

**AUTO SOLDERING: AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM DOS TERMINAIS  
DAS BOBINAS APLICADAS A TRANSFORMADORES**

**AUTO SOLDERING: AUTOMATION OF THE SOLDERING PROCESS FOR  
TRANSFORMER COIL TERMINALS**

**AUTO SOLDERING: AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA DE  
TERMINALES DE BOBINAS APLICADAS A TRANSFORMADORES**

 <https://doi.org/10.56238/arev8n3-107>

**Data de submissão:** 23/02/2026

**Data de publicação:** 23/03/2026

**Alexandre Holanda Damasceno**

Mestre em Engenharia

Instituição: Instituto de Inovação e Tecnologia da Amazônia (IITA)

E-mail: alexandre@iita.org.br

**Léo Fernando Castelhana Bruno**

Doutor em Administração de Empresas

Instituição: Califórnia American University, Instituto de Inovação e Tecnologia da Amazônia (IITA)

E-mail: leo.bruno@iita-am.org

**Maria de Lourdes Santos de Lima**

Mestranda em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal do Amazonas (UFAM), B&Z International

E-mail: maria.lima@bezinternational.com

**Victor Abreu dos Santos**

Bacharel em Engenharia Mecânica

Instituição: Instituto Federal do Amazonas (IFAM), B&Z International

E-mail: victor.abreu@bezinternational.com

**Luis Felipe Trindade Natário**

Bacharel em Engenharia Elétrica

Instituição: Nilton Lins, B&Z International

E-mail: luis.natario@bezinternational.com

---

## **RESUMO**

O presente artigo descreve o desenvolvimento do projeto AUTO SOLDERING, fruto de uma iniciativa de PD&I concebida e executada pela B&Z International no contexto industrial, tendo sua produção científica coordenada pelo IITA. O projeto é voltado à concepção e implementação de um sistema automatizado de soldagem por imersão em estanho aplicado aos terminais de bobinas de transformadores utilizados em carregadores de telefones celulares. A iniciativa decorre da necessidade de substituir o processo manual e semiautomático atualmente empregado, que expõe operadores a riscos de saúde e segurança e apresenta instabilidades quanto à repetibilidade, reprodutibilidade e controle de parâmetros críticos. A solução proposta baseia-se em um protótipo

integrado de hardware e software capaz de automatizar as etapas de inserção, manuseio, limpeza em fluxo, soldagem por imersão e transferência do produto à etapa subsequente. O sistema contempla controle de variáveis essenciais (tempo, profundidade e ângulo de imersão) e monitoramento contínuo de temperatura, volume de solda e tempo de ciclo. Como diferencial, utiliza inteligência embarcada para tomada de decisão em tempo real, visando estabilidade operacional e padronização da qualidade. Adicionalmente, permite coleta e disponibilização de dados produtivos para integração ao sistema CMES por meio de arquivos XML, suportando indicadores de desempenho e rastreabilidade. O desenvolvimento considera ergonomia, segurança ocupacional e conformidade com a NR-12. Como resultados esperados, destacam-se a eliminação da exposição do operador ao processo, aumento de eficiência e disponibilidade, melhoria da qualidade e maior controle dos indicadores produtivos, caracterizando inovação incremental de processo aplicada ao contexto industrial.

**Palavras-chave:** Automação Industrial. Soldagem por Imersão. Transformadores Eletrônicos. Segurança do Trabalho. Controle de Processos.

## ABSTRACT

This article describes the development of the AUTO SOLDERING project, the result of an PD&I initiative conceived and executed by B&Z International in the industrial context, with its scientific production coordinated by IITA. The project is aimed at the design and implementation of an automated tin immersion soldering system applied to transformer coil terminals used in cell phone chargers. The initiative stems from the need to replace the manual and semi-automatic process currently employed, which exposes operators to health and safety risks and presents instabilities regarding repeatability, reproducibility and control of critical parameters. The proposed solution is based on an integrated hardware and software prototype capable of automating the stages of insertion, handling, fluxing, immersion soldering and transfer of the product to the subsequent stage. The system includes control of essential variables (time, depth and immersion angle) and continuous monitoring of temperature, weld volume and cycle time. As a differential, it uses embedded intelligence for real-time decision-making, aiming at operational stability and quality standardization. Additionally, it allows the collection and availability of productive data for integration into the CMES system through XML files, supporting performance indicators and traceability. The development considers ergonomics, occupational safety and compliance with NR-12. As expected results, the elimination of operator exposure to the process, increased efficiency and availability, improved quality and greater control of production indicators stand out, characterizing incremental process innovation applied to the industrial context.

**Keywords:** Industrial Automation. Dip Soldering. Electronic Transformers. Occupational Safety. Process Control.

## RESUMEN

Este artículo describe el desarrollo del proyecto AUTO SOLDERING, resultado de una iniciativa de PD&I concebida y ejecutada por B&Z International en el contexto industrial, cuya producción científica está coordinada por el IITA. El proyecto tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema automatizado de soldadura por inmersión de estaño aplicado a los terminales de bobina de transformador utilizados en cargadores de teléfonos móviles. La iniciativa surge de la necesidad de sustituir el proceso manual y semiautomático actualmente empleado, que expone a los operadores a riesgos para la salud y la seguridad y presenta inestabilidades en cuanto a repetibilidad, reproducibilidad y control de parámetros críticos. La solución propuesta se basa en un prototipo integrado de hardware y software capaz de automatizar las etapas de inserción, manejo, limpieza de flujos, soldadura por inmersión y transferencia del producto a la siguiente etapa. El sistema incluye

el control de variables esenciales (tiempo, profundidad y ángulo de inmersión) y monitorización continua de la temperatura, el volumen de soldadura y el tiempo de ciclo. Como diferencial, utiliza inteligencia integrada para la toma de decisiones en tiempo real, con el objetivo de lograr la estabilidad operativa y la estandarización de calidad. Además, permite la recopilación y disponibilidad de datos productivos para su integración en el sistema CMES mediante archivos XML, apoyando indicadores de rendimiento y trazabilidad. El desarrollo tiene en cuenta la ergonomía, la seguridad laboral y el cumplimiento de la normativa NR-12. Como resultados esperados, destacan la eliminación de la exposición del operador al proceso, el aumento de la eficiencia y disponibilidad, la mejora de la calidad y un mayor control de los indicadores de producción, caracterizando la innovación incremental de procesos aplicada al contexto industrial.

**Palabras clave:** Automatización Industrial. Soldadura por Inmersión. Transformadores Electrónicos. Seguridad Laboral. Control de Procesos.

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por eficiência e segurança nos processos de manufatura eletrônica tem impulsionado a transição de métodos manuais para sistemas de automação inteligente. O presente artigo apresenta o desenvolvimento do projeto AUTO SOLDERING, cujo objetivo é a concepção e implementação de um sistema automatizado para a soldagem por imersão em estanho dos terminais de bobinas de transformadores. A iniciativa fundamenta-se na necessidade de substituir processos manuais e semiautomáticos que, além de exporem operadores a riscos ocupacionais, apresentam instabilidade técnica. Segundo Rosário (2005), a automação é essencial em processos que exigem alta repetibilidade, pois sistemas ativos são capazes de atuar com eficiência ótima ao processarem informações do meio em tempo real.

Embora as técnicas de união de materiais sejam ancestrais, sua evolução tecnológica permitiu a integração sistêmica em diversos segmentos industriais globais, consolidando-se como uma etapa crítica em setores como o polo de duas rodas, linha branca, eletroeletrônicos e eletroportáteis. Segundo Rosário (2005), a evolução desses processos é impulsionada pela necessidade de precisão e integridade estrutural, onde a automação atua como o elo entre a metalurgia convencional e a manufatura avançada. Conforme destaca Groover (2011), a soldagem e outros processos de união são fundamentais na montagem de produtos complexos, exigindo um controle rigoroso de parâmetros para garantir a qualidade final em ambientes de alta produtividade.

A implementação da automação introduz um paradigma disruptivo nos modelos de produção, impulsionando simultaneamente a eficiência operacional e a confiabilidade qualitativa do produto final. Para além do incremento produtivo, a transição tecnológica em processos críticos atua como um agente fundamental na promoção da segurança e saúde do operador, ao mitigar a exposição a ambientes insalubres ou riscos ergonômicos. Segundo Rosário (2005), a automação permite que o sistema ativo execute tarefas perigosas ou exaustivas com precisão superior à humana, garantindo que a integridade física do trabalhador seja preservada sem prejuízo ao throughput. Nesse sentido, Groover (2011) reforça que a automação não visa apenas a substituição do esforço manual, mas a criação de um ambiente de trabalho onde a tecnologia de controle absorve as variáveis de risco, resultando em um processo industrial mais humano, estável e seguro.

O presente artigo propõe-se a evidenciar a transição do modelo de fabricação de um processo de soldagem industrial para o sistema automatizado, avaliando a eficácia da mitigação de anomalias produtivas, bem como o incremento da eficiência e da qualidade assim como a redução dos riscos à saúde e integridade física do operador. Conforme destacam Rosário (2005) e Groover (2011), essa

transição é fundamental para converter sistemas rígidos em células de manufatura inteligentes e seguras.

