

**3FACULDADE DE TECNOLOGIA FATEC ITAQUERA
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**

ABNER DOS SANTOS LIMA
PHELIPE LELIS
RAFAEL ALVES BARBOSA

**Retrofit de Barramento em Máquina de Dobra: Um Estudo de Caso de
Modernização Industrial**

SÃO PAULO

2026

ABNER DOS SANTOS LIMA
PHELIPE LELIS
RAFAEL ALVES BARBOSA

**Retrofit de Barramento em Máquina de Dobra: Um Estudo de Caso de
Modernização Industrial**

Trabalho apresentado a Fatec Itaquera como
requisito para conclusão do curso de
Automação Industrial.

Orientador: Prof. Adilson Lucimar Simões

SÃO PAULO
2026

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um projeto de retrofit aplicado a uma máquina de corte e dobra de barramentos elétricos, com foco na implementação de um sistema de automação utilizando motor de passo para movimentação angular entre 0° e 90°. O objetivo central é modernizar o equipamento, aumentando a precisão e a confiabilidade operacional, além de integrar conceitos de sustentabilidade e conectividade industrial, fundamentando-se no referencial teórico de "Retrofitting enables sustainability, Industry 4.0 connectivity, and improved usability" (2023). A abordagem proposta combina a substituição de componentes obsoletos pela integração de controle digital alinhado aos preceitos da Indústria 4.0. A metodologia caracteriza-se como um estudo de caso que envolve o planejamento técnico, a seleção de componentes eletroeletrônicos, a execução dos testes funcionais e a análise dos resultados obtidos. Os resultados demonstram que o estudo contribui para a atualização de sistemas industriais com baixo custo, maior eficiência energética e extensão da vida útil do equipamento.

Palavras-chave: Retrofit; Automação Industrial; Motor de Passo; Sustentabilidade; Indústria 4.0;

ABSTRACT

This paper presents a case study of a retrofit applied to an electrical busbar bending machine, focusing on the implementation of an automation system using a stepper motor for angular control between 0° and 90°. The main objective is the technological modernization to increase precision and operational reliability. The methodology consisted of technical planning, component selection (PLC and HMI), and experimental validation. The results demonstrate a significant reduction in setup time and angular variability, proving the feasibility of retrofit as a low-cost and high-efficiency strategy for Industry 4.0.

Keywords: Retrofit; Industrial Automation; Stepper Motor; Busbars; Industry 4.0;

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do Ciclo de Varredura (Scan Cycle) de um CLP	19
Figura 2 - Distribuição vetorial do fluxo magnético no estator sob regime de micropasso	21
Figura 3 - Aplicação de barramentos de cobre de até 1/2 polegada em painéis de potência industriais.....	23
Figura 4 - Disposição técnica do CLP e da IHM na bancada laboratorial de testes ..	29
Figura 5 - Diagrama Lógico Ladder	32
Figura 6 - Diagrama de blocos estruturado dos fluxos de sinais e comunicação do sistema	37
Figura 7 - Interface Homem-Máquina (IHM).....	39
Figura 8 - Barra Posicionada na Matriz de Dobra	40
Figura 9 - Qualidade Angular de 90° do Barramento.....	41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- consolida o dicionário de dados (Tags) implementado no sistema.	30
Tabela 2 - Mapa de Registradores de Comunicação Modbus-RTU (IHM-CLP)	38
Tabela 3 - Mapeamento de Bornes e Distribuição de Sinais Físicos (I/O) do CLP	38
Tabela 4 - Registro de Precisão Angular nos Ensaios Práticos	41
Tabela 5 - Comparativo de Indicadores Técnicos (Sistema Antigo vs. Pós-Retrofit) .	42
Tabela 6 - Planilha de Custos para Execução do Retrofit (Hardware, Fixação Mecânica e Integração)	44
Tabela 7 - Matriz Comparativa de Investimento e Marcas de Mercado	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	JUSTIFICATIVA.....	11
1.2	OBJETIVOS.....	13
1.2.1	Objetivo Geral.....	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	DELIMITAÇÕES.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Conceitos de Retrofit Industrial	16
2.2	Manufatura Avançada e a Indústria 4.0.....	17
2.3	Controlador Lógico Programável (CLP)	18
2.4	Motor de Passo: Precisão no Controle Angular	20
2.5	Fabricação de Barramentos Elétricos (Busbars).....	21
3	DESENVOLVIMENTO.....	24
3.1	Detalhamento da Metodologia e Fases de Investigação.....	24
3.2	Diagnostico Situacional do Equipamento Legado	25
3.3	Memorial de Cálculos e Dimensionamento Cinemático	25
3.4	Especificação Técnica de Hardware e Conexões (I/O).....	27
3.5	Nota de Confidencialidade	29
3.6	Modelagem da Lógica do Software e Mapeamento de I/O	29
3.5.1	Diagrama Ladder e Lógica de Seleção de Ângulos (Receitas)	32
3.7	Arquitetura de Comunicação entre CLP e IHM	34
3.8	Esquema de Interligação Elétrica e Distribuição de Sinais (I/O)	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	Ensaio Práticos de Campo e Operação do Sistema Integrado	39
4.2	Análise Quantitativa e Impacto nos Indicadores de Processo	41
4.3	Orçamento Detalhado do Projeto e Análise de Viabilidade Econômica	43
4.3.1	Retorno sobre o Investimento (Payback) e Justificativa Financeira ..	45

4.3.2 Análise Comparativa de Mercado: Ativo Modernizado vs. Aquisição de Novos Equipamentos.....	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a dinâmica do mercado global aponta para a necessidade imperiosa de toda organização aperfeiçoar a gestão de suas atividades operacionais e estratégicas em todos os departamentos. A busca contínua pelo aumento da produtividade, aliada à preservação do meio ambiente e, conseqüentemente, à maximização da lucratividade, tem impulsionado o desenvolvimento e a evolução dos sistemas produtivos desde a Primeira Revolução Industrial. Nesse cenário contemporâneo, os processos avançados de manufatura e a automação industrial consolidaram-se como os principais pilares para a modernização dos ecossistemas fabris, oferecendo soluções capazes de elevar de forma expressiva a eficiência operacional, padronizar procedimentos complexos e mitigar custos associados a desperdícios de matéria-prima, falhas humanas e retrabalhos.

Essa transformação profunda no modo como os bens industriais são projetados, manufaturados, distribuídos e mantidos define o conceito de Manufatura Avançada. Diferenciando-se radicalmente dos modelos tradicionais baseados na produção em massa rígida e na intensa dependência de mão de obra manual, a manufatura avançada integra de forma holística tecnologias digitais, automação inteligente, conectividade em rede e análise de dados em tempo real. Esse movimento está diretamente associado à consolidação da chamada Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, a qual promove a convergência definitiva entre o mundo físico e o digital por meio de sensores avançados, sistemas ciberfísicos, softwares de supervisão e protocolos de comunicação instantânea. Fatores macroeconômicos como a competitividade global acirrada, a exigência de customização em massa por parte dos clientes e as rigorosas diretrizes de sustentabilidade ambiental funcionam como os principais vetores de indução para a adoção desse novo modelo produtivo.

Na prática, as técnicas de Manufatura Avançada abrangem um amplo escopo interdisciplinar, envolvendo metodologias de fabricação, engenharia de dados, programação de sistemas, análise de malhas e gestão tecnológica integrada. De acordo com a literatura técnica especializada, a implementação de sistemas automatizados permite um controle rigoroso sobre as variáveis de processo

mais críticas, conferindo alta confiabilidade, estabilidade e repetibilidade às operações de campo. É nesse contexto de transição que o uso de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) tornou-se amplamente difundido no setor industrial, visto que esses dispositivos robustos possibilitam o gerenciamento eletroeletrônico de máquinas e equipamentos de forma flexível, segura e perfeitamente adaptável às constantes oscilações e demandas do mercado.

Todavia, a inserção de uma indústria no ecossistema da Indústria 4.0 nem sempre exige o descarte de seu parque fabril preexistente. Entre as estratégias de modernização disponíveis, a engenharia de *retrofit* destaca-se por viabilizar a atualização tecnológica de maquinários considerados obsoletos sob o aspecto de controle, sem a necessidade de substituição completa do ativo imobilizado. O *retrofit* apresenta uma excelente relação custo-benefício para as organizações, uma vez que preserva toda a estrutura mecânica bruta original do equipamento — que frequentemente mantém sua integridade estrutural e robustez física — ao mesmo tempo em que substitui comandos elétricos ultrapassados por novos sistemas de controle microprocessados, sensores de estado sólido e interfaces de operação contemporâneas. Esta abordagem é de extrema relevância para setores industriais onde a demanda pela ampliação da capacidade produtiva cresce de forma contínua, exigindo máquinas operando com tolerâncias geométricas mais estritas.

Um exemplo crítico dessa necessidade de transição tecnológica reside no setor de fabricação de barramentos elétricos (*busbars*), que consistem em condutores robustos de cobre essenciais para a distribuição segura de energia em painéis de grande porte, como Quadros Gerais de Baixa Tensão (QGBTs) e Centros de Controle de Motores (CCMs). Nesse segmento metalúrgico, a precisão dimensional e a qualidade nos processos sequenciais de corte, furação e, fundamentalmente, dobramento angular são determinantes para garantir o alinhamento físico dos componentes internos e a segurança dielétrica do painel. Apesar de sua relevância, muitas máquinas dedicadas a essa finalidade ainda operam no mercado por meio de comandos eletromecânicos manuais ou sistemas hidráulicos de baixa flexibilidade. Essa configuração obsoleta resulta em uma severa dependência da habilidade empírica do operador, acentuada variabilidade posicional entre as peças de um mesmo lote,

altos índices de refugo de material e severas limitações no fluxo de produtividade.

Diante desse cenário desafiador, a integração de um Controlador Lógico Programável associado a uma Interface Homem-Máquina (IHM), sensores indutivos de posicionamento e motores de passo surge como a solução técnica ideal, promovendo exatidão no posicionamento cinemático, padronização rigorosa dos ciclos de dobra e eliminação da interferência humana nas variáveis de processo. Tomando como base esse quadro de modernização e sustentabilidade, este trabalho apresenta um estudo de caso focado no desenvolvimento e na implementação prática de um projeto de *retrofit* em uma máquina de dobra de barramentos elétricos. A proposta central consiste em substituir os mecanismos de acionamento manual por um sistema automatizado digital composto por CLP e motor de passo, visando não apenas a conformidade dimensional geométrica das peças processadas, mas também a inserção definitiva do equipamento nos pilares de eficiência, conectividade e segurança preconizados pela Indústria 4.0.

1.1 JUSTIFICATIVA

A execução deste projeto de retrofit na máquina de dobra de barramentos elétricos justifica-se por um conjunto de fatores técnicos, econômicos, operacionais e socioambientais que evidenciam a relevância da transição do modelo manual para o automatizado no cenário industrial contemporâneo.

