

APLICAÇÃO DA NR-12 E DOS CIRCUITOS LÓGICOS DE SEGURANÇA EM PRENSAS INDUSTRIAIS: ESTUDO DE CASO DE UMA PRENSA MECÂNICA

APPLICATION OF NR-12 AND SAFETY LOGIC CIRCUITS IN INDUSTRIAL
PRESSES: CASE STUDY IN A MECHANICAL PRESS

Engenharias • 26/05/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/779663333](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/779663333)

Pedro Vitor da Costa¹

Siomara Dias da Rocha²

RESUMO

Este estudo analisou a aplicação prática da NR-12, em conjunto com circuitos lógicos, para a adequação de uma prensa mecânica. O objetivo central consiste em verificar a eficácia da implementação de sistemas de controle monitorados para a mitigação de riscos em uma máquina de 60 toneladas, fabricada na década de 1990 e operante em uma metalúrgica. A metodologia fundamentou-se em um estudo de caso de natureza descritiva e exploratória, utilizando os protocolos da ABNT NBR ISO 12100 para a apreciação de riscos e da ISO 13849-1 para a definição de requisitos funcionais. O diagnóstico inicial revelou um cenário de alta criticidade, caracterizado por um sistema de comando unicanal não monitorado que expunha os operadores a perigos graves e iminentes. Em resposta, desenvolveu-se uma proposta de intervenção técnica baseada em arquitetura redundante de Categoria 4, integrando relés programáveis, cortinas de luz e válvulas de segurança de fluxo cruzado para atingir o Nível de Performance "e" (PL e). Os resultados demonstraram que a reengenharia do sistema de comando garantiu a confiabilidade da função de parada e eliminou a possibilidade de falhas perigosas não detectadas. Conclui-se que a aplicação rigorosa da engenharia de segurança viabiliza a continuidade operacional de ativos antigos, assegurando simultaneamente a integridade física do trabalhador e a conformidade legal da organização.

Palavras-chave: Apreciação de riscos; Circuitos lógicos; NR-12. Prensas mecânicas; Segurança de máquinas.

ABSTRACT

This study analyzed the practical application of NR-12, in conjunction with logic circuits, for the adaptation of a mechanical press. The central objective is to verify the effectiveness of implementing

monitored control systems to mitigate risks in a 60-ton machine, manufactured in the 1990s and operating in a metalworking plant. The methodology was based on a descriptive and exploratory case study, using the ABNT NBR ISO 12100 protocols for risk assessment and ISO 13849-1 for defining functional requirements. The initial diagnosis revealed a highly critical scenario, characterized by an unmonitored single-channel control system that exposed operators to serious and imminent dangers. In response, a technical intervention proposal was developed based on a Category 4 redundant architecture, integrating programmable relays, light curtains, and cross-flow safety valves to achieve Performance Level "e" (PL e). The results demonstrated that the re-engineering of the control system ensured the reliability of the shutdown function and eliminated the possibility of undetected dangerous failures. It is concluded that the rigorous application of safety engineering enables the operational continuity of older assets, simultaneously ensuring the physical integrity of the worker and the legal compliance of the organization.

Keywords: Risk assessment; Logic circuits; NR-12. Mechanical presses; Machine safety.

1. INTRODUÇÃO

O manuseio de maquinário de alto risco posiciona a segurança do trabalho como pilar central da atividade industrial. O panorama global é crítico: anualmente, acidentes e doenças ocupacionais vitimam cerca de 2,78 milhões de trabalhadores, com alta incidência em operações mecanizadas (OIT, 2019). A realidade brasileira reflete essa gravidade. Os registros do SINAN (2024) revelam um cenário impactante entre 2012 e 2024 com um total de 8.824.286 acidentes contabilizados. Prensas e injetoras frequentemente protagonizam

esses eventos devido à sua alta periculosidade. O Brasil responde a esse desafio técnico através da Norma Regulamentadora n.º 12 (NR-12). Ela atua como a espinha dorsal da prevenção jurídica no país.

A norma surgiu originalmente com a Portaria MTb n.º 3.214/1978 mas passou por uma reformulação robusta em 2010 para acompanhar todo o ciclo de vida do maquinário. As exigências vão desde a prancheta de projeto até o descarte final. Esse arcabouço garante que as diretrizes nacionais conversem diretamente com padrões internacionais rigorosos como as normas ABNT NBR ISO 12100:2013 e ISO 13849-1:2015 (Brasil, 2020; ABNT, 2013).

A evolução recente da NR-12 consolidou a transição de uma abordagem puramente prescritiva para uma filosofia de gestão de riscos. Essa mudança confere maior flexibilidade técnica, exigindo diagnósticos específicos e controles proporcionais aos perigos de cada máquina (Oliveira et al., 2021). Contudo, a adequação de "equipamentos legados" impõe barreiras significativas à indústria nacional (Magnus, 2021). Trata-se de ativos de gerações tecnológicas anteriores mantidos por seu valor produtivo, mas cujas arquiteturas obsoletas frequentemente rejeitam a integração com sistemas de segurança contemporâneos (Fritola e Santander, 2021).

As prensas mecânicas são máquinas industriais de alto risco, responsáveis por grande parte das amputações de membros superiores no Brasil, gerando incapacidades permanentes e impactos socioeconômicos relevantes para trabalhadores e empresas (Brasil, 2020). Os principais perigos incluem esmagamento, cortes e aprisionamento, especialmente durante a alimentação manual das peças, ajustes de ferramentas e atividades

de manutenção, quando o contato direto com partes móveis é mais frequente (Basso, 2023).

A adequação de prensas industriais à NR-12 depende diretamente da inteligência dos circuitos lógicos de segurança. Esses sistemas integram relés, CLPs de segurança e dispositivos de campo, como barreiras ópticas e intertravamentos, para monitorar a operação e forçar paradas imediatas diante de qualquer perigo (Silva et al., 2023). A robustez dessa proteção vem da arquitetura redundante e automonitorada. Projetada conforme os níveis de desempenho (Performance Level – PL) da ISO 13849-1, ela garante que a segurança do sistema permaneça intacta mesmo se um componente individual falhar (Pinheiro; Araújo Filho; Coelho, 2020).

Por mais que a importância técnica desses circuitos seja indiscutível, existe uma lacuna notável na literatura nacional: faltam estudos de caso que documentem a "jornada" completa da adequação, indo da análise de risco inicial até a validação da solução (Santana et al., 2024). A maioria das publicações atuais se prende a aspectos teóricos da norma. Isso deixa engenheiros e gestores sem um guia prático sobre como traduzir as exigências da lei em tecnologia funcional no chão de fábrica. Apesar dos avanços normativos e tecnológicos, observa-se uma lacuna relevante na literatura aplicada, especialmente no que diz respeito à validação prática de arquiteturas de segurança em prensas mecânicas excêntricas, com análise integrada entre desempenho funcional (PL) e contexto operacional real.

Esse cenário define o problema central desta pesquisa: de que forma a aplicação integrada da NR-12 e dos circuitos lógicos de segurança

pode reduzir, de maneira mensurável, os riscos operacionais em prensas mecânicas legadas?

A relevância do estudo é tripla. No âmbito social, o foco é a preservação da vida e a integridade física do trabalhador. Economicamente, a adequação reduz custos com acidentes e amplia a competitividade. Tecnicamente, o trabalho oferece um modelo sistemático de análise e controle, replicável em outros contextos industriais.

O escopo central deste trabalho consistiu na análise da aplicação prática da NR-12, em conjunto com circuitos lógicos, para a adequação de uma prensa mecânica. Para viabilizar tal propósito, o estudo desdobrou os seguintes objetivos específicos: revisar os fundamentos da norma e de regulamentações correlatas, avançando posteriormente para caracterizar os componentes e a lógica dos circuitos de segurança. Na sequência, procedeu-se à análise dos riscos da máquina sob as diretrizes da NR-12 e da ISO 12100. Com os perigos devidamente mapeados, propuseram-se medidas de controle baseadas nesses circuitos, fechando o ciclo com a discussão das implicações práticas da adequação para a integridade do operador e a conformidade da empresa.