Para a consecução deste objetivo central, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos: levantamento técnico por meio da realização do diagnóstico detalhado do processo atual e a identificação das causas raiz de seus problemas críticos; proposição de solução ao expor a arquitetura do modelo automatizado desenvolvido, detalhando sua inteligência embarcada e mecanismos de controle; análise comparativa com a execução de um estudo quali-quantitativo entre os modelos manual e automatizado, validando os ganhos de performance e a conformidade com as normas de segurança.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O referencial teórico de um estudo consiste em uma análise crítica e sistematizada da literatura pertinente ao tema, com o objetivo de fornecer a contextualização teórica da pesquisa e delimitar seus conceitos fundamentais. Os tópicos a seguir apresentam os principais constructos conceituais que sustentam e orientam o desenvolvimento deste trabalho.

### **2.1 INDÚSTRIA 4.0**

A indústria nos moldes que se conhece atualmente é o resultado de inúmeras transformações ao longo das décadas, transformações decorrentes de revoluções, estudos e evolução tecnológica e modernidade das sociedades. Para Boettcher (2015), a Indústria 4.0 é fruto das revoluções industriais e dos grandes avanços tecnológicos.

#### **2.1.1 Primeira Revolução Industrial – Indústria 1.0**

As formas mais antigas de civilização produziam bens estritamente de acordo com suas necessidades imediatas, por meio de processos predominantemente manuais, caracterizados pela produção artesanal. Com o crescimento demográfico, a necessidade de fixação em moradias permanentes e a organização social em vilas e pequenos agrupamentos, iniciou-se uma mudança significativa no comportamento humano, que resultou no surgimento de novas demandas e no aumento do consumo.

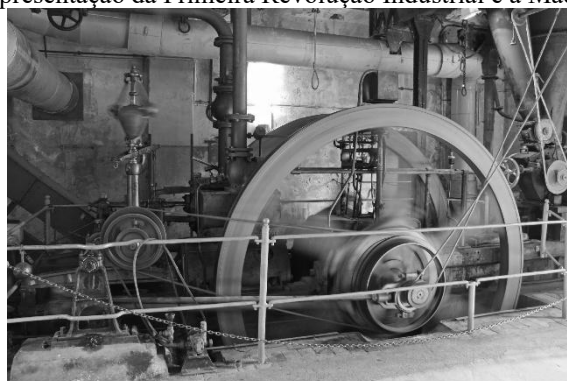
A migração da população do campo para os centros urbanos intensificou esse processo, promovendo transformações no mercado com o objetivo de estimular o consumo. Nesse contexto, surgiram novos serviços e atividades voltados à população urbana, como cinemas, lojas de vestuário e o comércio de eletroeletrônicos a baixo custo. A crescente demanda por bens de consumo exigiu a

reformulação dos processos produtivos, uma vez que a produção artesanal já não era capaz de atender à produção em larga escala mantendo a padronização dos produtos. Assim, emergiram as fábricas como alternativa para impulsionar o mercado varejista, com a adoção de mão de obra organizada em processos industrializados.

Segundo Cavalcante e Silva (2011), além de mais ágil, a produção passou a ocorrer em maior escala, contribuindo para a transformação da cultura social por meio da consolidação do capitalismo, cujo principal objetivo é a obtenção de lucros.

De acordo com Boettcher (2015), essa revolução teve início na Inglaterra entre o final do século XVIII e o início do século XIX, estendendo-se posteriormente a outros países, como Estados Unidos, França, Bélgica, Rússia, Alemanha e Holanda. A principal característica da Primeira Revolução Industrial foi o aperfeiçoamento da máquina a vapor, inicialmente aplicada à indústria têxtil e, posteriormente, expandida para diversos outros processos produtivos.

Figura 1. Representação da Primeira Revolução Industrial e a Máquina a Vapor.



Fonte: O Setor Elétrico (2010).

### **2.1.2 Segunda Revolução Industrial – Indústria 2.0**

Boettcher (2015) afirma que o principal fator que promoveu o surgimento de novas revoluções foi a evolução das tecnologias, pois proporcionavam crescimento e modernização e aumento expressivo dos lucros. Por volta de 1870 surge a Segunda Revolução Industrial movida por demanda tecnológica.

Essa transição foi marcada pela descoberta da eletricidade, transformação do ferro em aço, operacionalização e modernização de meios de transporte, avanço dos sistemas de comunicação, desenvolvimento da indústria química, etc. Como principais características dessa revolução foi a busca por maiores lucros, especialização do trabalho e aplicação da produção (SILVA; GASPARIN, 2013).

Inicia-se o Fordismo, denominação para produção em massa, com o objetivo de racionalizar a produção por meio de inovações técnicas, estimulando uma nova cadeia de produção em massa VS consumo em massa, tendo como precursor Henry Ford em 1914 (BOETTCHER, 2015).

Figura 2. Henry Ford - Fordismo.



Fonte: Business Insider (2012).

### **2.1.3 Terceira Revolução Industrial – Indústria 3.0**

Além do impulsionamento tecnológico, houve também renovação no processo econômico, político e social, com grande dinamismo e alta complexidade no século XX e XXI, conforme Silva et al. (2012).

Também denominada de Terceira Revolução, Técnico-Científica e Informacional, foi formada por meio de processos de inovação tecnológica, os quais são marcados pelos avanços no campo da informática, robótica, das telecomunicações, dos transportes, da biotecnologia, química e nanotecnologia (BOETTCHER, 2015).

A Indústria 3.0 apresentou diversas características marcantes, entre as quais se destacam a utilização de múltiplas fontes de energia, o uso crescente de recursos da informática e da automação, bem como o aumento da consciência ambiental. Observou-se, ainda, a intensificação da substituição da mão de obra humana por máquinas cada vez mais modernas, o que contribuiu para o aumento do desemprego estrutural. Paralelamente, houve a ampliação dos direitos trabalhistas, o avanço do processo de globalização, o surgimento de novas potências industriais e a massificação dos produtos tecnológicos (SILVA et al., 2002).

### **2.1.4 Quarta Revolução Industrial – Indústria 4.0**

O conceito de Indústria 4.0 ganhou visibilidade internacional em 2011, quando foi apresentado oficialmente na Alemanha durante a Feira de Hannover. De acordo com Kagermann et al. (2013), essa iniciativa surgiu como resposta estratégica à necessidade de aumentar a competitividade do setor manufatureiro alemão frente às transformações tecnológicas e ao cenário econômico global.

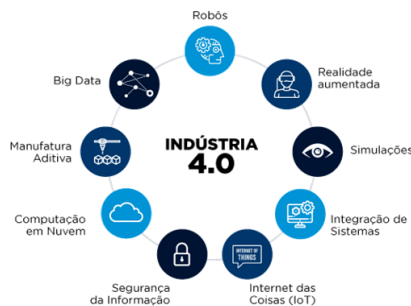


No ano seguinte, em 2012, os responsáveis pelo desenvolvimento do projeto, sob a coordenação de Siegfried Dais, representante da Robert Bosch GmbH, e Henning Kagermann, vinculado à acatech, elaboraram um documento com diretrizes e recomendações encaminhadas ao Governo Federal Alemão. Esse relatório serviu como base para o planejamento e a implementação do novo modelo industrial. Em 2013, ainda na Feira de Hannover, foi consolidada e divulgada a versão final do conceito de Indústria 4.0 (Silveira, 2017).

Esse novo paradigma industrial está associado à intensificação dos processos de digitalização e automação na manufatura, promovendo ambientes produtivos cada vez mais integrados e inteligentes (Oesterreich; Teuteberg, 2016). Conforme destaca Silveira (2017), a essência da Indústria 4.0 reside na capacidade de interligar máquinas, sistemas e recursos produtivos, permitindo a formação de redes autônomas capazes de tomar decisões e otimizar processos sem intervenção humana constante.

Nessa perspectiva, Zawadzki e Zywicki (2016) afirmam que a Indústria 4.0 representa a convergência dos avanços tecnológicos recentes com uma nova visão de produção, na qual sistemas ciberfísicos conectam o ambiente físico ao virtual, viabilizando operações automatizadas, inteligentes e altamente adaptáveis.

Figura 3. Principais Tecnologias da Indústria.



Fonte: Tecnicon (2022).

#### 2.1.4 Indústria 4.0 no Brasil

No contexto brasileiro, a Indústria 4.0 ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento quando comparada a países industrialmente mais avançados, como Alemanha, Estados Unidos e Japão. Segundo Hahn (2017), esse atraso tecnológico evidencia-se, principalmente, pela baixa substituição de linhas produtivas tradicionais por sistemas automatizados, cujo ritmo de adoção permanece inferior ao observado em economias desenvolvidas.

