

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

DOUGLAS MARTINS LUZ

**PROJETO DE MELHORIA ELÉTRICA E MECÂNICA PARA BANCADA
DE TREINAMENTO HIDRÁULICA VICKERS**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

DOUGLAS MARTINS LUZ

**PROJETO DE MELHORIA ELÉTRICA E MECÂNICA PARA BANCADA
DE TREINAMENTO HIDRÁULICA VICKERS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro em Mecatrônica.

Orientador:
Prof. Eduardo Yuji Sakurada, Dr Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Luz, Douglas

Projeto de Melhoria Elétrica e Mecânica para Bancada de Treinamento Hidráulica Vickers / Douglas Luz; orientação de Eduardo Yuji Sakurada. - Florianópolis, SC, 2025.
74 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

1. Retrofit. 2. Vickers. 3. Bancada de treinamento. 4. Hidráulica. 5. CLP. I. Yuji Sakurada, Eduardo. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Projeto de Melhoria Elétrica e Mecânica para Bancada de Treinamento Hidráulica Vickers.

PROJETO DE MELHORIA ELÉTRICA E MECÂNICA PARA BANCADA DE TREINAMENTO HIDRÁULICA VICKERS

DOUGLAS MARTINS LUZ

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, _25_ de _agosto_, 2025.

Banca Examinadora:

Eduardo Yuji Sakurada, Dr Eng.

Fernando José Fernandes Gonçalves, Dr Eng.
IFSC

Jean Paulo Rodrigues, Dr Eng.
IFSC

Eduardo Antonio Linck, M. Eng.
IFSC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial à minha mãe Zenaide, pelas palavras de estabilidade e pelo suporte constante ao longo de toda a graduação. À minha companheira Joice Pereira, pela paciência incomparável e pela ajuda incondicional nos momentos mais difíceis. Aos amigos Mateus e Bruno, por não permitirem que eu me isolasse do mundo.

Sou grato ao Dr. João pelo acompanhamento e orientação que me ajudaram a lidar melhor com o TDAH.

Ao meu grupo de RPG, cuja mesa soube colorir os dias mais cinzentos com alegria e companhia.

Agradeço a todos os professores do IFSC, que foram verdadeiros guias nesta jornada acadêmica. Em especial, registro minha gratidão aos docentes Jean, Adriano, Widomar, André, Link, Cyntia, Edson e, sobretudo, ao meu orientador, o prof. Eduardo Yuji Sakurada, pela paciência de ferro, pela orientação firme e por ir além do esperado para garantir a conclusão deste trabalho.

A todos, meu sincero muito obrigado.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta o projeto de *retrofitting* da bancada hidráulica didática Vickers, em uso no Instituto Federal de Santa Catarina há mais de duas décadas. O equipamento original operava com comando elétrico em 220 V CA, ausência de botão de parada de emergência e múltiplos vazamentos, configurando risco ao ambiente acadêmico e inviabilidade de manutenção. Aplicou-se a metodologia de projeto de Pahl & Beitz para estruturar o problema, definir requisitos e comparar alternativas por meio de matriz morfológica e análise HRN (*Hazard Rating Number*). O *retrofit* proposto substitui os acionamentos de alta tensão por válvulas solenóide NG 6 alimentadas em 24Vcc BTS (Tensão Baixa-de-Segurança) e controla todo o sistema por CLP Delta AX-308E, com expansão analógica para aquisição de pressão. O modelo hidráulico foi validado virtualmente no software de simulação hidráulica Fluidsim-H, permitindo ajustar vazão e tempos de ciclo antes da implementação. O orçamento totalizou R\$12.300,00 — aproximadamente 17 % do custo de uma bancada nova — e todas as falhas críticas migraram de risco “alto/moderado” para “baixo” após as contramedidas. O trabalho fornece um guia de modernização alinhado às normas NR-10, NR-12, IEC 60204-1 e ISO 4413, garantindo segurança, confiabilidade e relevância didática.

Palavras-chave: *retrofit*; automação hidráulica; CLP; segurança de máquinas; ensino técnico.

ABSTRACT

This Final paper presents the retrofitting project of a Vickers hydraulic training bench that has been in operation at the Federal Institute of Santa Catarina for over twenty years. The original equipment operated at 220VAC direct wiring, lacked an emergency stop button and exhibited several oil leaks, resulting in safety hazards and high maintenance costs. The Pahl & Beitz design methodology was applied to structure the problem, set functional requirements and compare solutions using a morphological chart and HRN risk analysis. The proposed retrofit replaces high-voltage actuators with NG 6 solenoid valves powered by 24VDC SELV(Safety Extra-Low Voltage) and places system control under a Delta AX-308E PLC with analog expansion for pressure monitoring. We validated the hydraulic model virtually using the Fluidsim-H hydraulic simulation software, allowing flow-rate and cycle-time adjustments before physical implementation. The total budget reached BRL12.300,00 — about 17 % of a new commercial bench — and all critical hazards were reduced from “high/moderate” to “low” after mitigating actions. The project delivers a modernization guide compliant with NR-10, NR-12, IEC 60204-1 and ISO 4413, ensuring safety, reliability and pedagogical relevance.

Key-words: retrofit; hydraulic automation; PLC; machine safety; technical education.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – CLP Delta AX-308E.....	7
Figura 2 – Ambiente de Programação CODESYS.....	8
Figura 3 - Layout de Componentes Bancada Vickers.....	13
Figura 4 - Bancada Vickers.....	16
Figura 5 - Válvula Direcional número 15.....	17
Figura 6 - Conjunto de Metrologia da Bancada.....	17
Figura 7 - Conexão válvula de retenção vista frontal.....	18
Figura 8 - Conexão unidirecional vista traseira.....	19
Figura 9 - Calha protetora Relés de fim de curso.....	19
Figura 10 - Conexão Relé de fim de curso.....	20
Figura 11 - Painel eletro-eletrônico.....	20
Figura 12 - Porta acionador mecânico.....	21
Figura 14 - Válvula direcional acionada por alavanca mecânica.....	22
Figura 15 - Escala de Avaliação.....	30
Figura 16 - Sequência operacional.....	36
Figura 18 - Declaração entradas digitais.....	44
Figura 19 - Declaração saídas digitais.....	45
Figura 19 - Código Ladder linhas 1–3.....	46
Figura 21 - Código Ladder linhas 9–11.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes da bancada Vickers.....	14
Tabela 14a – HRN Inicial.....	23
Tabela 2 - Requisitos de Produto.....	24
Tabela 3 - Matriz morfológica.....	29
Tabela 4 - Tabela de Pesos.....	31
Tabela 5 - Avaliação das Alternativas Acionamento Manual.....	31
Tabela 6 - Avaliação das Alternativas Acionamento Elétrico.....	32
Tabela 7 - Avaliação de Sensores de Pressão.....	33
Tabela 8 - Avaliação das Alternativas Atuadores 24-12V.....	33
Tabela 9 - Avaliação das Alternativas Controle.....	34
Tabela 10 - Resumo das Soluções Vencedoras.....	35
Tabela 11 - I/O do Sistema.....	38
Tabela 12 - Cotação Componentes Eletrônicos.....	49
Tabela 13 - Cotação Componentes Hidráulicos.....	50
Tabela 14b – HRN Residual.....	53

LISTA DE LEGENDAS

Benchmarking	Comparação de desempenho com concorrentes
CANopen	Protocolo de comunicação em rede de campo
Driver	Módulo de potência para servomotor
Fast-on	Engate rápido
FluidSim	Software de simulação de circuitos fluídicos
IHM	Interface Humano Máquina
Ladder	Linguagem gráfica IEC 61131-3 de contatos e bobinas
Retrofitting	Modernização de equipamento existente
Wireless	Comunicação sem fio

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BSP	British Standard Pipe (rosca paralela)
CETOP	Comité Européen des Transmissions Oléohydrauliques et Pneumatiques
CLP	Controlador Lógico Programável
CODESYS	Ambiente de programação PLC (Controller Development System)
DI / DO	Digital Input / Digital Output
E-STOP	Emergency Stop (parada de emergência)
HRN	<i>Hazard Rating Number</i> (Número de Classificação de Perigo)
IEC	International Electrotechnical Commission
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
I/O	Input / Output (Entradas / Saídas)
ISO	International Organization for Standardization
LED	Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)
NBR	Norma Brasileira (publicada pela ABNT)
NG	Nenngroße (tamanho nominal, em alemão)
NR	Norma Regulamentadora (Brasil)
OPC-UA	Open Platform Communications – Unified Architecture
PE	Protective Earth (Condutor de Proteção)
PID	Proportional–Integral–Derivative (controle)
RCD	Residual-Current Device (Dispositivo Diferencial-Residual)
SAE	Society of Automotive Engineers
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SELV	Safety Extra-Low Voltage (Tensão Extra-Baixa de Segurança)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	2
1.2 Definição do Problema.....	2
1.3 Objetivo Geral.....	3
1.4 Objetivos Específicos.....	3
1.5 Estrutura do Trabalho.....	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 Bancadas Didáticas Hidráulicas.....	6
2.2 Metodologia de Projeto de Engenharia segundo PAHL e BEITZ.....	6
2.3 Controladores Lógicos Programáveis (CLP).....	7
2.4 Sinalização e Interface Operador-Máquina.....	8
2.5 FluidSim-H.....	9
2.6 Normas de Segurança.....	9
3 METODOLOGIA.....	11
3.1 Projeto Informacional.....	11
3.1.1 Estudo de Caso.....	11
3.1.2 Manual Bancada.....	12
3.1.3 Análise de Processo Atual.....	15
3.1.4 Componentes e Falhas Identificadas.....	15
3.1.5 Análise de Riscos.....	22
3.1.6 Requisitos e Restrições do Produto.....	23
3.1.6.1 Especificações de Projeto.....	24
3.1.7 Análise de Mercado e Concorrentes.....	25
3.2 Projeto Conceitual.....	26
3.2.1 Função Global.....	26
3.2.2 Subfunções e Mapeamento Funcional.....	27
3.2.3 Geração de Alternativas.....	28
3.2.4 Matriz morfológica.....	28
3.2.5 Avaliação de Soluções.....	29
3.3 Projeto Preliminar.....	35
3.3.1 Layout e Diagramas Funcionais.....	35
3.3.2 In/Out: Mapeamento de Entradas e Saídas.....	36
3.3.3 Lógica de Comando e Ladder.....	37
3.4 Projeto Detalhado.....	37
3.4.1 Dimensionamento do CLP e dos Pontos de Entrada e Saída.....	37
3.4.2 Sistema Hidráulico.....	39
3.4.3 Sistema de Alimentação Elétrica.....	39
3.4.4 Sistema de Segurança e Sinalização.....	40
3.4.5 Simulação Final (FluidSim-H e CODESYS).....	41

3.4.6 Programação Ladder no CODESYS.....	42
4 ORÇAMENTO DE COMPONENTES.....	47
4.1 Metodologia de Seleção.....	47
4.2 Levantamento de Necessidades.....	47
4.3 Critérios de Escolha.....	48
4.4 Pesquisa de Mercado e Cotações.....	49
5 IMPLANTAÇÃO.....	52
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53d

1 INTRODUÇÃO

A integração entre teoria e prática é fundamental para a formação de profissionais da área tecnológica, especialmente no campo da automação industrial. Para isso, equipamentos didáticos desempenham papel central no processo de ensino-aprendizagem, permitindo a simulação de sistemas reais de forma controlada, segura e progressiva. Entre esses equipamentos, as bancadas hidráulicas didáticas representam uma ferramenta valiosa no estudo de sistemas de potência fluida, controle de atuadores e lógica de comando.

No Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), a bancada hidráulica da marca Vickers tem sido utilizada há mais de 10 anos no curso de Tecnólogo em Mecatrônica, bem como em cursos técnicos e tecnólogos correlatos. Essa bancada permite a montagem de diversos circuitos hidráulicos, contribuindo para o entendimento prático de conceitos como válvulas direcionais, controle de vazão e atuação de cilindros e motores. No entanto, o tempo de uso e a obsolescência de seus componentes têm comprometido seu desempenho e segurança.

Atualmente, a bancada apresenta vazamentos recorrentes em algumas vedações e conexões, além de ruído excessivo emitido pela bomba hidráulica. Os acionamentos elétricos — incluindo solenoides e relés — são energizados diretamente pela rede de 220 V CA, sem circuito de comando em baixa tensão, o que representa um risco significativo em ambiente didático. Essa condição torna inviável sua utilização em determinadas atividades práticas, afetando diretamente a qualidade da formação dos alunos.

A substituição integral do equipamento por um modelo novo foi considerada, mas esbarra em limitações orçamentárias e burocráticas. Diante disso, este trabalho propõe a modernização da bancada existente por meio do processo de *retrofitting*, substituindo apenas os componentes que apresentarem riscos, falhas ou obsolescência, mantendo a estrutura física sempre que possível. A proposta inclui a atualização dos sistemas elétrico e hidráulico, a adequação às normas de segurança vigentes, e a inserção de tecnologias compatíveis com o cenário industrial atual.

Este projeto visa, assim, garantir que o equipamento continue cumprindo sua função pedagógica, agora com maior confiabilidade, segurança e alinhamento

às práticas industriais. A relevância da intervenção se dá pelo impacto direto na formação de estudantes de todas as categorias — técnicos, tecnólogos e engenheiros — que utilizam a bancada para simulações, testes e análise de sistemas automatizados baseados em fluido.

1.1 Justificativa

A relevância deste trabalho é refletida tanto no custo de aquisição de um novo modelo de bancada, quanto na segurança do presente modelo. Tendo como intuito ser utilizado pelo grupo docente e discente em aulas, demonstrações e treinamento. Para isso é essencial que a bancada tenha funcionamento ótimo e que não acarrete possíveis riscos à sua utilização. Tendo pontos a serem levantados como o ruído excessivo produzido pela bomba de palhetas, desgastada pelo uso, acionadores eletro-hidráulicos obsoletos, e conectores com vazamento do fluido hidráulico.

Atualmente a instrumentação presente na atual bancada se mostra defasada e desnecessariamente robusta, possuindo relés para ativação de válvulas eletro-hidráulicas operando a uma tensão de 220V, algo perigoso e obsoleto para o escopo e intuito da bancada.

Atualizar a bancada permite que ela seja compatível com equipamentos atuais, estes operando a uma tensão menor, alinhando-a às práticas industriais mais atuais e tornando o aprendizado mais relevante e versátil. A atualização de seu circuito elétrico também resultaria em uma redução de custos operacionais e de manutenção.

1.2 Definição do Problema

A bancada hidráulica Vickers do laboratório opera com componentes obsoletos sem certificação IEC 60204-1, norma que estabelece requisitos de segurança para equipamentos elétricos de máquinas, e com falhas de vedação que geram vazamentos. Ela não atende aos padrões atuais de segurança, precisão (pressão, vazão e repetibilidade dos ensaios) e automação. Esse descompasso prejudica seu uso didático e aumenta custos de manutenção.

O problema central deste TCC é realizar o *retrofitting* da bancada para torná-la segura, confiável e compatível com as práticas industriais e pedagógicas modernas.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é o *retrofitting* da Bancada de Testes Hidráulicos Vickers, atualizando seu controlador para um módulo CLP, facilitando e tornando mais seguro seu uso em aulas e demonstrações para o curso de Engenharia Mecatrônica.

1.4 Objetivos Específicos

- Levantar a documentação técnica da bancada (manuais, esquemas e folhas de dados).
- Mapear os acionadores, válvulas e demais componentes, descrevendo seu princípio de funcionamento.
- Avaliar o estado de cada componente e propor melhorias ou alternativas mais seguras/eficientes.
- Simular virtualmente o circuito hidráulico-elétrico e gerar arquivos didáticos.
- Analisar o painel elétrico existente, verificando ligações e conformidade com normas.
- Testar os componentes hidráulicos, registrando vazões, pressões e eventuais falhas.
- Desenvolver os diagramas eletro-hidráulicos atualizados e um plano de testes para validação.
- Estimar o custo total do *retrofit*, comparando-o ao valor de aquisição de uma bancada nova.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho segue uma sequência lógica que conduz o leitor do problema inicial até a solução proposta. Ele está organizado em seis capítulos e três apêndices, conforme descrito abaixo:

- Capítulo 1 - Introdução
 - Contextualiza o projeto de *retrofit*, apresenta a motivação, define o problema e lista os objetivos.
- Capítulo 2 - Referencial teórico e metodologia
 - Revisa fundamentos de hidráulica didática, normas de segurança e a metodologia de projeto (Pahl & Beitz). Descreve o método adotado.
- Capítulo 3 - Diagnóstico da bancada
 - Detalha a inspeção, identifica falhas, consolida requisitos e seleciona a solução conceitual.
- Capítulo 4 - Especificação e aquisição de componentes
 - Apresenta critérios de escolha, cotações e o orçamento consolidado do *retrofit*.
- Capítulo 5 - Implantação e validação
 - Descreve a montagem, relata ensaios de simulação e testes práticos, comparando o desempenho antes e depois da modernização.
- Capítulo 6 - Conclusões
 - Resume os resultados, verifica o cumprimento dos objetivos e sugere trabalhos futuros.
- Apêndice A - Matriz morfológica
 - Lista completa de alternativas avaliadas para cada subfunção.
- Apêndice B - Check-list de conformidade normativa
 - Tabelas de verificação frente às normas NR-10, NR-12, IEC 60204-1 e ISO 4413.
- Apêndice C - Trechos normativos
 - Recortes dos artigos citados no texto, com numeração original, para consulta rápida.

Essa estrutura progressiva permite que o leitor acompanhe cada etapa do desenvolvimento do projeto e saiba exatamente onde encontrar detalhes técnicos ou trechos normativos sem perder o fluxo da leitura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo reúne os principais conceitos e normas que sustentam o projeto de *retrofit* da bancada hidráulica Vickers. Inicia-se com uma visão sobre o papel das bancadas didáticas no ensino de sistemas de potência fluida, segue pela metodologia de projeto de Pahl & Beitz e pelos fundamentos dos CLPs e IHM, e conclui com a simulação em FluidSim-H e as normas de segurança elétrica e hidráulica aplicáveis ao trabalho.

2.1 Bancadas Didáticas Hidráulicas

A integração entre teoria e prática é fundamental para a formação de profissionais da área tecnológica, especialmente no campo da automação industrial. Para isso, equipamentos didáticos desempenham papel central no processo de ensino-aprendizagem, permitindo a simulação de sistemas reais de forma controlada, segura e progressiva. Entre esses equipamentos, bancadas hidráulicas didáticas representam uma ferramenta valiosa no estudo de sistemas de potência fluida, controle de atuadores e lógica de comando.

2.2 Metodologia de Projeto de Engenharia segundo PAHL e BEITZ

Gerhard Pahl e Wolfgang Beitz, em sua obra Projeto na Engenharia (2009), estruturaram um modelo sistemático para o desenvolvimento de produtos técnicos. Segundo os autores, o processo de projeto deve ser conduzido por etapas bem definidas: compreensão do problema, definição de funções, geração de soluções e detalhamento da solução escolhida. Essa metodologia ajuda a tomada de decisões técnicas por meio de lógica clara, reduzindo incertezas e promovendo transparência durante a concepção.

Neste trabalho, aplicamos essa abordagem ao *retrofit* da bancada hidráulica. As cinco funções técnicas tratadas, acionamento manual, acionamento elétrico, medição e monitoramento, acionamento de atuadores em baixa tensão e controle, estão descritas na Seção 3.2.2 (p. 38). Cada uma gerou alternativas que compõem a Matriz Morfológica (Tabela 3, p. 42; ver Apêndice A). A seguir, as

combinações possíveis foram comparadas por meio da Matriz de Decisão de Pugh apresentada nas Tabelas 5 a 9, consolidadas na Tabela 10 (ver também Anexo A). Dessa forma, as três fases de Pahl & Beitz (definir, gerar, avaliar) ficam definidas no projeto.

2.3 Controladores Lógicos Programáveis (CLP)

Os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) representam o núcleo da automação industrial. Projetados para substituir relés eletromecânicos, eles monitoram sinais de entrada, processam lógicas de controle e comandam dispositivos de saída em tempo real. Operam com tensões de controle reduzidas (geralmente entre 12V e 24V), o que aumenta a segurança nas interfaces de operação e manutenção. Para a automação da bancada utilizou-se o CLP Delta AX-308E, programado no ambiente WPLSoft. A Figura 1 apresenta o equipamento e sua interface de programação.

Esses controladores são programados por meio de ambientes de desenvolvimento integrados, como o CODESYS, que atende à norma IEC 61131-3 e oferece suporte a diversas linguagens de programação, incluindo *Ladder*, Texto Estruturado e Diagrama de Blocos Funcionais. Essa flexibilidade torna o processo de programação mais acessível, tanto para ambientes acadêmicos quanto para aplicações industriais.

Figura 1 – CLP Delta AX-308E



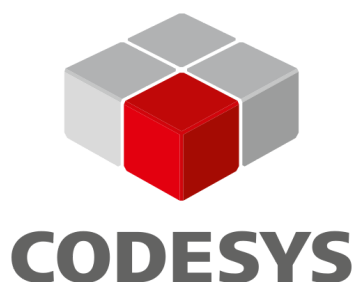
Fonte: <https://www.delta-emea.com/en-gb/products/CODESYS-Motion-Solution/10115>

(2025)

Para programar o CLP, será utilizada a linguagem *Ladder*, por sua estrutura gráfica semelhante a esquemas elétricos. Ela representa comandos lógicos com contatos, bobinas e temporizadores, facilitando a leitura e compreensão por estudantes e técnicos. Essa linguagem é amplamente usada no ensino técnico e alinha com os objetivos pedagógicos da bancada. Por meio de *Ladder*, implementamos as funções de controle dos relés, sinaleiros e válvulas hidráulicas, assegurando que o sistema opere com segurança e previsibilidade.

Como ferramenta para programação *Ladder* o CODESYS (Figura 2) é aquele que permite a simulação do sistema de controle antes da implementação física, o que contribui para a validação lógica, economia de recursos e aumento da confiabilidade do projeto. Além disso, a compatibilidade com protocolos de supervisão, como SCADA, e com ferramentas de registro contínuo de dados (*datalogger*) consolida o CLP como uma solução central para controle e monitoramento em sistemas automatizados.

Figura 2 – Ambiente de Programação CODESYS



Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Codesys_Logo.svg (2025)

2.4 Sinalização e Interface Operador-Máquina

Para sinalizar estado de máquina e atuadores serão utilizados botões e sinaleiros para que o operador interaja com segurança, em conformidade com a NR-12 (sinalização de estados e comandos). A luz piloto verde indica bomba ligada, a vermelha mostra parada. Essa interface visual ajuda no ensino e evita possíveis erros. Simples, direta e segura, ela reforça o aprendizado prático.

2.5 FluidSim-H

O FluidSim-H oferece simulação gráfica de circuitos hidráulicos e pneumáticos. Ele possibilita a modelagem de válvulas, bombas e atuadores, com cálculo de vazão e pressão em tempo real. O uso do FluidSim-H reduz custos de prototipagem e avança a curva de aprendizado dos alunos ao permitir ajustes de parâmetros antes da montagem.

