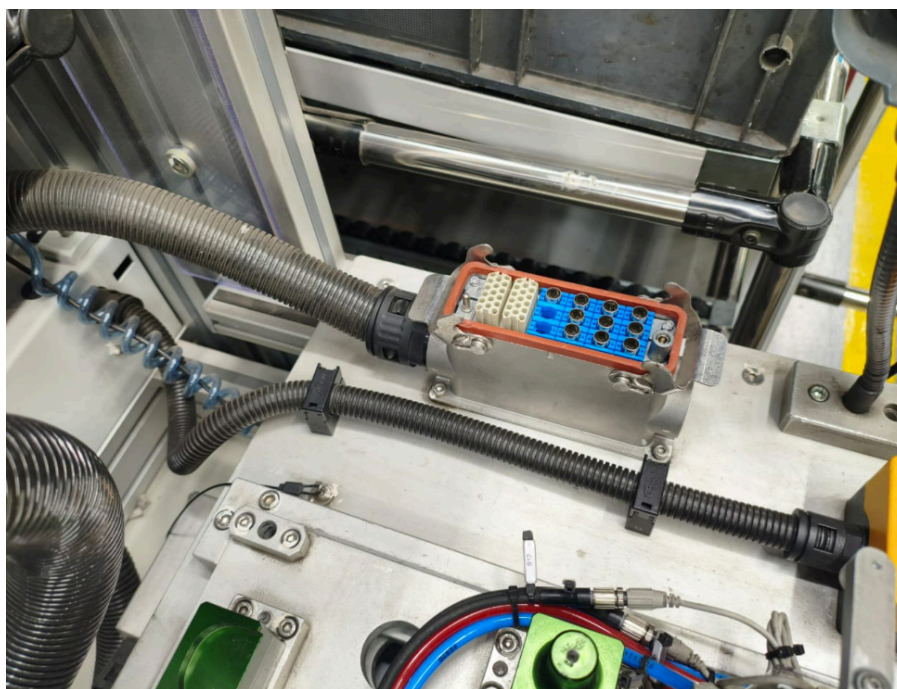


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O registro visual foca no conector do ferramental. O plugue multipolar robusto garante a condução limpa dos sinais elétricos dos sensores internos do gabarito, protegendo os contatos contra o desgaste natural gerado pelos setups.

A contrapeça hermética instalada de forma fixa na estrutura de alumínio da bancada para receber a conexão do dispositivo é visualizada como mostra a Figura 43.

FIGURA 43 - Tomada da bancada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A tomada fixa exposta na imagem destaca o sistema de travas mecânicas assistidas. A vedação com grau de proteção industrial impede a infiltração de umidade ou poeira química do setor de verniz antifog, mantendo a integridade elétrica das conexões de base.

A integridade estrutural e a visão geométrica tridimensional da bancada de última geração, registrada quando está sem nenhum dispositivo acoplado, são apresentadas como mostra a Figura 44.

FIGURA 44 - Bancada da última linha aplicada a padronização sem dispositivo

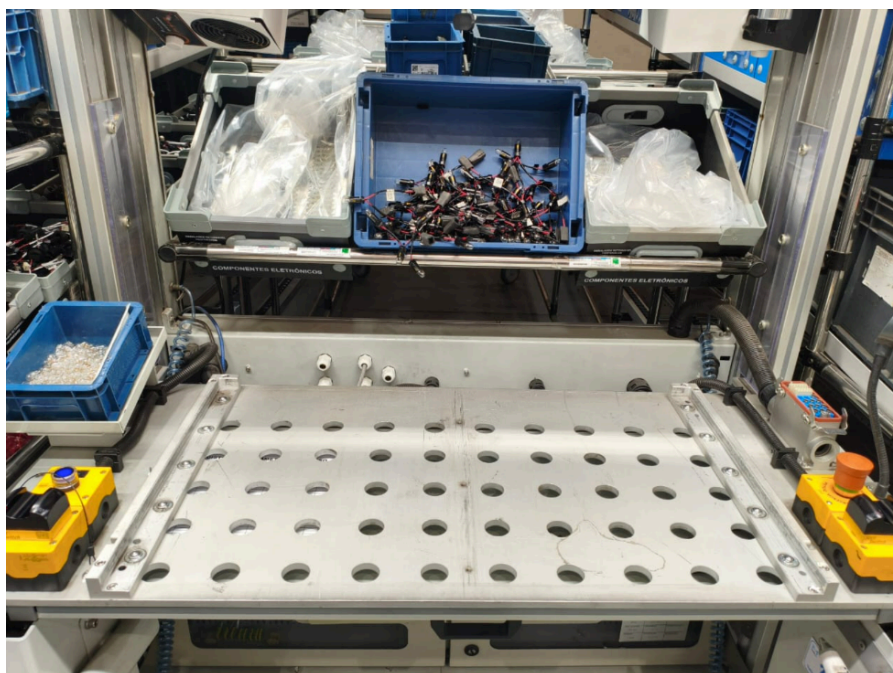


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A visão panorâmica da estação vazia evidencia o chassi universal limpo e padronizado. A constância dimensional da mesa estrutural e o posicionamento rígido das interfaces de comando provam que a base física se mantém perene e imune a variações de produtos.

Uma perspectiva angular complementar da mesma bancada de última geração sem ferramentaria, focando na área útil de trabalho, é exibida como mostra a Figura 45.

FIGURA 45 - Bancada da última linha aplicada a padronização sem dispositivo

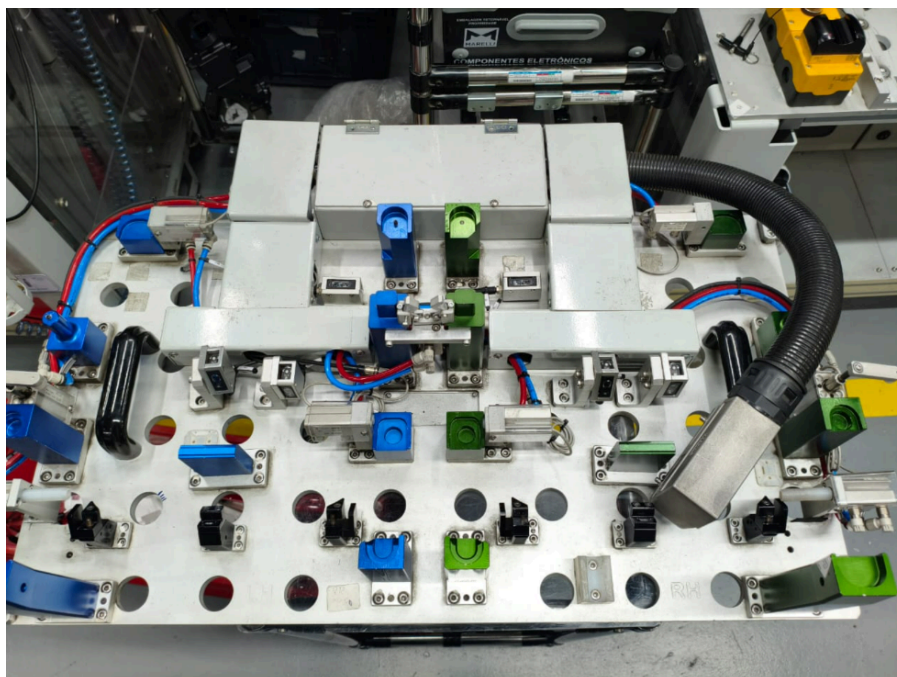


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O registro fotográfico reforça a unificação geométrica obtida na fase final do projeto. A eliminação completa de mangueiras pneumáticas soltas ou caixas elétricas adaptadas entrega um ambiente limpo e seguro para a atuação dos operadores.