Apesar desse cenário, a indústria nacional demonstra esforços para se inserir nesse novo paradigma produtivo. De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2016), as



iniciativas voltadas à Indústria 4.0 no Brasil concentram-se, inicialmente, no aprimoramento de produtos e no desenvolvimento de novos modelos de negócio, buscando maior eficiência e competitividade.

Zancul (2016) destaca que, embora muitas indústrias brasileiras já tenham incorporado algum nível de automação, a manufatura digital ainda não foi plenamente alcançada. O autor ressalta que a Indústria 4.0 se apoia em duas dimensões fundamentais, processos integrados e produtos inovadores, nas quais o Brasil ainda apresenta limitações, refletidas no reduzido número de setores competitivos em escala global.

Além disso, observa-se que diversas empresas nacionais ainda estão em processo de transição para a Terceira Revolução Industrial, convivendo com diferentes níveis de maturidade tecnológica. No entanto, conforme aponta Santos (2017), existe a possibilidade de acelerar esse processo por meio da adoção direta de tecnologias associadas à Indústria 4.0, especialmente por pequenas e médias empresas, que podem obter ganhos significativos de produtividade e competitividade.

Nesse sentido, a implementação da Indústria 4.0 no Brasil deve considerar as particularidades da realidade nacional, permitindo a adaptação dos conceitos e a superação de etapas tradicionais do desenvolvimento industrial. Contudo, a disseminação desse modelo ainda enfrenta obstáculos, como a falta de conhecimento técnico e a resistência à adoção de novas tecnologias, fatores que dificultam a consolidação dessa nova revolução industrial no país (Hahn, 2017).

## 2.2 ERGONOMIA

O termo Ergonomia foi utilizado pela primeira vez em 1857 por Wojciech Jastrzębowski, sendo derivado das palavras gregas *ergon* (trabalho) e *nomos* (regras ou leis). A ergonomia tem sua origem nos estudos da Fisiologia do Trabalho, com foco na identificação das causas da fadiga laboral e na proposição de soluções que visem à sua mitigação ou eliminação (Pinto, 2009).

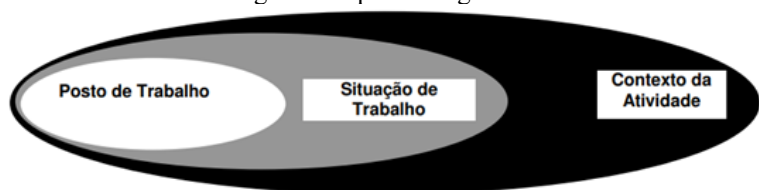
Segundo Wisner (1982), a ergonomia pode ser definida como o conjunto de conhecimentos científicos relativos ao ser humano e necessários para a concepção de ferramentas, máquinas, sistemas e dispositivos que possam ser utilizados com o máximo de conforto, segurança e eficiência.

A ergonomia está diretamente relacionada à saúde e segurança do trabalhador, por meio da adequação dos processos e condições de trabalho, buscando garantir o maior nível possível de conforto e bem-estar. Essa preocupação passou a ganhar maior relevância a partir das mudanças na forma como o trabalhador era percebido dentro das organizações, especialmente ao longo das diferentes revoluções industriais. Conforme destaca Chiavenato (2002), “quanto mais industrializada

for a sociedade, mais numerosas e complexas se tornam as organizações, que passam a exercer um impacto profundo e duradouro sobre a vida e a qualidade de vida dos indivíduos”.

Nesse contexto, a ergonomia aborda aspectos como iluminação, postura, posicionamento de membros e coluna vertebral, movimentos repetitivos, capacidade de manuseio de cargas, temperatura e outros fatores físicos e organizacionais, os quais são fundamentais para garantir que o ambiente de trabalho seja considerado adequado, seguro e saudável.

Figura 4. Tipos de Ergonomia.



Realidade Antropotecnológica:  
Tecido Industrial, Geografia Humana, História, Cultura

Fonte: Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Londrina (2019).

## 2.3 SOLDAGEM

A soldagem é um processo de união permanente de materiais, predominantemente metálicos, realizado por meio de aquecimento e/ou pressão, com ou sem adição de material de enchimento. Em aplicações eletroeletrônicas, a soldagem assume papel crítico por impactar diretamente a condutividade elétrica, a integridade mecânica e a confiabilidade do produto ao longo do ciclo de vida.

Do ponto de vista da classificação tecnológica, os processos de soldagem podem ser organizados em diferentes grupos, conforme a forma de geração de calor e o mecanismo de união:

- Soldagem por fusão: ocorre a fusão do metal de base, com ou sem metal de adição, e a junta é formada após solidificação do banho metálico. É amplamente utilizada na indústria pela versatilidade e produtividade.
- Soldagem no estado sólido (por pressão): a união ocorre sem fusão significativa do metal de base, tipicamente pela aplicação de pressão, podendo haver aquecimento auxiliar. Destaca-se por juntas de elevada resistência e por reduzir efeitos metalúrgicos associados à fusão.
- Soldagem por resistência elétrica: o calor é gerado pela passagem de corrente elétrica na região de contato entre as peças, combinada com pressão. É comum em aplicações seriadas e de alta repetibilidade.

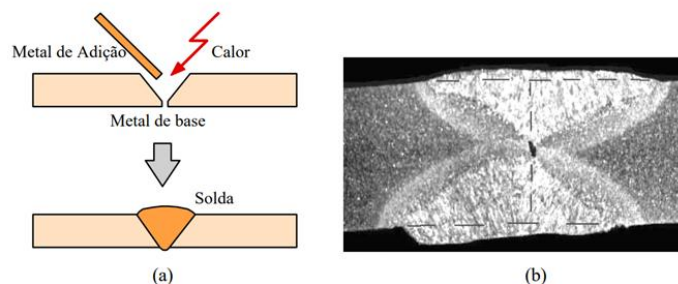
- Soldagem por energia concentrada: utiliza fontes altamente concentradas (ex.: laser ou feixe de elétrons), permitindo elevada precisão, baixa zona termicamente afetada e controle rigoroso de deformações.
- Soldagem por gás (oxigás): utiliza o calor da combustão de gases, sendo tradicionalmente aplicada em operações de manutenção, reparo e soldagens leves.
- Brasagem e soldagem branda: processos de união em que o metal de base não é fundido; a união ocorre pela fusão do metal de adição, com ponto de fusão inferior ao do metal de base. A brasagem ocorre, em geral, acima de 450 °C, e a soldagem branda abaixo desse valor.

Historicamente, a soldagem acompanha a evolução das técnicas metalúrgicas há séculos, com registros de processos como brasagem e forjamento em diferentes civilizações. A consolidação industrial intensificou-se a partir do desenvolvimento de fontes de energia controláveis e do uso do arco elétrico e de gases combustíveis, ampliando a precisão e a confiabilidade dos processos de união, especialmente após as grandes demandas industriais do século XX.

Nessa etapa inicial de desenvolvimento, a soldagem apresentou aplicação limitada, sendo empregada principalmente em reparos emergenciais. Somente a partir da Primeira Guerra Mundial esse processo passou a ser utilizado de forma mais ampla e sistemática, consolidando-se como um importante método de fabricação industrial. Atualmente, existem mais de cinquenta processos distintos de soldagem com aplicação no setor industrial, tornando-se o principal meio de união permanente de metais. A relevância desse processo é evidenciada por sua presença em diversos segmentos da indústria e pela influência direta que os requisitos de soldabilidade exercem no desenvolvimento de novos tipos de aços e de outras ligas metálicas.

No presente trabalho, o foco está na soldagem por imersão em estanho (banho de estanho), aplicada a terminais metálicos de transformadores miniaturizados. Nesse método, os terminais previamente preparados, incluindo a etapa de fluxagem, são imersos em liga metálica líquida por um tempo controlado, promovendo a molhagem adequada e a formação da junta após a solidificação. Por se tratar de um processo altamente sensível a variáveis como tempo, profundidade e ângulo de imersão, além da temperatura e das condições do banho, a automação torna-se um fator determinante para garantir estabilidade, repetibilidade e redução de defeitos no processo produtivo.

Figura 5. Processo de soldagem.



Fonte: Universidade Federal do Espírito Santo (2009).

## 2.4 AUTOMAÇÃO

É fundamental distinguir a automatização da automação. Enquanto a primeira refere-se estritamente à mecanização de movimentos repetitivos, caracterizando-se como uma "ação cega" por carecer de processamento de variáveis, a automação define-se como um conjunto de técnicas ciberfísicas. Ela viabiliza a criação de sistemas ativos capazes de processar informações do meio em tempo real para atuar com eficiência ótima. Em suma, a automação confere inteligência ao processo, permitindo que o sistema tome decisões fundamentadas em dados.

Nesse contexto, a automação industrial moderna opera por meio de sistemas computacionais que processam sinais provenientes de diversos instrumentos de medição no chão de fábrica. Ao confrontar esses dados com parâmetros ideais (setpoints), o sistema executa operações matemáticas complexas com a finalidade de gerar sinais de correção instantâneos. Como afirmam Groover (2011), a automação é a tecnologia pela qual um processo ou procedimento é realizado sem assistência humana, sendo executado por meio de um programa de instruções combinado com um sistema de controle.