2.6 Normas de Segurança

Este projeto observa NR-10, NR-12, NR-15, ABNT NBR IEC 60204-1, ABNT NBR 5410, ABNT NBR ISO 13850, ABNT NBR ISO 4413 e IEC 60445. Os circuitos de comando operam em 24 Vcc SELV/PELV, com parada de emergência, aterramento/PE, separação força/controle e proteção hidráulica por válvula de alívio. A avaliação de riscos segue os princípios da ISO 12100, quantificada por HRN ($S \times F \times P \times W$). Recortes literais das normas constam no Apêndice C.

- NR-10 — Instalações e serviços em eletricidade

Manter esquemas unifilares atualizados, identificação de circuitos, medidas de proteção coletiva desde o projeto, com aterramento/PE e seccionamento adequado. Adotar tensão de segurança quando a desenergização não for possível.

- NR-12 — Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos

Interfaces de comando em extrabaixa tensão quando indicado pela apreciação de risco. As máquinas devem possuir parada de emergência com atuação prioritária, retenção mecânica e rearme manual somente após corrigida a causa, posicionada em local acessível.

- NR-15 — Ruído

Para ambiente didático, observar ≤ 85 dB(A) para 8 h (ruído contínuo/intermitente). As medições e a avaliação da exposição seguem o procedimento técnico NHO-01 (Fundacentro).

- ABNT NBR IEC 60204-1 — Equipamentos elétricos de máquinas

Requisitos de projeto, proteção, documentação e ensaios do sistema elétrico de máquinas. 24 Vcc é o nível típico para circuitos de comando

(SELV/PELV). Exige verificação funcional da parada de emergência e ensaios de isolamento.

- ABNT NBR 5410 — Instalações elétricas de baixa tensão

Proteção adicional por $DR \leq 30$ mA onde aplicável; regras para SELV/PELV (limites e separação); identificação de condutores (PE verde-amarelo, neutro azul-claro) e segregação de circuitos de força, controle e sinal.

- ABNT NBR ISO 13850 — Parada de emergência

Princípios para a função de parada de emergência: atuação prioritária, botão tipo cogumelo (vermelho em fundo amarelo), retenção e rearme manual após eliminação do perigo.

- ABNT NBR ISO 4413 — Sistemas hidráulicos

Limitação de pressão por válvulas adequadas; seleção/instalação de mangueiras e conexões (fator de segurança mínimo, proteção contra abrasão/projeção); roteamento e manutenção de componentes hidráulicos.

- IEC 60445 — Identificação de condutores e bornes

Princípios para cores e marcações de condutores/terminais aplicados aos diagramas e ao painel (complementa NBR 5410 e NBR IEC 60204-1).

Conformidade e verificação. A conformidade será verificada pelo Checklist de Conformidade Normativa (Apêndice B), pelos ensaios elétricos (isolamento, continuidade PE, funcional do E-STOP) e pelos recortes literários no Apêndice C.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a abordagem adotada para o retrofit da bancada, com base no método de projeto sistemático de Pahl & Beitz (PAHL; BEITZ, 2009). Aplica-se aqui uma adaptação que preserva as quatro fases clássicas:

1. Projeto Informacional (seção 3.1): levantamento de dados, requisitos e diagnóstico inicial;
2. Projeto Conceitual (seção 3.2): geração de alternativas, comparação técnica e seleção da solução ideal;
3. Projeto Preliminar (seção 3.3): elaboração de *layouts*, avaliação econômica e refinamento das configurações selecionadas;
4. Projeto Detalhado (seção 3.4): desenvolvimento dos diagramas finais, dimensionamentos e plano de testes.

Essa estrutura foi adotada com foco na aplicabilidade prática e adequação ao escopo deste trabalho, mantendo os princípios fundamentais do método original.

3.1 Projeto Informacional

No estágio de projeto informacional, o foco é levantar e organizar todas as informações que definem o problema: necessidades dos usuários, limitações de uso, requisitos normativos, custos-alvo e condições de operação. É aqui que se elabora a lista de requisitos (Requisitos de Produto, Tabela 2) e se delimita o escopo que guiará as fases seguintes (PAHL; BEITZ, 2009).

3.1.1 Estudo de Caso

A bancada em seu presente momento se mostra defasada elétrica e eletronicamente. Nela estão presentes também inúmeros vazamentos em suas conexões. Para definir suas melhorias é necessário antes entender os pontos de falha e desgaste.

A válvula direcional representada apresentou faiscamento em seu acionamento, vazamento nas conexões das portas P (pressão) e T (retorno/escape)

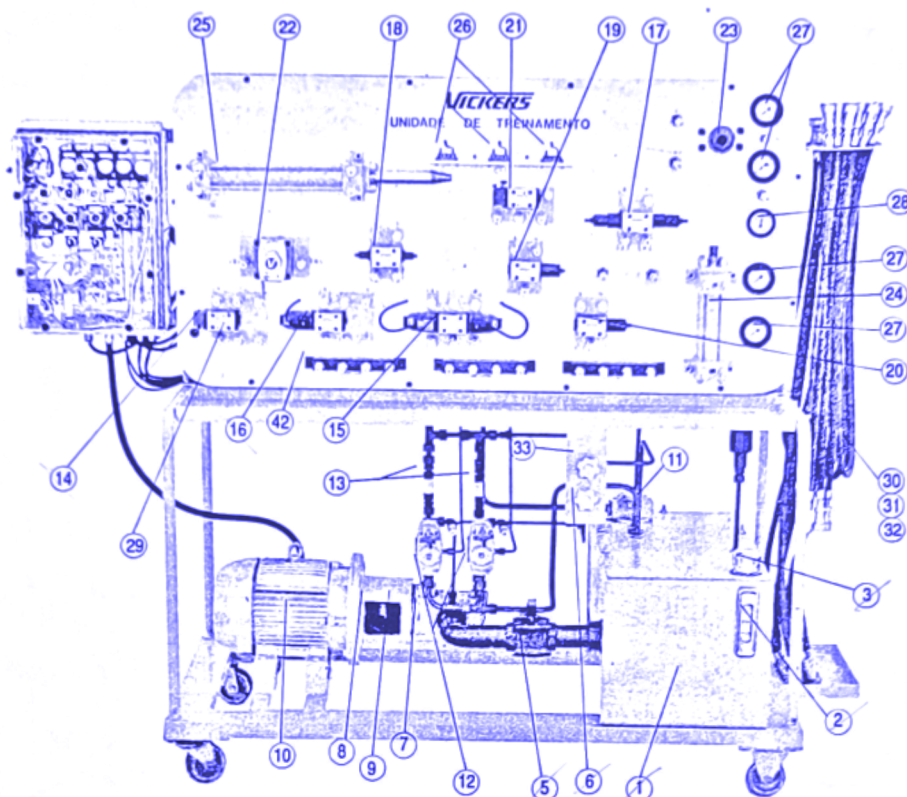
e oxidação dos parafusos de fixação. Os instrumentos de medição — quatro manômetros e um vacuômetro — encontram-se em estado avançado de desgaste. Dos quatro manômetros, apenas um responde à aplicação de pressão, mas não é possível verificar sua exatidão. Dois não reagem, e o último está com a agulha travada. O vacuômetro apresenta vazamento de glicerina.

Uma das válvulas de retenção apresenta vazamento no fluxo permitido e, eventualmente, permite passagem no sentido que deveria estar bloqueado. Um sensor de fim de curso, que opera a 220V, encontra-se exposto, protegido apenas por canaleta, e está sem fixação adequada. Todos os demais relés de acionamento apresentam ruído elétrico ao serem ativados, e todas as válvulas e atuadores apresentam vazamentos de grau médio ou pequeno.

3.1.2 Manual Bancada

O manual da bancada Vickers fornece detalhes técnicos fundamentais, como o *layout* dos componentes e as especificações operacionais. A configuração da bancada inclui válvulas direcionais, filtros, atuadores hidráulicos, sensores e o sistema de controle elétrico original, que opera a 220V. O conhecimento desses elementos é essencial para identificar pontos críticos que necessitam de melhorias, como vazamentos, conectores desgastados e relés obsoletos.

Figura 3 - Layout de Componentes Bancada Vickers



Fonte: Manual Bancada Vickers

A Figura 3 foi retirada do Manual para treinamento da Bancada Vickers, sua cor foi editada para melhor visualização dos itens indicados. O único diferencial da Figura 3 para com a bancada presente no laboratório de acionamentos é a presença de uma Válvula de retenção presente na bancada de treinamento, visto na Figura 7. Demais componentes que compõem a bancada podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 - Componentes da bancada Vickers

Número	Componente	Número	Componente	Número	Componente
1	Reservatório	15	Válvula Direcional	29	Engate Rápido Macho
2	Visor de Nível	16	Válvula Direcional	30	Mangueira
3	Filtro do Ar	17	Válvula de Alívio	31	Mangueira
4	Filtro de Sucção	18	Válvula Controladora de Vazão	32	Mangueira
5	Válvula Esférica	19	Válvula Redutora de Pressão	33	Válvula de Agulha
6	Válvula de Agulha	20	Válvula Controladora Pressão	34	Tampa de Interligação
7	Bomba	21	Válvula Direcional	35	Sub-Placas para FCG
8	Acoplamento	22	Válvula Controladora de Vazão	36	Sub-Placas para DG20V-3
9	Flange de Ligação	23	Motor Hidráulico	37	Sub-Placas (2 Engates)
10	Motor Elétrico	24	Atuador Hidráulico	38	Sub-Placas (3 Engates)
11	Filtro de Retorno	25	Atuador Hidráulico	39	Sub-Placas (4 Engates)
12	Válvula de Segurança	26	Interruptor Fim de Curso	40	Sub-Placas para Engates
13	Válvula de Retenção	27	Manômetro	41	Sub-Placas (5 Engates)
14	Válvula Direcional	28	Manovacuômetro	42	Sub-Placa (P/Engates)

Fonte: Do Autor (2025)

3.1.3 Análise de Processo Atual

Para identificar momentos de falha crítica da bancada hidráulica, foi feita uma análise sequencial de seu funcionamento. O processo inicia com o operador ligando o sistema. Em seguida, a bomba hidráulica é ativada, gerando pressão para os atuadores. Um botão de avanço aciona a válvula conectada, permitindo o deslocamento do cilindro. É feita uma observação visual de seu movimento e velocidade, sensores de fim de curso confirmam as distâncias.

Dependendo da configuração, o operador pode acionar o botão de retorno ou aguardar o último sensor ser ativado. A válvula inverte o fluxo, e o cilindro retorna à posição inicial. Um segundo sensor confirma o retorno. Essa análise contribuiu para o diagnóstico de falhas e compreensão da lógica operacional.

O manual da Bancada Vickers também possui exercícios sugeridos, realizando um grupo de testes destes exercícios foi possível verificar falhas em inúmeras situações possíveis.