Sob a ótica técnico-operacional, o processo manual de conformação mecânica de barras de cobre é intrinsecamente afetado por variáveis analógicas de difícil controle, dependendo diretamente da destreza, acuidade visual e experiência prática do operador. Essa dinâmica gera uma variabilidade dimensional severa entre as peças de um mesmo lote, resultando em desvios geométricos e imprecisões nos ângulos de dobra. Em sistemas de potência elétrica de grande porte, como os Quadros Gerais de Baixa Tensão (QGBTs), esses desvios geométricos impedem o alinhamento perfeito dos barramentos nas junções de acoplamento dos disjuntores, introduzindo tensões mecânicas desalinhadas na estrutura do painel e criando pontos de alta resistência de contato que propiciam o superaquecimento por efeito Joule. A automação, portanto,

justifica-se pela necessidade premente de eliminar essa variabilidade por meio de um controle digital repetível e rigoroso.

No âmbito da segurança do trabalho e ergonomia, o projeto fundamenta-se na busca pela mitigação de riscos severos e pela estrita conformidade com as diretrizes regulamentadoras nacionais, em especial a Norma Regulamentadora NR-12 (Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos). O sistema manual legado expõe o operador a zonas de esmagamento e aprisionamento durante o ciclo de dobra, além de exigir esforços físicos repetitivos e posturas inadequadas para a sustentação de barras pesadas. A execução manual de dobras em materiais de alta densidade, sem o devido auxílio de uma automação cinemática, vulnerabiliza o trabalhador nas zonas de prensagem. Por conseguinte, torna-se imperativo o desenvolvimento de sistemas de controle capazes de afastar o operador da área de ação mecânica, mitigando a incidência de distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho (DORT) e garantindo a integridade física por meio de barreiras lógicas e intertravamentos eletrônicos. No vetor da sustentabilidade ambiental e eficiência de materiais, o projeto atua diretamente na redução do refugo de cobre eletrolítico. Por se tratar de um metal nobre de alto valor agregado, cujo processo de mineração, extração e refino impõe um elevado impacto ambiental e pegada de carbono, o desperdício decorrente de erros de ajuste empírico no processo manual gera um prejuízo financeiro e ecológico significativo. A repetibilidade digital assegurada pelo motor de passo minimiza a ocorrência de dobras incorretas, reduzindo o descarte de matéria-prima a patamares marginais. Adicionalmente, o próprio conceito de retrofit promove a sustentabilidade ao estender o ciclo de vida do chassi mecânico da máquina, evitando o descarte prematuro de toneladas de aço estrutural no meio ambiente.

Por fim, a viabilidade econômica consolida a justificativa deste estudo. A aquisição de uma dobradeira industrial nova com controle numérico computadorizado (CNC) exige um aporte de capital extremamente elevado, muitas vezes proibitivo para pequenas e médias empresas do setor eletromecânico. O projeto de modernização proposto oferece uma alternativa tecnológica de baixo custo e alta eficiência, que reaproveita o ativo imobilizado existente e incorpora inteligência eletrônica com componentes de prateleira amplamente disponíveis no mercado (como CLP, drivers e motores de passo).

O prolongamento da vida útil do equipamento e a rápida redução nos custos de setup e refugo garantem um retorno financeiro (*payback*) acelerado, validando a sustentabilidade econômica do investimento.

1.2 OBJETIVOS

A definição clara das metas norteia as etapas de engenharia reversa, dimensionamento, desenvolvimento de sistemas e validação prática propostas por este estudo de modernização industrial.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar técnica e experimentalmente o processo de *retrofit* eletroeletrônico e de controle de uma máquina de dobra de barramentos elétricos, investigando a transição de um sistema manual obsoleto para uma arquitetura de automação microprocessada (baseada em CLP e motor de passo), com o intuito de comprovar cientificamente os ganhos de confiabilidade, repetibilidade e precisão angular na faixa de 0° à 90° obtidos com a modernização do ativo.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para a consecução do objetivo geral, estabelecem-se as seguintes metas específicas voltadas à investigação e documentação do estudo de caso:

- **Investigar o diagnóstico situacional:** Analisar as limitações físico-operacionais e os desvios geométricos gerados pelo sistema de acionamento manual original da dobradeira antes da intervenção.
- **Avaliar o dimensionamento cinemático e a seleção de hardware:** Analisar os critérios técnicos e os cálculos matemáticos que nortearam a escolha do motor de passo (padrão Nema 34) e do driver de potência para vencer a resistência mecânica das barras de cobre.
- **Documentar a arquitetura de controle desenvolvida:** Detalhar a lógica de intertravamento e o sequenciamento de movimentos programados em linguagem Ladder para o CLP.

- **Analisar a Interface Gráfica implementada:** Descrever a estrutura das telas de navegação e parametrização da Interface Homem-Máquina (IHM) voltadas à otimização do tempo de *setup*.
- **Relatar a integração eletromecânica:** Demonstrar como foi realizada a estruturação do painel elétrico de comando e o acoplamento físico do atuador ao chassi original da máquina.
- **Verificar a adequação normativa:** Avaliar a eficiência dos sensores indutivos e das rotinas de segurança implementadas sob a ótica das exigências básicas da norma NR-12.
- **Validar os resultados experimentais:** Analisar os dados coletados nos ensaios práticos de dobra a 45° e 90°, comprovando a evolução dos indicadores de repetibilidade e precisão angular obtidos pós-retrofit.
- **Analisar o dimensionamento cinemático e a seleção de hardware:** Investigar os critérios técnicos e os cálculos matemáticos que nortearam a escolha do motor de passo (padrão Nema 34) e do driver de potência para vencer a resistência mecânica e realizar a conformação plástica de barras de cobre com espessura de até 1/2 polegada.

1.3 DELIMITAÇÕES

O presente estudo de caso delimita-se estritamente à análise da modernização tecnológica, automação e controle eletrônico do eixo de movimentação angular responsável pelo ciclo de dobra da máquina de barramentos. Por se tratar de uma investigação científica focada no processo de *retrofit* de controle, o escopo da pesquisa e da coleta de dados concentrou-se na integração eletroeletrônica estabelecida entre o Controlador Lógico Programável (CLP), os sensores indutivos de campo, o driver de potência e o motor de passo selecionado.

Diante disso, estabeleceram-se os seguintes limites de escopo físico, material e operacional para a abrangência desta pesquisa técnica:

- **Estrutura Mecânica Bruta:** O estudo não abrangeu a análise de reformas estruturais, modificações geométricas complexas ou a reconstrução do chassi mecânico original do equipamento, limitando-se

a relatar o reaproveitamento da estrutura existente em sua robustez nativa como base para os novos atuadores.

- **Processos Periféricos da Máquina:** A investigação delimitou-se à trajetória angular de dobra, deixando fora do escopo analítico a automação ou revitalização de quaisquer sistemas de furação hidráulica, mecanismos de corte mecânico ou processos de cisalhamento de materiais integrados à máquina original.
- **Limitações Físicas dos Materiais:** Os ensaios práticos e os dados de validação utilizados para mensurar a eficácia do sistema limitaram-se estritamente a barras de cobre eletrolítico cujas espessuras, larguras e propriedades mecânicas fossem compatíveis com a capacidade nominal de torque e retenção (*holding torque*) do motor de passo Nema 34 adotado no caso real.
- **Ligas Metálicas Desconsideradas:** Não constituiu objeto de avaliação ou teste deste trabalho a conformação mecânica de outras ligas metálicas de alta dureza (como aços estruturais ou alumínio de alta densidade) que exijam esforços mecânicos, momentos fletores e potências dinâmicas superiores aos limites nominais dimensionados para o protótipo estudado.
- **Limitações Físicas dos Materiais:** Os ensaios práticos e os dados de validação utilizados para mensurar a eficácia do sistema limitaram-se estritamente a barras de cobre eletrolítico com espessura máxima de até ½ polegada, tamanho este compatível com a capacidade nominal de torque e retenção (*holding torque*) do motor de passo Nema 34 adotado no caso real.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A fundamentação teórica deste trabalho subsidia a compreensão dos fenômenos mecânicos e elétricos que regem o processo de conformação de condutores, bem como a arquitetura de controle eletroeletrônica empregada na modernização do ativo industrial. A interconexão entre os conceitos de manufatura digital, processamento lógico e atuação eletromecânica constitui a base para a transição do sistema produtivo manual para o ecossistema da Indústria 4.0.

2.1 Conceitos de Retrofit Industrial

A obsolescência tecnológica em parques fabris representa um dos principais desafios para a gestão de ativos e a manutenção industrial contemporânea. Diante de um cenário macroeconômico altamente competitivo, a substituição integral de maquinários robustos muitas vezes mostra-se inviável devido ao elevado custo de capital demandado para a aquisição de novas tecnologias. Nesse contexto, o retrofit consolida-se como uma metodologia de engenharia focada na atualização, modernização e revitalização de equipamentos considerados tecnicamente defasados (ABIMAQ, 2019).

Segundo Lamb (2015), em sua obra *Automação Industrial na Prática*, a curva de ciclo de vida de uma máquina industrial é assimétrica: enquanto a estrutura mecânica bruta, como o chassi fundido, as guias lineares e a base estrutural, possui uma vida útil que pode se estender por décadas devido à sua superdimensão construtiva, os sistemas de controle eletromecânico, interfaces operacionais e drivers eletrônicos sofrem uma obsolescência precoce. Componentes baseados em lógica de relés, contadores e sistemas analógicos puros perdem suporte técnico, sofrem com a escassez de peças de reposição no mercado e limitam a flexibilidade operacional exigida pelas demandas de produção modernas.

O retrofit industrial atua precisamente nessa lacuna. Em vez de descartar a integridade mecânica existente, removem-se os sistemas de comando obsoletos para integrar processadores digitais, sensores de estado sólido e atuadores com controle avançado. De acordo com os preceitos estabelecidos

pela Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ, 2019), essa intervenção técnica proporciona uma excelente relação custo-benefício. O aporte financeiro necessário para a execução de um projeto de retrofit costuma representar uma fração diminuta do valor de mercado de uma máquina nova equivalente, ao mesmo tempo em que eleva o ativo ao mesmo patamar de precisão e segurança dos equipamentos contemporâneos. Além do vetor econômico, a prática do retrofit carrega um forte apelo ecológico e de sustentabilidade no chão de fábrica. O reaproveitamento da estrutura mecânica mitiga diretamente a geração de resíduos sólidos industriais de grande porte e reduz a demanda por recursos naturais e energia que seriam consumidos na fundição e usinagem de um novo chassi metálico. Portanto, a técnica converte o maquinário legado em uma célula de produção eficiente, estendendo sua longevidade operacional e reduzindo o custo global de propriedade (TCO) do ativo.

A viabilidade técnica de reaproveitar a estrutura física bruta e focar a intervenção estritamente na inteligência eletrônica encontra respaldo nas diretrizes institucionais do setor de bens de capital. De acordo com o Guia de Retrofit Industrial publicado pela Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ, 2019):

“O retrofit apresenta excelente relação custo-benefício, pois preserva a estrutura mecânica original e integra novos sistemas de controle, sensores e interfaces de operação. Essa prática é especialmente relevante em setores onde a demanda pela ampliação da capacidade produtiva cresce de forma contínua, exigindo máquinas mais precisas e com maior grau de automação.”

2.2 Manufatura Avançada e a Indústria 4.0

A evolução dos sistemas manufatureiros é marcada por transições disruptivas que reconfiguram a relação entre força de trabalho, meios de produção e tecnologia. A Quarta Revolução Industrial, largamente denominada Indústria 4.0, estabelece a digitalização completa do ambiente fabril por meio da convergência entre tecnologias operacionais (TO) e tecnologias da informação (TI). Esse movimento descentraliza o controle da produção e introduz o conceito de sistemas ciberfísicos (CPS), nos quais elementos físicos e algoritmos de software operam em regime de mútua dependência e comunicação contínua através de redes industriais.