Segundo Rosário (2005), a automação industrial pode ser categorizada em três tipos principais, de acordo com sua versatilidade e volume de produção:

- **Automação Fixa:** Caracteriza-se pela rigidez operacional, com pouca ou nenhuma adaptabilidade a mudanças. É direcionada a processos de altíssimo volume e modelos padronizados, onde a sequência de operações é fixada pela configuração do equipamento. Exemplo disso são os processos de inserção SMD de grande escala, onde não há variação interna ou troca de setup, sendo as linhas segregadas por modelos devido à impossibilidade de alteração para processos distintos.
- **Automação Flexível:** Constitui uma evolução da automação programável, sendo direcionada para volumes médios de produção. Sua principal característica é a capacidade de processar

diferentes modelos de produtos sem perda de tempo com trocas de ferramentas ou reprogramações extensas, permitindo um mix de produção variado e simultâneo.

- Automação Programável: É utilizada em processos produtivos que apresentam alta variabilidade de produtos e volumes de produção menores. Neste caso, a sequência de operações é controlada por um software, podendo ser alterada para diferentes configurações de produtos, embora exija um tempo de setup para a reprogramação e troca de dispositivos físicos.

A evolução dos sistemas de manufatura tem sido impulsionada pela transição de mercados de massa para mercados de nicho, onde a variabilidade de produtos torna-se um diferencial competitivo. Segundo Rosário (2005), a necessidade de automação surge não apenas para aumentar a produtividade, mas para garantir a integridade e a repetibilidade em cenários onde o erro humano é potencializado pela diversidade de modelos e processos.

Em contextos de alta variabilidade, a automação deixa de ser puramente mecânica e passa a ser uma ferramenta de gestão da complexidade. Rosário (2005) argumenta que a automação fixa, embora eficiente para grandes volumes, torna-se obsoleta diante da necessidade de customização, uma vez que "é direcionada para processos produtivos com pouca ou nenhuma adaptabilidade a mudanças" (Rosário, 2005, p. 11).

A implementação de sistemas flexíveis e programáveis justifica-se pela capacidade de processar diferentes configurações de produtos com o mínimo de intervenção física. como aponta o autor:

"A automação flexível é uma extensão da automação programável. [...] um sistema de automação flexível é aquele capaz de produzir uma variedade de produtos (ou partes) com tempos de setup reduzidos, permitindo a produção de diferentes modelos em uma mesma linha de montagem." (Rosário, 2005).

Dessa forma, a variabilidade de produtos exige que a automação seja dotada de sistemas de controle inteligentes e softwares embarcados capazes de reconhecer e ajustar parâmetros de forma autônoma. essa transição para a automação flexível minimiza as perdas decorrentes de trocas de lote (setups) e reduz a incidência de falhas críticas, como as de isolamento elétrico ou integridade estrutural, que tendem a ocorrer com maior frequência quando o processo depende exclusivamente da memória e da ação manual do operador frente a múltiplos modelos.

Em suma, a automação em ambientes de alta variabilidade não é apenas uma escolha técnica, mas uma necessidade estratégica para viabilizar o throughput e a conformidade normativa em sistemas de produção modernos.

### 3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como aplicada e tecnológica, por estar orientada à solução de um problema real de manufatura e envolver o desenvolvimento e a avaliação de um protótipo de automação industrial. Quanto aos objetivos, trata-se de um estudo descritivo e explicativo, pois descreve o processo de soldagem por imersão atualmente utilizado e explica os efeitos da automação sobre variáveis críticas de segurança, estabilidade e desempenho (GIL, 2019).

Em relação à abordagem, adota-se um delineamento misto (quali-quantitativo), integrando evidências qualitativas (mapeamento de riscos ocupacionais e conformidade com requisitos de segurança) e quantitativas (medições de tempo de ciclo, indicadores de produtividade e métricas de qualidade), estratégia recomendada quando se busca uma compreensão mais abrangente do fenômeno pela combinação de diferentes tipos de dados (CRESWELL; PLANO CLARK, 2017).

Como procedimento técnico, o trabalho configura-se como um estudo de caso em ambiente industrial, adequado quando se investigam fenômenos contemporâneos no contexto real e se pretende compreender “como” e “por que” mudanças de processo produzem determinados efeitos (YIN, 2018). A validação do desempenho do protótipo segue uma lógica comparativa antes-depois (processo semiautomático versus protótipo automatizado), incorporando cronoanálise/estudo de tempos para estimativas e comparação do tempo padrão e do tempo de ciclo (BARNES, 1977).

A avaliação do desempenho do sistema automatizado é realizada por meio da comparação direta entre o processo semiautomático e o modelo automatizado, considerando indicadores operacionais e produtivos extraídos do próprio sistema de controle do equipamento. A análise contempla variáveis como tempo de ciclo, estabilidade do processo, incidência de defeitos e disponibilidade operacional, dados estes coletados automaticamente pelo software embarcado e disponibilizados para acompanhamento por meio do sistema CMES. Para a consolidação da performance global do equipamento, adota-se o indicador Overall Equipment Effectiveness (OEE), amplamente utilizado na indústria para a mensuração integrada de disponibilidade, desempenho e qualidade (NAKAJIMA, 1988).

### 3.1 DIAGNÓSTICO DO PROCESSO NÃO AUTOMATIZADO

O processo produtivo em estudo constitui uma etapa fundamental da manufatura de carregadores de celular, concentrando-se especificamente na soldagem dos terminais de um componente crítico: o transformador. Esta operação é tecnicamente denominada soldagem por imersão, ou "banho de estanho", e consiste na submissão dos terminais ao metal em estado líquido para promover a união metalúrgica. Para assegurar a qualidade e a integridade da junta, é imperativo o controle rigoroso da temperatura do fluido, da precisão da altura de imersão e da pureza da liga, uma vez que a presença de contaminantes compromete as propriedades condutivas e a aderência do processo.

O método vigente para a soldagem dos terminais baseia-se em um sistema semiautomático com elevada dependência de intervenção manual e baixa eficiência ergonômica. O fluxo operacional inicia-se com a preparação da vareta de fixação, que demanda a aplicação manual de fitas adesivas (dupla face e crepe) para o suporte dos componentes. Após o posicionamento dos transformadores com os pinos orientados verticalmente, os terminais são submetidos à fluxagem, processo que exige a renovação frequente do insumo químico a cada dois ciclos de bandeja para garantir a desoxidação adequada das superfícies.

Figura 6. Análise comparativa da morfologia dos terminais: (A) Estado in natura pré-soldagem e (B) Interface metálica após o processo de estanhagem por imersão.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

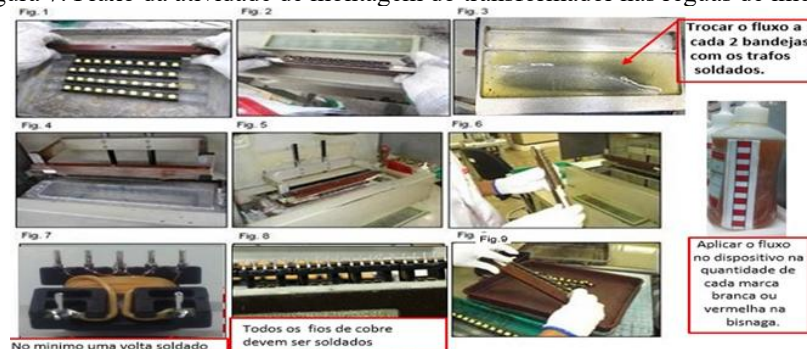
A etapa crítica da soldagem ocorre mediante o acionamento manual, após o acoplamento da vareta ao dispositivo de tração. O processo exige dois ciclos de imersão consecutivos na liga de estanho fundido, com tempos de contato rigorosamente estabelecidos entre 2,2 e 2,6 segundos. O segundo mergulho apresenta uma complexidade técnica adicional, pois deve atingir seletivamente o fio Tex-E. Ao final da imersão, é realizada uma inspeção visual detalhada para validar a integridade da soldagem e certificar a ausência de degradação térmica nos isolantes ou nos elementos de fixação.

Este fluxo é caracterizado por uma manutenção constante do setup, exigindo a substituição da fita crepe a cada 15 ou 20 ciclos, frequência que varia conforme a temperatura e a saturação do fluxo. Na ocorrência de anomalias na soldagem primária, os componentes são segregados para uma linha



de retrabalho com parâmetros ajustados, tempos de imersão entre 1,0 e 2,0 segundos e temperaturas entre 350°C e 370°C. A persistência de falhas após esta intervenção resulta no descarte definitivo (scrap), evidenciando um modelo de manufatura com alta incidência de manipulação humana e gargalos de produtividade latentes.