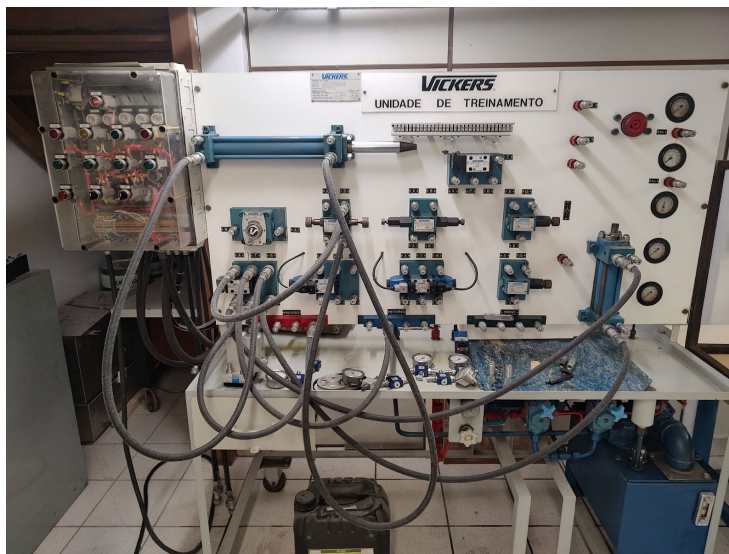
3.1.4 Componentes e Falhas Identificadas

A bancada apresenta um conjunto amplo de componentes que, em conjunto, garantem o seu funcionamento e servem como base para o *retrofit*. Dentre eles destacam-se as conexões hidráulicas e os dispositivos de controle do fluxo. A bancada conta com 16 mangueiras hidráulicas, das quais quatro apresentam vazamentos graves e seis vazamentos leves.

A análise permite identificar válvulas direcionais responsáveis por regular o fluxo do fluido. Por exemplo, a válvula número 15 apresenta sinais de desgaste – faiscamento no relé de acionamento – e cumpre um papel crítico no controle do fluido. O sistema atual utiliza acionadores elétricos a 220V, o que representa risco. A proposta de *retrofit* inclui substituí-los por sistemas de baixa tensão (12V a 24V), controlados por CLP, promovendo maior segurança e eficiência.

A Bancada em seu presente momento se mostra, como citado anteriormente, defasada elétrica e eletronicamente. Nela estão presentes também inúmeros vazamentos em suas conexões que serão apontados a seguir.

Figura 4 - Bancada Vickers



Fonte: Do Autor (2025)

A Bancada apresentada, Figura 4, é composta por inúmeros componentes suscetíveis a falha e desgaste, destes os que possuem indicadores mais graves são: Manômetros que, dos quatro presentes, três se encontram inoperantes; Manovacuômetro inoperante; relé responsável por avanço da válvula número 15 apresenta faiscamento; conexão para testes de válvulas de sentido único AB apresenta fluxo lento independente da pressão no sentido A B, e ocasional fluxo no sentido B A, este deveria se encontrar completamente interrompido. Também é possível observar contatos elétricos presentes em sensores de fim de curso expostos ao operador, estes sujeitos a uma tensão de 220V.

Todos demais relés de acionamento apresentam ruído elétrico ao serem acionados, e todas válvulas e atuadores apresentam vazamentos de grau médio ou pequeno. Abaixo se encontram as imagens de registro da avaliação da bancada.

Figura 5 - Válvula Direcional número 15



Fonte: Do Autor (2025)

A válvula direcional representada na Figura 5 apresentou faiscamento e falha ocasional em seu acionamento elétrico, vazamento na porta de pressão e oxidação dos parafusos de fixação.

Figura 6 - Conjunto de Metrologia da Bancada



Fonte: Do Autor (2025)

Os instrumentos de medição mostrados na Figura 6 — quatro manômetros e um vacuômetro — apresentam-se em estado avançado de desgaste. Dos quatro manômetros, apenas um responde à aplicação de pressão, porém não é possível verificar sua exatidão. Dois dos demais não reagem a qualquer estímulo, enquanto o último possui a agulha travada atrás do pino que indica o valor mínimo da escala, impossibilitando sua leitura.

O Vacuômetro apresenta vazamento da glicerina utilizada para lubrificação e amortecimento de impacto da Agulha indicadora.

Figura 7 - Conexão válvula de retenção vista frontal



Fonte: Do Autor (2025)

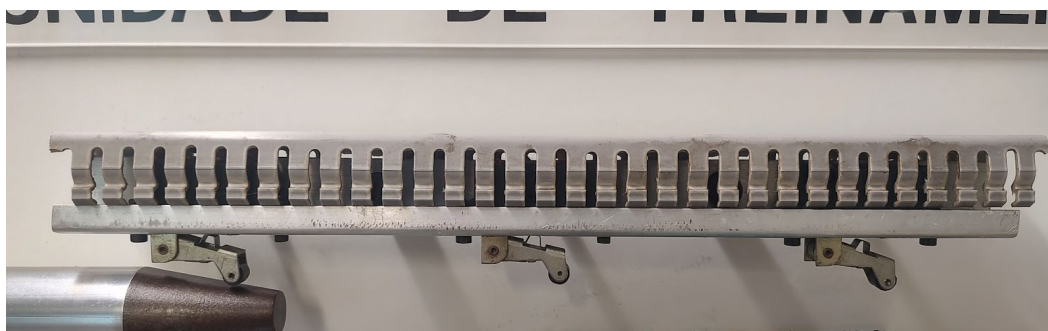
Figura 8 - Conexão unidirecional vista traseira



Fonte: Do Autor (2025)

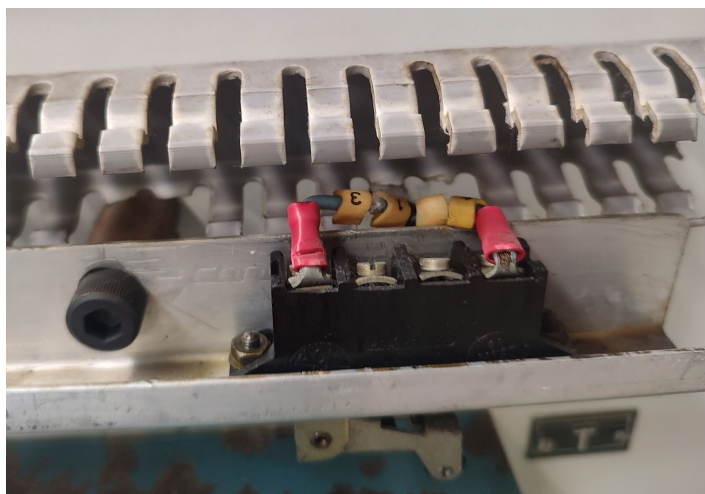
As Figuras 7 e 8 representam a válvula de retenção que apresenta vazamento na porta de pressão e, eventualmente, permite passagem no sentido de bloqueio.

Figura 9 - Calha protetora Relés de fim de curso



Fonte: Do Autor (2025)

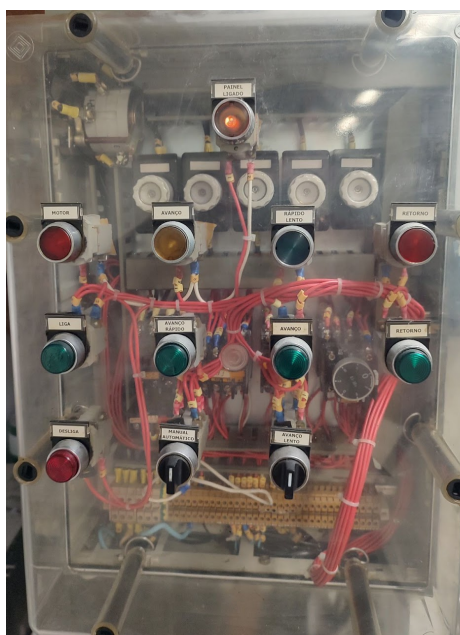
Figura 10 - Conexão Relé de fim de curso



Fonte: Do Autor (2025)

As Figuras 9 e 10 apresentam a situação atual dos sensores de fim de curso, estes operando a 220V, se encontram expostos, protegido apenas por uma canaleta para cabos, está sem fixação adequada.

Figura 11 - Painel eletro-eletrônico



Fonte: Do Autor (2025)

Na Figura 11 é possível observar o painel eletro-eletrônico, este apresenta comando em 220VCA direta nos botões; ausência de transformador SELV, contrariando IEC 60204-1 § 9.4 e NR-10 (risco de choque). Botão de emergência inexistente; a interface conta apenas com botões pulsadores Ø22mm — não atende NR-12 § 12.38. Fiação fixa por presilhas de nylon, sem canaletas, todas na mesma cor (vermelho); dificulta a manutenção e favorece falhas de conexão.. Cabo *fast-on* usado em bornes; tendência a afrouxar com vibração da bomba.

Figura 12 - Porta acionador mecânico



Fonte: Do Autor (2025)

Figura 13 - Acionador mecânico



Fonte: Do Autor (2025)

Oxidação indica ausência de lubrificação e exposição a névoa de óleo + umidade. O atrito aumenta a força de acionamento e pode travar em posição intermediária. Desgaste do corpo sugere idade avançada e possível infiltração de contaminantes internos. Porta de pressão apresenta vazamento quando em uso, como visto nas Figuras 12 e 13.

Figura 14 - Válvula direcional acionada por alavanca mecânica



Fonte: Do Autor (2025)

Válvula direcional Vickers 3/2 manual, Figura 14, apresenta pintura descascada e corpo oxidado; alavanca com folga e pinos gastos, risco de travamento. Parafusos corroídos indicam possível vazamento nos anéis de vedação em borracha.

3.1.5 Análise de Riscos

O método HRN foi aplicado, em que $HRN = S \times F \times P \times W$.

S = severidade do dano; F = frequência de exposição; P = probabilidade de ocorrer; W = possibilidade de evitar/limitar o dano.

Cada fator vai de 1 (baixo) a 5 (alto); HRN maior indica prioridade de mitigação.

A Tabela 14a apresenta os valores iniciais e a Tabela 14b os valores residuais após as medidas.

Tabela 14a – HRN Inicial

Perigo (Modo de Falha)	S	F	P	W	HRN Inicial
Exposição a tensão de 220 V em bornes não isolados	5	3	3	3	135
Corrente de fuga à carcaça devido a falha de aterramento	4	2	2	3	48
Aprisionamento em partes rotativas da bomba hidráulica	3	2	2	4	48
Dermatite por contato e absorção cutânea de fluido hidráulico	2	3	3	3	54

3.1.6 Requisitos e Restrições do Produto

Com base na análise de mercado e em *benchmarking* junto a soluções concorrentes, o *retrofit* da bancada deverá atender aos seguintes requisitos:

- Custo máximo: entre R\$73.000,00 e R\$98.000,00 (30% a 40% do preço de bancada nova);
- Tempo de resposta: 1 ms a 10 ms;
- Tensão de comando: 12 V cc a 24 V cc, com tensão máxima de acionamento de 24Vcc;
- Manutenção: modularidade que permita troca de componentes de forma fácil.
- Robustez: resistência a impactos e a uso indevido;
- Nível de ruído: operação entre 70 dB e 85 dB;
- Conformidade: atendimento às normas técnicas aplicáveis (NR-10, NR-12, IEC 60204-1, ABNT NBR 5410 e ISO 4413).
- Como restrição de projeto, a tensão de alimentação do sistema de controle ficará limitada a 12Vcc–24Vcc.

A Tabela 2 apresenta de forma clara e dinâmica este requisitos com seus respectivos valores alvo e sua justificativa.