Sob o prisma da organização estrutural, o artigo foi disposto em seções sequenciais para facilitar a compreensão da lógica investigativa. Após esta introdução, a fundamentação teórica revisitou a evolução histórica da NR-12 e os princípios técnicos dos circuitos de segurança. Na sequência, a trajetória metodológica descreveu as ferramentas de coleta de dados e os critérios de análise de risco adotados. O núcleo do trabalho, apresentado nos resultados e discussões, materializou o estudo de caso da prensa mecânica,

detalhando desde o diagnóstico de não conformidades até a proposição técnica das medidas de controle. Por fim, as considerações finais sintetizaram os êxitos obtidos e apontaram perspectivas para pesquisas futuras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Evolução Normativa da NR-12 e Contexto Internacional

Entender o cenário atual da segurança em máquinas no Brasil exige um olhar crítico sobre a trajetória da Norma Regulamentadora n.º 12 (NR-12). Quem analisa o texto original de 1978 percebe de imediato um viés puramente prescritivo. Naquela época, a norma operava quase como um *checklist* estático, ditando regras genéricas de proteção física sem considerar as nuances operacionais ou a complexidade dos sistemas de controle. Era uma abordagem "engessada" que, muitas vezes, não acompanhava a velocidade da evolução tecnológica no chão de fábrica.

A verdadeira mudança de paradigma veio com a revisão de 2010. O Brasil abandonou a lógica do "cumpra-se" para adotar uma filosofia moderna baseada na gestão e análise de riscos. Magnus (2021) observa que essa transição, embora fundamental para a modernização do parque industrial, gerou um impacto técnico severo: as empresas tiveram que sair da zona de conforto das proteções fixas simples para enfrentar a complexidade das apreciações de risco dinâmicas.

Essa nova estrutura normativa, reafirmada pela Portaria SEPRT n.º 915 de 2019, deixa claro que o foco não é burocratizar a engenharia, mas garantir que falhas técnicas não custem vidas. O escopo da norma define bem essa responsabilidade:

Esta Norma Regulamentadora - NR e seus anexos definem referências técnicas, princípios fundamentais e medidas de proteção para resguardar a saúde e a integridade física dos trabalhadores e estabelece requisitos mínimos para a prevenção de acidentes e doenças do trabalho nas fases de projeto e de utilização de máquinas e equipamentos, e ainda à sua fabricação, importação, comercialização, exposição e cessão a qualquer título, em todas as atividades econômicas, sem prejuízo da observância do disposto nas demais NRs aprovadas pela Portaria MTb n.º 3.214, de 8 de junho de 1978, nas normas técnicas oficiais ou nas normas internacionais aplicáveis e, na ausência ou omissão destas, opcionalmente, nas normas Europeias tipo “C” harmonizadas (Brasil, 2019, p. 1).

Para sustentar tal nível de exigência, o arcabouço normativo brasileiro não se isolou; ao contrário, buscou alinhamento visceral com a Diretiva de Máquinas da União Europeia (2006/42/CE). Essa estratégia gerou uma equivalência técnica transcontinental. Na prática, isso implica dizer que o rigor de segurança imposto a um projeto nascido no Polo Industrial de Manaus submete-se, hoje, ao mesmo crivo técnico que validaria esse equipamento em solo europeu.

A base técnica dessa harmonização se apoia em dois pilares: a ABNT NBR ISO 12100 e a ISO 13849-1. A primeira estabelece a metodologia para a apreciação de riscos, definindo uma estratégia iterativa que

vai da determinação dos limites da máquina até a estimativa do risco. A ABNT (2013) reforça que esse processo é a base lógica de qualquer projeto de segurança:

A apreciação de riscos fornece a informação necessária para a avaliação de riscos, que por sua vez permite determinar se a redução de riscos é necessária. [...] Essas decisões devem ser sustentadas por uma estimativa qualitativa ou quantitativa do risco associado aos perigos presentes na máquina (ABNT, 2013, p. 5).

Enquanto a ISO 12100 orienta "o que" deve ser protegido, a ISO 13849-1 define "como" garantir a confiabilidade dessa proteção nas Partes Relacionadas à Segurança de Sistemas de Comando (SRP/CS). Aqui a engenharia elétrica se aprofunda: não basta instalar um sensor de barreira; é preciso calcular se a arquitetura do circuito (Categoria), a confiabilidade dos componentes (MTTFd) e a cobertura de diagnóstico (DC) atingem o Nível de Performance (PLr) exigido. A evolução da NR-12, portanto, transformou a segurança de uma obrigação legal em um desafio de engenharia de controle, onde a conformidade depende de cálculos probabilísticos e arquiteturas robustas.

2.2. Fundamentos dos Circuitos Lógicos de Segurança

A segurança em prensas mecânicas não depende apenas da instalação de barreiras físicas, mas principalmente da confiabilidade dos sistemas lógicos que controlam a máquina. São esses circuitos

que governam o comportamento do equipamento diante de eventos críticos, determinando se uma falha resulta em parada segura ou em acidente.

Sob a ótica da engenharia de confiabilidade, as Partes de Sistemas de Comando Relacionadas à Segurança (SRP/CS) constituem uma cadeia de transmissão de informações onde a função de transferência, entre a detecção do perigo e a interrupção da energia, deve apresentar uma probabilidade de falha sob demanda (PFD) infinitesimal. A arquitetura fundamental desse sistema supera o modelo linear simplista; trata-se de um arranjo estruturado em três subsistemas interdependentes e frequentemente redundantes: a aquisição de dados (interface de entrada), o processamento lógico (unidade de controle) e a atuação de potência (interface de saída) (Silva et al., 2023).

No estágio de aquisição, dispositivos de campo como cortinas de luz, chaves de intertravamento e paradas de emergência não atuam como meros interruptores binários. Em aplicações de alta exigência normativa, esses periféricos operam mediante sinais pulsados (OSSD – *Output Signal Switching Device*) ou contatos secos duplos monitorados por discrepância temporal, visando a detecção imediata de falhas como curtos-circuitos cruzados (*cross-short*) ou perdas de referência de terra. O sinal gerado é transmitido à unidade lógica, que executa algoritmos de verificação cruzada (*cross-monitoring*) antes de comandar os elementos de saída. Estes, por sua vez, utilizam tipicamente contadores em série com contatos mecanicamente guiados (contatos espelho), assegurando que a colagem de um polo não impeça a abertura do circuito de segurança. Conforme elucidam Silva et al. (2023), tal arquitetura deve garantir o princípio do estado seguro (*fail-safe*): a ocorrência de uma

falha isolada em qualquer componente deve conduzir o sistema, invariavelmente, à parada segura.

A análise de confiabilidade dos sistemas de segurança pode ser aprofundada a partir de metodologias como o FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), amplamente discutido por Stamatis (2003), permitindo identificar modos de falha críticos e seus impactos no desempenho do sistema. A validação dessa arquitetura exige a aplicação de modelagens matemáticas complexas, materializadas nas métricas de *Performance Level* (PL), segundo a ABNT NBR ISO 13849-1, e *Safety Integrity Level* (SIL), conforme a IEC 62061 e a IEC 61508. Embora a ISO 13849-1 utilize o conceito de Performance Level (PL) e a IEC 62061 adote o Safety Integrity Level (SIL), ambas convergem para o mesmo objetivo: quantificar a confiabilidade das funções de segurança. Estudos indicam que sistemas classificados como PL e apresentam equivalência aproximada ao SIL 3, evidenciando alto nível de integridade funcional. O *Performance Level* categoriza a confiabilidade em cinco níveis discretos (de "a" a "e"), derivados de uma função multivariável que pondera a Categoria da arquitetura (B, 1, 2, 3 ou 4), o Tempo Médio Até Falha Perigosa (MTTFd), a Cobertura de Diagnóstico (DC) e a resistência a Falhas de Causa Comum (CCF). Já o SIL, fundamentado em cadeias de Markov para sistemas programáveis complexos, baseia-se na Probabilidade de Falha Perigosa por Hora (PFHd).

A correlação intrínseca entre a topologia do *hardware* e a probabilidade de falha é enfatizada na literatura especializada:

A segurança funcional e o performance level em sistemas de automação industrial dependem diretamente da arquitetura escolhida e da confiabilidade dos componentes. O cálculo do PL, por exemplo, unifica a probabilidade de falha perigosa por hora (PFHd) com a capacidade do sistema de diagnosticar seus próprios erros, exigindo que engenheiros considerem não apenas a topologia do hardware, mas a eficácia dos testes automáticos internos (Pinheiro; Araújo Filho; Coelho, 2023, p. 4).