Figura 7. Fluxo da atividade de montagem do transformador nas régua de imersão.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

Figura 8. Processo de imersão dos transformadores no banho de solda.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

A análise deste cenário revela uma matriz de riscos críticos à integridade física e à saúde ocupacional dos operadores a longo prazo. O fator de risco preponderante reside na inalação de fumos metálicos compostos por partículas ultrafinas (0,01 a 1µm) que, por sua dimensão reduzida, transpõem as barreiras do sistema respiratório. A toxicidade desses efluentes é potencializada por elementos como o cromo hexavalente Cr (VI), o manganês e o níquel. Segundo dados técnicos da Nederman, a exposição contínua a esses agentes está associada a patologias severas, incluindo neoplasias sistêmicas, danos neurológicos, asma ocupacional e outras doenças pulmonares.

Somado ao risco químico, a operação manual impõe perigos físicos imediatos, visto que o crisol de soldagem opera em temperaturas constantes entre 350°C e 370°C. Essa condição submete o trabalhador a uma intensa irradiação térmica, resultando em desconforto agudo e fadiga precoce, fatores que elevam exponencialmente a probabilidade de acidentes e queimaduras graves durante a manipulação da vareta. Sob a perspectiva da eficiência produtiva, o modelo atual padece de

instabilidades crônicas na repetibilidade e na reprodutibilidade do processo, uma vez que o controle de variáveis fundamentais, como tempo de imersão, profundidade e ângulo de ataque, depende exclusivamente da destreza e da resistência física do operador. A ausência de registros digitais e a dependência de métodos analógicos para monitoramento dificultam a gestão da performance e favorecem erros de manuseio que comprometem a qualidade final do produto. Diante deste cenário, a automação do processo via projeto AUTO SOLDERING apresenta-se como uma medida imperativa para assegurar a biossegurança e a estabilidade técnica exigidas pela manufatura moderna.

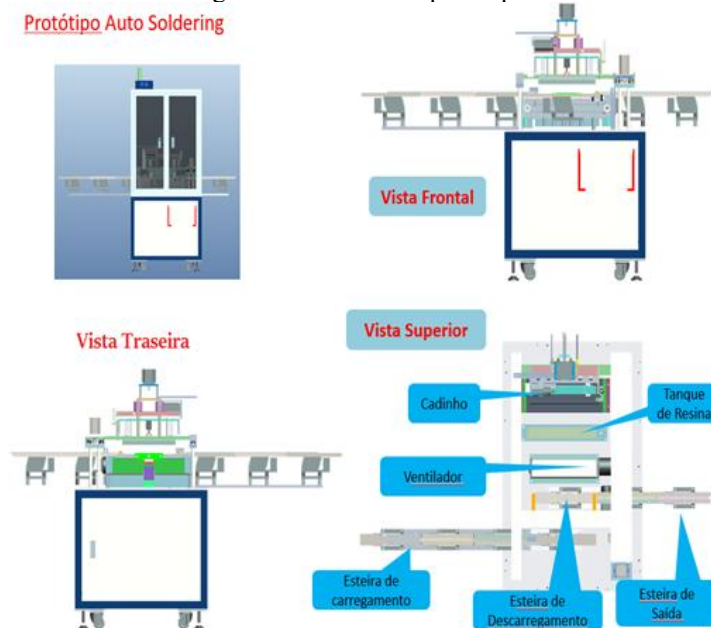
O diagnóstico do processo atual revelou instabilidades críticas na repetibilidade e reprodutibilidade da soldagem, principalmente devido à variação manual do tempo e ângulo de imersão. Além disso, identificou-se a exposição direta dos operadores a fumos metálicos e altas temperaturas, reforçando a necessidade de uma solução automatizada em conformidade com a NR-12 e normas de ergonomia.

### 3.2 DETALHAMENTO DO MODELO AUTOMATIZADO COM INTELIGÊNCIA EMBARCADA E MECANISMOS DE CONTROLE

A solução proposta consiste em um protótipo de automação integral com software embarcado, projetado para gerenciar a cadência produtiva através do monitoramento em tempo real. A transição para o modelo totalmente automatizado elimina a necessidade de intervenção direta do operador nas etapas críticas, reduzindo substancialmente os riscos de doenças ocupacionais e acidentes. O escopo tecnológico do sistema abrange:

- Automação do Ciclo de Vida do Produto: O protótipo realiza a inserção, o manuseio e o transporte automático dos transformadores através de sistemas de pick and place customizados, garantindo uma produção contínua em regime on-line.
- Tratamento e Soldagem Inteligente: Inclui a limpeza automática dos terminais em tanques de fluxo e a soldagem por imersão com controle rigoroso da altura do banho, ângulo e profundidade.
- Segurança e Biossegurança: Implementação de um sistema de exaustão independente para captura de fumos metálicos na fonte e conformidade com a NR-12 para operação em ambiente de risco zero.
- Integração Digital (Smart Manufacturing): Coleta de índices de produção e status do equipamento para exportação via arquivos XML, permitindo a integração direta com o sistema CMES da empresa.

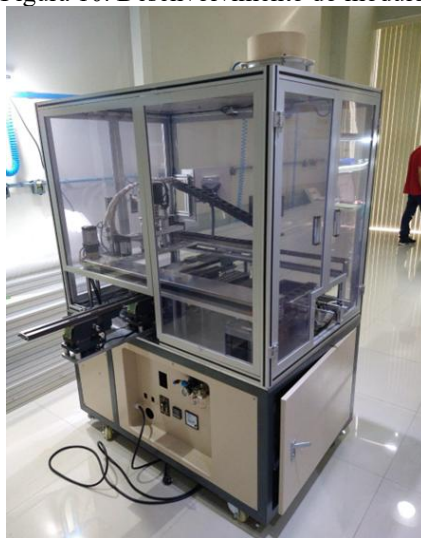
Figura 9. Conceito do protótipo.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

O protótipo foi concebido a partir de modelagem digital elaborada no software SolidWorks. Na fase de construção, procedeu-se inicialmente à montagem da estrutura mecânica e, em seguida, à integração dos dispositivos de manipulação, transporte, controle e potência, incluindo sensores, atuadores, CLP, cilindros pneumáticos, entre outros componentes necessários ao funcionamento do sistema.

Figura 10. Desenvolvimento do módulo.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

O sistema de armazenamento e controle do fluxo e da solda nos respectivos tanques foi desenvolvido de forma independente, em função das particularidades técnicas de cada aplicação. O

tanque de fluxo resinado é destinado à limpeza dos terminais, fabricados em liga de titânio, tendo sido submetido a testes de uso e confiabilidade.

Figura 11. Tanque de solda.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

O emprego do fluxo de solda tem como principal finalidade facilitar o processo de soldagem, promovendo a remoção de óxidos e impurezas, além de melhorar a molhabilidade da superfície metálica. De acordo com Frank et al. (1981), o fluxo de soldagem pode ser composto por uma mistura não reativa, contendo ativadores com pelo menos um átomo de halogênio, componentes de desestabilização e surfactantes ácidos, tais como ácidos carboxílicos polibásicos, seus derivados hidroxilados, acetoácidos ou combinações desses agentes, cuja função é otimizar o desempenho do processo.

Figura 12. Tanque de circulação de fluxo (fluxador).



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

Para assegurar que o composto químico fosse mantido em condições ideais de operação, especialmente quanto à temperatura, altura da onda e volume aplicado, foi projetado um sistema com bomba de recirculação, responsável por regular a formação da onda durante o processo de limpeza. Tal solução evita a alteração da viscosidade do fluxo, prevenindo sua consistência pastosa, e permite o ajuste controlado dos parâmetros operacionais, garantindo estabilidade e qualidade ao sistema de limpeza desenvolvido.

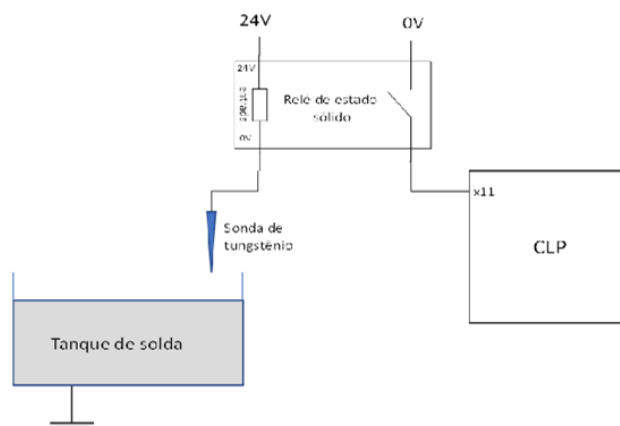
Figura 13. Sensor de nível do volume de solda.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

Uma das principais soluções usadas no sistema foi o sensor de altura da onda de solda, desenvolvido a partir de pesquisa realizada, estabeleceu-se um sistema (descrito na figura 14) que se inicia quando a sonda de tungstênio toca a superfície da solda líquida, esse potencial de 0V é transferido para a entrada do relé de estado sólido, o que resulta na energização da bobina. Nesse instante o contato do relé de estado sólido comuta, transferindo para o terminal x11 do CLP o potencial de 0V. Quando o CLP detecta o sinal em x11, o seu programa interno realiza a leitura da altura no encoder do eixo Z. A altura lida no encoder é o nível da solda utilizado como referência no processo de soldagem.