Tabela 2 - Requisitos de Produto

Requisitos	Valor alvo	Justificativa
Baixo Custo	R\$ 73 000 – R\$ 98 000	Mantém o <i>retrofit</i> economicamente vantajoso para compra simplificada
Resposta rápida/imediata	1 ms – 10 ms	Atende a exercícios de dinâmica rápida em hidráulica
Segurança Elétrica	$\leq 24 \text{ V}$	Reduz risco de choque em ambiente didático
Manutenção	Conjunto modular.	Facilitar manutenção
Resistente	Suporta impactos e mau uso típicos de laboratório	Aumenta vida útil e reduz custos de reposição
Silencioso	70 dB – 85 dB (conforme NR-15)	O maquinário deverá manter conforto acústico
Segurança	Cumprir normas IEC 60204-1 e NR 12	Alinha-se aos requisitos legais de máquinas didáticas

Fonte: Do Autor (2025)

3.1.6.1 Especificações de Projeto

As especificações de projeto derivam diretamente dos requisitos funcionais e das restrições estabelecidas. Com base na pesquisa de mercado, na análise das condições atuais da bancada e na avaliação das alternativas disponíveis, definem-se as seguintes especificações para o *retrofitting*:

- **Custo e Viabilidade Econômica:** O investimento não deve ultrapassar um valor estipulado, em consonância com as limitações orçamentárias da instituição.

- Resposta e Tempo de Operação: O sistema de controle, por meio do novo CLP, deve responder de forma imediata aos comandos do operador, com tempo inferior a 10 ms.
- Tensão de Operação: Todos os componentes eletrônicos e atuadores deverão operar entre 12V e 24V, minimizando os riscos elétricos.
- Facilidade de Manutenção: O *layout* do sistema deve permitir acesso rápido aos componentes críticos.
- Resistência e Durabilidade: Os materiais e componentes devem apresentar alta resistência a impactos e ao uso contínuo.
- Nível de Ruído: O funcionamento da bancada deve emitir ruído controlado entre 70 e 85 dB, como estabelecido pela NR 15.
- Segurança Operacional: conformidade com normas vigentes, incluindo desligamento de emergência e monitoramento de falhas.
- Integração e Monitoramento: A integração do CLP com SCADA e *datalogger* é obrigatória.
- Qualidade e Conformidade: Às especificações devem ser validadas por testes e simulações com apoio do FluidSim e aplicabilidade do QFD (Desdobramento da Função Qualidade).

3.1.7 Análise de Mercado e Concorrentes

Empresas como Festo, Vickers e Parker Hannifin se destacam na oferta de soluções em bancadas didáticas hidráulicas. Contudo, devido à complexidade técnica e aos recursos sofisticados, os preços das bancadas modernas podem oscilar entre dezenas e centenas de milhares de reais.

Assim, para projetos de pesquisa e ensino, é crucial analisar opções que sejam economicamente viáveis, levando também em conta tempo e burocracia envolvida em licitações. Dessa forma, o *retrofit* ou revitalização de bancadas antigas surge como alternativa para reduzir despesas e ajustar os recursos às demandas locais.

Essa escolha precisa ser fundamentada em uma avaliação cuidadosa do custo-benefício, compatibilidade tecnológica e concordância com as metas

educacionais. Para instituições com recursos mais restritos, a recuperação de equipamentos se mostra sustentável e estratégica.

Concorrentes:

Festo Didactic

- Vantagens: ampla experiência no setor de ensino e treinamento, componentes de alta qualidade e soluções confiáveis.
- Desvantagens: alto custo dos serviços e exigência de peças originais, o que pode limitar a flexibilidade de customização.

Parker Hannifin

- Vantagens: soluções personalizadas, experiência com componentes robustos e integração de sensores modernos.
- Desvantagens: prazos de entrega elevados para componentes importados ou soluções customizadas; alto custo relativo.

Esse panorama evidencia que, embora existam empresas consolidadas no mercado de revitalização de bancadas, os altos custos e prazos podem ser obstáculos para instituições públicas com orçamento limitado. O *retrofit* local e bem planejado torna-se uma alternativa tecnicamente válida, econômica e alinhada aos objetivos educacionais.

3.2 Projeto Conceitual

Nesta fase, são gerados e avaliados diferentes conceitos capazes de atender aos requisitos definidos. A partir da matriz morfológica e aplicando uma análise comparativa ponderada para selecionar o conceito mais promissor.

3.2.1 Função Global

A função global do produto representa o propósito central que a bancada deve cumprir após a modernização. Ela orienta todas as decisões de projeto e serve como referência para a síntese das alternativas propostas.

"Oferecer uma plataforma didática e segura para testes, simulações e experimentos práticos de sistemas hidráulicos e eletro-hidráulicos, integrando tecnologias modernas de controle e monitoramento para otimizar o aprendizado e a operação."

Essa definição orienta o projeto para que:

- Aprimoramento do Aprendizado: permita a visualização e experimentação dos conceitos teóricos e práticos dos sistemas hidráulicos, contribuindo para a formação dos alunos;
- Segurança Operacional: garanta a substituição de componentes obsoletos e de alta tensão por soluções de baixa tensão (12–24V);
- Eficiência e Confiabilidade: incorpore um CLP integrado a sistemas de monitoramento (SCADA e *data logger*), possibilitando diagnósticos automáticos e resposta rápida às demandas operacionais;
- Validação Prévia por Simulação: permite a utilização de ferramentas como o FluidSim-H para modelagem virtual do sistema, viabilizando a identificação e correção de falhas antes da implementação prática.

3.2.2 Subfunções e Mapeamento Funcional

A síntese funcional consiste na decomposição da função global da bancada em subfunções essenciais, evidenciando como cada elemento contribui para o desempenho integrado do sistema. A função global é realizada através da articulação dos seguintes blocos funcionais:

- Acionamento Manual: operação direta dos componentes, possibilitando aos usuários o controle intuitivo de válvulas e atuadores;
- Acionamento Elétrico: sistemas automatizados via CLP que substituem os acionadores obsoletos de alta tensão;
- Medição e Monitoramento: integração de instrumentos como manômetros, sensores e *data logger* para avaliação dos parâmetros operacionais;
- Simulação e Validação: uso de softwares como FluidSim-H para prever o comportamento do sistema antes da implementação física;

- **Acionamento de Atuadores em Baixa Tensão:** operação com tensões entre 12V e 24V, alinhada às normas de segurança industrial.

Essas subfunções garantem que todos os módulos trabalhem em sinergia para garantir o funcionamento da função global da bancada.

3.2.3 Geração de Alternativas

Nesta fase, foram propostas diferentes abordagens para cada subfunção, considerando alternativas tecnológicas, funcionais e econômicas. As decisões envolveram desde a escolha entre acionamento manual e elétrico até estratégias para modernização da interface de controle, medição e atuação.

As opções foram agrupadas conforme as subfunções:

- **Acionamento manual:** alavanca com mola retrátil, manivela, pedal de ativação, interruptor tátil;
- **Acionamento elétrico:** botoeira, microcontrolador, CLP, *wireless*;
- **Metrologia:**
 - Pressão: transdutor 0- 250 bar ou manômetro glicerinado;
- **Atuadores:** motoredutores, servomotores, conjunto válvula + acionamento integrado;
- **Controle:** microcontrolador, controlador com feedback PID, computador, CLP.

3.2.4 Matriz morfológica

A matriz morfológica, apresentada na Tabela 3, é uma ferramenta que organiza as possíveis soluções para cada subfunção em formato de tabela, permitindo a visualização clara das opções de projeto. Ela auxilia na tomada de decisão estruturada.

Tabela 3 - Matriz morfológica

Função principal: apresentar dados relevantes para a condução do veículo ao usuário				
Subfunções	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
Acionamento manual	Alavanca com Mola de retorno	Manivela	Pedal de Ativação	Interruptor Tátil
Acionamento elétrico	Contator/relé 24 V	Solenóide 24 V	<i>Driver</i> de servomotor 24 V	Válvula proporcional 24V
Medição de Pressão	Transdutor de pressão 0-10 V	Transmissor pressão 4–20 mA	Sensor pressão digital I ² C/SPI	Manômetro eletrônico <i>CANopen</i>
Atuadores 24-12V	Motoredutor DC	Servomotores	Conjunto Válvula + acionamento integrado	Cilindro pneumático 24V
Controle	Microcontrolador (Arduino/ES P32)	CLP Delta AX-308E	PC industrial + SCADA (CODESYS)	CLP + <i>Datalogger</i> integrado

Fonte: Do Autor (2025)

3.2.5 Avaliação de Soluções

Para uma análise detalhada, foram definidos os seguintes critérios:

- **Preço:** Avalia o custo total da solução, considerando tanto a aquisição quanto a manutenção dos componentes. Uma solução mais econômica receberá uma pontuação maior.

- **Precisão:** Grau de exatidão com que a solução atende às especificações técnicas (pressão). Será avaliada comparando-se o erro máximo permitido com o erro real medido em teste ou informado pelo fabricante.
- **Estética:** Considera o design, a integração visual e a ergonomia do componente, aspectos importantes para a aceitação e usabilidade do produto final.
- **Facilidade de Instalação:** Verifica a simplicidade e a rapidez com que a solução pode ser implementada, levando em conta o tempo e a complexidade do processo de instalação.
- **Resistência:** Avalia a durabilidade e a robustez dos materiais e componentes, garantindo que a solução suporta condições adversas e uso contínuo.
- **Segurança:** Analisa se a solução atende às normas de segurança, minimizando riscos operacionais e protegendo os usuários e o equipamento.

Usando critérios próprios e pensando nos requisitos acima, foi feita uma avaliação de cada solução. A avaliação de cada item é baseada em experiências próprias e pesquisa de itens similares, sendo atribuído um valor entre 1 a 10, sendo 1 equivalente a péssimo, e 10 ótimo, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Escala de Avaliação



Fonte: Do Autor (2025)

Realizando a somatória dos valores de cada requisito para determinada solução, é possível definir qual destas é a mais adequada para atender sua função. Como certas funções devem ser priorizadas, foi atribuído um valor de peso para cada item, onde itens mais críticos possuem um peso maior. Os valores atribuídos a cada critério estão discriminados na Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela de Pesos

Critério	Peso
Preço	3
Precisão	2
Fácil instalação	2
Resistência	1
Segurança	3

Fonte: Do Autor (2025)

Com os pesos estabelecidos (Tabela 4), cada alternativa foi pontuada segundo pesquisa técnica e a experiência do avaliador. Em seguida, as notas atribuídas a cada critério foram multiplicadas pelos respectivos pesos e somadas, resultando no valor total ponderado apresentado na Tabela 7.

Tabela 5 - Avaliação das Alternativas Acionamento Manual

Avaliação da Subfunção: Acionamento manual						
Alternativas	Preço	Precisão	Fácil instalação	Resistência	Segurança	Total
Alavanca com Mola	8	6	7	8	7	79
Manivela	7	8	7	8	8	82
Pedal de Ativação	7	7	7	8	8	81
Interruptor Tátil	9	7	9	6	9	86

Fonte: Do Autor (2025)

O Interruptor Tátil recebeu a maior nota global (86 pt), como visto na Tabela 5. Ela combina o menor custo do grupo, instalação plug-and-play e a maior pontuação em segurança, atendendo de forma simples e robusta aos exercícios de bancada.

Tabela 6 - Avaliação das Alternativas Acionamento Elétrico

Avaliação da Subfunção: Acionamento Elétrico						
Alternativas	Preço	Precisão	Fácil instalação	Resistência	Segurança	Total
Contator/relé 24 V	9	6	9	7	7	82
Solenóide 24 V	7	6	8	7	8	77
<i>Driver</i> servomotor 24 V	5	8	6	6	8	71
Válvula proporcional 24V	4	9	7	7	8	73

Fonte: Do Autor (2025)

A pontuação ponderada indica que o contator/relé 24 V é a melhor opção (82 pt), como visto na Tabela 6. Ele alia baixo custo e instalação rápida, sem comprometer a segurança nem a resistência. As demais alternativas perderam pontos principalmente pelo preço (solenóide e válvula proporcional) ou pela dificuldade de integração (*driver* de servomotor). Dessa forma, o projeto adotará o contator/relé como solução de acionamento elétrico.