Para demonstrar a dissociação total entre a inteligência e a mecânica, o dispositivo específico da última linha é mantido armazenado fora da bancada na oficina de apoio, como mostra a Figura 46.

FIGURA 46 - Dispositivo Bancada da última linha aplicada a padronização fora da bancada

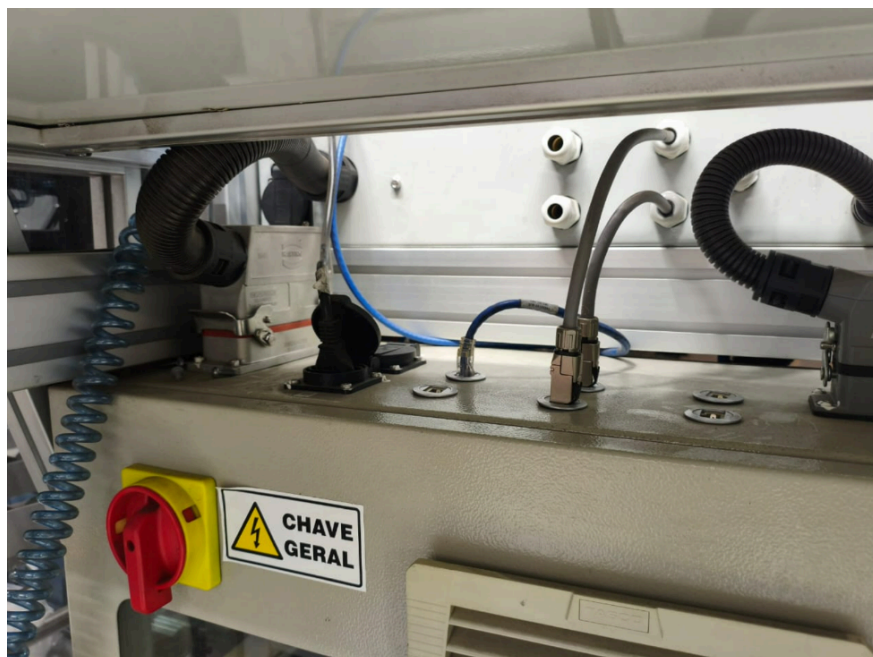


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A imagem do dispositivo de montagem isolado ilustra o conceito de flexibilidade de ativos defendido no estudo. Ao fim de uma campanha comercial de veículo, a bancada cara permanece na linha enquanto este módulo específico de ferramentaria de baixo custo é o único componente a ser armazenado ou substituído.

O conjunto de tomadas multipolares de engate rápido dispostas na parte externa lateral do chassi metálico da última linha piloto é apresentado como mostra a Figura 47.

FIGURA 47 - Interfaces das tomadas de conexão da bancada da última linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A observação das tomadas rápidas laterais confirma o fim dos antigos tubos plásticos flexíveis conjugados. A remoção ou substituição de um painel elétrico inteiro passou a ser uma tarefa instantânea através do desacoplamento manual desses plugues de potência.

O alinhamento e a vedação simétrica das interfaces de conexão rápida adicionais instaladas na base da última bancada são expostas como mostra a Figura 48.

FIGURA 48 - Interfaces das tomadas de conexão da bancada da última linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Esta segunda perspectiva técnica foca nas travas de segurança dos conectores industriais externos. O acoplamento hermético blinda os pinos de comunicação de rede contra contaminantes agressivos, neutralizando falhas espúrias de transmissão de dados no chão de fábrica.

A organização interna do cabeamento estruturado e a distribuição dos disjuntores-motores no interior do painel elétrico da última ramificação são detalhadas como mostra a Figura 49.

FIGURA 49 - Painel elétrico da última linha aplicada a padronização

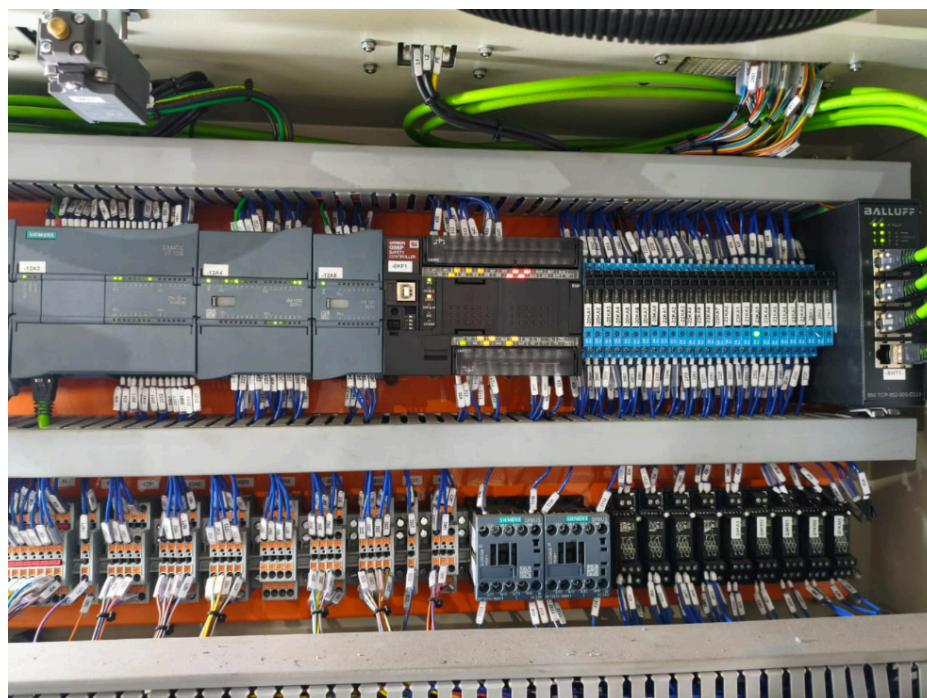


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A análise visual do interior elétrico confirma a aplicação estrita do padrão de hardware. O barramento limpo e a clara identificação dos bornes de conexão facilitam o rastreamento físico de falhas, desabando o tempo médio de reparo técnico (MTTR) da planta.

O perfeito alinhamento dos cartões lógicos do CLP Siemens e das fontes robustas Balluff na calha superior do mesmo painel elétrico final é exposto como mostra a Figura 50.

FIGURA 50 - Painel elétrico da última linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Esta segunda perspectiva técnica do painel final consolida o patamar de excelência em engenharia eletrotécnica alcançado. O gerenciamento limpo da fiação interna e a eliminação de redundâncias elétricas blindaram os circuitos lógicos de processamento contra ruídos.

O projeto evoluiu para solucionar as instabilidades posturais através de um plano corporativo de melhoria contínua e Kaizen, como mostra a Figura 51.