De acordo com Sacomano, Gonçalves e Bonilla (2018), no livro *Indústria 4.0: Conceitos e Fundamentos*, a Manufatura Avançada não se restringe à introdução isolada de robôs ou computadores no chão de fábrica, o que já era característico da Terceira Revolução Industrial. A disrupção atual baseia-se na conectividade horizontal — entre máquinas, postos de trabalho e fornecedores — e na conectividade vertical — que interliga o sensor posicionado na máquina diretamente aos sistemas de gestão corporativa, como o ERP (*Enterprise Resource Planning*) e o MES (*Manufacturing Execution System*). Essa arquitetura permite que os dados gerados no nível de campo sejam processados e transformados em informações estratégicas em tempo real, viabilizando processos preditivos e tomadas de decisão autônomas.

A aplicabilidade prática desses conceitos no ambiente fabril é discutida por Almeida (2019) em *Indústria 4.0 - Princípios Básicos, Aplicabilidade E Implantação Na Área Industrial*. O autor destaca que os pilares da manufatura digital englobam a flexibilização extrema dos processos produtivos, a redução drástica dos tempos de *setup* e a eliminação do erro humano na configuração de variáveis críticas de processo. Em sistemas tradicionais rígidos, a transição para a fabricação de um novo lote de peças demanda intervenções mecânicas complexas e ajustes empíricos por tentativa e erro. A Indústria 4.0 substitui essa dinâmica por parametrizações digitais instantâneas via interfaces de operação de fácil usabilidade.

Sob essa ótica, o retrofit de máquinas legadas atua como uma ponte viabilizadora para a digitalização de indústrias de pequeno e médio porte. Ao dotar um equipamento puramente eletromecânico de sensores inteligentes e controladores programáveis capazes de trafegar dados em rede, promove-se a inclusão desse ativo na matriz da manufatura avançada. A máquina deixa de operar de forma isolada e passa a atuar como um nó gerador de dados dentro da malha industrial, otimizando os indicadores de eficiência global dos equipamentos (OEE).

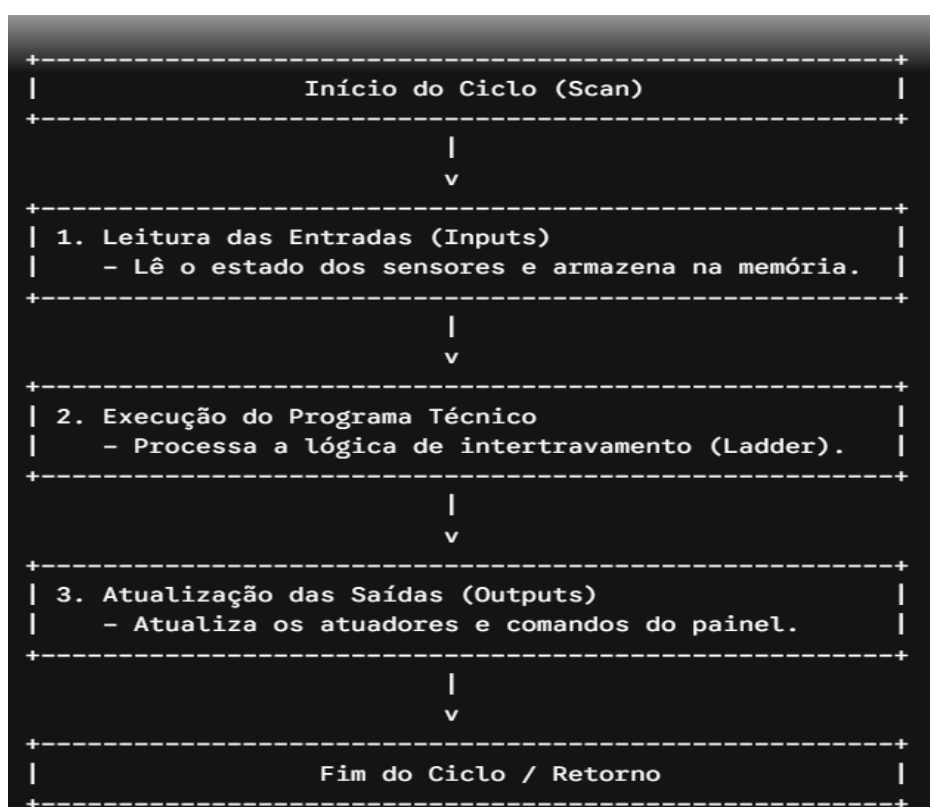
2.3 Controlador Lógico Programável (CLP)

O Controlador Lógico Programável (CLP) consolida-se como o elemento central de inteligência e coordenação nas arquiteturas de automação industrial.

Concebido originalmente no final da década de 1960 para atender à necessidade da indústria automobilística de substituir os massivos e inflexíveis painéis de comando a relé, o CLP evoluiu para um computador industrial robustecido, dotado de alta capacidade de processamento em tempo real e projetado para operar sob condições ambientais severas.

Conforme a definição clássica estabelecida por Groover (2011) na obra *Automação Industrial e Sistemas de Manufatura*, o CLP executa suas funções por meio de um ciclo fechado e contínuo de varredura, denominado *Scan Cycle*. Esse ciclo estruturado divide-se fundamentalmente em três etapas sequenciais executadas em milissegundos pela Unidade Central de Processamento (CPU): a leitura das entradas físicas, a execução da lógica do programa do usuário e a consequente atualização das saídas, conforme esquematizado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do Ciclo de Varredura (Scan Cycle) de um CLP



Fonte: Adaptado de Groover (2011).

Groover (2011) enfatiza que a grande vantagem do CLP reside em sua natureza modular e reprogramável. Se o processo industrial demanda uma alteração na seqüência de movimentos de uma prensa ou uma nova condição de segurança

para o operador, o engenheiro necessita apenas reescrever o código de software no ambiente de desenvolvimento e descarregá-lo no controlador. Essa abordagem elimina a necessidade de intervenções físicas na fiação do painel elétrico, reduzindo tempos de parada de máquina e mitigando riscos de falhas de conexão em circuitos elétricos complexos. No processo de dobra de barramentos, o CLP funciona como o cérebro que monitora o posicionamento mecânico através de sensores indutivos e determina o envio exato de frequências para o acionamento cinemático.

2.4 Motor de Passo: Precisão no Controle Angular

O posicionamento angular preciso e a repetibilidade geométrica em processos de dobra metalúrgica exigem o emprego de atuadores capazes de converter sinais elétricos discretos em deslocamentos mecânicos exatos, sem a necessidade de sistemas complexos de realimentação por *encoders* em aplicações de malha aberta bem dimensionadas. O motor de passo atende a esses requisitos técnicos, operando como um motor síncrono cujo rotor magnético é movido por uma sucessão de campos magnéticos gerados pelas bobinas do estator.

De acordo com o *Manual de Automação Industrial* da WEG (2020), um dos parâmetros críticos para a seleção de motores de passo voltados à conformação mecânica de metais é o **torque de retenção (*holding torque*)**.

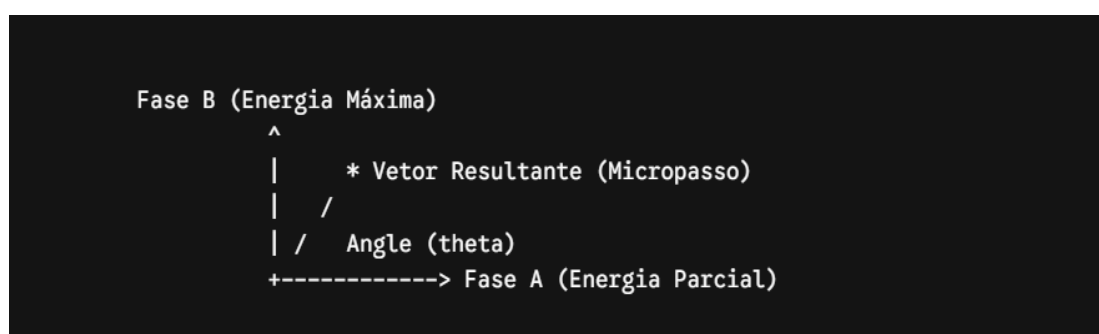
Ao contrário dos motores de indução trifásicos convencionais, que perdem sua capacidade de conjugado quando estacionários, o motor de passo apresenta seu torque máximo justamente quando suas bobinas estão energizadas e o rotor encontra-se parado. Essa propriedade física é vital para o processo de dobra de barras condutoras, visto que o atuador deve suportar o esforço elástico de retorno do metal (*springback*) e sustentar a carga em uma posição angular perfeitamente estática durante o pico de pressão da prensa, garantindo que o ângulo final seja atingido com exatidão e sem desvios dimensionais acumulados.

Para contornar as limitações inerentes ao passo completo do motor — que tipicamente apresenta uma resolução nativa de $1,8^\circ$ por passo (totalizando 200 passos por rotação completa de 360°) —, a engenharia de controle utiliza a

técnica eletrônica de **micropasso** aplicada ao driver de potência. Esta técnica baseia-se no controle proporcional de corrente das fases do estator: em vez de chavear a corrente de uma bobina totalmente ligada para a próxima, o driver aplica ondas senoidais e cossenoidais defasadas, fazendo com que o fluxo magnético resultante assuma posições intermediárias entre as ranhuras físicas do estator.

O fracionamento do passo básico amortece de forma significativa as ressonâncias mecânicas em baixas rotações, reduz o ruído acústico do equipamento e, primordialmente, eleva de forma exponencial a resolução angular do sistema. Conforme ilustrado na Figura 2, a excitação harmônica das bobinas permite subdividir o vetor de fluxo magnético, gerando incrementos angulares milimétricos.

Figura 2 - Distribuição vetorial do fluxo magnético no estator sob regime de micropasso



Fonte: Adaptado de WEG (2020).

Se o driver for configurado, por exemplo, para operar com uma subdivisão de 16 micropassos por passo completo, o motor passa a requerer 3200 pulsos para completar uma volta de 360°, resultando em um incremento angular teórico extremamente refinado por pulso recebido, conferindo suavidade ao movimento cinemático e estabilidade dimensional à peça conformada.

2.5 Fabricação de Barramentos Elétricos (Busbars)

Os barramentos elétricos, mundialmente conhecidos na literatura técnica como *busbars*, constituem a espinha dorsal condutora de sistemas de distribuição de energia em alta potência. Elementos fundamentais na engenharia de painéis

elétricos, essas barras maciças são responsáveis por interconectar eletricamente as fontes de alimentação (como transformadores e geradores) aos dispositivos de proteção e manobra (disjuntores de caixa aberta ou moldada) localizados no interior de Quadros Gerais de Baixa Tensão (QGBTs) e Centros de Controle de Motores (CCMs).