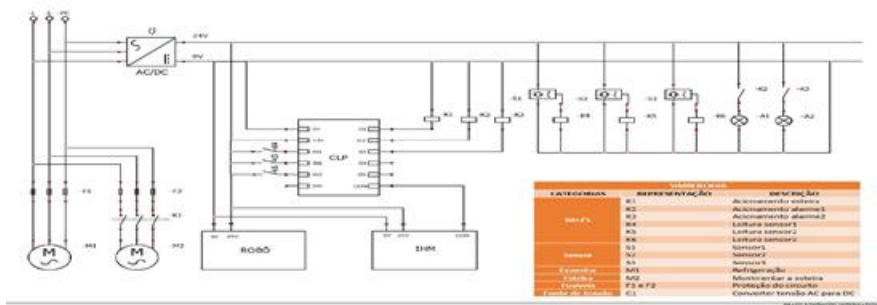
Figura 14. Diagrama funcional de controle de nível.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

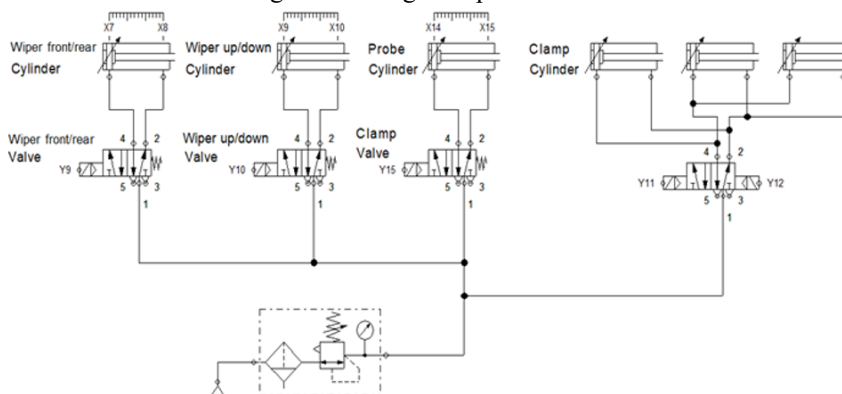


Figura 15. Diagrama elétrico.



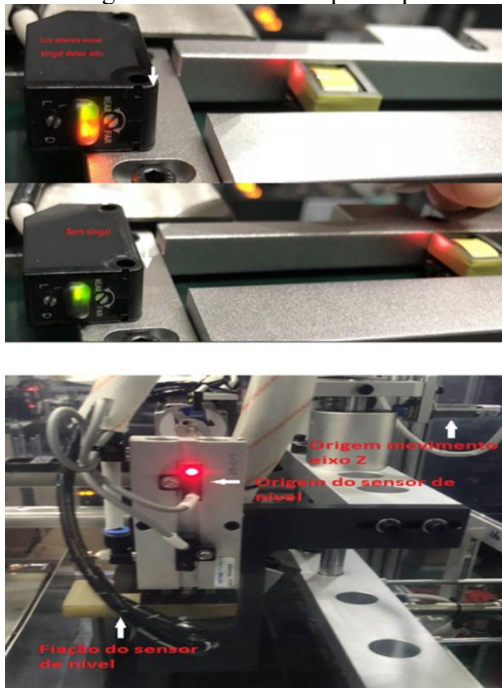
Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

Figura 16. Diagrama neumático.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

Figura 17. Sensores do protótipo.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

### 3.2.1 Arquitetura de Software

O núcleo do sistema foi desenvolvido nas linguagens C e C++, utilizando uma arquitetura que processa variáveis de campo em milissegundos. O diferencial inovador reside na implementação de uma Inteligência Artificial que realiza a tomada de decisão autônoma sobre a profundidade de imersão.

Através de cálculos matemáticos processados pelo computador, o sistema verifica o volume de material disponível nos tanques e ajusta dinamicamente a posição do braço robótico. Esse mecanismo compensa automaticamente o consumo de estanho e fluxo, garantindo que o nível de contato com os terminais permaneça constante independentemente da quantidade de material no crisol. Além disso, o software calcula e disponibiliza o OEE, monitorando temperatura, velocidade e índices de defeitos, demonstrando-os em uma interface homem-máquina (IHM) intuitiva para supervisão técnica.

### 3.2.2 Inovação Incremental e Personalização Industrial

Devido à inexistência de soluções "de prateleira" para a fabricação de transformadores miniaturizados, mercado restrito a designs proprietários, o projeto representa uma inovação incremental de processo. O equipamento foi projetado com acessórios intercambiáveis, permitindo flexibilidade para futuros ajustes de design do produto, alinhando a robustez da automação fixa com a versatilidade da automação flexível, conforme preconizado por Rosário (2005).

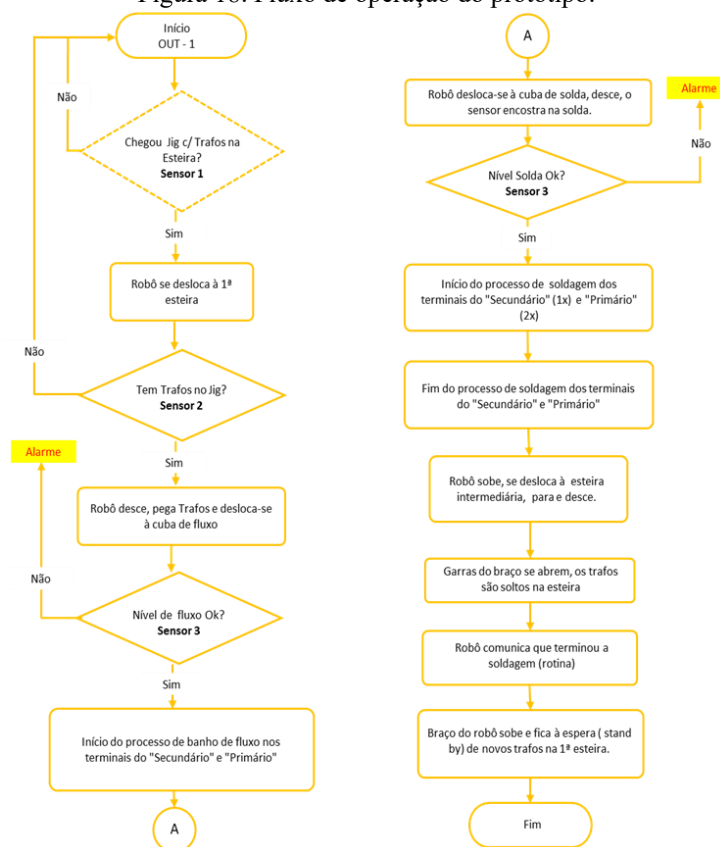
Quadro 1. Matriz de conhecimento técnico.

| Componente de Conhecimento   | Aplicação no Projeto AUTO SOLDERING                                   |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Inteligência Artificial (AI) | Cálculo dinâmico da imersão baseado em volume e nível dos tanques.    |
| Linguagem C/C++ e Ladder     | Sincronização de sistemas ciberfísicos e variáveis de teste.          |
| Tecnologia de Ultrassom      | Controle de parâmetros produtivos para precisão metalúrgica da solda. |
| Integração de Sistemas       | Gestão de transporte, soldagem e segregação em espaço reduzido.       |

Fonte: Autores (2026).



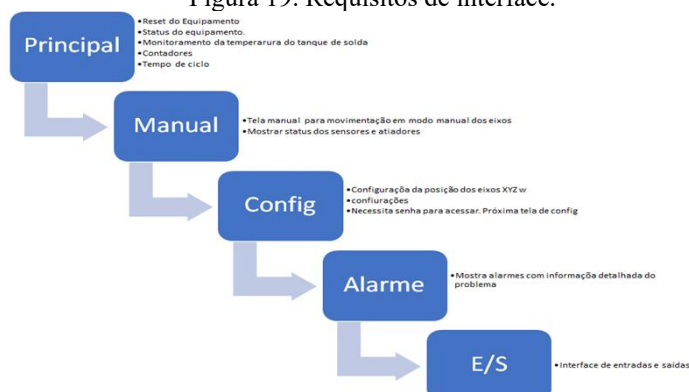
Figura 18. Fluxo de operação do protótipo.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

A Interface Homem-Máquina (IHM) utilizada no sistema foi o modelo WEINVIEW MT6071iP. A programação foi realizada no software EasyBuilder Pro, no qual foram desenvolvidos os arquivos de aplicação, definidos os parâmetros operacionais e configurados os dispositivos de comunicação. A integração com o CLP empregado na aplicação foi estabelecida por meio da parametrização dos protocolos de comunicação, permitindo o monitoramento e o gerenciamento dos movimentos e das funções do sistema em tempo real.

Figura 19. Requisitos de interface.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

A partir dos requisitos previamente estabelecidos, foram elaboradas as interfaces gráficas do sistema, utilizando os recursos da biblioteca Drawing Tools do EasyBuilder Pro. Nessa etapa, foram inseridos e configurados elementos como botões, indicadores luminosos, campos de texto, etiquetas, imagens e tabelas, organizados nos arquivos de projeto nas extensões “.exob” e “.cxob”, que compõem a estrutura visual e funcional da IHM.