FIGURA 51 - Projeto Kaizen realizado da parte de padronização das bancadas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

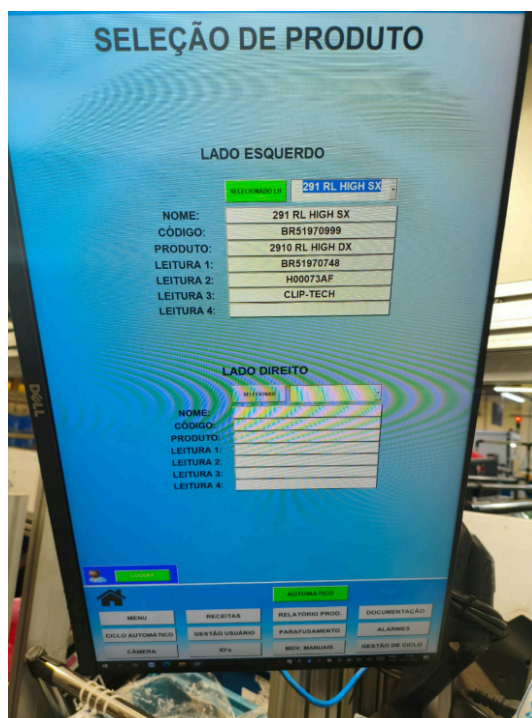
O cronograma do Kaizen consolida o sucesso das metas ergonômicas e econômicas da Alfa. O registro valida como as pequenas modificações funcionais unificaram o ambiente de trabalho e estruturaram a engenharia para receber os sistemas de elevação ajustáveis.

O desfecho financeiro da implementação do projeto Kaizen de padronização estrutural, ilustrado na Figura 51, consolidou um ganho expressivo na gestão de ativos da Alfa Componentes Automotivos. Sob o modelo modular adotado, verificou-se que futuras alterações ou descontinuações de modelos de conjuntos ópticos comandadas pelas montadoras não mais exigirão o descarte prematuro e a aquisição de novas bancadas automatizadas completas, cujo custo nominal de aquisição está avaliado em R\$ 220.000,00.

A flexibilidade da arquitetura permitiu limitar o investimento futuro estritamente ao desenvolvimento e à fabricação de dispositivos internos específicos de fixação e gabarito, cujos custos estimados orbitam em uma faixa reduzida de R\$ 40.000,00 a R\$ 50.000,00 por projeto. Essa estratégia preservou toda a infraestrutura eletromecânica preexistente e gerou uma economia de CAPEX de aproximadamente 80% por posto de trabalho reformulado.

Para as rotinas de troca de lote e adequação ergonômica nas linhas iniciais, o terminal disponibilizava uma tela dedicada para a seleção rápida de variantes, como mostra a Figura 52.

FIGURA 52 - Seleção de produto da primeira linha aplicada a padronização

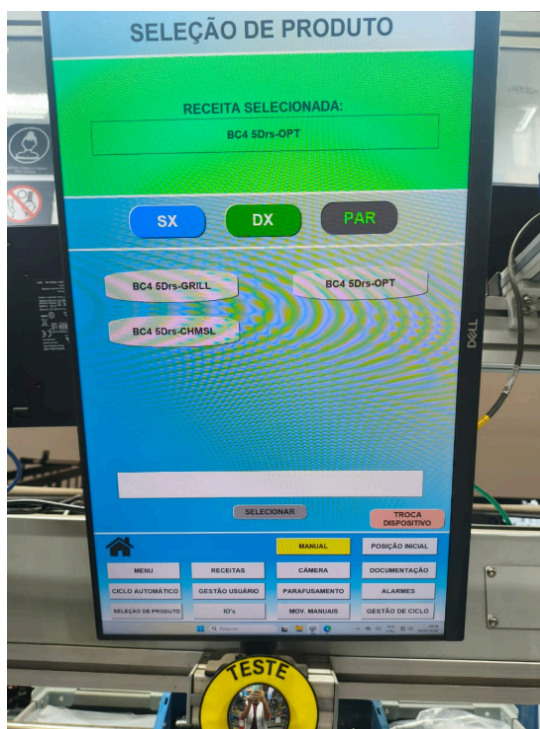


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A tela destaca a transição para o formato digital de escolha de modelos. O menu enxuto reduziu o setup na linha piloto, embora ainda operasse de forma estática antes do padrão unificado via Excel.

Esse ambiente de seleção gráfica amadureceu nas células mais recentes da fábrica, integrando o acionamento em um menu centralizado e limpo, como mostra a Figura 53.

FIGURA 53 - tela de seleção de produto da segunda e última linha aplicada a padronização

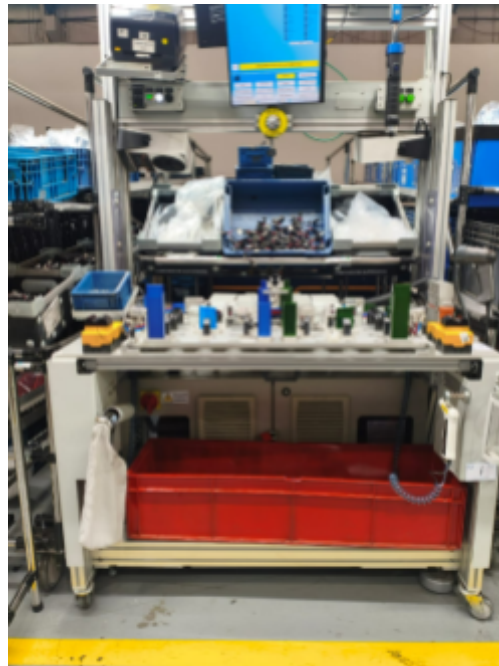


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O terminal atualizado revela a padronização visual das IHMs da planta. A organização lógica eliminou cliques excessivos e facilitou a interação do operador na transição automática de lotes de faróis, permitindo uma seleção muito mais intuitiva de cada modelo por parte do operador. Essa reestruturação de *software* soluciona um gargalo crônico da interface antiga, a qual apresentava uma elevada densidade de informações e dados técnicos que eram totalmente irrelevantes para a rotina de quem operava a máquina, gerando distrações e retardando o tempo de resposta no posto de trabalho.

A engenharia aplicou as modificações no sistema de elevação mecânica regulável para neutralizar o desnivelamento, permitindo monitorar o comportamento da bancada em sua cota física inferior, como mostra a Figura 54.

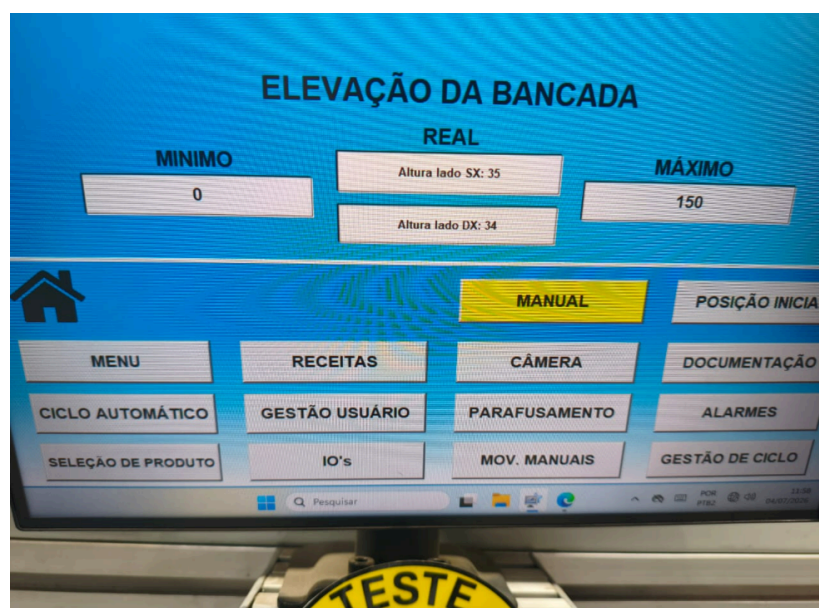
FIGURA 54 - Regulagem da altura da bancada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O registro apresenta a estrutura posicionada em seu limite de curso inferior. Essa flexibilidade geométrica assegura que operadores adaptem o posto de trabalho à sua altura antropométrica neutra.