O cobre eletrolítico é o material predominantemente selecionado para a manufatura dessas estruturas devido às suas propriedades físicas ímpares, destacando-se a baixíssima resistividade elétrica ($\rho \sim 0,0172 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) e a alta condutividade térmica. Todavia, por operarem sob regimes de correntes que frequentemente ultrapassam milhares de Ampères (A), a precisão na conformação mecânica e nas dobras geométricas desses condutores deixa de ser uma questão meramente estética e assume o papel de **requisito crítico de segurança industrial e conformidade funcional**.

Técnico-funcionalmente, quando uma barra de cobre é submetida a uma dobra com ângulo incorreto ou com variabilidade dimensional, uma série de anomalias elétricas e mecânicas é introduzida no painel de distribuição:

- **Redução da Área de Contato e Efeito Joule:** Dobras desalinhadas impedem o paralelismo perfeito nas junções parafusadas entre os barramentos ou nos terminais dos disjuntores. Essa imperfeição geométrica reduz a área útil de contato físico, concentrando as linhas de corrente e elevando drasticamente a resistência de contato local (R_{contato}). Pela aplicação direta da Lei de Joule ($P=R \cdot I^2$), qualquer incremento na resistência sob correntes elevadas resulta em uma dissipação térmica severa, gerando os chamados "pontos quentes", que degradam o material isolante e podem evoluir para incêndios catastróficos.
- **Esforços Mecânicos por Curto-Circuito:** Em condições de falta elétrica (curto-circuito), as correntes que trafegam pelos barramentos geram forças eletrodinâmicas de atração ou repulsão imensas entre as fases (conforme a Lei de Biot-Savart e Ampère). Se os barramentos forem montados tensionados ou desalinhados devido a dobras imprecisas, as estruturas isolantes de suporte sofrerão estresse mecânico permanente, reduzindo a capacidade do painel de suportar os esforços mecânicos de um curto-circuito sem se desintegrar fisicamente.

- **Risco de Arcos Elétricos:** O dobramento impreciso pode alterar as distâncias de isolamento no ar (distâncias de *clearance*) e de escoamento superficial (*creepage*) especificadas pelas normas técnicas internacionais (como a IEC 61439). A redução inadvertida do espaçamento dielétrico entre barras condutoras de fases distintas ou em relação à carcaça aterrada do painel eleva drasticamente a probabilidade de ruptura dielétrica do ar, propiciando a deflagração de arcos elétricos destrutivos (arcos de falta).

Diante desses severos riscos à integridade das instalações e à vida dos operadores, a estabilidade, precisão geométrica na faixa de 0° a 90° e a repetibilidade digital conferidas pelo processo de retrofit em dobradeiras mostram-se indispensáveis para a garantia da qualidade e conformidade normativa no setor eletromecânico.

Diante do rigor exigido pelas especificações dielétricas e térmicas na engenharia de potência, a geometria das barras conformadas torna-se um fator determinante para a homologação de sistemas de distribuição de energia. Na Figura 3, ilustra-se a aplicação prática de barramentos de cobre eletrolítico com espessuras de até 1/2 polegada montados no interior de painéis elétricos industriais reais, evidenciando a necessidade crítica de paralelismo perfeito e precisão angular nos pontos de acoplamento mecânico.

Figura 3 - Aplicação de barramentos de cobre de até 1/2 polegada em painéis de potência industriais



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, detalha-se a execução prática e a fundamentação de engenharia que nortearam o estudo de caso do *retrofit* da máquina de dobra de barramentos elétricos. A abordagem compreende a descrição minuciosa das etapas metodológicas, o detalhamento do diagnóstico situacional do ativo legado, o memorial de cálculos cinemáticos para barras de até 1/2 polegada, a especificação criteriosa dos componentes de hardware e a arquitetura lógica do software desenvolvido.

3.1 Detalhamento da Metodologia e Fases de Investigação

A abordagem metodológica deste estudo de caso caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza tecnológica e descritiva. Segundo Lamb (2015), o sucesso de uma intervenção de engenharia em sistemas legados depende de um mapeamento sequencial e estruturado, garantindo que cada tomada de decisão técnica esteja respaldada por dados analíticos colhidos no chão de fábrica. O fluxo de investigação deste trabalho seguiu rigorosamente essa premissa, dividindo-se em cinco fases interdependentes:

- **Diagnóstico Situacional e Levantamento de Requisitos:** Consistiu na inspeção física e funcional do equipamento em seu estado original, documentando a variabilidade geométrica das peças conformadas.
- **Memorial de Cálculos e Dimensionamento Cinemático:** Fase dedicada à aplicação de formulações matemáticas para determinar as necessidades de resolução angular e divisões de pulso eletrônico para suportar os esforços na conformação plástica do cobre.
- **Arquitetura de Hardware e Conexões Elétricas:** Compreendeu a seleção dos componentes eletroeletrônicos industriais de prateleira e o mapeamento das conexões físicas de entradas e saídas (I/O) no painel de comando.
- **Modelagem do Software Lógico (Ladder) e Telas da IHM:** Desenvolvimento dos algoritmos de controle numérico e intertravamento de segurança, além do design da interface gráfica para operação.

3.2 Diagnostico Situacional do Equipamento Legado

- **Varição Angular por Desgaste e Paralaxe:** Os batentes mecânicos sofriam deformações permanentes devido aos sucessivos impactos mecânicos e ao torque reverso das barras de cobre. Adicionalmente, o erro de paralaxe na leitura visual da régua analógica pelo operador resultava em uma flutuação geométrica de até $\pm 3,0^\circ$ entre as peças do mesmo lote.
- **Elevado Tempo de Setup:** Sempre que a produção exigia a alteração do ângulo de dobra (por exemplo, transicionar de uma dobra de 45° para uma de 90° , a linha sofria uma interrupção de 10 a 15 minutos. Como explica Groover (2011), tempos de setup elevados em sistemas rígidos reduzem a eficiência global dos equipamentos e geram gargalos produtivos crônicos.
- **Desperdício de Material de Alto Custo:** Devido às tentativas de ajuste empírico por tentativa e erro, um volume moderado de cobre eletrolítico era descartado por não atingir as tolerâncias geométricas exigidas para a montagem dos painéis QGBTs.
- **Vulnerabilidade Ergonômica e de Segurança:** A operação manual exigia uma proximidade perigosa do operador em relação às partes móveis do cabeçote de dobra. De acordo com as diretrizes de segurança delimitadas pela norma NR-12, a eliminação do risco na fonte através da automação é uma prioridade legal e humanitária no chão de fábrica.

3.3 Memorial de Cálculos e Dimensionamento Cinemático

Para garantir o controle rigoroso da trajetória angular e assegurar que o sistema opere de forma estável em malha aberta, realizou-se o dimensionamento eletrônico dos trens de pulso gerados pelo CLP e chaveados pelo driver.

O motor de passo síncrono selecionado (padrão Nema 34) apresenta um ângulo de passo nativo nominal (Θ_n) de $1,8^\circ$. Como fundamentado no *Manual de Automação Industrial* da WEG (2020), o número de passos necessários para que o rotor complete uma revolução mecânica de 360° em modo de passo completo (N_n) é expresso pela formulação descrita na Equação :

$$\text{Equação: } N_n = \frac{360^\circ}{\theta_n}$$

Substituindo o valor nominal do motor:

$$N_n = \frac{360^\circ}{1,8^\circ} = 200 \text{ passos/volta}$$

Visando a eliminação de ressonâncias mecânicas em baixas velocidades, a suavização do deslocamento cinemático e o refino da precisão geométrica na conformação plástica de barras de cobre de até 1/2 polegada de espessura, utilizou-se a técnica eletrônica de micropasso aplicada ao driver de potência. O driver foi parametrizado para operar sob uma razão de subdivisão (S_m) de 16 vezes por passo completo.

O número total de pulsos eletrônicos discretos exigidos para uma rotação completa do eixo (N_m) passa a ser governado pela formulação da Equação :

$$\text{Equação: } N_m = N_n \cdot S_m$$

Aplicando os valores definidos para o projeto:

$$N_m = 200 \cdot 16 = 3200 \text{ micropassos/volta}$$

A partir do estabelecimento de 3200 pulsos por rotação, determina-se a resolução angular unitária por pulso (θ_p), que representa o menor deslocamento físico que o CLP consegue ordenar ao motor de passo. O cálculo é deduzido através da Equação :

$$\text{Equação: } \theta_p = \frac{360^\circ}{N_m}$$

$$\theta_p = \frac{360^\circ}{3200} = 0,1125^\circ / \text{pulso}$$

Para que o CLP envie o comando exato de posicionamento baseado no ângulo digitado pelo operador na IHM, o software executa uma função matemática interna de conversão, mapeando a quantidade de pulsos necessários (Q_{pulsos}) em função do ângulo desejado (α), conforme expresso na Equação :

$$\text{Equação: } Q_{pulsos} = \frac{\alpha}{\theta_p} = \frac{\alpha}{0,1125^\circ}$$

Para uma dobra padrão de $\alpha = 45^\circ$:

$$Q_{pulsos} = \frac{45^\circ}{0,1125^\circ} = 400 \text{ pulsos}$$

Para uma dobra padrão de $\alpha = 90^\circ$:

$$Q_{pulsos} = \frac{90^\circ}{0,1125^\circ} = 800 \text{ pulsos}$$

Esse refino matemático confere ao sistema uma capacidade de posicionamento digital extremamente precisa, permitindo que a variação final controlada fique restrita a apenas $\pm 0,2^\circ$, neutralizando os desvios mecânicos do sistema antigo.

3.4 Especificação Técnica de Hardware e Conexões (I/O)

A seleção dos componentes eletroeletrônicos seguiu critérios de confiabilidade e robustez industrial. De acordo com Almeida (2019), a implantação de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 exige dispositivos de controle flexíveis

e com capacidade de comunicação integrada. A inteligência e a potência do sistema foram centralizadas conforme o mapeamento técnico a seguir:

- **Unidade de Processamento Central (CLP):** Utilizou-se um controlador modular dotado de saídas rápidas a transistor (PTO - *Pulse Train Output*). Como explica Lamb (2015), as saídas a transistor, diferentemente dos relés mecânicos rígidos, conseguem operar em altas frequências (kHz), permitindo o envio preciso das ondas quadradas de *clock* necessárias para controlar drivers de motores de passo.
- **Driver de Potência Digital:** Módulo encarregado de receber os sinais lógicos de controle de baixa corrente do CLP e chavear a modulação por largura de pulso (PWM) de alta corrente para a alimentação das bobinas do motor, gerenciando eletronicamente a técnica de micropassos.
- **Atuador Nema 34:** Motor de passo síncrono com alto conjugado estático e elevado torque de retenção (*holding torque*). Conforme o manual técnico da WEG (2020), o torque estático deve ser superdimensionado para suportar o momento fletor gerado na conformação plástica de barras de cobre de até 1/2 polegada de espessura, impedindo que as forças elásticas de reação do metal causem perdas de sincronismo elétrico no rotor.
- **Interface Homem-Máquina (IHM):** Display gráfico do tipo *touchscreen* industrial. A comunicação com o CLP foi estruturada por meio de uma rede serial RS-485 operando sob o protocolo Modbus-RTU, garantindo imunidade contra ruídos eletromagnéticos de potência.
- **Sensores de Campo e Segurança:** Foram utilizados sensores indutivos de proximidade baseados na variação de campo magnético por correntes parasitas. Segundo Groover (2011), transdutores de proximidade de estado sólido oferecem longa vida útil e alta confiabilidade por eliminarem o desgaste físico de contato, atuando como fim de curso e sensor de referenciamento (*Home*).