### **3.2.3 Escopo Negativo e Restrições**

Para garantir o foco no objetivo central de segurança e qualidade de soldagem, o projeto delimita que não serão contempladas as seguintes funcionalidades: identificação automática de mudança de produto via leitura de códigos; integração direta com ERP (mantendo-se apenas o fornecimento de dados para o CMES via XML); e inspeções de qualidade puramente cosméticas ou mecânicas fora do escopo da junta soldada.

## **3.3 METODOLOGIA PARA O ESTUDO QUALI-QUANTITATIVO ENTRE OS MODELOS**

Para a validação da transição tecnológica, esta pesquisa adota uma abordagem metodológica mista, fundamentada em um estudo quali-quantitativo que confronta o cenário atual (semiautomático) com o protótipo desenvolvido (AUTO SOLDERING). O objetivo é mensurar o impacto da automação na mitigação de riscos ocupacionais e no incremento da eficiência produtiva.

### **3.3.1 Procedimentos Qualitativos (Saúde e Segurança)**

A análise qualitativa concentra-se na avaliação da biossegurança e conformidade normativa. A metodologia consiste no mapeamento dos riscos de exposição aos fumos metálicos e à irradiação térmica (350°C - 370°C), utilizando como base os parâmetros de toxicidade de partículas (0,01-1µm) descritos na literatura técnica da Nederman. A eficácia do protótipo é validada pela eliminação completa da interação humana no ponto de soldagem, substituindo o manuseio manual por sistemas de pick and place e exaustão independente, visando atingir a meta de zero acidentes e afastamentos.

### **3.3.2 Procedimentos Quantitativos (Performance e Confiabilidade)**

A vertente quantitativa utiliza cronoanálise e comparação de indicadores operacionais para avaliar produtividade e qualidade entre o processo semiautomático e o modelo automatizado (BARNES, 1977). O levantamento de dados segue os seguintes critérios:

Avaliação da estabilidade e da repetibilidade operacional do processo por meio do acompanhamento dos parâmetros críticos (tempo, profundidade e ângulo de imersão), comparando a

variação observada no modelo manual com a variação obtida no sistema automatizado. Enquanto o modelo manual depende da habilidade do operador, o modelo automatizado utiliza inteligência embarcada (ANI), implementada em C/C++, para calcular e ajustar em tempo real a profundidade e o ângulo de imersão, compensando variações do processo ao longo do ciclo produtivo.

**Eficiência Global de Equipamentos (OEE):** Coleta automática de dados via software, integrando informações de tempo de ciclo, disponibilidade e índice de defeitos diretamente ao sistema CMES da empresa via arquivos XML.

**Parâmetros Técnicos:** Monitoramento comparativo da estabilidade térmica e do tempo de imersão (setado em 2,2s ~ 2,6s), avaliando o percentual de redução de scrap após o retrabalho.

### **3.3.3 Estrutura de Validação da Inovação**

Dado que não existem soluções padronizadas "de prateleira" para o design específico dos transformadores da empresa, a metodologia de desenvolvimento segue o conceito de inovação incremental. A validação ocorre através da verificação da capacidade do sistema em ajustar-se automaticamente ao volume de estanho fundido e à limpeza dos terminais, garantindo que a tecnologia de soldagem por imersão atinja os níveis de precisão exigidos pela manufatura de alta escala.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A implementação do projeto AUTO SOLDERING resultou no desenvolvimento de um protótipo funcional de uma estação automatizada de soldagem por imersão em estanho aplicada aos terminais de bobinas de transformadores utilizados em carregadores de telefones celulares. Os resultados obtidos foram avaliados sob as perspectivas de saúde e segurança ocupacional, estabilidade do processo, eficiência produtiva e qualidade da soldagem, conforme os objetivos estabelecidos no plano de trabalho do projeto.

Do ponto de vista da biossegurança, a principal evidência de resultado foi a eliminação total da interação direta do operador com o banho de solda, que opera em temperaturas entre 350 °C e 370 °C. O sistema automatizado integrou mecanismos de pick and place, exaustão dedicada de fumos metálicos e enclausuramento conforme os requisitos da NR-12, mitigando completamente os riscos associados à inalação de partículas ultrafinas (0,01–1 µm) contendo elementos como cromo hexavalente, manganês e níquel. Dessa forma, os indicadores projetados de zero acidentes de trabalho, zero afastamentos e zero ocorrência de doenças ocupacionais tornaram-se tecnicamente

alcançáveis, superando de forma significativa o cenário do processo semiautomático anteriormente utilizado.

Figura 20. Metodologias de avaliação ergonômica.

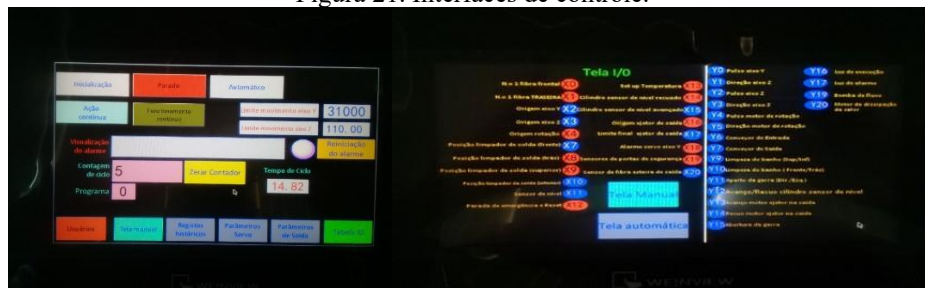
| MOORE & GARD |                                                          | OCRA           |             |                      |
|--------------|----------------------------------------------------------|----------------|-------------|----------------------|
| < 3          | Trabalho é seguro                                        | VERDE          | 5,1 - 7,5   | AUSENTE OU ACEITÁVEL |
| 3 À 7        | Trabalho pode apresentar riscos para membros superiores. | AMARELO        | 7,6 - 11    | LIMITE               |
| > 7          | Trabalho perigoso e apresenta riscos.                    | VERMELHO LEVE  | 11,1 - 14   | BAIXO                |
|              |                                                          | VERMELHO MÉDIO | 14,1 - 22,5 | MÉDIO                |
|              |                                                          | ROXO           | > 22,5      | ALTO                 |

Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

No que se refere à estabilidade e confiabilidade do processo, os resultados demonstram uma evolução substancial em relação ao modelo manual. O controle automatizado de variáveis críticas, tempo de imersão, profundidade, ângulo de ataque e temperatura do banho, eliminou a variabilidade inerente à atuação humana, que anteriormente comprometia a repetibilidade e a reprodutibilidade do processo.

A inteligência embarcada, desenvolvida em linguagem C/C++, possibilitou o cálculo dinâmico da altura de imersão com base no volume disponível de estanho e fluxo nos tanques, compensando automaticamente o consumo de material ao longo do ciclo produtivo. Essa abordagem garantiu a uniformidade metalúrgica da soldagem, independentemente das flutuações naturais do processo.

Figura 21. Interfaces de controle.



Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

Em termos de performance produtiva, os dados consolidados no plano de trabalho indicam uma melhoria estimada de 10% na disponibilidade do equipamento e um incremento de aproximadamente 20% na eficiência do posto de trabalho, tanto do ponto de vista mecânico quanto

do sistema de controle computacional. A produção diária passou de 1340 unidades para 1900, significando um aumento de 41% na capacidade produtiva.

Figura 22. Dados de produção.

| Resultados Produção 2993 peças |             |        |        |          |
|--------------------------------|-------------|--------|--------|----------|
| 1ª Indutância                  | Teste Func. | Hipot  | Tex-E  | total ok |
| 15 und                         | 0 und       | 01 und | 35 und | 2942     |
| FPY                            |             |        |        | 98,30%   |

51 peças em análise

Back Panel

Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

A automação integral do ciclo, inserção, limpeza, soldagem e transferência dos componentes, permitiu a operação contínua em regime on-line, atendendo ao requisito crítico de tempo de produção de aproximadamente 2,86 segundos por peça, por meio da soldagem coletiva de múltiplos transformadores simultaneamente.