FIGURA 55 - Interface de controle de altura da bancada do supervisor da segunda e última linha aplicada a padronização



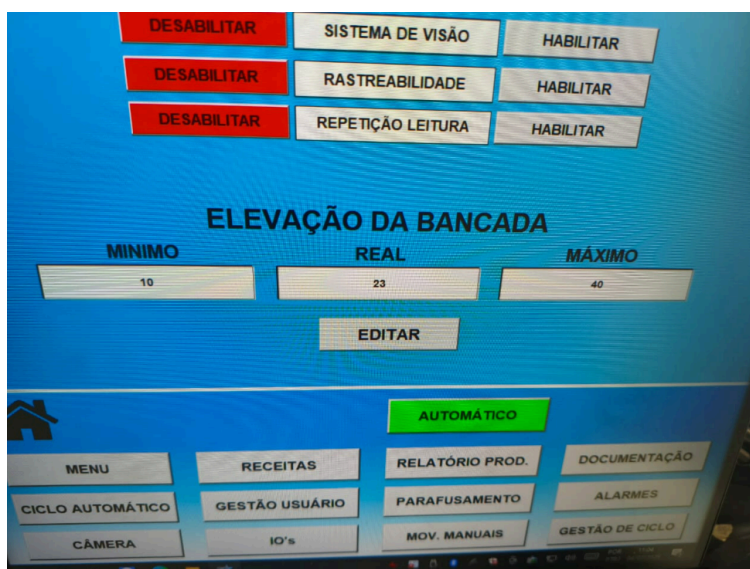
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A visualização da interface na cota máxima válida a estabilidade da sintonia dos motores elétricos. O alinhamento milimétrico prova que o *software* blinda o retorno analógico contra ruídos da rede fabril.

A inteligência de controle de curso vertical analógico aplicada para gerenciar de forma isolada os periféricos da primeira linha piloto é apresentada como visto na Figura 56. É fundamental corrigir que, na concepção original dessa primeira bancada, a movimentação vertical não dependia de inversores de frequência; o sistema era constituído por atuadores lineares associados a um comando elétrico único.

Sob essa configuração rudimentar, ao enviar o sinal para subir, o circuito acionava simultaneamente ambos os atuadores sem qualquer compensação dinâmica, o que propiciava o desnivelamento crônico da mesa de trabalho caso houvesse distribuição desigual de carga ou travamentos mecânicos em uma das extremidades, justificando a evolução para as lógicas de controle individualizado desenvolvidas posteriormente.

FIGURA 56 - Interface de controle de altura da bancada do supervisor da primeira linha aplicada a padronização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A imagem exibe a tela de ajuste do controle de altura analógica inicial de 0 a 10 V. Esse gerenciamento foi o ponto de partida para estabilizar o

sincronismo e erradicar os travamentos angulares que danificavam as primeiras estruturas.

O projeto incluiu um sensor de fim de curso para detectar a posição zero e balizar a calibração do motor com retorno de posição. A montagem física desse conjunto elétrico de acionamento por colunas é detalhada como mostra a Figura 57.

FIGURA 57 - Conjunto de elevação da segunda linha aplicada a padronização, motor com sensor para referenciamento do *encoder*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O registro detalha a fixação do motor de alta capacidade ao chassi de elevação. O sensor de proximidade atua como o balizamento de segurança que calibra o ponto zero real do curso mecânico, prevenindo os danos severos à bancada que ocorriam caso a referência fosse perdida.

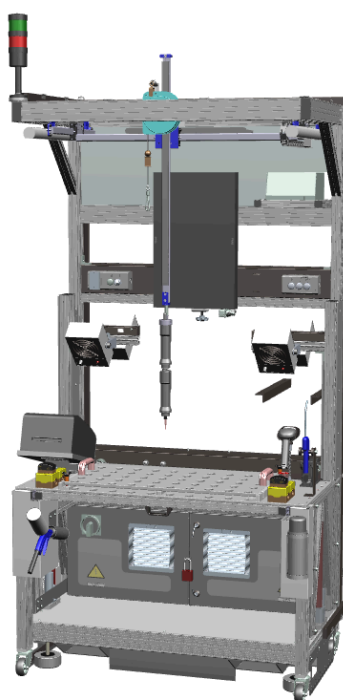
Durante a fase de engenharia da segunda linha piloto na Alfa Componentes Automotivos, implementou-se um protótipo baseado em motores com encoders digitais para o referenciamento de altura. Contudo, os testes práticos em chão de fábrica revelaram severas falhas de leitura decorrentes de ruídos eletromagnéticos gerados pelos inversores vizinhos. Diante dessa

instabilidade fática, os encoders digitais foram rejeitados para essa aplicação, demandando o retorno definitivo ao feedback analógico tradicional de 0 a 10 V com potenciômetros lineares blindados.

Esta perspectiva técnica confirma a individualização dos comandos de força, utilizando uma versão equipada com *encoder* digital para garantir o sincronismo. A leitura precisa de pulsos permite que ambas as colunas subam equilibradas, neutralizando a distribuição desigual de peso e liberando o início seguro da produção após a validação do posicionamento geométrico do posto, porém foi descontinuada por questões de ruídos eletromagnéticos.

Ao longo do desenvolvimento da bancada, os problemas identificados foram corrigidos ao decorrer dos novos projetos. Grande parte dessas modificações como o controle de altura e a fixação do monitor, entre outras, foi abordada nos capítulos anteriores. A Figura 58 apresenta a vista do desenho 3D da última versão da bancada.

FIGURA 58 - Vista do desenho 3D da bancada em último nível

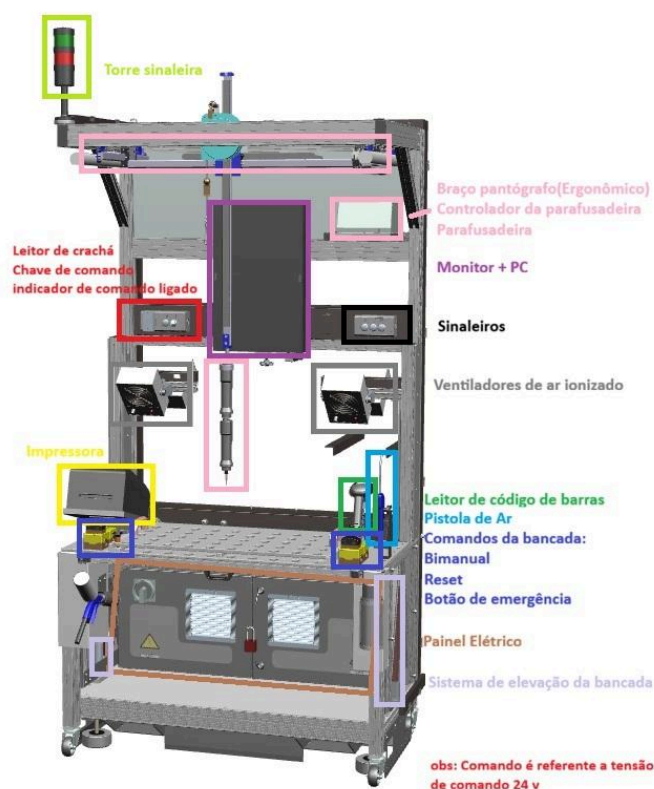


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Na Figura 58, podem-se observar alterações em relação à Figura 44, que também ilustra a bancada sem o dispositivo. Entre as principais

modificações, destacam-se a ausência dos ventiladores de ar ionizado e a inclusão de uma caixa de componentes, necessária devido à remoção da impressora. A Figura 59 detalha a descrição de cada componente da bancada, considerando as variações mapeadas pela engenharia.