No cenário industrial contemporâneo, a implementação desses conceitos teóricos ocorre através de um espectro tecnológico que varia conforme a complexidade da lógica de segurança. Para sistemas onde as funções são fixas e a complexidade é baixa, como o monitoramento isolado de paradas de emergência, a indústria consolidou o uso de relés de segurança de lógica discreta. Soluções como a linha Pilz PNOZ X e os módulos Siemens SIRIUS 3SK1 exemplificam essa categoria, oferecendo redundância eletromecânica ou eletrônica sem a necessidade de programação de *software*.

Entretanto, a evolução para células de manufatura integradas impulsionou a adoção de Controladores Lógicos Programáveis de Segurança (*Safety PLCs*). Equipamentos como o Rockwell GuardLogix e o Schmersal PSC1 permitem a implementação de lógicas booleanas sofisticadas e o processamento de sinais via protocolos de rede seguros (como CIP Safety ou PROFIsafe), mantendo a integridade do sistema. No mercado nacional, destaca-

se o relé programável WEG SRW01 Safety, que preenche a lacuna técnica entre o relé fixo e o CLP de grande porte. A seleção entre essas tecnologias não deve ser arbitrária, mas sim o resultado direto da etapa de apreciação de riscos, assegurando que o dispositivo escolhido possua certificação compatível com o PL ou SIL requerido para mitigar os perigos identificados na prensa.

2.3. Estado da Arte: Pesquisas Recentes

O panorama científico recente, compreendido entre 2020 e 2024, revela um deslocamento significativo no foco das publicações sobre segurança de máquinas: a discussão migrou da mera interpretação hermenêutica da norma para a análise empírica das complexidades de implementação. Observa-se, na literatura atual, um esforço para quantificar o hiato existente entre a teoria prescrita na NR-12 e a realidade operacional do chão de fábrica, especialmente no que tange ao *retrofitting* de ativos legados.

Nessa vertente, Oliveira e Santos (2022) aprofundaram a discussão metodológica ao examinar a aplicação da ISO 12100 em ambientes industriais heterogêneos. O estudo demonstrou que a eficácia da análise de riscos não reside na simples identificação de perigos mecânicos, mas na capacidade de segmentar o ciclo de vida da máquina em fases operacionais distintas. Os autores enfatizaram que muitas adequações falham não por deficiência de *hardware*, mas pela aplicação de uma metodologia de apreciação de riscos estática, que ignora modos de operação não triviais, como ajustes e *setups*. A pesquisa evidenciou que a ausência de uma abordagem heurística e iterativa durante a fase de projeto resulta em sistemas de segurança que, embora normativamente corretos, tornam-se operacionalmente inviáveis.

Essa interdependência entre segurança e operabilidade foi o cerne da investigação conduzida por Basso (2023). Ao analisar prensas industriais sob um viés ergonômico, o trabalho desconstruiu a ideia de que a segurança é uma disciplina isolada. Foi possível notar uma correlação direta entre a usabilidade dos dispositivos de proteção e a tentativa de burla (*bypassing*) por parte dos operadores. Basso (2023) argumentou que adequações que negligenciam a biomecânica do trabalho e o fluxo cognitivo do operador, impondo barreiras físicas que dificultam a visibilidade ou o acesso excessivo, tendem a gerar novos riscos ocultos, criando uma falsa sensação de segurança. Concluiu-se, portanto, que a adequação à NR-12 deve ultrapassar a engenharia elétrica e mecânica, incorporando preceitos de ergonomia cognitiva para garantir a eficácia dos sistemas de comando.

No campo estritamente prático e voltado à tecnologia de conformação, Santana et al. (2024) apresentaram um estudo de caso robusto focado na adequação de prensas hidráulicas. O trabalho se destacou por documentar as idiossincrasias técnicas do sistema hidráulico comparado ao mecânico, especialmente no que tange ao tempo de resposta das válvulas de segurança e à inércia do fluido. Os autores demonstraram os desafios de integrar blocos hidráulicos de segurança monitorados com a lógica de CLPs modernos em equipamentos antigos, onde a ausência de documentação técnica prévia (esquemas elétricos e hidráulicos) obrigou a equipe de engenharia a realizar uma engenharia reversa completa.

O processo de adequação de prensas hidráulicas exige uma compreensão profunda da dinâmica dos fluidos e da resposta temporal dos atuadores. A simples instalação de cortinas de luz, sem o devido dimensionamento da distância de segurança baseado no tempo de parada total do sistema hidráulico, mostrou-se insuficiente para garantir a integridade do operador em cenários de intrusão súbita (Santana et al., 2024, p. 8).

A análise conjugada dessas obras evidencia que o "estado da arte" não se resume a novas tecnologias de sensores, mas sim à metodologia de integração dessas tecnologias em máquinas obsoletas. Enquanto Oliveira e Santos (2022) forneceram o rigor metodológico e Basso (2023) alertou para o fator humano, Santana et al. (2024) expuseram as dificuldades materiais da execução. Nota-se, contudo, uma lacuna específica: embora haja literatura sobre prensas hidráulicas e aspectos ergonômicos gerais, carece-se de estudos que detalhem a lógica de segurança específica para prensas *mecânicas* excêntricas, equipamentos com dinâmica de frenagem e riscos de repique (ciclo não intencional) distintos dos sistemas hidráulicos.

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da Pesquisa

No que concerne aos objetivos, a investigação configurou-se como descritiva e exploratória, visto que se empenhou em detalhar as

nuances da adequação de uma prensa industrial à NR-12, explorando simultaneamente as conexões entre as exigências normativas e as respostas técnicas providas pelos circuitos lógicos (Gil, 2019). S

ob a ótica dos procedimentos, o delineamento da pesquisa baseou-se no estudo de caso. Tal estratégia, conforme preconiza Yin (2015), viabilizou uma imersão analítica no fenômeno observado, mantendo-o atrelado ao seu contexto operacional real. A opção pela abordagem mista (quali-quantitativa) decorreu da necessidade de balizar a rigidez dos parâmetros numéricos de risco com a interpretação contextual das rotinas de trabalho e da eficácia das barreiras de controle (Creswell; Creswell, 2021).

3.2. Objetivo de Estudo e Delimitação

O objeto de análise centrou-se em uma prensa mecânica excêntrica de fricção, de capacidade nominal de 60 toneladas, instalada em uma unidade do setor metalúrgico. Remanescente da década de 1990, o equipamento operava em regime de produção seriada, sendo demandado para atividades de corte e conformação de chapas metálicas (Figura 1).

Figura 1 – Prensa mecânica excêntrica de fricção com capacidade nominal de 60 toneladas, representativa de equipamento legado operante em ambiente industrial



Fonte: Arquivo pessoal do Autor, 2025.

A eleição deste equipamento como foco do estudo sustentou-se em um tripé de critérios técnicos. O primeiro fator foi a representatividade, reflexo da ubiquidade das prensas mecânicas na matriz produtiva brasileira. Paralelamente, considerou-se a criticidade da operação, dada a elevada severidade dos riscos acidentais historicamente atrelados a essa tipologia de máquina. O terceiro vetor decisivo foi a obsolescência normativa, visto que a data de manufatura do ativo, anterior aos marcos regulatórios vigentes, impunha uma demanda concreta e complexa de adequação à NR-12.

3.3. Procedimentos Metodológicos

3.3.1. Etapa 1: Revisão Bibliográfica e Documental

A estruturação da pesquisa alicerçou-se em uma revisão bibliográfica técnico-científica, desenhada para dar robustez teórica às discussões sobre segurança de máquinas e à aplicabilidade da NR-12 no contexto de prensas industriais. O levantamento perscrutou um espectro diversificado de informações, transitando

pelo arcabouço legislativo e normativo, pela literatura acadêmica especializada e pelo material técnico de fabricantes e entidades de classe. A Tabela 1, apresentada na sequência, sistematizou as tipologias de fontes consultadas, evidenciando os critérios de elegibilidade que pautaram a seleção.