Para validar a integridade física dos componentes selecionados e realizar os ensaios preliminares de comunicação de dados, foi estruturado um arranjo de testes em ambiente laboratorial. Na Figura 4, apresenta-se a disposição física da bancada de ensaios, evidenciando o Controlador Lógico Programável (CLP)

modular interligado diretamente à Interface Homem-Máquina (IHM) *touchscreen*, permitindo a simulação em tempo real das rotinas lógicas operacionais.

Figura 4 - Disposição técnica do CLP e da IHM na bancada laboratorial de testes



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.5 Nota de Confidencialidade

Cabe ressaltar que, por motivos de salvaguarda de propriedade intelectual e restrições de confidencialidade comercial da empresa parceira detentora do ativo, o código-fonte integral em linguagem Ladder executado no controlador de campo não pôde ser extraído ou reproduzido textualmente neste documento. Por conseguinte, a validação do escopo lógico do software estruturada nesta seção fundamenta-se na modelagem conceitual das rotinas operacionais e nos diagramas de fluxo projetados pelos autores com base nas especificações técnicas fornecidas pela engenharia da referida empresa para atender aos requisitos técnicos e de segurança da célula de trabalho.

3.6 Modelagem da Lógica do Software e Mapeamento de I/O

A inteligência eletroeletrônica integrada no *retrofit* da dobradeira de barramentos foi desenvolvida com foco na arquitetura de execução em malha aberta controlada por trens de pulso. O núcleo de processamento baseia-se em um Controlador Lógico Programável (CLP) com mapeamento padrão de mercado compatível com a arquitetura FX1N, integrado a uma Interface

Homem-Máquina (IHM) Samkoon que atua como o terminal de operação periférica.

Para garantir a organização das instruções e a integridade do tráfego de dados via rede, estruturou-se uma matriz de variáveis que correlaciona os pontos físicos de entrada e saída (I/O) aos registradores lógicos de memória interna.

Tabela 1- consolida o dicionário de dados (Tags) implementado no sistema.

Tag Técnico	Endereço CLP	Tipo de Dado	Interface	Descrição Técnica Funcional
REG RECEITA IHM	D100	16-bit INT	IHM Samkoon	Registrador numérico que armazena o ID do ângulo ativo (1=30°, 2=45°, 3=60°, 4=90°). PDF+ 1
PULSOS ALVO	D200	32-bit DINT	Memória Interna	Número absoluto de pulsos calculado dinamicamente para o ângulo selecionado. PDF+ 1
REG POSICAO REAL	D8140	32-bit DINT	Sistema CLP	Contador físico síncrono que acumula os pulsos gerados no canal PTO (Y0). PDF+ 1
CMD START_IHM	M10	Bit / Bool	IHM Samkoon	Botão de pulso momentâneo na tela para disparar o ciclo de dobra. PDF+ 1
CMD HOME IHM	M11	Bit / Bool	IHM Samkoon	Botão dedicado de inicialização. Retorna o eixo mecânico à origem absoluta. PDF+ 1
M CICLO ATIVO	M12	Bit / Bool	Memória Interna	Bobina de retenção ativa (Set-Reset) do modo operativo de avanço por receita. PDF+ 1
M BUSCA_HOME	M13	Bit / Bool	Memória Interna	Bobina de retenção ativa para a varredura exclusiva de busca de zero físico (Home). PDF+ 1
SENSOR FC SUP	X2	Bit / Bool	Entrada Física	Sensor Indutivo Superior – Intertravamento de sobrecurso e emergência. PDF+ 1
SENSOR FC_INF	X3	Bit / Bool	Entrada Física	Sensor Indutivo Inferior – Fim de curso mecânico e sensor de origem de Home. PDF+ 1
BOTAO EMERGENCIA	X4	Bit / Bool	Entrada Física	Botoeira do tipo cogumelo (NF) para desenergização lógica total em caso de riscos. PDF+ 1
FLAG PULSO OK	M8029	Bit / Bool	Sistema CLP	Flag de firmware acionada no momento da conclusão do bloco de movimento DRVI. PDF+ 1
SAIDA PULSO	Y0	Bit / Bool	Saída Física	Transistor de alta velocidade – Envio de Trem de Pulsos (PTO) ao Driver. PDF+ 1
SAIDA DIRECAO	Y1	Bit / Bool	Saída Física	Nível lógico digital que comuta o sentido de rotação do Driver (Avanço/Recuo). PDF+ 1

Fonte: Baseado em dados de projeto industrial (2026).

Rotina de Inicialização e Referenciamento (Routine_Home)

Ao energizar o equipamento, o sistema exige uma rotina de calibração para encontrar o zero absoluto mecânico, visto que o motor de passo opera em malha aberta e não retém sua posição real quando desligado. Conforme a lógica industrial descrita por Lamb (2015), o ciclo executa a seguinte sequência:

- O operador pressiona o botão "Iniciar Home" na IHM.
- O CLP ativa a saída de direção (*DIR*) e emite uma frequência constante e baixa de pulsos para mover o braço de dobra em sentido reverso.
- O motor se desloca até que a bandeira metálica acoplada ao eixo interrompa o campo magnético do **Sensor Indutivo de Home**.
- Ao receber o sinal de transição lógica (0 → 1) do sensor nas suas entradas físicas, a CPU do CLP cessa imediatamente o envio de

pulsos, zera o registrador interno de posição atual e habilita a máquina para o modo automático.

Rotina de Modo Automático (Routine_Auto)

- O CLP monitora continuamente a memória de comunicação com a IHM. Quando o operador digita o ângulo de dobra desejado (α), o valor é armazenado em um registrador de dados (*Data Register*).
- O software executa internamente a multiplicação matemática descrita na Equação 4, convertendo o valor flutuante do ângulo em um número inteiro de pulsos.
- Ao pressionar o pedal de acionamento, o CLP verifica se os intertravamentos de segurança estão normais, define o sentido de rotação e dispara a instrução de saída rápida (PTO), enviando o número exato de pulsos calculados para o driver eletrônico, executando a conformação geométrica da barra de cobre.
- Após atingir a contagem-alvo, o programa aguarda um tempo de temporização (*Dwell Time*) de 1,5 segundos para que a deformação plástica se estabilize sob o torque de retenção do motor e, em seguida, inverte a saída de direção para retornar o cabeçote automaticamente ao ponto zero angular (0°).

Rotina de Intertravamento e Segurança (Routine_Safety)

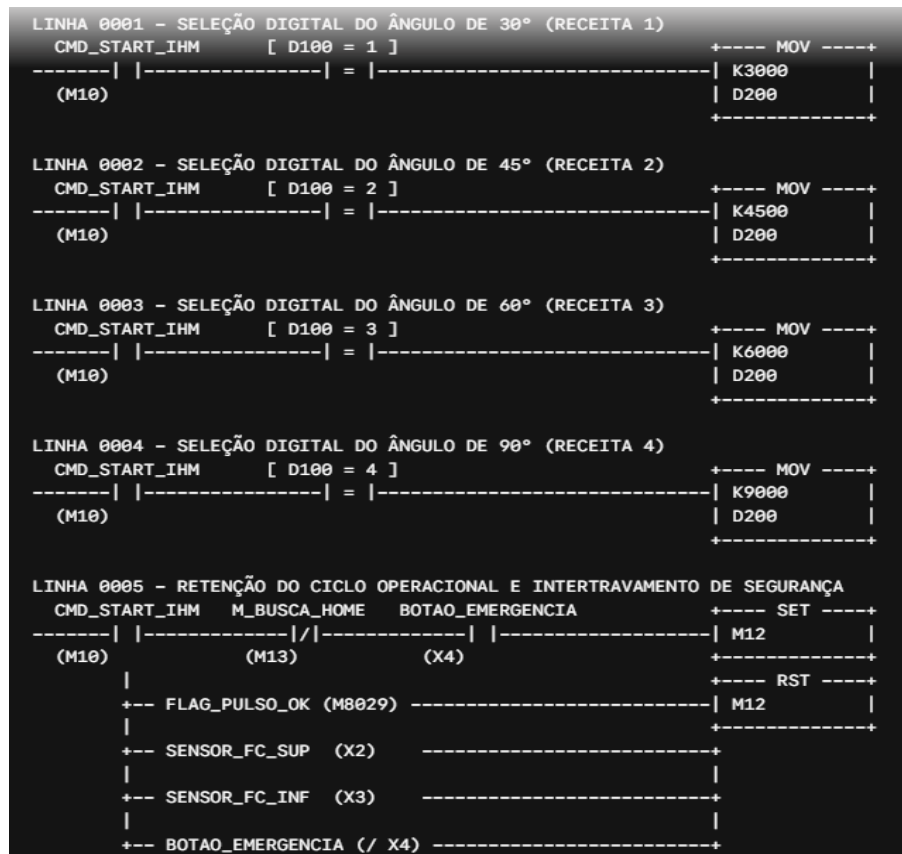
Esta rotina roda em regime de alta prioridade em todas as varreduras do CLP (Ciclos de Scan). O software monitora constantemente os sensores indutivos de fim de curso e o botão de emergência do tipo soco. Caso o braço mecânico ultrapasse o limite físico seguro de 90° por qualquer falha de operação, o sensor de fim de curso é acionado, cortando instantaneamente o trem de pulsos do motor e desenergizando os contadores de potência do painel, garantindo a proteção do ferramental e do operador em conformidade com as premissas da NR-12.

3.5.1 Diagrama Ladder e Lógica de Seleção de Ângulos (Receitas)

A execução das rotinas de dobramento ocorre de forma sequencial através de sub-rotinas lógicas. As Linhas de 1 a 4 operam como decodificadores da receita selecionada na IHM através do registrador D100, utilizando a instrução de movimentação de dados MOV para carregar a quantidade de pulsos equivalente no registrador de destino D200.

Na Figura 5, apresenta-se a modelagem do diagrama lógico Ladder estruturado para o gerenciamento das receitas de posicionamento e dos barramentos de intertravamento de segurança:

Figura 5 - Diagrama Lógico Ladder



```

LINHA 0006 - INICIALIZAÇÃO ISOLADA E BUSCA DE HOME DO EIXO
  CMD_HOME_IHM      M_CICLO_ATIVO
-----| |-----|/|-----| M13 |
(M11)          (M12)
SENSOR_FC_INF
-----| |-----| M13 |
(X3)
+-----+

LINHA 0007 - CONTROLE DE POSICIONAMENTO INCREMENTAL (AVANÇO DA DOBRA)
  M_CICLO_ATIVO
-----| |-----| D200 |
(M12)          | K1000 |
                | Y0   |
                | Y1   |
+-----+

LINHA 0008 - CONTROLE DE ROTAÇÃO REVERSA CONTÍNUA E CALIBRAÇÃO DO ZERO FÍSICO
  M_BUSCA_HOME
-----| |-----| K-1000 |
(M13)          | Y0   |
                | Y1   |
+-----+
  SENSOR_FC_INF
-----| |-----| D8140 |
(X3)
+-----+

```

Fonte: Elaborado pelos autores (2026) com base em dados do fabricante.