Tabela 7 - Avaliação de Sensores de Pressão

Avaliação da Subfunção: Sensores de Pressão						
Alternativas	Preço	Precisão	Fácil instalação	Resistência	Segurança	Total
Transdutor pressão 0–10 V	8	7	8	7	9	88
Transmissor pressão 4–20 mA	6	9	7	8	9	85
Sensor pressão digital I ² C/SPI	7	8	9	7	8	86
Manômetro eletrônico CANopen	5	8	7	9	9	81

Fonte: Do Autor (2025)

Conforme a Tabela 7, o transdutor de pressão 0–10 V alcançou a maior pontuação (88 pontos) e, por isso, foi selecionado como solução para a subfunção de metrologia.

Tabela 8 - Avaliação das Alternativas Atuadores 24-12V

Avaliação da Subfunção: Atuadores 24-12V						
Alternativas	Preço	Precisão	Fácil instalação	Resistência	Segurança	Total
Motoredutor DC	7	6	7	8	7	79
Servomotor	6	9	6	7	8	80
Válvula hydr. integrada	7	7	8	7	8	82
Cilindro pneumático 24V	5	8	8	6	9	80

Fonte: Do Autor (2025)

Conforme a Tabela 8, a válvula hidráulica integrada alcançou a maior pontuação (82 pontos). Graças ao acionamento rápido e seguro, à instalação ágil e ao preço competitivo, ela supera os motoredutores e servomotores nas tarefas em que não se exige alta precisão de posicionamento.

Tabela 9 - Avaliação das Alternativas Controle

Avaliação da Subfunção: Controle						
Alternativas	Preço	Precisão	Fácil instalação	Resistência	Segurança	Total
Microcontrolador (ESP32)	9	8	8	6	7	83
CLP Delta AX-308E	5	9	6	9	9	86
PC ind. + SCADA	4	9	5	6	7	73
CLP + <i>datalogger</i>	5	9	5	9	9	85

Fonte: Do Autor (2025)

Conforme a Tabela 9, o CLP Delta AX-308E obteve a maior pontuação (86 pt). Sua confiabilidade elevada, os recursos de segurança integrados e a compatibilidade direta com a IHM justificam o investimento superior em relação a um microcontrolador, garantindo ainda a expansibilidade futura do sistema.

Conforme a Tabela 10, as escolhas finais são: interruptor tátil (acionamento manual); contator/relé 24 V cc (acionamento elétrico); transdutor de pressão 0–10 V (metrologia); válvula hidráulica integrada (atuadores 24 V); e CLP Delta AX-308E (controle).

Tabela 10 - Resumo das Soluções Vencedoras

Subfunção	Soluções
Acionamento manual	Interruptor Tátil
Acionamento Elétrico	Contator / relé 24 V
Metrologia	Transdutor de pressão 0 – 10 V
Atuadores 24-12V	Válvula hidr. integrada
Controle	CLP Delta AX-308E

Fonte: Do Autor (2025)

3.3 Projeto Preliminar

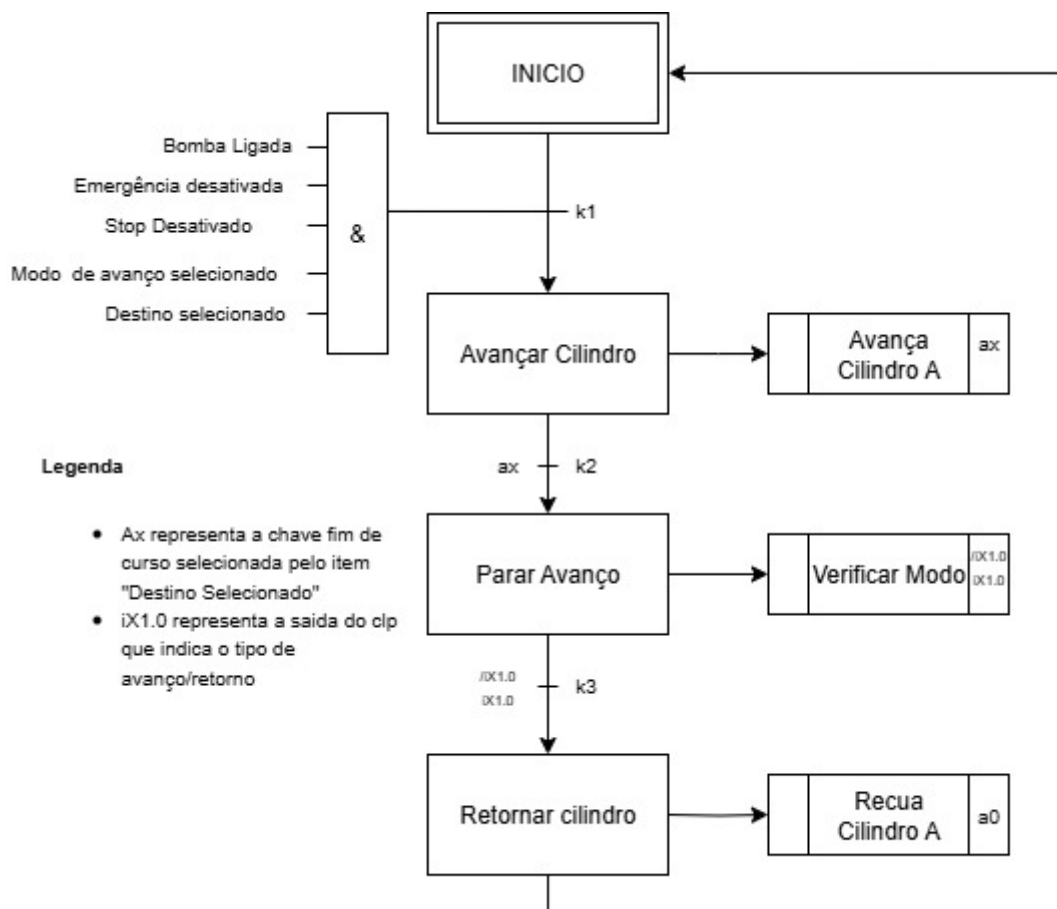
Conforme Pahl e Beitz (2009), o projeto preliminar se resume a: definir requisitos, decompor a função global, reunir princípios de solução, compor a matriz morfológica, avaliar cada conceito e eleger o melhor (PAHL; BEITZ, 2009).

3.3.1 Layout e Diagramas Funcionais

A partir das alternativas escolhidas, definiu-se um layout funcional que organiza os principais subconjuntos da bancada: painel de controle (CLP, relés, botoeiras, sinaleiros e fontes) e conjunto hidráulico (válvulas direcionais, atuadores, manômetros, filtros e reservatório). O layout prioriza acessibilidade, manutenção e segurança dos usuários.

A sequência operacional foi especificada por um diagrama GRAFCET, Figura 16, versão em alta resolução encontra-se no Anexo E. Ela compreende:

Figura 16 - Sequência operacional



Fonte: Do Autor (2025)

3.3.2 In/Out: Mapeamento de Entradas e Saídas

Foram listados todos os dispositivos que compõem o sistema de controle. As entradas digitais incluem botões, sensores de fim de curso e elementos de segurança; as saídas digitais correspondem ao acionamento de válvulas e sinalizadores:

Entradas Digitais:

- Botão de partida (NA)
- Botão de parada (NF)
- Botão de avanço e retorno (NA)
- Sensores de fim de curso (magnéticos ou fim de curso)

Saídas Digitais:

- Acionamento da bomba hidráulica (relé ou contator)
- Piloto verde e vermelho (LED 24V)
- Acionamento de válvulas (solenóide 24VCC)

3.3.3 Lógica de Comando e *Ladder*

Com a sequência de movimentos definida, foi possível estabelecer a lógica de acionamento. Utilizou-se o método sequencial para gerar equações de controle com base na correspondência entre os estados dos sensores e as ações dos atuadores. A linguagem *Ladder* foi escolhida por sua clareza e aderência ao ensino técnico.

O uso do CODESYS permite simular previamente a lógica, garantindo funcionalidade e segurança antes da implementação física.

3.4 Projeto Detalhado

Segundo Pahl e Beitz (2009), o projeto detalhado deve concretizar o conceito escolhido: dimensionar cada componente, definir materiais e bitolas, gerar desenhos de fabricação e diagramas finais, calcular esforços e quedas de pressão, validar pelo modelo de simulação e elaborar o plano de testes e de custos finais, assegurando conformidade normativa antes da execução (PAHL; BEITZ, 2009).

3.4.1 Dimensionamento do CLP e dos Pontos de Entrada e Saída

Para a automação do sistema reformulado, foi realizado o levantamento do número de entradas e saídas digitais necessárias. Essa contagem foi baseada na quantidade de sensores, atuadores e dispositivos de sinalização da bancada. A Tabela 11 apresenta a relação dos dispositivos utilizados e seus respectivos tipos de sinal: Também foi decidido a segregação de alimentação 24 V: fonte para

atuadores/relés e fonte dedicada para lógica do CLP, reduzindo quedas de tensão e ruído eletromagnético

Tabela 11 - I/O do Sistema

I/O do Sistema		
Dispositivo	Quantidade	Tipo de Sinal
Sensores indutivos (M18)	4	Entrada digital
Fins de curso tipo rolete	3	Entrada digital
Botões de comando (liga/desliga/reset)	3	Entrada digital
Botão de emergência	1	Entrada digital
Válvulas direcionais 4/2 elétricas	4	Saída digital
Relé de potência (bomba/motor)	1	Saída digital
Sinalizações luminosas	2	Saída digital

Fonte: Do Autor (2025)

Com base nos dispositivos apresentados, totalizam-se 11 pontos de entrada digital e 7 pontos de saída digital. Diante dessa necessidade, foi selecionado o CLP modelo Delta AX-308E, que possui 8 entradas digitais e 6 saídas digitais, com sua possibilidade de expansão podemos então adicionar o módulo AS06XA-A. Este equipamento é compatível com o ambiente de desenvolvimento CODESYS e opera com alimentação de 24V, garantindo maior segurança no ambiente acadêmico.

A escolha desse modelo justifica-se pela adequação ao número de I/Os necessários, pela possibilidade de comunicação com outros dispositivos via Ethernet, e pela compatibilidade com módulos adicionais para expansão futura, caso necessário. A programação do CLP será realizada em linguagem *Ladder*, utilizando o software CODESYS, o qual permite simulações e testes prévios ao comissionamento da bancada.

3.4.2 Sistema Hidráulico

A bancada hidráulica será composta por um conjunto de componentes dimensionados para simular circuitos industriais e didáticos de potência fluida. Os principais elementos incluem válvulas direcionais elétricas 4/2 vias, válvulas reguladoras de vazão, válvulas limitadoras e redutoras de pressão, válvula de retenção pilotada, rotâmetro para medição de vazão e manômetros para leitura da pressão em diferentes pontos do circuito.

O sistema contará ainda com mangueiras hidráulicas de 3/8" e conexões apropriadas, garantindo vedação e resistência às pressões de operação. Será mantido o reservatório original, com verificação de estanqueidade e reposição do fluido hidráulico conforme especificações técnicas do fabricante.

O conjunto motobomba atual será analisado quanto à viabilidade de reaproveitamento. Caso necessário, será substituído por uma unidade hidráulica com motor elétrico trifásico e bomba de engrenagens, adequada ao volume e pressão requeridos para os ensaios propostos. O sistema hidráulico será montado de forma modular, com engates rápidos e suportes que facilitem a troca de componentes e a didática de ensino.