Tabela 1 - Fontes consultadas na revisão bibliográfica sobre segurança em máquinas e NR-12

Tipo de Fonte	Descrição	Detalhes / Observações
Legislação e normas técnicas	Análise detalhada das normas que regem a segurança de máquinas	<ul style="list-style-type: none"> ● NR-12 (Portaria SEPRT n.º 915/2019); ● ABNT NBR ISO 12100:2013 (Princípios Gerais de Projeto); ISO 13849-1:2015 (Sistemas de Comando Relacionados à Segurança); ● IEC 60204-1:2016 (Equipamento Elétrico de Máquinas); ● ABNT NBR 13930:2008 (Prensas Mecânicas - Requisitos de Segurança).
Artigos científicos e publicações técnicas	Pesquisa em bases de dados para fundamentação teórica e estudos correlatos	<ul style="list-style-type: none"> ● Bases SciELO; ● Google Scholar; ● Portal de Periódicos CAPES; ● Descritores: "NR-12", "segurança em máquinas", "circuitos lógicos de segurança",

		<p>"prensas industriais", "análise de riscos";</p> <ul style="list-style-type: none"> • Período: 2015-2025; • Idiomas: português e inglês.
<p>Manuais técnicos e guias práticos</p>	<p>Consulta a materiais técnicos de fabricantes e guias de aplicação</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Catálogos de dispositivos de segurança (relés de segurança, barreiras fotoelétricas, CLPs de segurança); • Guias publicados por FUNDACENTRO e ABIMAQ.

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

3.3.2. Etapa 2: Coleta de Dados e Caracterização da Máquina

A etapa de coleta de dados materializou-se por meio de visitas técnicas *in loco*, perfazendo uma carga horária aproximada de 20 horas. Essas incursões ao chão de fábrica ocorreram de forma intervalada ao longo de cinco dias no mês de setembro de 2024. Para garantir a triangulação das informações, o estudo articulou os seguintes instrumentos e técnicas:

- a. **Observação direta e sistemática:** Monitorou-se a rotina operacional da prensa em sua totalidade, abrangendo desde a preparação inicial (*setup*) e o regime normal de produção até os procedimentos de limpeza e manutenção. A amostragem visual contemplou cerca de 150 ciclos operacionais executados por três colaboradores com níveis de senioridade distintos (2, 5

e 12 anos de experiência), o que permitiu identificar vícios e variações no método de trabalho;

- b. **Entrevistas semiestruturadas:** Para captar a percepção subjetiva do risco, aplicou-se um roteiro de perguntas a um grupo multidisciplinar (n=6), composto pelos operadores, além das lideranças de produção, manutenção e segurança do trabalho. Nesses diálogos, com duração média de 40 minutos, investigaram-se o histórico de incidentes, as restrições operacionais enfrentadas e as sugestões de melhoria emanadas da própria equipe;
- c. **Análise documental:** Procedeu-se ao escrutínio da documentação técnica para reconstituir o histórico do equipamento. A revisão abrangeu manuais do fabricante, ordens de serviço de manutenção, registros de sinistralidade, laudos pregressos e os Procedimentos Operacionais Padrão (POPs) vigentes;
- d. **Registro fotográfico e videográfico:** A documentação visual serviu como evidência técnica dos pontos críticos, zonas de perigo e sistemas de proteção instalados. Toda a captação de imagens seguiu rigorosamente os protocolos de autorização da empresa, preservando-se o anonimato dos trabalhadores;
- e. **Levantamento técnico e dimensional:** Executaram-se medições *in loco* para aferir distâncias de segurança e alturas de proteção, além da verificação das grandezas elétricas e da tipologia dos componentes de acionamento, dados fundamentais para o confronto posterior com os requisitos normativos.

3.3.3. Etapa 3: Apreciação de Riscos

A sistemática de apreciação de riscos obedeceu aos ritos metodológicos preconizados pela ABNT NBR ISO 12100:2013 e aos ditames da NR-12, fracionando-se em três eixos estruturantes:

- a. **Análise Preliminar de Riscos (APR):** Nesta fase inicial, mobilizou-se um colegiado multidisciplinar que integrou o saber acadêmico à vivência prática do chão de fábrica, reunindo engenharia, segurança, manutenção e operação. Esse grupo conduziu um escrutínio técnico da prensa, mapeando perigos latentes em todo o ciclo de vida do ativo, abrangendo desde o comissionamento e a operação normal (alimentação/retirada), passando por rotinas de *setup* e manutenção, até cenários de falha e descarte. Os riscos foram catalogados segundo as taxonomias da ISO 12100 (mecânicos, elétricos, ergonômicos, etc.).

- b. **Estimativa e Avaliação de Riscos:** Na sequência, procedeu-se à ponderação da criticidade de cada evento através de uma métrica tridimensional. A metodologia analisou a interação entre três variáveis fundamentais:
 - **Gravidade (G):** Escalonada em quatro níveis, variando de lesões leves e reversíveis (G1) a ocorrências fatais ou catastróficas (G4);
 - **Frequência (F):** Avaliada desde a exposição rara (F1) até a contínua (F4);
 - **Possibilidade de Evitação (P):** Graduada da condição possível (P1) à impossível (P3). A interpolação desses vetores em uma matriz de risco resultou em uma classificação estratificada em

cinco níveis (de Muito Baixo a Muito Alto), definindo a hierarquia de prioridades para a intervenção técnica.

c. **Documentação e Validação:** O processo culminou na consolidação dos dados em uma planilha técnica de Avaliação de Riscos. Esse inventário detalhou a zona de perigo, a natureza do risco e a memória de cálculo das variáveis G, F e P. O documento foi submetido à validação cruzada da equipe multidisciplinar e recebeu a aprovação formal do responsável técnico da empresa, assegurando a rastreabilidade das informações.

3.3.4. Etapa 4: Proposição de Medidas de Controle

Fundamentando-se na matriz de riscos consolidada, a proposição das medidas de controle obedeceu estritamente ao escalonamento hierárquico preconizado pela NR-12 e pela ISO 12100. A estratégia de mitigação desdobrou-se em quatro níveis de atuação:

- **1º Nível – Medidas inerentes ao projeto:** Investigou-se, prioritariamente, a viabilidade de eliminar ou reduzir os perigos na origem através de alterações na própria concepção física ou mecânica da máquina;
- **2º Nível – Proteção coletiva:** Dimensionaram-se e selecionaram-se as proteções físicas (fixas e móveis intertravadas) e os dispositivos de segurança eletrônicos (como cortinas de luz e sensores), visando isolar a zona de perigo;
- **3º Nível – Medidas administrativas:** Estabeleceram-se protocolos organizacionais, incluindo a redação de

procedimentos operacionais, programas de capacitação técnica e a implementação de sinalização de advertência e bloqueio;

- **4° Nível – Equipamentos de Proteção Individual (EPI):** Especificaram-se os EPIs complementares para o manejo dos riscos residuais que não puderam ser totalmente suprimidos pelas barreiras anteriores.

No que tange especificamente à engenharia das proteções coletivas baseadas em circuitos lógicos, o desenvolvimento técnico percorreu as seguintes etapas:

- a. **Seleção de componentes:** Procedeu-se à especificação técnica dos dispositivos. relés de segurança, barreiras optoeletrônicas e chaves de intertravamento, assegurando-se a compatibilidade com a infraestrutura elétrica preexistente e a conformidade com as certificações vigentes.
- b. **Cálculo do Performance Level (PL):** Determinou-se o Nível de Performance Requerido (PLr) para cada função de segurança, aplicando-se a metodologia da ISO 13849-1. Na sequência, verificou-se matematicamente se a arquitetura dos componentes selecionados atingia o PL necessário para validar a confiabilidade do sistema.
- c. **Elaboração de diagramas:** Desenvolveram-se os esquemas elétricos detalhados dos circuitos lógicos, mapeando toda a cadeia de sinal: desde os elementos de entrada (sensores, botões de emergência) e a lógica de processamento (relés/CLPs) até os atuadores de saída (contatores, válvulas).

d. **Análise de distâncias de segurança:** Calcularam-se as distâncias mínimas para a instalação dos dispositivos optoeletrônicos, em estrita observância à ABNT NBR ISO 13855:2013. O cálculo ponderou o tempo total de resposta do sistema de frenagem da máquina em relação à velocidade de aproximação dos segmentos corporais humanos.