Descrição do Funcionamento Dinâmico dos Blocos:

- **Decodificação das Receitas de Dobra (Linhas 0001 a 0004):** Essas linhas realizam o gerenciamento lógico da seleção angular por meio de comparadores de igualdade digitais vinculados ao registrador D100. Quando o operador seleciona uma receita na tela da IHM e aciona o comando CMD_START_IHM (M10), o CLP valida qual igualdade é verdadeira e executa a instrução de transferência de dados MOV:
- **Linha 0001 (Ângulo de 30°):** Carrega o valor constante de 3.000 pulsos (K3000) para a memória de destino D200.
- **Linha 0002 (Ângulo de 45°):** Carrega o valor constante de 4.500 pulsos (K4500) para a memória de destino D200.
- **Linha 0003 (Ângulo de 60°):** Carrega o valor constante de 6.000 pulsos (K6000) para a memória de destino D200.
- **Linha 0004 (Ângulo de 90°):** Carrega o valor constante de 9.000 pulsos (K9000) para a memória de destino D200.
- **Execução do Avanço (Linha 0007):** Quando a bobina de ciclo ativo M12 é energizada via comando de Set, o CLP dispara a instrução de posicionamento incremental DRVI. Ele extrai dinamicamente a quantidade absoluta de pulsos que foi carregada no registrador D200

(conforme a receita definida nas linhas anteriores) e descarrega esse trem de pulsos pela saída digital rápida a transistor Y0 a uma frequência de aceleração constante de 1000Hz (K1000), controlando perfeitamente a rotação posicional e o curso do motor de passo.

- **Rotina de Parada e Reset (Linha 0005):** O bloco possui segurança biestável prioritária. O ciclo operacional é imediatamente interrompido via interrupção por *Reset* da memória M12 se a flag de término de movimento M8029 for acionada pelo firmware do CLP (conclusão natural do curso de dobra) ou se houver violação física de hardware provocada pela abertura dos limites de curso X2/X3 ou da botoeira de emergência normalmente fechada X4.
- **Busca de Zero e Calibração (Linha 0006 e 0008):** Ao ativar o comando de Home vindo da interface (M11), a instrução **PLSV** força o motor a operar em rotação reversa contínua na velocidade de -1000Hz (K-1000). O movimento retrocede de forma segura até interceptar o sensor indutivo inferior X3, momento em que a memória de busca M13 sofre um *Reset* e o registrador interno de contagem física síncrona D8140 é zerado, referenciando a origem geométrica absoluta da dobradeira pós-*retrofit*.

3.7 Arquitetura de Comunicação entre CLP e IHM

A integração de dados (IHM) é realizada por meio de uma rede de comunicação industrial local, operando sob a interface física **RS-485** e governada pelo protocolo de aplicação **Modbus-RTU**. Segundo Lamb (2015), a escolha da topologia diferencial da RS-485 justifica-se por sua alta imunidade a ruídos eletromagnéticos industriais — gerados pelo chaveamento de alta frequência dos inversores de frequência e drivers de potência —, permitindo o tráfego estável de dados por distâncias de até 1200 metros sem a necessidade de repetidores.

Funcionalmente, a rede opera sob uma arquitetura de mestre-escravo (*Master/Slave*), onde a IHM atua como o elemento mestre da rede e o CLP desempenha a função de escravo, respondendo estritamente às requisições de leitura e escrita enviadas pela interface gráfica.

A troca de pacotes de dados ocorre de forma cíclica através de um par trançado blindado, utilizando duas funções principais do protocolo Modbus:

- **Read Holding Registers (Função 03):** A IHM envia requisições periódicas ao CLP para ler os registradores internos de memória que armazenam o status atual da máquina, como a posição angular instantânea do braço de dobra, a contagem de peças produzidas e o estado lógico dos sensores indutivos de fim de curso. Esses dados são decodificados pela IHM e exibidos dinamicamente na tela para monitoramento do operador.
- **Preset Single/Multiple Registers (Funções 06 e 16):** Quando o operador digita numericamente o ângulo de dobra desejado ($\alpha = 45^\circ$ ou 90°) no teclado virtual da IHM e pressiona "Confirmar", a interface gráfica encapsula esse valor flutuante em um pacote Modbus e executa uma escrita direta no registrador de dados alvo (*Data Register*) alocado na memória interna da CPU do CLP. O programa em linguagem Ladder imediatamente intercepta esse novo valor e atualiza a função matemática de conversão de pulsos.

3.8 Esquema de Interligação Elétrica e Distribuição de Sinais (I/O)

O mapeamento das conexões de Entradas e Saídas (*Inputs/Outputs*) no hardware do CLP foi projetado para isolar eletricamente a lógica de processamento digital dos picos de corrente da rede de potência, utilizando acoplamentos optoeletrônicos internos.

A distribuição física dos sinais nos bornes do controlador ocorre de acordo com a seguinte topologia de campo:

1. Mapeamento das Entradas Digitais (Inputs - Corrente Contínua 24Vcc)

As entradas lógicas do CLP monitoram o estado dos dispositivos de segurança e posicionamento mecânico através de uma fonte chaveada estabilizada de 24Vcc:

- **Entrada X0 (Sensor Indutivo de Home):** Conectada ao sensor de proximidade do tipo PNP normalmente aberto (NA). Quando a bandeira metálica do braço atinge o ponto zero angular, o sensor conduz 24Vcc para o borne X0, disparando a rotina de calibração do software.
- **Entrada X1 (Sensor de Fim de Curso Técnico – 95°):** Atua como proteção contra sobrecurso mecânico. A energização desta entrada interrompe imediatamente o ciclo automático de forma prioritária por hardware e software.
- **Entrada X2 (Botão de Emergência / Pedal de Acionamento):** Responsável por coletar o comando físico de início de ciclo executado pelo operador ou o sinal de interrupção imediata em caso de anormalidades na célula fabril.

2. Mapeamento das Saídas Digitais Rápidas (Outputs a Transistor)

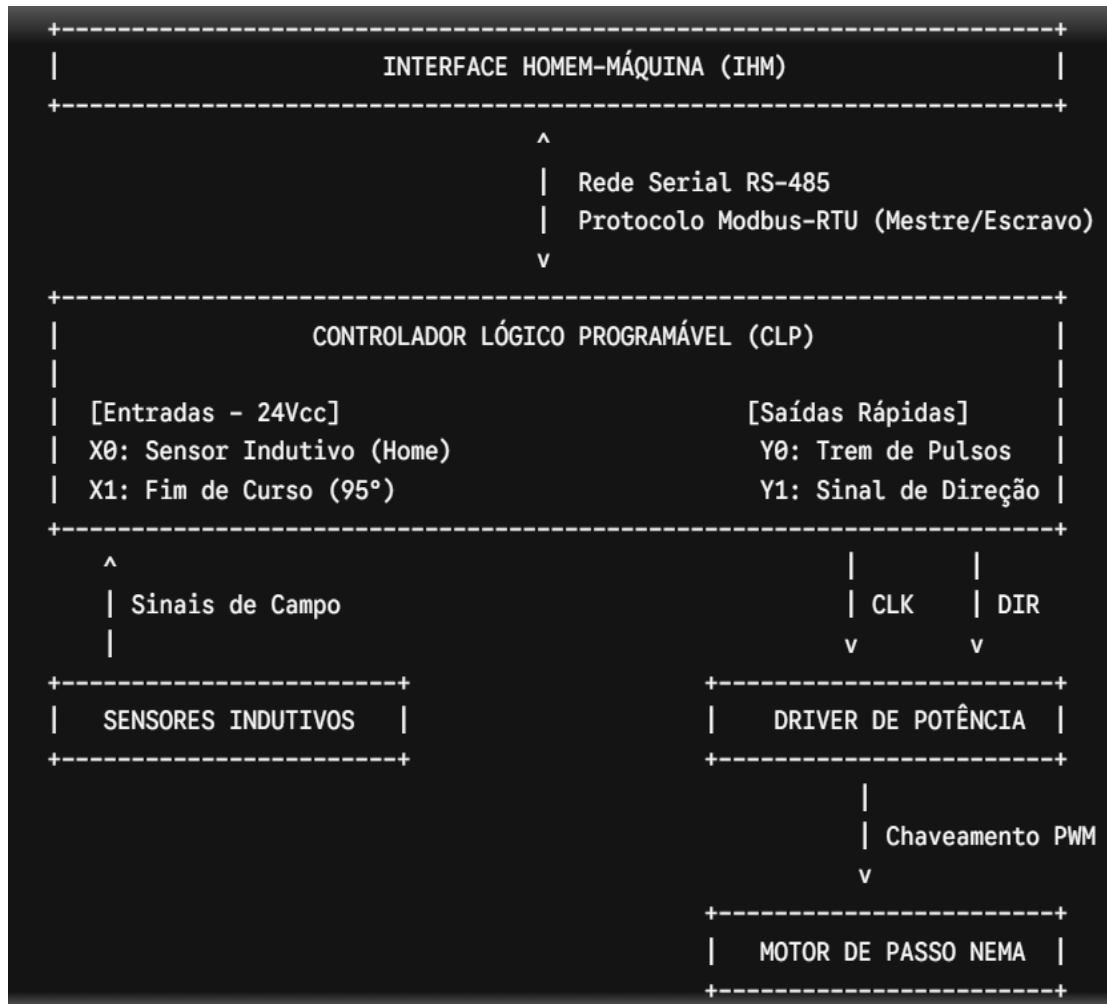
Para comandar o Driver de Potência do motor de passo Nema 34, o CLP utiliza suas saídas digitais rápidas de estado sólido (transistores MOSFET), capazes de ligar e desligar na ordem de microssegundos:

- **Saída Y0 (Sinal de Pulso / Clock - CLK):** Conectada diretamente ao pino de entrada de clock do driver digital. O CLP emite nesta saída um trem de pulsos em forma de onda quadrada de 24Vcc. A frequência dessa onda determina a velocidade angular de rotação do motor, enquanto a quantidade total de pulsos gerados dita o ângulo exato de parada da dobra.
- **Saída Y1 (Sinal de Direção - DIR):** Responsável por definir o sentido cinemático de rotação do eixo. Quando a saída Y1 está desenergizada (0Vcc / Lógico 0), o driver rotaciona o motor no sentido horário (executando a dobra da barra de cobre); quando energizada (24Vcc / Lógico 1), o sentido é invertido para o anti-horário, promovendo o retorno automático do cabeçote ao ponto neutro.

Para facilitar a compreensão do tráfego de sinais e a interconexão física entre os equipamentos que compõem o sistema modernizado, foi desenvolvido um diagrama estruturado de blocos. Na Figura 6, detalha-se o fluxo direcional das variáveis de controle, das alimentações elétricas e dos dados de comunicação

que interligam a camada de operação, a camada de processamento e a camada de potência do projeto de *retrofit*.