FIGURA 59 - Vista do desenho 3D da bancada em último nível com legenda



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O detalhamento apresentado na Figura 59 finaliza a etapa de concepção física da bancada, assegurando que as variações previstas pela engenharia fossem contempladas.

4.5 Viabilidade econômica e flexibilidade de ativos

A consolidação da arquitetura padronizada gerou um impacto financeiro positivo para a engenharia da Alfa, alterando a dinâmica de modificação de linhas industriais. Com a unificação da lógica do CLP e a carga de parâmetros via arquivos de Excel, a dependência de consultorias terceirizadas de

automação foi eliminada para rotinas operacionais. Às 400 horas de programação contratadas no cenário pré-padronização técnico de 2022 (representando um custo direto baseado na taxa horária de R\$ 130,00) deixaram de existir para refinamentos de produtos, conferindo total autonomia tecnológica à equipe de engenharia de manutenção interna da planta.

A unificação estrutural permitiu dividir a máquina em duas partes independentes: a estrutura da bancada padrão e o dispositivo de fixação específico da peça. Quando uma linha de faróis antigos deixa de rodar na fábrica para dar lugar a um novo modelo de veículo, a estrutura da bancada permanece 100% inalterada, sofrendo apenas processos simples de atualização técnica (retrofit) caso algum componente elétrico ou painel de primeira versão torne-se obsoleto.

Durante o retrofit, o sistema de elevação também foi revisado para garantir compatibilidade com a nova arquitetura padronizada das bancadas. A reorganização dos componentes elétricos e mecânicos permitiu manter o funcionamento sincronizado dos motores, assegurando estabilidade durante a movimentação vertical e maior confiabilidade operacional.

A engenharia não necessita mais adquirir uma bancada nova completa com componentes fornecidos, cujo valor de mercado gira em torno de R\$ 220.000,00. O investimento futuro fica concentrado estritamente no desenvolvimento do dispositivo interno específico dotado de sua automação dedicada. O custo de um dispositivo novo varia entre R\$ 40.000,00 e R\$ 50.000,00 (dependendo do nível de complexidade e se utiliza câmeras e sensores visuais), gerando uma economia direta superior a R\$ 170.000,00 por posto de trabalho modificado no Alfa Componentes Automotivos.

5 DISCUSSÃO

A análise dos resultados empíricos colhidos na planta industrial da Alfa Componentes Automotivos revela um cenário de profunda convergência, mas também de especificidades do caso real vivenciado e relatado. A transição da linha legada, caracterizada como um emaranhado de "ilhas de automação", para uma arquitetura modular unificada permitiu testar as hipóteses teóricas de flexibilidade operacional frente à agressiva dinâmica produtiva do setor automobilístico.

O primeiro ponto de discussão reside na quebra do vínculo físico permanente imposto pelo antigo tubo flexível corrugado, que interligava de maneira indissociável o painel elétrico e o chassi da bancada. Conforme postulado por Costa (2021), a manutenção de conexões elétricas e mecânicas fixas atua como um limitador severo de manutenibilidade, estendendo o tempo de máquina parada (*downtime*).

O caso prático da Alfa confirmou essa premissa: na linha legada, qualquer intervenção pesada prendia o técnico ao chão de fábrica. A introdução de tomadas industriais multipolares desconectáveis validou o conceito defendido por Marques (2021) e Sales (2024), convertendo uma complexa atividade de campo em uma substituição modular rápida em ambiente de oficina fora da linha.

Contudo, a evolução cronológica visto nas Figuras 23, 41, 48 e 49 expôs uma nuance prática omitida pela literatura: na segunda linha piloto (Figura 23), a presença residual do corrugado coexistindo com as novas tomadas demonstrou que a dissociação total da "inteligência" elétrica não ocorre de forma imediata, demandando o amadurecimento mecânico obtido apenas na geração final (Figuras 48 e 49).

Isso corrobora a visão de Thomazini e Albuquerque (2021) de que a infraestrutura de hardware deve evoluir de forma homogênea para evitar novos gargalos localizados. No âmbito do *software* industrial e da Interface Homem-Máquina (IHM), as evidências confirmam a relevância dos critérios de usabilidade debatidos por Iida e Guimarães (2016) e Rodrigues (2021). O depoimento do autor indicando que a tela antiga (Figura 2) possuía uma alta densidade de informações irrelevantes para quem operava o posto encontra

eco nas críticas de Silva (2020) sobre a saturação cognitiva e o aumento do tempo de resposta operacional.

A unificação gráfica consolidada nas Figuras 53 e 54, que incorporou o Select Menu e eliminou os dados sobressalentes, resultou em uma interface intuitiva, encurtando a curva de aprendizado e reduzindo drasticamente os erros na troca de lotes (setup). Essa flexibilização lógica materializa diretamente os conceitos de separação entre o modelo de equipamento e o modelo de receita preconizados pela Norma ANSI/ISA-88, conforme detalhado por Moraes (2019) e Ribeiro (2020).

A capacidade do *software* de processar diferentes variantes de faróis (como o modelo X1312 RL T1 DX visto na Figura 19) carregando parâmetros via planilhas estruturadas em Excel sem alterar o código-fonte do CLP Siemens confirma a transição do modelo rígido para a automação flexível defendida por Sabadini (2026) e Carvalho (2026).

Verificou-se, contudo, uma particularidade de campo: embora o sistema suporte a automação remota por arquivos externos, na situação real documentada (Figura 33), o mapeamento fino de presença e a associação das posições de berço p1 e p2 foram interfaceados diretamente na máquina, indicando que a flexibilidade da norma ISA-88 deve sempre salvaguardar a autonomia de ajustes rápidos pelo preparador de processo no chão de fábrica.

A maior divergência entre a prática empírica e a literatura acadêmica manifestou-se no sistema eletromecânico de elevação e nivelamento ergonômico das bancadas. Enquanto Lorenzo (2020) e Wagner (2024) apontam os motores dotados de *encoders* digitais como a solução padrão para o sincronismo preciso de colunas telescópicas múltiplos pontos de força, o caso prático demonstrou que as instabilidades de calibração provocadas pelos severos ruídos eletromagnéticos do pavilhão forçaram a rejeição dos *encoders*.

A instabilidade observada nos encoders digitais em ambientes industriais severos corrobora as premissas de Balbinot e Brusamarello (2019), que destacam a fácil identificação de circuitos de contagem de pulsos de alta frequência frente a transientes eletromagnéticos gerados por inversores de frequência e motores de grande porte, justificando o uso de sinais analógicos filtrados para garantir a integridade do feedback de posição.

O retorno ao *feedback* analógico tradicional operando na faixa clássica de tensão de 0 a 10 Volts (Figuras 57, 58 e 59), combinado a um algoritmo dedicado de controle individualizado por motor, mostrou-se a solução mais estável e imune a interferências.

Essa constatação quebra o paradigma acadêmico de que a digitalização pura é sempre superior, validando o pragmatismo de campo. Ademais, o sucesso obtido ao fixar rigidamente as interfaces de vídeo e comandos bimanuais à cota estável de 1.200 mm (Figura 15 e 45), erradicando as avarias e os desalinhamentos posturais relatado no caso de referência na Alfa ocorrerem quando tentou introduzir o braço articulado móvel na primeira linha piloto (Figura 13), comprova a tese contracorrente de Silva (2020) e Netto (2023): em determinados ambientes severos de manufatura em larga escala, o engessamento físico planejado sob parâmetros antropométricos ótimos é superior à total liberdade de ajustes ergonômicos reguláveis.