3.4. Aspectos Éticos

A execução deste trabalho balizou-se por diretrizes éticas fundamentais da pesquisa científica, priorizando a responsabilidade no manejo das informações. O ingresso no ambiente fabril não exigiu trâmites processuais extensos; a anuência partiu diretamente da diretoria da empresa, o que facultou o acesso imediato aos dados técnicos e às instalações vitais para a investigação. Ao longo de toda a trajetória, houve o cuidado de resguardar o sigilo institucional e a privacidade dos colaboradores. O tratamento dos dados restringiu-se estritamente ao escopo acadêmico, descaracterizando-se quaisquer elementos que pudessem identificar os participantes. Como devolutiva, os diagnósticos e as propostas de adequação retornaram à organização na forma de um relatório técnico, com o propósito de auxiliar na mitigação dos riscos e no cumprimento das exigências da NR-12.

3.5. Limitações da Pesquisa

Reconhece-se como limitações do estudo: (i) a análise de apenas uma máquina específica, o que restringe a generalização dos achados; (ii) a impossibilidade de implementação física das medidas propostas no período de desenvolvimento da pesquisa, limitando a avaliação à fase de projeto; e (iii) a dependência das informações

fornecidas pela empresa e pelos entrevistados, exigindo triangulação de dados para validação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização Técnica da Máquina

O objeto central da intervenção consistiu em uma prensa mecânica excêntrica com sistema de acoplamento por fricção (*friction clutch*), ostentando uma capacidade de força nominal de 60 toneladas (tf). O equipamento, remanescente da década de 1990, operava em uma planta metalúrgica dedicada à estamparia de componentes de precisão. A data de fabricação do ativo, anterior às revisões substanciais das normas de segurança, enquadrava-o na definição de "equipamento legado" discutida por Fritola e Santander (2021): uma tecnologia operacionalmente vital, porém alicerçada em uma arquitetura obsoleta e incompatível com os paradigmas modernos de proteção.

Do ponto de vista cinemático, a máquina utilizava um volante de inércia acionado por motor elétrico trifásico, transmitindo movimento ao martelo através de um conjunto de embreagem e freio pneumático. Diferentemente das prensas de engate por chaveta (revolução completa), esse sistema permitia a interrupção do ciclo de descida em qualquer ponto do curso, uma característica técnica fundamental que, teoricamente, viabilizava a integração de dispositivos de parada eletrônicos. Contudo, a inspeção inicial revelou que o sistema de comando original era puramente eletromecânico, desprovido de interfaces de monitoramento de falhas ou redundância, violando os princípios de segurança funcional estabelecidos na NR-12 (Brasil, 2020).

No que tange às condições operacionais, o diagnóstico evidenciou um cenário crítico. A alimentação da matéria-prima (chapas metálicas) ocorria de forma manual, exigindo que o operador invadisse a zona de prensagem a cada ciclo produtivo. Tal dinâmica de trabalho, conforme analisado por Basso (2023) em estudos ergonômicos similares, expunha o trabalhador a riscos severos de esmagamento e amputação, agravados pela repetitividade da tarefa e pela fadiga cognitiva. O acionamento da máquina efetuava-se mediante um pedal mecânico sem proteção contra acionamento acidental, ou, em alguns *setups*, por botoeiras simples que não atendiam aos requisitos de bimanualidade sincrônica.

A avaliação dos dispositivos de segurança originais constatou uma precariedade estrutural. O equipamento carecia de proteções fixas ou móveis intertravadas nas zonas laterais e traseira, permitindo o acesso irrestrito às partes móveis de transmissão de força (correias e volantes). Na zona frontal de operação, inexistiam cortinas de luz ou barreiras físicas monitoradas. A única medida de mitigação presente resumia-se a uma proteção de policarbonato adaptada de forma improvisada, que, além de não possuir intertravamento elétrico, encontrava-se danificada e frequentemente burlada para agilizar a produção. Esse quadro confirmou as observações de Magnus (2021) sobre a dificuldade da indústria em manter a conformidade de máquinas antigas, onde a ausência de uma apreciação de riscos baseada na ABNT NBR ISO 12100 (ABNT, 2013) resultava na perpetuação de condições de perigo grave e iminente.

4.2. Diagnóstico de Conformidade NR-12

O escrutínio da conformidade legal submeteu os achados da inspeção física a um confronto analítico rigoroso contra os requisitos

mandatários da Norma Regulamentadora n.º 12 e suas normas técnicas referenciadas. Essa auditoria evidenciou que as deficiências transcendiam o mero desgaste material; tratava-se de uma dissonância sistêmica entre a lógica de controle existente e os preceitos contemporâneos de engenharia de segurança. A Tabela 2, apresentada na sequência, sintetizou o hiato normativo identificado, correlacionando os itens infringidos com a severidade do risco residual.

Tabela 2 - Matriz Comparativa de Conformidade (NR-12 vs. Situação Atual)

Item NR-12	Requisito Normativo (Síntese)	Situação Diagnosticada na Máquina	Status
12.38	As zonas de perigo devem possuir sistemas de proteção (fixas ou móveis) que impeçam o acesso às partes móveis.	Inexistência de proteções fixas na transmissão de força (volante/correias). Proteção frontal precária, sem monitoramento e com acesso livre à zona de prensagem.	Crítico
12.26	As proteções móveis devem possuir dispositivos de intertravamento que paralitem a máquina em caso de abertura.	A proteção frontal improvisada não possuía qualquer chave de segurança ou sensor de intertravamento conectado ao comando.	Crítico
12.36	Componentes de segurança devem garantir que uma falha única não leve à perda da função	O circuito de comando operava em canal único (unicanal), sem relés de segurança e sem	Crítico

	de segurança (redundância).	monitoramento de falhas.	
12.4	Instalações elétricas devem prevenir choques, incêndios e explosões, com grau de proteção adequado.	Painel elétrico com componentes expostos (IP00), fiação degradada e ausência de seccionadora com bloqueio (lockout/tagout).	Grave
12.5	Comandos de acionamento devem impedir funcionamento acidental e exigir ação intencional (bimanual).	Acionamento via pedal simples sem capa de proteção e sem dispositivo de retenção mecânica, suscetível a toques inadvertidos.	Crítico

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Brasil (2020).

A análise aprofundada das não conformidades revelou que a vulnerabilidade crítica residia na inadequação da Categoria de Segurança do sistema de comando. Enquanto a apreciação de riscos, balizada pelos critérios da ABNT NBR ISO 12100 (ABNT, 2013), demandava uma arquitetura de Categoria 4, caracterizada por redundância completa e monitoramento contínuo para riscos altos, o sistema diagnosticado operava em Categoria B (Básica).

Isso significava que a segurança dependia exclusivamente da integridade de componentes não monitorados. A ausência de uma interface de segurança monitorada para as válvulas pneumáticas violava frontalmente o princípio da falha segura, um conceito central discutido por Silva et al. (2023) ao abordarem a confiabilidade de circuitos lógicos: constatou-se que o travamento mecânico do êmbolo da válvula solenoide em estado energizado provocaria a

descida involuntária do martelo, sem que o sistema possuísse inteligência lógica para detectar o erro e abortar a operação.

No espectro das interfaces elétricas, identificou-se uma violação grave dos requisitos de bloqueio e impedimento de reenergização (*Lockout/Tagout* - LOTO). O painel de comando não dispunha de chave seccionadora principal com capacidade para recebimento de cadeados de segurança, impedindo que as equipes de manutenção garantissem a desenergização total durante intervenções. Adicionalmente, o grau de proteção (IP) do invólucro elétrico mostrou-se insuficiente para o ambiente industrial; a presença de frestas e componentes energizados acessíveis (grau IP20 ou inferior) expunha os operadores a riscos de contato direto com partes vivas, contrariando as exigências harmonizadas entre a NR-12 e a NR-10 (Brasil, 2020).

A auditoria dos dispositivos de intertravamento denunciou a ineficácia lógica das proteções existentes, embora houvesse anteparos físicos improvisados, a falha normativa residia na ausência de integração desses elementos ao circuito de parada. A norma prescreve que a abertura de uma proteção móvel deve cessar imediatamente os movimentos perigosos através de chaves de segurança com ruptura positiva e codificação anti-burlabilidade. No cenário avaliado, a inexistência desses sensores permitia que a máquina operasse com as zonas de transmissão de força expostas, transferindo toda a responsabilidade da segurança para o comportamento administrativo do operador. Essa prática configura-se inadmissível sob a ótica da hierarquia de controle de riscos e corrobora os alertas de Basso (2023), que aponta a falibilidade humana como fator crítico em sistemas desprovidos de proteções ergonômicas e automáticas.