3.4.3 Sistema de Alimentação Elétrica

Visando a segurança dos usuários e a padronização conforme boas práticas de automação industrial, a nova configuração do painel elétrico da bancada utilizará tensão de 24V para todos os dispositivos de controle e acionamento. A alimentação será fornecida por uma fonte chaveada com capacidade de 10A, dimensionada para suportar a carga total dos relés, sensores e válvulas.

A alimentação da bomba hidráulica, por se tratar de uma carga de potência elevada, será mantida em 220V com acionamento via relé de estado sólido, protegido por disjuntor termomagnético e contato de segurança. O circuito de força será isolado do circuito de controle por meio de relés auxiliares e fontes independentes.

A fiação será organizada em calhas e trilhos DIN, e identificada com etiquetas padrão para facilitar manutenções e inspeções. Todos os dispositivos de campo estarão conectados ao CLP por meio de bornes identificados, assegurando clareza no *layout* elétrico da bancada.

Os diagramas elétricos completos encontram-se no ANEXO C

3.4.4 Sistema de Segurança e Sinalização

O projeto incorpora dispositivos de segurança para evitar acidentes durante a operação da bancada. O botão de emergência tipo cogumelo, de retenção mecânica, interrompe o circuito de comando e provoca o desligamento imediato da bomba, exigindo reset manual para rearme. O atuador fica em posição central e de fácil acesso (ver Figura 17).

A sinalização visual do painel utiliza três lâmpadas piloto — verde (sistema energizado/pronto), vermelha (falha ou parada) e âmbar (avanço/movimento ativo) — dispostas conforme a Figura 17. A proteção elétrica inclui disjuntor geral, fusíveis por setor e relé térmico do motor, com separação entre força (220 V) e controle (24 Vcc SELV). Todos os elementos atendem às NR-12 e às boas práticas de NR-10/IEC 60204-1, reforçando a confiabilidade e a segurança em ambiente acadêmico.

Figura 17 - Distribuição das botoeiras



Fonte: Do Autor (2025)

3.4.5 Simulação Final (FluidSim-H e CODESYS)

A fase final do projeto detalhado consistiu na validação cruzada dos sistemas por meio de simulação. O software FluidSim-H foi utilizado para modelar todo o circuito hidráulico, incluindo válvulas, bomba e cilindro. Essa simulação permitiu verificar o comportamento físico do sistema em resposta aos comandos, ajustar pressões e tempos, e identificar falhas operacionais como vazamentos ou travamentos lógicos.

Paralelamente, o ambiente CODESYS foi usado para simular o circuito de controle lógico em *Ladder*. Com isso, foi possível acompanhar em tempo real o

acionamento das saídas digitais e a leitura dos sensores e botoeiras, permitindo testar diversas condições sem risco físico.

A comparação entre os testes virtuais (simulação) e os testes reais em bancada demonstrou elevada aderência entre os comportamentos esperados e observados. Pequenas variações foram corrigidas rapidamente, confirmando a importância da fase de simulação como ferramenta fundamental para a confiabilidade e eficiência do projeto.

3.4.6 Programação Ladder no CODESYS

Para a implementação da lógica de controle da bancada hidráulica, foi utilizada a linguagem Ladder (LD), escolhida por sua representação gráfica similar a esquemas elétricos convencionais, o que facilita o entendimento por alunos e técnicos. O ambiente de desenvolvimento adotado foi o **CODESYS**, que atende à norma **IEC 61131-3**, permitindo a criação, simulação e futura transferência do código para o CLP físico.

A programação foi estruturada em redes lógicas separadas, de forma modular, para facilitar o entendimento e a manutenção futura, as conexões elétricas do CLP sugeridas podem ser vistas no Anexo D. Alguns termos utilizados e im

- Rede 1 – Partida e selo da bomba

Implementa a lógica de **selo de motor**, Selo da bomba (auto-manutenção): circuito de latch que mantém o motor ligado após o Start, desligando somente por Stop ou Emergência, permitindo que a bomba permaneça ligada após o acionamento do botão de partida (*Start_Button*) e só desligue por comando do botão de parada (*Stop_Button*) ou em caso de emergência. Além disso, a lógica aciona o **LED verde**, sinalizando a condição de sistema energizado.

- Rede 2 – Parada e sinalização de falha

Esta rede é responsável por desligar a bomba e acionar o **LED vermelho** (LED_Vermelho_Parado) sempre que houver uma condição de

parada ou falha. O desligamento também afeta o **contator do motor** e ativa a saída digital Desliga_Motor.

- Rede 3 – Bloqueio por falha de emergência

Foi implementada uma variável de memória interna (Falha_Emergencia), que bloqueia o acionamento de qualquer válvula ou motor enquanto estiver ativa. Todas as redes que envolvem movimentação de atuadores possuem contatos de bloqueio usando essa variável.

- Rede 4 – Tratamento de emergência (*Set/Reset*)

A emergência é gerenciada com uma lógica de **Set/Reset**. O estado de falha é ativado (*Set*) quando o botão de emergência (Emergencia) é pressionado. O retorno ao estado normal só ocorre após o operador pressionar o **botão físico de Reset de emergência** (*Reset_Emergencia*), o que executa o **Reset** da variável de falha.

- Rede 5 – *Reset* manual de falha geral

Além do *reset* de emergência, um **botão de Reset de Falha** (*Reset_Falha*) foi adicionado. Essa rede permite que o operador desative o estado de falha após a correção da causa, reforçando a segurança.

- Rede 6 – Controle de avanço do cilindro

Foi implementada a lógica de avanço do cilindro, respeitando o modo selecionado pelo operador. No **modo meio avanço**, o cilindro avança até o sensor intermediário. No **modo total**, o avanço continua até o sensor de fim de curso.

- Rede 7 – Controle de retorno do cilindro

A lógica de retorno inclui duas condições:

Retorno automático: Se o seletor estiver ativo e o cilindro atingir o sensor correspondente, o retorno ocorre automaticamente.

Retorno manual: Se o seletor estiver desativado, o operador pode comandar o retorno pelo botão específico.

Ambas as condições são bloqueadas durante uma falha de emergência.

- Rede 8 – Sinalização de modo de operação

Para facilitar a identificação do modo atual, dois LEDs foram implementados:

LED_Modo_Automatico: Indica quando o retorno automático está ativo.

LED_Modo_Manual: Indica quando o sistema está operando no modo manual.

As figuras a seguir apresentam capturas de tela diretamente extraídas do ambiente CODESYS, demonstrando a implementação das redes citadas.

Figura 18 - Declaração entradas digitais

Start_Button	AT %IX0.0 : BOOL;
Stop_Button	AT %IX0.1 : BOOL;
Avanco_Button	AT %IX0.2 : BOOL;
Retorno_Button	AT %IX0.3 : BOOL;
Sensor_Intermediario	AT %IX0.4 : BOOL;
Sensor_Avanco	AT %IX0.5 : BOOL;
Sensor_Retorno	AT %IX0.6 : BOOL;
Modo_Meio_Avanco	AT %IX0.7 : BOOL;
Retorno_Automatico	AT %IX1.0 : BOOL;
Emergencia	AT %IX1.1 : BOOL;
Reset_Emergencia	AT %IX1.2 : BOOL;
Falha_Emergencia	AT %MX0.0 : BOOL;
Reset_Falha	AT %IX0.8 : BOOL;

Fonte: Do Autor (2025)

A Figura 18 apresenta a tabela de declaração das entradas digitais utilizadas no programa.

Figura 19 - Declaração saídas digitais

Valvula_Avanco	AT %QX0.0 : BOOL;
Valvula_Retorno	AT %QX0.1 : BOOL;
LED_Verde_Bomba	AT %QX0.2 : BOOL;
LED_Vermelho_Parado	AT %QX0.3 : BOOL;
Contator_Motor	AT %QX0.4 : BOOL;
Desliga_Motor	AT %QX0.5 : BOOL;
LED_Modo_Automatico	AT %QX0.6 : BOOL;
LED_Modo_Manual	AT %QX0.7 : BOOL;

Fonte: Do Autor (2025)

A correspondência das saídas digitais pode ser vista na Figura 19.

As Figuras 18 a 21 ilustram o trecho principal do código; o projeto completo pode ser baixado¹.

¹ LUZ, Douglas Martins. Código-fonte do retrofit da bancada hidráulica: projeto CODESYS, versão 07 jul. 2025. Florianópolis, 2025. Arquivo digital (.project, 45 kB). Disponível em: https://drive.google.com/drive/folders/1dU9-q7GgTG6fLlZAYInzspzP7PCMjqv_. Acesso em: 12 jul. 2025.

Figura 19 - Código Ladder linhas 1–3



Fonte: Do Autor (2025)

Figura 21 - Código Ladder linhas 9–11



Fonte: Do Autor (2025)

4 ORÇAMENTO DE COMPONENTES

Nesta etapa, concentra-se numa possível aquisição dos itens necessários ao *retrofitting* da bancada. O processo considera critérios de custo, confiabilidade, compatibilidade técnica e disponibilidade de fornecedores. A seguir, detalha-se a metodologia de seleção e o levantamento de necessidades que embasam cada escolha para uma futura implantação prática do *retrofitting*.

4.1 Metodologia de Seleção

A escolha dos componentes foi fundamentada nos requisitos definidos durante o projeto informacional e nas soluções selecionadas na fase conceitual. Utilizou-se uma abordagem multicritério baseada em fatores como: custo, confiabilidade, facilidade de aquisição, compatibilidade técnica e suporte técnico.

Foram priorizados fornecedores nacionais com boa reputação e disponibilidade imediata dos itens. Em alguns casos, utilizou-se benchmarking com bancadas semelhantes ou documentação técnica de fabricantes renomados como Festo, Parker e Vickers.

4.2 Levantamento de Necessidades

Após analisar as condições atuais da bancada e definir as funcionalidades exigidas pelo *retrofit*, elaborou-se um levantamento dos componentes críticos para garantir operação segura, confiável e compatível com as etapas de automação do projeto. Os itens identificados foram classificados em dois grupos:

Componentes elétricos

- Controlador Lógico Programável (CLP) com expansão de E/S digitais
- Duas fontes de alimentação 24 V cc para circuito de comando e alimentação CLP
- Contator para acionamento da bomba
- Relés de interface para isolamento entre CLP e atuadores

- Sensores de fim de curso (intermediário, avanço e retorno)
- Botões de comando (*Start*, *Stop*, Avanço, Retorno, Emergência e *Reset*)
- Sinaleiros (LEDs verde, vermelho e indicador de modo)
- Disjuntores, fusíveis, bornes, canaletas e cabeamento

Componentes hidráulicos

- Bomba hidráulica (palhetas ou engrenagens) compatível com 200–250 bar e 8 L/min
- Filtro de retorno (classe $\leq 25 \mu\text{m}$)
- Válvula de alívio ajustável a 90 % da pressão nominal da linha
- Válvulas direcionais NG 6 (CETOP 03) 4/2 e 4/3, bobina 24Vcc
- Válvula de retenção (*check*) 3/8" BSP, 315 bar
- Válvula de controle de fluxo bidirecional compensada, 25 L min⁻¹
- Mangueiras SAE 100 R2 c/ fator de segurança 4:1, conexões e engates rápidos
- Instrumentação de pressão: manômetro glicerinado 0–315 bar e/ou transdutor 0–10 V (0–250 bar)

Esse levantamento orienta a especificação dos dispositivos e serve de base para as etapas de cotação, compatibilização normativa e dimensionamento do *retrofit*.

4.3 Critérios de Escolha

Os principais critérios utilizados para a seleção dos componentes foram:

- Compatibilidade com o ambiente de programação CODESYS.
- Quantidade de entradas e saídas compatível com a necessidade do projeto.
- Disponibilidade no mercado nacional, facilitando aquisição e reposição.
- Custo-benefício entre qualidade, preço e suporte técnico.
- Confiabilidade e reconhecimento da marca no setor industrial.