Por fim, os desdobramentos financeiros e operacionais dão suporte quantitativo à filosofia do Kaizen e à melhoria contínua abordadas por Assis e Casagrande (2024) e Porto (2025). A consolidação do projeto Kaizen (Figura 52) demonstrou que o investimento concentrado estritamente na ferramentaria e nos dispositivos modulares híbridos de fixação específica, como o gabarito duplo cromático verde/azul e preto (Figura 28), gerou uma redução drástica de CAPEX frente à aquisição de células monolíticas completas.

Ao dissociar o chassi universal de 1.200 mm (reaproveitável em 100% das campanhas veiculares futuras) da automação dedicada do dispositivo, a engenharia da Alfa blindou seus ativos imobilizados contra a obsolescência de produtos ditada pelas montadoras, transformando o aprendizado prático em uma ferramenta de sustentabilidade econômica e inteligência manufatureira, em total consonância com as teorias de Groover (2014) e Liker (2021).

Para consolidar as discussões e propiciar uma visão estruturada das interações entre a teoria e a prática vivenciada nesta investigação, o Quadro 1 sintetiza os principais eixos analíticos examinados no estudo de caso.

Quadro 1 – Síntese da prática vivenciada na empresa Alfa

Variável de Análise	Abordagem Teórica (Autores)	Realidade Prática (Alfa Componentes)	Classificação do Impacto
Sincronismo de Elevação	Fundamenta os princípios de controle de velocidade por inversores de frequência e acoplamento eletromecânico dinâmico (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2021; SILVA, 2020).	O controle simplificado de atuadores gerava desnível estrutural; a implementação experimental de encoders digitais falhou devido a severas interferências eletromagnéticas da planta; o sistema estabilizou-se após o retorno ao feedback analógico tradicional de 0–10 V com potenciômetros lineares blindados.	Divergência Técnica A severidade e os ruídos elétricos do ambiente fabril real exigiram o recuo estratégico para a robustez e a imunidade eletromagnética da tecnologia analógica tradicional, contrapondo-se à tendência digital padrão da literatura.
Suporte de Interfaces	Preconiza a aplicação de percentis antropométricos populacionais e o posicionamento de interfaces dentro das zonas de alcance ótimo para manter a postura neutra do trabalhador (IIDA; GUIMARÃES, 2016; BALSADI, 2024).	A utilização inicial de braços mecânicos articulados gerou colisões constantes das telas com ferramentas de fluxo e caixas de componentes, além de induzir desalinhamento postural; o cenário foi estabilizado por meio da fixação rígida das interfaces e comandos a uma cota espacial fixa de 1.200 mm em relação ao solo.	Divergência Ergonômica A restrição física rígida e o engessamento geométrico planejado do layout superaram a flexibilidade de ajuste móvel dos braços articulados, demonstrando que o travamento estrutural blindou o patrimônio e estabilizou a postura.
Troca de Parâmetros	Estabelece as premissas de modularidade de software, gerenciamento de receitas digitais e a separação lógica entre o modelo de	A parametrização manual linha a linha no software do controlador gerava alto índice de erros humanos; a arquitetura evoluiu para uma lógica automatizada de carregamento em	Convergência Expandida Validação prática das diretrizes de modularidade da Norma ANSI/ISA-88 e do relatório ISA-TR88.00.02

	equipamento e o modelo de produto (ISA, 2010; LINO, 2025).	segundo plano (<i>background</i>) via importação e exportação de dados estruturados em planilhas eletrônicas na IHM.	(PackML), transpondo com sucesso os conceitos de gerenciamento de receitas do domínio de processos em batelada para o fluxo da manufatura discreta.
Protocolo de Segurança	Aborda as diretrizes normativas de segurança ocupacional em máquinas e a necessidade de validação e redundância de dispositivos protetivos para salvaguardar a integridade física do operador (SILVA, 2020; ISA, 2015).	A fiscalização burocrática por meio de checklists impressos em papel propiciava preenchimentos retrospectivos sem testes reais; implementou-se uma rotina de checklist digital mandatória na IHM de turno com lógica excludente e intertravada que bloqueia o ciclo automático do CLP até a validação física síncrona dos botões de acionamento.	Convergência Técnica Evolução prática das exigências regulamentares da NR-12 por meio de barreiras lógicas de software em tempo real, mitigando a falha humana e convertendo a auditoria estática em um mecanismo dinâmico e excludente de segurança (FELIX <i>et al.</i> , 2025).

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

Sendo assim, a análise da reengenharia empreendida na Alfa Componentes Automotivos explicita que o verdadeiro papel da engenharia de controle e automação não reside na aplicação cega de tecnologias de vanguarda, mas sim na capacidade de decodificar e adaptar a teoria às realidades mutáveis do chão de fábrica.

Ao rejeitar soluções sofisticadas, porém instáveis em campo, como a volatilidade dos *encoders* digitais e a fragilidade dos braços ergonômicos articulados, em prol da robustez do controle analógico de 0 a 10 V e do engessamento físico rígido das interfaces a 1.200 mm, o projeto rompeu com o purismo acadêmico para priorizar a resiliência operacional.

A referida quebra de paradigmas prova que a eficiência de uma célula de manufatura contemporânea é alcançada quando a flexibilidade lógica do *software* (consagrada pela norma ISA-88 via parametrização por Excel) apoia-se sobre uma infraestrutura de *hardware* mecanicamente estável, segura e imune a ruídos.

A padronização do sistema de elevação contribuiu para maior estabilidade mecânica das bancadas, redução das intervenções corretivas relacionadas ao conjunto motriz e melhoria da ergonomia durante as operações de setup e manutenção.

O adequado funcionamento do conjunto motriz mostrou-se essencial para a confiabilidade operacional das bancadas automatizadas. A integração entre motores, sistema de elevação, painel elétrico e lógica de controle permitiu que a movimentação vertical ocorresse de forma precisa e segura, reduzindo a necessidade de ajustes manuais e favorecendo a padronização proposta neste estudo.

Assim, o estudo de caso transcende a mera descrição de uma melhoria de processo para se consolidar como um manifesto pragmático: na severidade da indústria automotiva, a simplicidade estrutural aliada à inteligência digital modular constitui o único caminho viável para aniquilar custos de engenharia, prolongar o ciclo de vida dos ativos e blindar a integridade do trabalhador.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho proporciona um espaço acolhedor para refletirmos sobre tudo o que foi vivenciado no chão de fábrica da Alfa Componentes Automotivos. Não se trata de um desfecho apenas formal, este momento serve para resgatar o propósito que foi o foco desta pesquisa.

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma proposta de melhoria aplicada ao processo produtivo, com foco em reduzir custos relacionados à engenharia de integração, aumentar a flexibilidade produtiva e otimizar os processos de manutenção industrial. Pode-se dizer que este objetivo foi parcialmente alcançado, pois, apesar de rodar as novas linhas piloto, separando de verdade a estrutura física da bancada da inteligência do *software*, o que permitiu mudar a forma como a empresa gerencia seus ativos, faltou bases quantitativas para mensurar os alcances dessa proposta.

Do ponto de vista técnico e operacional, destacam-se como contribuições relevantes a introdução de conectores industriais multipolares de engate rápido, os quais converteram intervenções corretivas complexas em substituições modulares ágeis (*plug-and-play*), e o desenvolvimento de um dispositivo eletromecânico híbrido, capaz de processar dois produtos distintos simultaneamente por meio de sistemas de codificação visual.

Adicionalmente, a implementação de um checklist digital de segurança com lógica excludente e intertravada via interface homem-máquina (IHM) aprimorou a governança de segurança do trabalho. Esse mecanismo passou a exigir a validação física e síncrona dos botões de acionamento bidirecional, superando as fragilidades de auditoria associadas aos registros estáticos em papel.