4.3. Avaliação de Riscos e Priorização

A etapa de valoração dos riscos não se constituiu em mero formalismo documental; tratou-se de um processo analítico para quantificar a vulnerabilidade do sistema produtivo. Aplicando-se a metodologia da ABNT NBR ISO 12100 (ABNT, 2013), a equipe multidisciplinar ponderou cada perigo identificado através da tríade vetorial: Gravidade da lesão (G), Frequência de exposição (F) e Possibilidade de evitar o dano (P). A consolidação desses parâmetros permitiu hierarquizar as intervenções, segregando os riscos triviais daqueles que demandavam engenharia imediata.

A Tabela 3, disposta a seguir, apresenta o recorte da Matriz de Risco preenchida, destacando os cenários operacionais de maior criticidade diagnosticados durante a inspeção *in loco*.

Tabela 3 - Matriz de Avaliação de Riscos (Extrato dos Pontos Críticos)

ID	Fase de Vida	Zona de Perigo	Descrição do Evento Perigoso	G (1-4)	F (1-4)
R01	Operação Normal	Zona de Prensagem (Frontal)	Esmagamento de mãos/dedos entre o martelo e a matriz durante a alimentação	G4	F4

△ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/aplicacao->

Fonte: Elaborada pelo autor com base na ABNT NBR ISO 12100 (2013).

A análise estratificada dessa matriz permitiu isolar os cinco riscos de maior magnitude ("Top 5"), cuja mitigação condicionou a viabilidade técnica da adequação. A priorização obedeceu à lógica de severidade irreversível combinada à alta probabilidade de ocorrência:

- i. **Esmagamento na Zona de Prensagem (R01):** Classificado como o risco predominante. A alimentação manual impunha que o operador invadisse a zona de perigo a cada ciclo (aproximadamente 600 vezes/hora). A ausência de cortinas de luz tornava a prevenção dependente exclusivamente do reflexo humano, resultando em uma classificação máxima em todos os vetores (G4/F4/P3).
- ii. **Acionamento Acidental (R02):** A precariedade do pedal mecânico sem proteção configurou um cenário onde um simples tropeço poderia deflagrar o ciclo de 60 toneladas. A impossibilidade de o operador reagir a tempo de retirar os membros (P3) elevou a criticidade desse ponto, corroborando os dados de acidentes em prensas compilados pelo SINAN (2024).
- iii. **Aprisionamento na Transmissão de Força (R03):** O volante de inércia, localizado na face posterior, acumulava energia cinética significativa mesmo após o desligamento do motor. A inexistência de proteções fixas (gradis) e de freio-motor

dinâmico expunha as equipes de manutenção e limpeza ao risco de serem "tragadas" pelo sistema de correias.

iv. **Choque Elétrico e Arco Voltaico (R04):** A degradação do invólucro do painel e a exposição de barramentos energizados representavam um perigo latente de eletrocussão. Embora a frequência de acesso fosse menor (F2), a letalidade potencial do evento (G4) exigiu prioridade na adequação do quadro de comando à NR-10 e NR-12.

v. **Cisalhamento por Energia Residual (R05):** Durante as trocas de ferramentas (*setup*), identificou-se o risco de movimentação gravitacional do martelo caso houvesse falha no sistema pneumático ou ruptura de componente mecânico. A ausência de calços de segurança monitorados tornava essa operação crítica, dado o peso elevado do conjunto móvel.

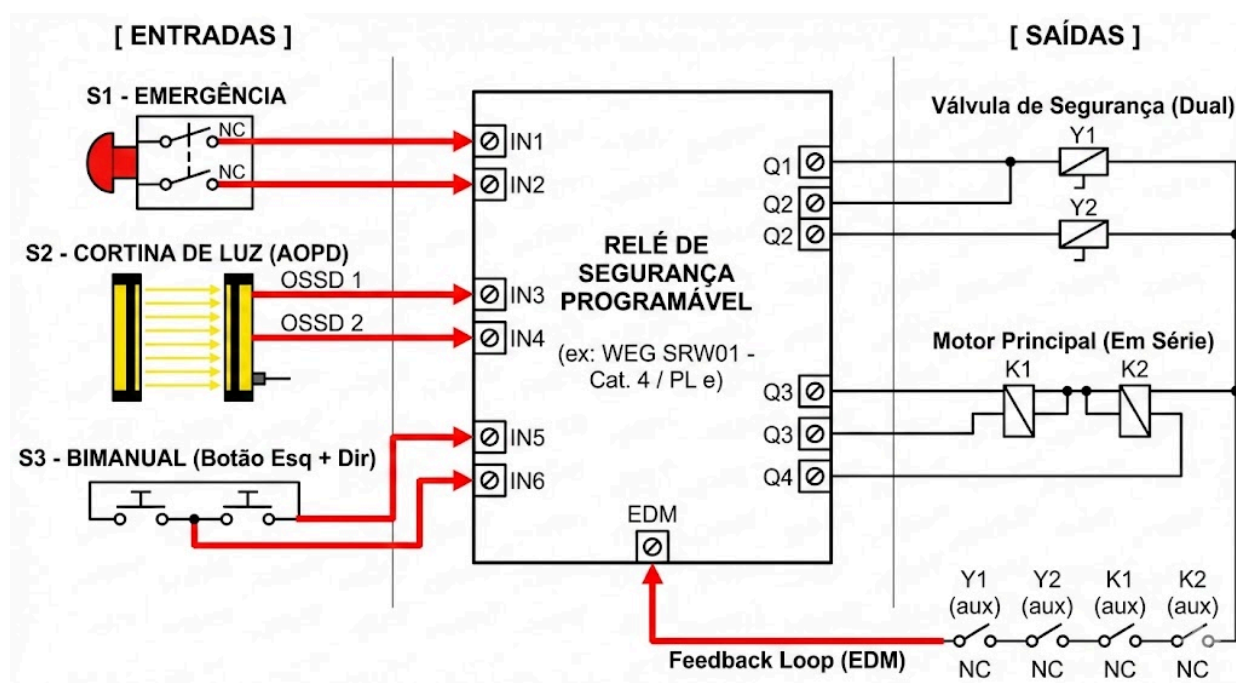
4.4. Proposta de Adequação Técnica

A materialização da solução de engenharia para a mitigação dos riscos catalogados transcendeu a instalação periférica de componentes isolados; configurou-se uma nova topologia de controle, arquitetada para garantir redundância e monitoramento contínuo, visando atingir a Categoria 4 conforme a ABNT NBR ISO 13849-1. A estratégia baseou-se na segregação do circuito de comando em dois canais distintos (*dual channel*), onde a permissão de operação dependia da validação simultânea e síncrona dos sinais de entrada pela unidade lógica central.

A Figura 1, apresentada a seguir, ilustra o diagrama esquemático simplificado da solução proposta. O desenho lógico priorizou a interface entre os dispositivos de campo (sensores e botoeiras) e os

elementos de atuação (contatores e válvulas), evidenciando o fluxo de sinal através do relé de segurança programável.

Figura 2 - Diagrama esquemático simplificado da arquitetura de segurança proposta, evidenciando a redundância de canais e o monitoramento de falhas (EDM).



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Na concepção deste diagrama, estabeleceu-se que o "reset" do sistema (rearme) ocorreria apenas mediante ação voluntária do operador (botão de reset azul), e somente após a confirmação de integridade de todos os sensores. A lógica interna do controlador foi programada para executar a varredura cíclica (*cross-monitoring*) entre os canais, detectando falhas como curtos-circuitos entre fios ou travamento de contatos em menos de 20 milissegundos.

A especificação do *hardware* obedeceu a critérios rigorosos de compatibilidade eletromagnética e confiabilidade funcional. A escolha dos componentes não foi arbitrária; buscou-se a harmonização entre fabricantes com forte presença no mercado

nacional, assegurando a manutenibilidade futura e a disponibilidade de peças de reposição.

A Tabela 4 resume o *Bill of Materials* (BOM) técnico selecionado para a adequação, correlacionando cada subsistema com o Nível de Performance (PL) atingido, conforme declaração dos fabricantes e cálculos de arquitetura.