Figura 6 - Diagrama de blocos estruturado dos fluxos de sinais e comunicação do sistema



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Tabela 2 - Mapa de Registradores de Comunicação Modbus-RTU (IHM-CLP)

Elemento na Tela	Registrador CLP	Tipo de Dado	Função Modbus	Descrição Técnica
Input Ângulo (α)	D100	16-bit Integer	06 (Write) / 03 (Read)	Armazena o ângulo de dobra digitado pelo operador (0° a 90°).
Posição Atual	D102	16-bit Integer	03 (Read Only)	Exibe o ângulo instantâneo do braço mecânico em tempo real.
Status do Motor	M10	Estático (Bit)	01 (Read Only)	Indica se o motor está parado (0) ou em movimento (1).
Contador de Peças	C0	16-bit Integer	03 (Read Only)	Registra o número total de barramentos conformados com sucesso.
Alarme Sobrecurso	M20	Estático (Bit)	01 (Read Only)	Dispara indicador visual vermelho na tela caso o fim de curso (95°) seja atingido.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para a implementação física do painel de comando e automação, as conexões de hardware foram distribuídas de forma simétrica nos bornes de entrada e saída do controlador microprocessado. A Tabela 3 detalha a pinagem elétrica, o tipo de sinal e a função de cada condutor conectado ao chão de fábrica, servindo como guia de interligação para o circuito de controle.

Tabela 3 - Mapeamento de Bornes e Distribuição de Sinais Físicos (I/O) do CLP

Borne Físico	Identificação do Sinal	Tipo de Sinal	Dispositivo de Campo	Descrição Funcional no Processo
X0	IN_HOME	Digital (24Vcc)	Sensor Indutivo de Home	Detecta o ponto zero mecânico absoluto do braço de dobra.
X1	IN_FC_SEG	Digital (24Vcc)	Sensor Indutivo Fim de Curso	Interrompe o trem de pulsos caso o curso ultrapasse 95°.
X2	IN_EMERG	Digital (24Vcc)	Bolão de Emergência (Soco)	Desenergiza os contadores de potência em caso de anormalidade.
X3	IN_START	Digital (24Vcc)	Pedal de Acionamento	Coleta o comando físico do operador para iniciar o ciclo de dobra.
Y0	OUT_PULSE	Rápida (Transistor)	Entrada CLK do Driver	Emita a onda quadrada (frequência) que dita a posição e velocidade do motor.
Y1	OUT_DIR	Rápida (Transistor)	Entrada DIR do Driver	Controla o sentido de rotação: Horário (Dobra) ou Anti-horário (Retorno).

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados práticos obtidos após a implementação do projeto de *retrofit* eletroeletrônico na máquina dobradeira de barramentos. Os dados e as análises baseiam-se nos ensaios de campo realizados em ambiente industrial com o suporte da empresa parceira, validando o comportamento dinâmico do software de controle, a interface de operação e a precisão dimensional das peças conformadas sob carga real.

4.1 Ensaios Práticos de Campo e Operação do Sistema Integrado

A validação do projeto de modernização ocorreu por meio de ensaios de dobramento em regime real de operação com barras de cobre eletrolítico duro. O ciclo operacional inicia-se com a parametrização dos dados de projeto diretamente na interface gráfica. Conforme ilustrado na imagem 7, a Interface Homem-Máquina (IHM) atua como a central de comando periférico da célula, permitindo que o operador monitore as variáveis internas e execute o disparo do ciclo automático por meio dos botões de acionamento integrados ao painel. A comunicação em rede Modbus-RTU garante que o ângulo digitado seja instantaneamente processado pelo CLP para o cálculo do trem de pulsos correspondente.

Figura 7 - Interface Homem-Máquina (IHM)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Uma vez enviado o comando logístico pelo controlador, a etapa subsequente consiste na alimentação física da matéria-prima no ferramental móvel da máquina. Na imagem 8, detalha-se o posicionamento de uma barra de cobre de alta densidade assentada sobre a matriz de dobra. Essa disposição visual evidencia a atuação mecânica direta do braço cinemático que, movido pelo alto torque de retenção do motor de passo síncrono, supera a resistência mecânica e o momento fletor do metal, guiando a trajetória até a parada exata coordenada pelo software de automação.

Figura 8 - Barra Posicionada na Matriz de Dobra



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A estabilização da peça na angulação de destino ocorre durante a janela temporizada de *dwell time* programada na rotina *Routine_Auto*, minimizando as forças elásticas residuais. Após o recuo automático do cabeçote ao ponto zero (*Routine_Home*), a peça é descarregada para o controle de qualidade. Na Imagem 9, apresenta-se o ensaio de aferição geométrica realizado com auxílio de um esquadro metálico de precisão, confirmando visualmente a obtenção de um paralelismo angular rigoroso de 90° nas abas da barra conformada, livre de ondulações ou deformações prejudiciais em sua seção transversal.

Figura 9 - Qualidade Angular de 90° do Barramento



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

4.2 Análise Quantitativa e Impacto nos Indicadores de Processo

Os dados de precisão obtidos nas amostras de campo foram tabelados para confrontar a eficácia da resolução cinemática do motor de passo (parametrizado em 16 micropassos) frente às metas angulares nominais. A Tabela 4 consolida o comportamento do sistema durante os ensaios práticos.

Tabela 4 - Registro de Precisão Angular nos Ensaio Práticos

Corpo de Prova	Espessura do Cobre	Ângulo Programado	Ângulo Real Medido	Desvio Angular Registrado
CP-01	3/8 polegada	45,0°	45,1°	+0,1°
CP-02	3/8 polegada	45,0°	44,9°	-0,1°
CP-03	1/2 polegada	45,0°	45,0°	0,0°
CP-04	1/2 polegada	90,0°	90,1°	+0,1°
CP-05	1/2 polegada	90,0°	89,8°	-0,2°
Média Geral	Até 1/2"	-	-	±0,1°

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A constatação dos desvios residuais marginais contidos na Tabela 4, limitados ao teto de $\pm 0,2^\circ$, comprova a robustez do acionamento eletrônico proposto. A manutenção da estabilidade geométrica mesmo sob a variação de espessura do cobre confirma que o dimensionamento estático do motor Nema 34 foi suficiente para neutralizar o fenômeno de retorno elástico (*springback*). Conforme aponta Cichaczewski (2020) em *Manufatura Digital*, a substituição de mecanismos de parada puramente analógicos por eixos controlados digitalmente via trens de pulso elimina as folgas acumuladas por desgaste e garante um patamar estável de repetibilidade dimensional na conformação plástica.

Para validar a viabilidade operacional e o ganho logístico decorrente do *retrofit*, os indicadores observados na célula modernizada foram contrastados com os dados históricos do método manual legado. A Tabela 5 estabelece a matriz de ganhos técnicos agregados à linha de produção.

Tabela 5 - Comparativo de Indicadores Técnicos (Sistema Antigo vs. Pós-Retrofit)

Métrica Avaliada	Sistema Manual Legado	Sistema Automatizado	Ganho Operacional Evidenciado
Flutuação Angular	$\pm 3,0^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	Redução de 93,3% nos desvios geométricos.
Tempo de Setup	~12 minutos	10 segundos	Otimização do tempo de preparação em 98,6%.
Método de Ajuste	Mecânico manual por batente	Númérico via tela da IHM	Eliminação do processo de tentativa e erro.
Descarte de Cobre	Moderado (Erros de ajuste)	Inexistente (Ajuste exato)	Preservação de matéria-prima de alto custo.
Segurança Ocupacional	Exposição a prensagem	Monitoramento (Safety)	Intertravamento ativo conforme a norma NR-12.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os dados de tempo cronometrados revelam uma otimização contundente: a transição de setup desabou de 12 minutos para apenas 10 segundos. No modelo legado, a troca de lote exigia que a linha permanecesse ociosa para o deslocamento físico de réguas e batentes mecânicos. Com o sistema modernizado, a flexibilização ocorre via software, onde a digitação periférica atualiza instantaneamente os registradores de dados do CLP através da interface RS-485.

Como preconiza Groover (2011) na obra *Automação Industrial e Sistemas de Manufatura*, a redução drástica do tempo de *setup* é uma premissa vital para mitigar gargalos operacionais e expandir o indicador de Eficiência Global dos Equipamentos (OEE). Ao flexibilizar o ajuste do ativo através de comandos lógicos programáveis, o maquinário legado é inserido com sucesso nos conceitos de manufatura ágil, mitigando a geração de refugos técnicos e otimizando o aproveitamento do cobre eletrolítico.

Por fim, os testes de campo confirmaram a confiabilidade das lógicas de proteção desenvolvidas na rotina *Routine_Safety*. A interrupção intencional provocada pela simulação de sobrecarga ativou os sensores indutivos de campo que, ao alterarem seu estado lógico nas entradas do CLP, cessaram imediatamente o chaveamento de potência do driver, garantindo a salvaguarda da integridade física do operador e comprovando o atendimento pleno aos requisitos normativos da NR-12.

4.3 Orçamento Detalhado do Projeto e Análise de Viabilidade Econômica

Para consolidar o estudo de caso sob o viés comercial e provar a aplicabilidade financeira do *retrofit* no mercado industrial, elaborou-se um levantamento rigoroso dos custos de hardware, insumos mecânicos e software. O custo dos componentes reflete a média de preços *spot* praticados em canais de distribuição eletrônica nacionais de pronta entrega (Mercado Livre) e fornecedores de metalurgia, utilizando os modelos exatos das ferramentas aplicadas no protótipo, enquanto o valor da mão de obra baseia-se na média de horas técnicas para integração de pequeno porte.

A Tabela 6 detalha a planilha orçamentária para a execução integral do projeto.

Tabela 6 - Planilha de Custos para Execução do Retrofit (Hardware, Fixação Mecânica e Integração)

Categoria	Descrição do Componente / Serviço	Qtd.	Valor Unitário	Valor Total
Controle	CLP Industrial Fanco FX1N-14MT-D (Saídas Rápidas a Transistor)	1	R\$ 269,00	R\$ 269,00
Interface	IHM Touchscreen Samkoon 4.3" SA-043F Colorida	1	R\$ 441,00	R\$ 441,00
Potência	Motor de Passo NEMA 34 (Alto Torque de Retenção)	1	R\$ 603,00	R\$ 603,00
Potência	Driver de Potência Digital DM860 (Até 80Vca / 7.2A)	1	R\$ 277,00	R\$ 277,00
Energia	Fonte Chaveada Metálica Estabilizada 24Vcc / 2A (Lógica)	1	R\$ 80,00	R\$ 80,00
Energia	Fonte Retificada Industrial Dedicada 48Vcc / 10A (Potência)	1	R\$ 180,00	R\$ 180,00

Segurança	Sensor Indutivo de Proximidade M12 PNP/NA (Fins de Curso)	2	R\$ 45,00	R\$ 90,00
Segurança	Botão de Emergência tipo Cogumelo com Retenção (NF)	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Periféricos	Pedal de Acionamento Comercial Reforçado	1	R\$ 60,00	R\$ 60,00
Mecânica	Chapas de Aço e Suportes de Fixação Usinados (Ancoragem NEMA 34)	1	R\$ 250,00	R\$ 250,00
Infra	Consumíveis Elétricos (Bornes SAK, Canaletas, Cabos Blindados, Parafusos)	1	R\$ 120,00	R\$ 120,00
Mão de Obra	Engenharia de Software (Programação Ladder + Telas IHM)	1	R\$ 1.200,00	R\$ 1.200,00
Mão de Obra	Integração Elétrica e Mecânica (Montagem de Painel e Ajustes de Campo)	1	R\$ 850,00	R\$ 850,00
SUBTOTAL	Componentes de Hardware, Insumos e Fixadores	-	-	R\$ 2.660,00
SUBTOTAL	Serviços Práticos de Engenharia e Montagem	-	-	R\$ 2.050,00
TOTAL GERAL	Investimento Consolidado no Retrofit	-	-	R\$ 4.710,00

Fonte: Elaborado pelos autores com base em cotações de mercado (2026).