Por outro lado, a análise crítica dos resultados evidenciou discrepâncias entre as predições teóricas da literatura e as restrições práticas do ambiente fabril de manufatura severa.

Embora o referencial teórico e alguns autores preconizasse o uso de braços articulados para monitores e sistemas de feedback baseados em

encoders digitais, a realidade operacional impôs modificações no projeto original.

No que tange às interfaces visuais, os suportes articulados móveis geravam colisões frequentes com embalagens e ferramentas de fluxo, demandando a substituição por suportes fixos posicionados de acordo com parâmetros antropométricos e zonas de alcance ótimo.

No sistema de elevação das mesas, os encoders digitais demonstraram vulnerabilidade a surtos e interferências eletromagnéticas (EMI) gerados pelas redes de potência da planta. Essa limitação técnica exigiu o recuo estratégico para o sistema de feedback analógico tradicional na faixa de 0 a 10 V com potenciômetros lineares, configuração que garantiu a estabilidade e a imunidade necessárias ao nivelamento dos módulos.

Evidenciaram-se, também, limitações de escopo temporais e operacionais: o período de coleta de dados restringiu-se a dois meses, o que impediu o monitoramento do desgaste mecânico e da fadiga estrutural dos componentes a longo prazo.

Ademais, cláusulas de confidencialidade e sigilo comercial impossibilitaram a publicação integral do código-fonte do Controlador Lógico Programável (CLP) e dos diagramas elétricos detalhados. Constatou-se, ainda, a ausência de correlação entre os resultados locais obtidos e indicadores macroindustriais de produtividade, como o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), bem como a falta de detalhamento dos protocolos de comunicação de rede e diretrizes de cibersegurança no tráfego de arquivos de receitas baseados em planilhas eletrônicas.

Conclui-se que a eficiência operacional é maximizada quando a flexibilidade do software é sustentada por uma infraestrutura mecânica e elétrica rígida e confiável. Sob a perspectiva financeira, a organização obteve ganhos indiretos expressivos pela redução do dispêndio com horas de engenharia externa e pela mitigação do descarte prematuro de bens de capital (CAPEX), restringindo os investimentos futuros aos dispositivos de fixação específicos de cada produto.

Entre as melhorias implementadas, destaca-se a padronização do sistema de elevação das bancadas, contemplando não apenas a lógica de controle, mas também os componentes mecânicos e elétricos responsáveis

pelo acionamento dos motores. Essa integração contribuiu para aumentar a confiabilidade operacional, facilitar futuras intervenções de manutenção e ampliar a flexibilidade da arquitetura desenvolvida.

A arquitetura desenvolvida demonstrou potencial para ampliar a flexibilidade produtiva e reduzir a complexidade de reprogramação em eventos de *setup*, embora a validação matemática definitiva dos ganhos permaneça condicionada à operação contínua do sistema.

Por fim, ressalta-se que as conclusões geométricas, econômicas e operacionais desta pesquisa decorrem de um estudo de caso restrito a uma unidade fabril do setor de iluminação automotiva, não permitindo generalizações diretas para indústrias de processos contínuos, como os segmentos químico ou siderúrgico.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se a investigação de arquiteturas baseadas em computação de borda (*edge computing*) aplicadas às bancadas operacionais, integrando algoritmos de redes neurais artificiais para fins de manutenção preditiva e detecção precoce de falhas por desgaste. Recomenda-se, complementarmente, o estudo aprofundado de mecanismos de criptografia e governança de tecnologia da informação (TI) voltados à segurança de dados em redes industriais dedicadas à importação e parametrização de receitas de manufatura.

REFERÊNCIAS

AMUY, Paulo Vítor Cordeiro. **Proposta de conjunto edificado à base de módulos tridimensionais-Estudo de caso**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).

ANES, Hugo Francisco. **Aplicações para dispositivos móveis e wearables em ambiente industrial**. 2024. <https://repositorio.utad.pt/entities/publication/082035b7-2e23-4b84-b804-ad7b3cda5d6c>

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Produção e venda de autoveículos crescem em 2025 e Anfavea projeta nova alta em 2026**. São Paulo: ANFAVEA, 15 jan. 2026. Disponível em: https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2025/06/DIGITAL-ANUARIO-2025ALT.CAP_4_compressed.pdf?. Acesso em: 19 jul. 2026.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Produção e venda de autoveículos crescem em 2025 e Anfavea projeta nova alta em 2026**. São Paulo: ANFAVEA, 15 jan. 2026. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2026/01/Release-Janeiro-2026-final.pdf?> Acesso em: 19 jul. 2026.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Carta da ANFAVEA: dados estatísticos da indústria automobilística brasileira**. São Paulo: ANFAVEA, 2026. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/carta-da-anfavea/>. Acesso em: 19 jul. 2026.

ASSIS, Naiara Aparecida; CASAGRANDE, Diego José. KAIZEN E A MELHORIA CONTÍNUA NAS OPERAÇÕES PRODUTIVAS: estudo de caso em uma indústria de termoplásticos. **Ciência & Tecnologia**, v. 16, n. 1, p. e16108-e16108, 2024. DOI: 10.52138/citec. v16i1.347. <https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/citec/article/view/347>

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BALSADI, Daniela. **Análise do trabalho padronizado sob a ótica da ergonomia**: um estudo de caso em uma indústria de componentes para refrigeração. 2024. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, Campus São Carlos, São Carlos, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/server/api/core/bitstreams/5460dadd-54bc-4455-9673-96daf9db9f80/content> Acesso em: 19 jul. 2026.

BALIEIRO, Livia Silva; MÁXIMO, Maria Eduarda de Melo. **Proposta de melhorias através da padronização de processo: um estudo de caso na montagem de componentes em uma linha de produção automotiva.** 2023. <https://repositorio.aedb.br/jspui/handle/123456789/143>

BERTEQUINE, André Vainer. **Proposta de automação para um processo de montagem de um componente automotivo.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/25378>

BOLTON, William. **Programmable Logic Controllers.** 6 ed. Oxford: Elsevier, 2015.

BORGES, Samira Bellettini *et al.* **Proposta de *checklist* para avaliação ergonômica de posto de teletrabalho em ambiente universitário.** 2023. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/249906>

CARNEIRO, Fernanda Pereira Guidotti. **Arquitetura 6C: Um Framework para Inteligência Artificial na Indústria.** 2025. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. DOI: [10.11606/T.55.2025.tde-22062026-131840](https://doi.org/10.11606/T.55.2025.tde-22062026-131840)

CARVALHO, Matheus Amarante. **Modelagem e implementação de sistema de automação para processo cervejeiro em batelada baseado na ANSI/ISA-88 com integração OpenPLC–ScadaBR.** 2026. https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/8898/5/MONOGRAFIA_ModelagemImplementa%C3%A7%C3%A3oSistema.pdf

CESARIO, Lucas Malta Barbosa. **Aplicação de Kaizen em um setor de manufatura fabril.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/34846>

CHIAVENATO, I. **Administração nos novos tempos: os novos horizontes em gestão.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

COELHO, Gustavo Modesto. **Arquitetura e industrialização: influência da Filosofia "Lean" nos processos de gestão da construção.** 2020. <https://dspace.mackenzie.br/items/016d5f07-189b-4a29-aac6-4d8988e38a5c>

COSTA, Alysson Percicotty da. **Arquiteturas E/E automotivas centralizadas.** 2021. <http://repositoriocopia.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/29944>