Tabela 4 - Especificação Técnica dos Dispositivos de Segurança

Subsistema	Dispositivo Selecionado	Fabricante / Modelo	Função de Segurança	Classificação ISO 13849-1
Unidade Lógica	Relé de Segurança Programável	WEG SRW01 Safety	Processamento central dos sinais, monitoramento de discrepância e controle de saídas.	PL e / Cat. 4 (SIL 3)
Sensoriamento Óptico	Cortina de Luz de Segurança (Resolução 14mm)	Schmersal SLC440	Proteção da zona de prensagem frontal contra intrusão de dedos/mãos.	PL e / Cat. 4 (SIL 3)
Interface de Comando	Comando Bimanual Eletrônico	Siemens SIRIUS 3SB3 (Botões) + Módulo Lógico	Acionamento síncrono (<0,5s) exigindo ocupação das duas mãos.	PL e / Cat. 4 (SIL 3)
Atuação Pneumática	Válvula de Segurança	Ross Controls / DM2 Series	Controle do fluxo de ar para	PL e / Cat. 4

	de Corpo Duplo		embreagem/freio com monitoramento dinâmico de falha.	
Parada de Emergência	Botão de Emergência (Cogumelo com retenção)	Pilz PNOZ E-Stop (Conjunto)	Parada imediata em situação de perigo (prioridade sobre todos os comandos).	PL e / Cat. 4
Atuação Elétrica	Contatores de Potência em Série	WEG CWB (x2) com contato espelho	Corte redundante da energia do motor principal.	PL e / Cat. 4 (via arquitetura)

Fonte: Elaborada pelo autor (2025) com base nos catálogos técnicos dos fabricantes (2024).

A integração desses componentes permitiu a validação teórica do sistema. Considerando que todos os subsistemas críticos (entrada, lógica e saída) possuem certificação **PL "e"**, e que a arquitetura adotada eliminou o ponto único de falha através da redundância (duplo canal para sensores e dupla válvula/contatores para atuadores), concluiu-se que o conjunto proposto atendeu integralmente ao Nível de Performance Requerido (PLr = e) identificado na apreciação de riscos preliminar. A solução, portanto, não apenas cumpriu o requisito legal da NR-12, mas elevou o equipamento ao estado da arte em termos de segurança funcional.

4.5. Validação e Comparativo Técnico

A etapa derradeira do estudo consistiu na validação teórica da solução proposta, submetendo a arquitetura desenhada a simulações de cenários de falha (*Failure Mode and Effects Analysis - FMEA*). O objetivo dessa verificação não foi apenas atestar a funcionalidade operacional, mas comprovar a resiliência estocástica do sistema frente a avarias críticas, contrastando o comportamento da máquina em sua condição original com o estado proposto.

Para tal, modelaram-se dois cenários distintos focados na falha mais severa identificada: o travamento mecânico do elemento final de controle (válvula pneumática) em posição aberta.

No Cenário A (Máquina Original - Categoria B), a simulação indicou que o emperramento do carretel da válvula solenoide durante o ciclo de descida impediria o escape de ar da embreagem. Como o sistema carecia de redundância e monitoramento, a prensa executaria um "repique" (ciclo não intencional) imediatamente após o comando de parada. A ausência de cortinas de luz significava que, se o operador estivesse retirando a peça nesse instante, o tempo de reação humano (aprox. 200ms) seria insuficiente para evitar o acidente, resultando em lesão de gravidade G4 (amputação/esmagamento). Esse comportamento confirmou a fragilidade dos sistemas legados discutida por Magnus (2021), onde a falha técnica evolui diretamente para o dano físico.

Em contrapartida, no Cenário B (Adequação Proposta - Categoria 4), a mesma falha foi introduzida na lógica. Ao detectar que o canal 1 da válvula permaneceu energizado (pressurizado) enquanto o comando de parada foi enviado, a válvula de corpo duplo acionou instantaneamente o canal 2 para exaurir o ar residual, forçando a aplicação do freio por mola. Simultaneamente, o relé de segurança

programável, através do laço de realimentação (*feedback loop*), identificou a discrepância de estado entre os canais em um intervalo inferior a 20ms, travando o sistema em modo de falha e impedindo qualquer reinicialização (*lockout*). Conforme elucidam Silva et al. (2023), é essa capacidade de transformar uma falha perigosa em uma parada segura que define a eficácia dos circuitos lógicos modernos.

A implementação das medidas resultou em uma alteração drástica na matriz de riscos. A probabilidade de evitação do perigo (parâmetro P da ISO 12100) migrou de "Impossível" (P3) para "Possível/Provável" (P1), uma vez que a cortina de luz passou a atuar como barreira ativa. O cálculo da distância de segurança, balizado pela ABNT NBR ISO 13855 (ABNT, 2013), considerou o tempo total de parada do sistema $T = t_{\text{cortina}} + t_{\text{relé}} + t_{\text{válvula}} + t_{\text{freio}}$. Verificou-se que a eletrônica de resposta rápida ($< 30\text{ms}$), somada à eficiência da nova válvula de segurança, garantiu a imobilização do martelo antes que qualquer parte do corpo alcançasse a zona de perigo, neutralizando o risco de esmagamento frontal.

Sob a ótica da conformidade internacional, a validação técnica ratificou o alinhamento da proposta com os padrões mais rigorosos de engenharia. A arquitetura redundante com monitoramento de diagnóstico ($DC > 99\%$) assegurou o atingimento do Performance Level "e" (PL e), conforme a ISO 13849-1. Comparativamente, sob a métrica da IEC 62061, essa configuração de hardware e lógica correspondeu ao Safety Integrity Level 3 (SIL 3).

Essa equivalência técnica demonstrou que a adequação não se limitou ao cumprimento burocrático da NR-12 nacional. A solução elevou a prensa a um patamar de "Engenharia 4.0", termo explorado

por Pinheiro, Araújo Filho e Coelho (2020), onde a segurança deixa de ser um acessório mecânico para se tornar uma função integrada, inteligente e auditável do processo produtivo. No contexto da Indústria 4.0, os sistemas de segurança passam a integrar arquiteturas ciberfísicas, permitindo monitoramento em tempo real, diagnóstico remoto e integração com sistemas de manutenção preditiva (Kagermann et al., 2013).

A análise comparativa finalizou-se com a constatação de que o investimento tecnológico reduziu o Risco Residual a níveis toleráveis, viabilizando a continuidade operacional da máquina sem comprometer a integridade física dos trabalhadores. Os resultados obtidos corroboram os achados de Basso (2023), que aponta a ergonomia como fator crítico na eficácia dos sistemas de segurança. Adicionalmente, diferem parcialmente de Santana et al. (2024), ao demonstrar que, em prensas mecânicas, o tempo de resposta do sistema de frenagem apresenta comportamento distinto dos sistemas hidráulicos. Apesar da robustez da solução proposta, ressalta-se que a validação prática do sistema em ambiente produtivo real ainda se faz necessária para confirmar o desempenho sob variabilidade operacional, especialmente em condições de desgaste dos componentes.

4.6. Benefícios e Implicações Práticas

As repercussões da intervenção extrapolam a mera conformidade burocrática, desdobrando-se em benefícios tangíveis para a dinâmica operacional da planta. O impacto mais imediato observou-se na drástica redução do risco residual. A implementação da redundância lógica e física transformou a prensa de uma "armadilha mecânica" em um ativo produtivo controlável, onde a falha humana

ou técnica não resulta mais, inevitavelmente, em lesão. Essa mudança de paradigma alinhou a empresa às diretrizes da OIT (2019), promovendo um ambiente de trabalho decente e seguro.

Sob a ótica da manutenção, a introdução do relé programável gerou um ganho colateral significativo: a redução do Tempo Médio Para Reparo (MTTR). Enquanto o sistema antigo exigia diagnósticos manuais demorados com multímetros para localizar falhas em cadeias de contatos, a nova interface lógica passou a fornecer diagnósticos precisos via LEDs de status e códigos de erro. Isso permitiu que a equipe técnica identificasse rapidamente a origem de paradas (ex: desalinhamento de sensor ou colagem de contator), minimizando o *downtime* improdutivo.