Figura 23. Relatório de performance de produção.

| RELATÓRIO OQC - Transformador |        |             |                  |                                        |        |                                     |                  |
|-------------------------------|--------|-------------|------------------|----------------------------------------|--------|-------------------------------------|------------------|
| MODELO:                       |        |             |                  | ULC                                    |        |                                     |                  |
| CÓDIGO:                       |        |             |                  | FM 0201H ULC                           |        | Qtd de Amostra: 2942 pcs            |                  |
| LINHA/FORNECEDOR              |        |             |                  | LINHA PILOTO ( PROJETO AUT. DE SOLDA ) |        | Qtd Amostra: 160 pcs                |                  |
| DATA: 05/04/2021              |        |             |                  | RESPONSÁVEL: CARLOS - ENGENHARIA       |        | Índice NOK: 2,5% EMC acima do espec |                  |
| PEÇA                          | HIPO   | TESTE FUNC. | EMC (-70 ~ 40mV) | PEÇA                                   | HIPO   | TESTE FUNC.                         | EMC (-70 ~ 40mV) |
| NUM.                          | STATUS | STATUS      | VALOR MEDIDO     | NUM.                                   | STATUS | STATUS                              | VALOR MEDIDO     |
| 1                             | OK     | OK          | 0                | 81                                     | OK     | OK                                  | -30              |
| 2                             | OK     | OK          | -30              | 82                                     | OK     | OK                                  | 70               |
| 3                             | OK     | OK          | -60              | 83                                     | OK     | OK                                  | 0                |
| 4                             | OK     | OK          | 10               | 84                                     | OK     | OK                                  | 0                |
| 5                             | OK     | OK          | 40               | 85                                     | OK     | OK                                  | -60              |

Fonte: Relatório Técnico de PD&I – B&Z International (2022).

A qualidade do produto final também apresentou ganhos expressivos. A redução da manipulação manual minimizou danos térmicos aos isolantes, falhas de molhagem da solda e defeitos associados ao retrabalho. Como consequência, o projeto projeta uma melhoria da qualidade da soldagem da ordem de 30%, refletindo diretamente na diminuição de scrap e no aumento da confiabilidade do componente entregue às etapas subsequentes da linha de produção. Além disso, a coleta automática de dados produtivos viabilizou o monitoramento contínuo de indicadores como OEE, tempo de ciclo, paradas e índices de defeitos, permitindo a integração com o sistema CMES da empresa por meio de arquivos XML.

Sob a ótica da inovação industrial, os resultados confirmam o caráter de inovação incremental de processo do projeto AUTO SOLDERING. A inexistência de soluções padronizadas “de prateleira” para a soldagem automatizada de transformadores miniaturizados exigiu o desenvolvimento de uma solução customizada, com acessórios intercambiáveis e arquitetura flexível. Essa característica

assegura a adaptabilidade do sistema a futuras variações de design do produto, conciliando a robustez da automação fixa com a versatilidade da automação flexível, conforme preconizado na literatura clássica de automação industrial.

## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do projeto AUTO SOLDERING demonstrou ser uma solução técnica e industrialmente viável para a automação do processo de soldagem por imersão em estanho dos terminais de bobinas de transformadores aplicados à fabricação de carregadores de telefones celulares. A transição do modelo semiautomático para um sistema totalmente automatizado evidenciou ganhos significativos em segurança ocupacional, estabilidade do processo, eficiência produtiva e qualidade do produto final.

Os resultados obtidos confirmam que a eliminação da intervenção humana nas etapas críticas do processo não apenas reduz de forma efetiva os riscos de acidentes e doenças ocupacionais, como também contribui para a padronização da soldagem, assegurando elevados níveis de repetibilidade e reprodutibilidade. O uso de inteligência embarcada para tomada de decisão em tempo real mostrou-se fundamental para o controle dinâmico das variáveis do processo, compensando automaticamente variações no volume de solda e fluxo, e garantindo a integridade metalúrgica das juntas soldadas.

Adicionalmente, a capacidade de coleta e disponibilização de dados produtivos em tempo real posiciona o sistema AUTO SOLDERING em consonância com os princípios da indústria 4.0, ao permitir a integração com sistemas corporativos de manufatura e a gestão baseada em indicadores de desempenho. Essa característica amplia o potencial do equipamento não apenas como uma solução operacional, mas como uma ferramenta estratégica de apoio à tomada de decisão industrial.

Por fim, conclui-se que o projeto representa uma inovação incremental aplicada, capaz de elevar o nível tecnológico do processo produtivo sem a necessidade de reestruturações complexas da planta industrial. A solução desenvolvida contribui para a modernização da manufatura eletrônica, promovendo um ambiente de trabalho mais seguro, eficiente e sustentável, além de servir como referência para futuras aplicações de automação inteligente em processos industriais críticos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à B&Z International pela concepção e execução do projeto de PD&I que serviu de base para este estudo, realizado em parceria com uma empresa do Polo Industrial de Manaus. O



suporte para a análise técnica, sistematização teórica e a elaboração desta publicação científica foi provido pelo Instituto de Inovação e Tecnologia da Amazônia (IITA).

## REFERÊNCIAS

- BARNES, Ralph M. Estudo de movimentos e de tempos: projeto e medida do trabalho. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- BOETTCHER, M. Revolução Industrial - Um pouco de história da Indústria 1.0 até a Indústria 4.0. LinkedIn. 26 nov. 2015. Disponível em:< <https://pt.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%A3o-industrial-um-pouco-dhist%C3%B3ria-da-10-at%C3%A9-boettcher>>. Acesso em: 13 jan. 2026.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 12 (NR-12): Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Brasília, DF.
- CAVALCANTE, Z. V.; SILVA, M. L. S. da. A importância da Revolução Industrial no mundo da Tecnologia. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 7. 2011. Maringá. Anais eletrônico. Maringá. 2011. Disponível em:< [https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2011/wpcontent/uploads/sites/86/2016/07/zedequias\\_vieira\\_cavalcante2.pdf](https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2011/wpcontent/uploads/sites/86/2016/07/zedequias_vieira_cavalcante2.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- CHIAVENATO, I. Introdução à teoria geral da administração. 6. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2002.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Desafios para Indústria 4.0 no Brasil. Brasília: CNI, 2016.
- CRESWELL, John W.; PLANO CLARK, Vicki L. Pesquisa de métodos mistos. 3. ed. Porto Alegre: Penso, 2017.
- FRANK, R. et al. Soldering Flux. U.S. Patent 4,278,479. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, jul. 1981.
- GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- GROOVER, M. P. Automação Industrial e Sistemas de Manufatura. 3ª ed. São Paulo: Pearson, 2011.
- JASTRZĘBOWSKI, W. B. An outline of ergonomics, or the science of work based upon the truths drawn from the science of nature. 1857. (Tradução e publicação posterior em periódicos científicos).
- KAGERMANN, H. et al. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie. 2013.
- OESTERREICH, T. D.; TEUTEBERG, F. Understanding the implications of digitization and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. Computers in Industry. 2016.
- O SETOR ELÉTRICO. Da máquina a vapor aos softwares de automação. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/da-maquina-a-vapor-aos-softwares-de-automacao/>. Acesso em: 13 jan. 2026.

NAKAJIMA, Seiichi. Introduction to TPM: total productive maintenance. Cambridge: Productivity Press, 1988.

NEDERMAN. Catálogo Técnico de Soluções para Extração de Fumos de Solda.

PINTO, A. R. Ergonomia aplicada ao trabalho. São Paulo: Blucher, 2009.

ROSÁRIO, João Mauricio. Princípios de Mecatrônica. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

SAKURAI, Ruudi; ZUCHI, Jederson Donizete. As revoluções industriais até a Indústria 4.0. INFA – Revista de Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade, Taquaritinga, v. 15, n. 2, [s.d.]. DOI: 10.31510/infa.v15i2.386.

SANTOS, Marcos; MANHÃES, Aline Martins; LIMA, Angélica Rodrigues. Indústria 4.0: desafios e oportunidades para o Brasil. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE – X SIMPROD, 2018, São Cristóvão, SE. Anais [...]. São Cristóvão, SE: Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal de Sergipe, 2018. p. 317–329.

SILVA, D. B. da. et al. O Reflexo da Terceira Revolução Industrial na Sociedade. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 22., 2012, Curitiba. Curitiba, ABEPRO, 2012. Disponível em: [http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2002\\_tr82\\_0267.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2002_tr82_0267.pdf).

SILVA, M. C. A. da.; GASPARIN, J. L. A Segunda Revolução Industrial e suas influências sobre a Educação Escolar Brasileira. 2015. Disponível em:  
<[http://www.histedbr.fe.unicamp.br/acer\\_histedbr/seminario/seminario7/TRABALHOS/M/Marcia%20CA%20Silva%20e%20Joao%20L%20Gasparin2.pdf](http://www.histedbr.fe.unicamp.br/acer_histedbr/seminario/seminario7/TRABALHOS/M/Marcia%20CA%20Silva%20e%20Joao%20L%20Gasparin2.pdf)>.

SILVEIRA, C. B. O que é a Indústria 4.0 e como ela vai impactar o mundo. Citisystems. 2017. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/>>. Acesso em: 20 jun. 2025.

WISNER, A. Ergonomie. 2. ed. Paris: Presses Universitaires de France, 1982.

YIN, Robert K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

ZANCUL, E. de S. O Brasil está pronto para a Indústria 4.0? Exame. São Paulo, maio. 2016. Disponível em:< <https://exame.abril.com.br/tecnologia/o-brasil-esta-pronto-para-a-industria-4-0/>>.

ZAWADZKI, P.; ŻYWICKI, K. Smart product design and production control for effective mass customization in the industry 4.0 concept. Management and Production Engineering Review. 2016.