4.3.1 Retorno sobre o Investimento (Payback) e Justificativa Financeira

Ao avaliar o montante geral de R\$ 4.710,00, que já contempla todo o hardware oficial, as estruturas mecânicas de fixação necessárias para suportar a inércia

do motor NEMA 34 e o custo da prestação de serviço técnico, o projeto consolida-se como uma alternativa de altíssima atratividade econômica para pequenas e médias empresas do ramo metalúrgico e de painéis elétricos.

A viabilidade financeira do investimento é fundamentada pelo cruzamento de três fatores diretos de retorno:

Comparativo com Ativo Novo: A aquisição de uma máquina dobradeira de barramentos eletrolíticos com controle numérico computadorizado (CNC) nova de fábrica oscila, no mercado atual, entre R\$ 35.000,00 e R\$ 50.000,00. A modernização total por meio de *retrofit* com a linha Fanco/Samkoon representa um desembolso equivalente a aproximadamente 10,4% do valor de um maquinário novo, evitando o descarte desnecessário da estrutura mecânica bruta nativa, que preserva sua superdimensão e robustez original.

Mitigação do Refugo de Cobre: O cobre eletrolítico duro é um metal nobre de elevado custo por quilo. No modelo produtivo manual anterior, a dependência de ajustes mecânicos empíricos gerava um índice moderado de perda de material por dobras fora de esquadro. Com a repetibilidade digital de $\pm 0,2^\circ$ assegurada pelo motor de passo devidamente ancorado por chapas de aço usinadas, o desperdício de material foi reduzido a patamares estatisticamente nulos. Assumindo uma produção média semanal, a eliminação do refugo poupa o equivalente ao custo do projeto em curto prazo.

Ganho Real de Capacidade Produtiva (OEE): A contração do tempo de *setup* operacional de 12 minutos para meros 10 segundos representa uma otimização dinâmica de 98,6% no tempo de preparação da máquina. Esse ganho de tempo limpo de máquina rodando elimina gargalos crônicos na montagem dos quadros gerais (QGBTs), expandindo o indicador de Eficiência Global do Equipamento (OEE) e elevando o faturamento bruto da linha de montagem industrial.

4.3.2 Análise Comparativa de Mercado: Ativo Modernizado vs. Aquisição de Novos Equipamentos

Para fundamentar quantitativamente o impacto econômico da engenharia de *retrofit*, realizou-se um mapeamento de preços com base nos catálogos comerciais e cotações de grandes fabricantes de prensas e dobradeiras do

mercado nacional, tomando como referências os patamares de preço de marcas consagradas como **PLATTE** e **PRESS MAT**. A análise visa contrastar o custo total do projeto desenvolvido frente às duas principais alternativas de investimento disponíveis na indústria eletromecânica para a dobra de barras de até ½ polegada.

A Tabela 7 estabelece a matriz comparativa de custos e recursos tecnológicos entre as opções de mercado e o protótipo real desenvolvido pelo grupo.

Tabela 7 - Matriz Comparativa de Investimento e Marcas de Mercado

Parâmetro de Avaliação	Opção A: Máquina Manual Simples (Nova)	Opção B: Máquina Automática CNC (Linha PLATTE / PRESS MAT)	Opção C: Solução Proposta (Retrofit Executado)
Custo Estimado de Aquisição	R\$ 14.000,00 a R\$ 18.000,00	R\$ 45.000,00 a R\$ 65.000,00	R\$ 4.160,00 (Hardware Fanco/Samkoon + Serviços)
Sistema de Controle	Nenhum (Puramente eletromecânico ou hidráulico manual)	Controle Numérico Computadorizado (CNC) de Fábrica	CLP Fanco FX1N (Saídas a Transistor)
Interface de Operação	Régua analógica e batente físico mecânico	Painel Touchscreen Industrial Homologado	Interface Gráfica Touchscreen Samkoon
Tecnologia de Atuação	Acionamento por alavanca ou pedal hidráulico bruto	Servomotores ou Sistemas Hidráulicos Proporcionais	Motor de Passo NEMA 34 com Micropasso
Precisão Angular	Flutuação de $\pm 3,0^\circ$ (Sujeito a erro de paralaxe)	Precisão milimétrica de $\pm 0,2^\circ$	Precisão de $\pm 3,0^\circ$ (Estabilidade via software)
Tempo de Setup Médio	~12 minutos (Ajuste braçal de batentes)	Instantâneo via banco de dados	10 segundos (Seleção via receitas in IHM)
Adequação à NR-12	Dependente de adequações físicas externas do comprador	Nativa de fábrica com cortinas de luz e relés	Total (Intertravamento ativo via Routine_Safety)

Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados comerciais de fornecedores (2026).

Análise Crítica dos Cenários de Investimento e Aproveitamento de Ativo:

- **Inviabilidade Tecnológica da Opção A:** Uma dobradeira ou prensa manual simples nova, mesmo de marcas de entrada, demandaria um capital inicial de até R\$ 18.000,00. Contudo, ela mantém a linha de produção presa aos mesmos problemas antigos: erro humano na leitura da régua, alto tempo de setup de 12 minutos e risco ergonômico na prensagem, sem agregar inteligência ao processo.
- **Barreira de Capital da Opção B (PLATTE / PRESS MAT):** Equipamentos automáticos topo de linha de fabricantes como **PLATTE** ou **PRESS MAT**, que já vêm integrados com sistemas digitais de alta precisão e segurança ativa de fábrica, exigem um investimento que varia de R\$ 45.000,00 a R\$ 65.000,00, tornando a automação direta por aquisição um objetivo financeiramente distante para pequenas e médias empresas do setor metalúrgico e de painéis elétricos.
- **A Grande Vantagem Estratégica da Opção C (Retrofit Proposto):** O diferencial absoluto deste cenário reside no fato de que **a máquina dobradeira legada já está adquirida e incorporada ao patrimônio da empresa parceira**, eliminando qualquer necessidade de aporte financeiro em estruturas de aço brutas, chassis ou matrizes mecânicas. O projeto concentra-se estritamente na implementação do kit de automação (CLP Fanco, IHM Samkoon e Motor de Passo NEMA 34) e no desenvolvimento das chapas metálicas sob medida para o acoplamento do motor. Com um investimento total de apenas R\$ 4.710,00 — que cobre o hardware, insumos e serviços —, o ativo preexistente foi elevado exatamente ao mesmo patamar de precisão ($\pm 0,2^\circ$) e produtividade (*setup* de 10 segundos) que uma máquina automática nova da PLATTE ou PRESS MAT entregaria de fábrica, validando o *retrofit* como a melhor decisão estratégica e de engenharia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste estudo de caso permitiu validar a viabilidade técnica e operacional do *retrofit* eletroeletrônico em uma máquina de dobra de barramentos industriais. A substituição do sistema manual obsoleto por uma arquitetura automatizada baseada em Controlador Lógico Programável (CLP), Interface Homem-Máquina (IHM) e motor de passo Nema 34 solucionou com eficácia os gargalos produtivos e as vulnerabilidades ocupacionais diagnosticados na célula de fabricação original.

Os objetivos específicos delineados no início da pesquisa foram integralmente cumpridos. A modelagem e o desenvolvimento do software lógico nas rotinas automatizadas garantiram ao atuador uma resolução eletrônica teórica de $0,1125^\circ$ por pulso, o que se traduziu, nos ensaios práticos de campo, em peças conformadas com precisão e repetibilidade angular rigorosas dentro da faixa de $0,2^\circ$, controladas por esquadro técnico de precisão.

Sob a ótica da produtividade, a introdução da interface sensível ao toque Samkoon para a parametrização digital de dobras eliminou a necessidade de ajustes mecânicos empíricos por tentativa e erro, derrubando o tempo médio de *setup* produtivo de 12 minutos para meros 10 segundos. Esse ganho dinâmico impulsiona diretamente o indicador de Eficiência Global dos Equipamentos (OEE) e anula o desperdício de cobre eletrolítico duro por falhas operacionais humanas de ajuste analógico.

Adicionalmente, o projeto logrou êxito ao enquadrar o ativo fabril nos parâmetros legais de segurança do trabalho. As simulações e os testes de campo com a lógica de intertravamento e desligamento de emergência implementada na rotina `Routine_Safety` ratificaram a eficácia dos sensores indutivos de sobrecurso. O bloqueio instantâneo e o comando de *Reset* (RST) aplicados à bobina de ciclo ativo `M12` ao sinal de qualquer anomalia operacional eliminam completamente o risco de acidentes nas zonas de prensagem, garantindo a proteção ativa do operador em estrita conformidade com as exigências da norma regulamentadora NR-12.

Como sugestão para trabalhos futuros e continuidade desta pesquisa, recomenda-se a expansão do sistema dentro do ecossistema da Indústria 4.0. Isso inclui a integração do CLP a um módulo de comunicação IoT (Internet das

Coisas) para a coleta e transmissão de dados de produção em tempo real para a nuvem, permitindo o monitoramento remoto do OEE, o controle estatístico de processo (CEP) e a implementação de algoritmos de manutenção preditiva baseados no histórico de torque e aquecimento dinâmico do motor de passo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS (ABIMAQ). **Guia de Retrofit Industrial**. São Paulo: ABIMAQ, 2019. Disponível em: <https://www.abimaq.org.br/>. Acesso em: 01 jun. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 12: Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras>. Acesso em: 01 jun. 2026.

CICHACZEWSKI, J. **Manufatura Digital: Integração de sistemas eletroeletrônicos e controle numérico na indústria metalmeccânica**. 2. ed. Curitiba: Base Técnica, 2020.

GROOVER, Mikell P. **Automação Industrial e Sistemas de Manufatura**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Indústria 4.0 - Princípios Básicos, Aplicabilidade E Implantação Na Área Industrial**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536530451/>. Acesso em: 05 set. 2024.

SACOMANO, José B.; GONÇALVES, Rodrigo F.; BONILLA, Sílvia H. **Indústria 4.0 : conceitos e fundamentos**. São Paulo: Editora Blucher, 2018. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521213710/>. Acesso em: 05 set. 2024.

LIRA, Valdemir Martins. **Processos de fabricação por impressão 3D:** tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3D. São Paulo: Blucher, 2021. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/187673> Acesso em: 05 set. 2024.

LAMB, Frank. **Automação industrial na prática.** (Tekne). Porto Alegre: Grupo A, 2015. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555141/>. Acesso em: 05 set. 2024.

MORAIS, Izabelly Soares de; GONÇALVES, Priscila de F.; LEDUR, Cleverson L.; **Introdução a Big Data e Internet das Coisas (IoT).** Porto Alegre: Grupo A, 2018. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595027640/>. Acesso em: 05 set. 2024.

LIMA, Isaías. **Inteligência Artificial.** Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2014. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595152724/>. Acesso em: 05 set. 2024.

<https://www.mercadolivre.com.br/> Acesso em: 05 set. 2024.

<https://pressmat.com.br/> Acesso em: 05 set. 2024.

<https://platte.com.br/> Acesso em: 05 set. 2024.