DA CÁS, João Luiz Kaled. **Modelagem de sistema de automação para planta de produção de biodiesel em pequena escala.** 2020. https://www.academia.edu/download/77036339/2017_JoaoLuizKaledDaCas_tc_c.pdf

FELIX, André Santos *et al.* **Modelo em menor escala de edifício inteligente com sistemas integrados de automação industrial.** <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/40913>

FERREIRA, André Luis *et al.* **A investigação da eficiência da automatização na gestão da linha de produção automobilística.** <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/34592>

FICAGNA, Tiago Vinicius; DOS REIS, Alexandre Amorim. ANÁLISE DE USABILIDADE DE UMA INTERFACE EM REALIDADE AUMENTADA E IOT PARA O MONITORAMENTO DE DOCAS. **Human Factors in Design**, v. 13, n. 26, 2024. doi. 10.5965/2316796313262024038

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GOMES, Lucas Lopes. APLICAÇÕES DE CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA. **LUMEN ET VIRTUS**, v. 14, n. 32, 2024. <https://periodicos.newsciencepubl.com/LEV/article/view/XLC15/12587>

GROOVER, M. P. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

IIDA, I.; GUIMARÃES, L. B. M. **Ergonomia: projeto e produção**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION (ISA). **ANSI/ISA-101.01-2015: Human Machine Interfaces for Process Automation Systems**. Research Triangle Park: ISA, 2015.

KURANAKA, Fabio. **Influência da introdução de automação em indústria do setor automotivo**. 2020. Tese de Doutorado. [sn]. <https://acervus.unicamp.br/Resultado/Listar?guid=1784514893700>

KAMINSKI, J. et al. Hard coatings by plasma CVD on polycarbonate for automotive and optical applications. **Surface and Coatings Technology**, v. 200, p. 6145–6151, 2006. [10.1016/j.tsf.2005.07.296](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040609005011648)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040609005011648>

LIKER, J. K. **O modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2021.

LINO, Ícaro Luiz de Souza. **Implementação de Arquitetura IIoT para virtualização de controle utilizando CLP S7-1200 e Gateway IOT2050**. 2025. <https://repositorio.ufrn.br/bitstreams/336bb4fd-c62c-4acc-982e-106f4e1e2b19/download>

LORENÇO, Felipe. **Projeto de um sistema de nivelamento para doca em centros logísticos**. 2020. <https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/9020>

MARÇAL, Márcio Alves *et al.* **Riscos ergonômicos de uma linha de produção na indústria automotiva**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ERGONOMIA, 20., 2020, Virtual. **Anais eletrônicos [...]**. Recife: ABERGO, 2020.

https://www.researchgate.net/profile/Marcio-Marcal/publication/351416619_RISCOS_ERGONOMICOS_DE_UMA_LINHA_DE_PRODUCAO_NA_INDUSTRIA_AUTOMOTIVA/links/60968426299bf1ad8d860c87/RISCOS-ERGONOMICOS-DE-UMA-LINHA-DE-PRODUCAO-NA-INDUSTRIA-AUTOMOTIVA.pdf Acesso em: 20 jun. 2026.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MARQUES, Wellington Kenidy. **Quality-of-service em arquiteturas eletrônicas veiculares baseadas em rede ethernet automotiva: um mapeamento sistemático**. 2021.

<http://repositoriocopia.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/29954>

MILLER, M. **Automotive plastics and composites: materials and processing**. SAE International, 2000.

MORAES, C. C. **Engenharia de automação industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

NETTO, Izabela Rodrigues Correa *et al.* **Integrando Lean e Ergonomia para a melhoria do processo produtivo de uma empresa do setor automotivo**. 2023. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/253235>

NEVES, Monique *et al.* **Ferramenta para Avaliação Ergonômica de Posto de Trabalho e Ambiente informatizado: atualização do Checklist de Couto** (2014). 2022. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/237301>

PERDÃO, Alisson Barbosa; BRUM, Ricardo Vieira. **Desenvolvimento de um sistema de controle/monitoramento de lâmpadas de lanternas do veículo**. <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/24322>

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Setor automotivo: fabricação nacional e mais sustentável está em alta**. Brasília: CNI, 2026. Disponível em: <portaldaindustria.com.br>. Acesso em: 3 jul. 2026.

PORTO, Chrislayne Helena Vieira. **Análise da implementação do Kaizen na melhoria contínua de processos industriais em uma empresa do setor de transporte vertical**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RIBEIRO, M. A. **Automação industrial: instrumentação, controle de processo e redes industriais**. São Paulo: Tekne, 2020.

RIBEIRO, Guilherme Fernando. Ergonomia e as condições ambientais de trabalho: análise da iluminância de um Laboratório de Tecnologia Aplicada. In: **OPEN SCIENCE RESEARCH II**. Editora Científica Digital, 2022. p. 1273-1283. 10.37885/220207837
<https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/ergonomia-e-as-condicoes-ambientais-de-trabalho-analise-da-iluminancia-de-um-laboratorio-de-tecnologia-aplicada>

RODRIGUES, L. F. **Flexibilidade e modularidade em linhas de montagem automotivas**. Curitiba: Appris, 2021.

SABADINI, José Antônio. **INtegração de tecnologias da indústria 4.0 para mitigar as inversões de kanban na manufatura automotiva**. 2026.
<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/a903099c-a6d6-4651-9d04-f4923e8eddea>

SALLES, Laura. **Indústria inteligente: como a tecnologia 4.0 pode conectar, automatizar e transformar a indústria automotiva**. 2024.
<https://repositorio.pucsp.br/handle/handle/43041>

SANTOS FILHO, Antonio Carlos *et al.* Implementação de novas tecnologias no gerenciamento de estoque: análise de experiência. **Prospectus (ISSN: 2674-8576)**, v. 7, n. 1, p. 340-359, 2025.
<https://www.prospectus.fatecitapira.edu.br/index.php/pst/article/download/367/282>

SANTOS, A. L. **Luminotécnica e sistemas de sinalização visual automotiva**. Porto Alegre: Tekne, 2018.

SILVA, J. R. **Manutenção industrial e retrofitting de sistemas automatizados**. São Paulo: Érica, 2020.

TIRELLI, Marcelo Alexandre; RÖHM, Daniel Gobato. **Aplicação da ferramenta ergonômica rula**. Estudo de caso em uma indústria automobilística. 2022.
https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Tirelli/publication/348751156_APLICACAO_DA_FERRAMENTA_ERGONOMICA_RULA_ESTUDO_DE_CASO_E_M_UMA_INDUSTRIA_AUTOMOBILISTICA/links/600ed9fd92851c13fe3613b9/APLICACAO-DA-FERRAMENTA-ERGONOMICA-RULA-ESTUDO-DE-CASO-E-M-UMA-INDUSTRIA-AUTOMOBILISTICA.pdf

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. S. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 9. ed. São Paulo: Érica, 2021.

VILARDOURO, Mariana José Nogueira. **Melhorias do Fluxo Intralogístico de uma Célula Produtiva e Suporte à Industrialização de um Novo Projeto no Ramo Automóvel**. 2024. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro (Portugal).

<https://search.proquest.com/openview/a314e8930e772f0748e9cc736d6e8a6e/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>

VOGEL-HEUSER, B. et al. Modularity and architecture of PLC-based software for automated production systems: An analysis in industrial companies. **Journal of Systems and Software**, v. 131, p. 35–62, 2017.

WAGNER, Dânton Giovan. **Automação de conjunto de elevação em linha de montagem**. 2024.

<https://repositorio.upf.br/items/b262c1c1-ae6d-4d6f-92c5-273d8c2b5146>