No plano jurídico e cultural, a adequação fortaleceu a blindagem legal da organização. Ao documentar todo o processo de apreciação de riscos e validação de *Performance Level*, a empresa produziu evidências técnicas robustas de boa-fé e diligência, essenciais em eventuais contenciosos trabalhistas ou auditorias fiscais. Ademais, a presença de dispositivos de segurança modernos e visíveis (como cortinas de luz e comandos bimanuais ergonômicos) atuou como um vetor de transformação cultural, sinalizando aos colaboradores que a produção não se sobrepõe à integridade física.

Sendo assim, o modelo de adequação desenvolvido demonstrou alto potencial de replicabilidade. A sistemática aplicada, diagnóstico baseado na ISO 12100 seguido de *retrofitting* com componentes de mercado (WEG, Siemens, Schmersal), provou-se agnóstica em relação à marca da máquina. Isso significa que o roteiro técnico consolidado nesta pesquisa pode ser transposto para outras prensas excêntricas do polo industrial, oferecendo um caminho validado

para a revitalização de parques fabris obsoletos sem a necessidade de aquisição de maquinário novo.

Como contribuição original, este estudo propõe um modelo integrado de adequação baseado na correlação entre apreciação de riscos (ISO 12100), arquitetura de controle (ISO 13849-1) e validação funcional por simulação de falhas, oferecendo um framework replicável para modernização de equipamentos industriais legados.

5. CONCLUSÕES

O itinerário investigativo percorrido neste trabalho permitiu corroborar, com solidez empírica, a hipótese central da pesquisa: a aplicação integrada dos requisitos da NR-12 com a arquitetura de circuitos lógicos de segurança é condição *sine qua non*, ou seja, é impossível atingir o objetivo sem esse requisito específico, para a redução substancial do risco em prensas mecânicas. Demonstrou-se que a simples adição de barreiras físicas, desacompanhada de uma inteligência lógica de monitoramento (Categoria 4/PL e), é insuficiente para mitigar a severidade dos perigos inerentes a equipamentos de alta inércia.

As contribuições do estudo ramificam-se em três esferas distintas. Na dimensão técnica, o trabalho entregou um modelo sistemático de análise e adequação, provando que é viável elevar equipamentos legados ("sucatas tecnológicas") ao estado da arte da engenharia de segurança através de *retrofitting* criterioso. Na esfera social, a pesquisa reveste-se de caráter humanitário, uma vez que as soluções implementadas atuam diretamente na preservação da integridade física do trabalhador, combatendo a estatística de mutilações que historicamente assombra o setor metalúrgico

brasileiro. No âmbito científico, o estudo preenche uma lacuna na literatura aplicada, conectando a teoria abstrata das normas internacionais (ISO 13849-1, IEC 62061) com a realidade crua e restritiva do chão de fábrica nacional.

Diante do exposto, e considerando a dinamicidade da tecnologia industrial, vislumbram-se horizontes para trabalhos futuros. Recomenda-se o desenvolvimento de análises econômicas que quantifiquem o Retorno sobre o Investimento (ROI) da adequação de segurança, contrastando os custos de engenharia com a prevenção de passivos trabalhistas e paradas não programadas. Adicionalmente, sugere-se a investigação da integração desses sistemas de segurança com a Indústria 4.0 (IoT), explorando como os dados diagnósticos dos relés de segurança podem alimentar algoritmos de manutenção preditiva, antecipando falhas de componentes antes que elas interrompam o fluxo produtivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 12100: Segurança de máquinas - Princípios gerais de projeto - Avaliação e redução de riscos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/manuais-e-publicacoes/manual-de-aplicacao-da-nr-12.pdf>. Acesso em: 3 out. 2025.

BASSO, Émerson Feijó. Análise ergonômica do trabalho na operação de prensa mecânica excêntrica na atividade de forjamento. Canoas: Centro Universitário Ritter dos Reis, 2023. Disponível em: <https://repositorio->

api.animaeducacao.com.br/server/api/core/bitstreams/01566dfb-ccf1-4646-817d-04237c55daa0/content. Acesso em: 2 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Secretaria do Trabalho. Secretaria de Inspeção do Trabalho. Departamento de Segurança e Saúde do Trabalhador. Comissão Tripartite Paritária Permanente. Normas Regulamentadoras. NR. Brasília, 22 out. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora>. Acesso em: 1 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. Anuário estatístico de acidentes do trabalho. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/assuntos/previdencia-social/saude-e-seguranca-do-trabalhador/dados-de-acidentes-do-trabalho>. Acesso em: 1 out. 2025.

CRESWELL, John W.; CRESWELL, J. David. Projeto de Pesquisa: Métodos Qualitativo, Quantitativo e Misto. Porto Alegre: Penso, 2021. Ebook. ISBN 9786581334192. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786581334192>. Acesso em: 8 out. 2025.

FRITOLA, Renato G.; SANTANDER, Victor F. A. Documentando requisitos de sistemas legados: um estudo de caso utilizando técnicas da Engenharia de Requisitos Orientada a Objetivos. *In*: ESCOLA REGIONAL DE ENGENHARIA DE SOFTWARE (ERES), 5. , 2021, Evento Online. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2021 . p. 139-148. DOI: <https://doi.org/10.5753/eres.2021.18459>. Acesso em: 8 out. 2025.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

MAGNUS, Vinícius. Adequação de máquinas com base na NR 12: um estudo de caso em uma metalúrgica. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2021 Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/11720>. Acesso em: 3 out. 2025.

OIT, (Organização Internacional do Trabalho), International Labour Organization. Safety and health at the heart of the future of work: building on 100 years of experience. Geneva: ILO, 2019. Disponível em: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms_687610.pdf. Acesso em: 1 out. 2025.

OLIVEIRA, W. C.; SANTOS, A. C. de Q.; QUEIROZ, S. F. A. M. de; MARINHO, S. D. A. M. Implementação da Norma Regulamentadora NR-12 em uma máquina fundidora de peças de alumínio. Revista Principia, [S. l.], v. 1, n. 53, p. 95–102, 2021. DOI: 10.18265/1517-0306a2020v1n53p95-102. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/3198>. Acesso em: 8 out. 2025.

PINHEIRO, Eduardo Mendonça; ARAÚJO FILHO, Patrício Moreira de; COELHO, Glauber Túlio Fonseca (Orgs.). Engenharia 4.0: a era da produção inteligente. São Luís: Editora Pascal LTDA, 2020. 218 f.; il. (Engenharia 4.0; v. 3). ISBN 978-65-86707-03-8. DOI: 10.29327/514535. Disponível em: <https://unifsa.com.br/site/wp->

<content/uploads/2020/04/ENGENHARIA-4.0-VOL.3-1.pdf>. Acesso em: 8 out. 2025.

SANTANA, T. P. de; SOLLA, L. A. S. dos S.; CRUZ, P. H. V. N. G.; ANDRADE, G. C. de; MAZUTE, J. NR12 - Análise e aplicação da norma. REVISTA DELOS, [S. l.], v. 17, n. 61, p. e2811, 2024. DOI: 10.55905/rdelosv17.n61-149. Disponível em: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/2811>. Acesso em: 8 out. 2025.

SILVA, Jonathon Viana; VIANA, Maria Aparecida da Silva; VILAS BOAS, Alexandre Cotrim; ROCHA, Maicon Junio Oliveira; ARANTES, Fernando de Souza. O impacto da automação industrial na vida cotidiana dos trabalhadores das indústrias. Anais do ConBRepro 2023. Associação Brasileira de Engenharia de Produção (APREPRO), 2023. Disponível em: https://aprepro.org.br/conbrepro/anais/2023/arquivos/10282023_181017_653d812910cf3.pdf. Acesso em: 1 out. 2025.

SINAN, Previdência Social, Ministério Da Saúde. Notificações de acidentes de trabalho (previdência social): distribuição geográfica, 2012 a 2024. Tratamento e análise: SmartLab, 2024. Disponível em: <https://smartlabbr.org/sst>. Acesso em: 1 out. 2025.

YIN, Robert K. Estudo de caso: planejamento e métodos / Robert K. Yin - 5.ed. - Porto Alegre: Bookman, 2015. - 247p. il.

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

² Professora Orientadora do Trabalho de Conclusão de Curso da
Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica –
FUCAPI, Manaus/AM.