- Segurança e adequação às normas NR-10, NR-12, IEC 60204-1 e ISO 4413, adotando circuitos de comando em 24 Vcc SELV (conforme ABNT NBR 5410/IEC 60364-4-41).

A escolha de fornecedores nacionais permite facilidade logística e melhor suporte pós-venda. Além disso, os componentes selecionados são amplamente utilizados em aplicações industriais semelhantes, garantindo a robustez do sistema após o *retrofit*.

4.4 Pesquisa de Mercado e Cotações

Foi realizada uma pesquisa de mercado junto a fornecedores brasileiros para levantamento de preços médios e identificação de possíveis fontes de aquisição.

Tabela 12 - Cotação Componentes Eletrônicos

Cotações de componentes eletrônicos (mai–jun 2025)			
Componente	Quantidade	Especificação	Preço médio (R\$)
CLP Delta AX-308E	1	24 V cc – 8 DI/4 DO	3 200,00
Fonte 24V	2	24 V – 10 A	350,00
Contator	1	24 V – 9 A	190,00
Relé interface	4	24 V – 5 A	65,00
Transdutor de pressão	1	0–250 bar – saída 0–10 V	780,00
Módulo analógico CLP	1	4 ch – 0–10 V / 0–20 mA	820,00
Disjuntor DIN	1	10 A (curva C)	45,00
Bornes + trilho DIN	10	10 un. – 35 mm, 32 A/600 V	4,50

Fonte: Do Autor (2025)

Tabela 13 - Cotação Componentes Hidráulicos

Cotações de componentes Hidráulicos (mai–jun 2025)			
Componente	Quantidade	Especificação-chave	Preço médio (R\$)
Bomba hidráulica (engrenagens)	1	8 L/min, 200 – 250 bar	730,00
Filtro de retorno	1	Elemento $\leq 25 \mu\text{m}$, cabeçote 3/4"	200,00
Filtro de Sucção	1	Tela interna de reservatório, 25 μm	130,00
Válvula de alívio	1	in-line, regulável 0 – 160 bar (máx. 315 bar)	350,00
Válvula direcional NG 6	3	4/2 e 4/3, bobina 24Vcc	930,00
Válvula de retenção (<i>check</i>)	2	Rosca 3/8" BSP, 315 bar	200,00
Válvula de controle de fluxo	2	Bidirecional compensada, 25 L/min	400,00
Válvula agulha	2	Estrangulamento 3/8" BSP	350,00
Manômetro glicerinado	4	0 – 315 bar, 1/4" BSP	115,00

Fonte: Do Autor (2025)

As Tabelas 12 e 13 detalham as cotações individuais de componentes eletrônicos e hidráulicos obtidas em maio-junho de 2025. Esses valores se consolidam em três grupos:

- Componentes Elétricos: R\$ 6.040,00
- Componentes Hidráulicos: R\$ 6.560,00
- Materiais de Fixação/Instalação: R\$ 50,00
- Resulta-se em um custo total de R\$12.650,00

Esse montante representa $\approx 17\%$ do preço mínimo ($\approx$ R\$73.000,00) de uma bancada nova e $\approx 12\%$ do preço máximo estimado ($\approx$ R\$ 98.000,00), mantendo-se, portanto, confortavelmente dentro do limite de $30\% - 40\%$ estabelecido nos requisitos (Seção 3.1).

As cotações foram obtidas junto a fornecedores nacionais com pronta-entrega; variações cambiais ou de frete podem fazer com que valores variem.

5 IMPLANTAÇÃO

Embora este projeto tenha sido desenvolvido apenas em ambiente teórico e de simulação, é importante apresentar considerações relevantes caso a implementação física venha a ocorrer no futuro.

Para a montagem prática do sistema, seria necessária a alocação dos componentes elétricos (CLP, relés, contator, fontes e bornes) em um painel de controle industrial, devidamente protegido conforme as normas da NR10.

A interligação entre o painel e os atuadores hidráulicos, bem como os sensores de fim de curso, seria feita utilizando cabos industriais com isolamento adequado e identificação por cores. Todos os cabos de potência e comando seriam organizados através de canaletas e barramentos apropriados.

A alimentação elétrica do sistema deveria prever proteção contra sobrecorrente e curto-circuito, com a utilização de disjuntores e fusíveis apropriados. A interface homem-máquina (IHM) seria representada por botões, sinaleiros e, caso necessário, um painel com sinalização adicional.

Quanto ao software, o programa desenvolvido em CODESYS deveria ser transferido ao CLP utilizando comunicação via cabo USB ou Ethernet, conforme a especificação do fabricante. Uma vez carregado, os testes de funcionamento poderiam ser realizados em etapas: validação de entradas, verificação de acionamentos de saída e, posteriormente, a execução de ciclos completos de operação.

Recomenda-se que qualquer implementação física futura seja acompanhada por um profissional técnico com experiência em automação industrial e segurança de máquinas, para garantir o cumprimento das normas NR10 e NR12.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O *retrofit* da bancada Vickers alcançou redução significativa dos riscos identificados, conforme quantificado pelo método HRN (ver Tabelas 14a e 14b). A Tabela 14a apresenta os valores de HRN pré-mitigação, enquanto a Tabela 14b exhibe os valores de HRN pós-mitigação, demonstrando que todos os perigos críticos migraram de níveis “alto” ou “moderado” para “baixo”.

Tabela 14b – HRN Residual

Perigo (Modo de Falha)	Medidas de Mitigação	S'	F'	P'	W'	HRN Residual
Exposição a tensão de 220 V em bornes não isolados	Migração para 24 V cc SELV + bornes com capa isolante	2	3	1	2	12
Corrente de fuga à carcaça devido a falha de aterramento	Aterramento reforçado + RCD 30 mA + ensaio de continuidade do PE	2	2	1	2	8
Aprisionamento em partes rotativas da bomba hidráulica	Acoplamento com proteção fixa + guarda metálica com intertravamento	2	1	1	2	4
Dermatite por contato e absorção cutânea de fluido hidráulico	Uso de luvas nitrílicas + sistema de contenção de respingos	1	2	2	2	8

Fonte: Do Autor (2025)

O *retrofit* da bancada Vickers alcançou uma modernização bem-sucedida, conforme demonstrado pelos resultados obtidos nas análises de risco e no atendimento aos requisitos técnicos e normativos.

A quantificação dos perigos com o método HRN evidenciou redução substancial dos riscos: enquanto, antes da mitigação, às exposições a tensão de 220V, fugas de corrente, aprisionamento em partes móveis e dermatite cutânea apresentavam HRN entre 48 e 135 (níveis “alto” a “moderado”), após a implantação das contramedidas esses valores caíram para 4–12 (nível “baixo”) (ver Tabelas 14a e 14b). Essa diminuição confirma a eficácia das soluções de baixa tensão SELV, proteções mecânicas e procedimentos de EPI.

Os objetivos foram atendidos em nível de projeto: todas as soluções foram especificadas, dimensionadas e validadas virtualmente (simulação/documentação), ficando a montagem física como etapa futura.

Segurança: o retrofit prevê migrar todos os circuitos de comando para 24VCC (SELV), instalar proteções e reforçar o aterramento, em conformidade com NR-10, NR-12 e IEC 60204-1.

Desempenho: especifica-se CLP modular, válvulas hidráulicas integradas e instrumentação digital, com expectativa de maior durabilidade dos componentes.

Viabilidade econômica: o custo estimado do retrofit é de R\$ 8.462,00 — cerca de 30–40% do valor de um equipamento novo —, indicando vantagem frente à substituição completa.

Limitações: o estudo baseou-se em simulações e dados de catálogo; serão necessários ensaios práticos (isolamento elétrico, medições de ruído e testes de durabilidade) após a implementação física.

Trabalhos futuros:

Implementar fisicamente o *retrofit* e conduzir os ensaios de segurança (medição de correntes de fuga, resistência de isolamento) e de desempenho hidráulico (vazão, pressão e ruído).

Desenvolver e integrar software de supervisão SCADA para monitoramento em tempo real e histórico de falhas.

Expandir a análise de riscos incluindo cenários de manutenção e falhas catastróficas (FMEA) para suportar planos de manutenção preditiva.

Em síntese, o projeto proposto oferece à comunidade acadêmica uma bancada hidráulica renovada, segura, econômica e alinhada às práticas industriais modernas, contribuindo significativamente para a qualidade do processo de ensino-aprendizagem em Engenharia Mecatrônica.

REFERÊNCIAS

- ABB. Chave seletora M3SSC7-10B – 3 posições. Disponível em: <https://new.abb.com/products/1SFA611256R1006/m3ssc7-10b>. Acesso em: 12 mai. 2025.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 4413:2019 – Sistemas hidráulicos e seus componentes – Requisitos gerais de segurança. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5410:2020 – Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2020.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR IEC 60204-1:2021 – Segurança de máquinas – Equipamentos elétricos de máquinas – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.
- ATOS. Válvula hidráulica proporcional com driver integrado. Disponível em: https://www.atos.com/en-it/Products/Industrial/Proportional-valves/c/IN_C001. Acesso em: 29 jun. 2025.
- BECKHOFF. PC embarcado CX5020 – Processador Intel® Atom™. Disponível em: <https://www.beckhoff.com/en-us/support/service-products/ipc-service-products/cx5020.html>. Acesso em: 17 mai. 2025.
- BOYES, Walt. Instrumentation Reference Book. 1 ed. Elsevier Science, 2002.
- BOSCH REXROTH. Válvula direcional proporcional 4WREE. Disponível em: <https://www.boschrexroth.com/media/23486568-d36d-4c47-8fc6-1e8ae9f1e4c6>. Acesso em: 02 jun. 2025.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Diário Oficial da União, Brasília, 10 jun. 2022.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR-12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Diário Oficial da União, Brasília, 24 abr. 2022.
- BÜRKERT. Válvula solenoide Tipo 6011 – 24 V cc. Disponível em: <https://www.burkert.com/en/type/6011>. Acesso em: 20 mai. 2025.
- CAPELLI, Alexandre. Eletroeletrônica Automotiva – Injeção Eletrônica, Arquitetura do Motor e Sistemas Embarcados. 1 ed. Saraiva, 2010.
- DELTA ELECTRONICS. CLP AX-308E – Controlador CODESYS. Disponível em: <https://industrialautomation.delta-emea.com/en/ax-308e-series-3402.htm>. Acesso em: 06 mai. 2025.
- DELTA ELECTRONICS. Módulo de expansão digital AS06XA-A – Folha de dados. Taipé, 2024. Disponível em: <https://www.delta.com>. Acesso em: 15 jun. 2025.

DESA, Douglas O. L. Applied Technology and Instrumentation for Process Control. 1 ed. CRC Press, 2004.

ESPRESSIF. Microcontrolador ESP32 – Wi-Fi/Bluetooth. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 30 mai. 2025.

FANUC. Servomotor Série Alpha i-B. Disponível em: <https://www.fanucamerica.com/products/cnc/servo-drive-motor/servo-motors>. Acesso em: 24 jun. 2025.

FESTO DIDACTIC. FluidSim Hydraulics – Manual do Usuário. Esslingen, 2023.

FESTO DIDACTIC. Catálogo de bancadas hidráulicas didáticas. Esslingen, 2024. Disponível em: <https://www.festo-didactic.com>. Acesso em: 18 mai. 2025.

FLEX HIDRÁULICA. Válvulas hidráulicas Atos – Sorocaba. Disponível em: <https://www.flexhidraulica.com.br/valvulas-hidraulicas-atos-sorocaba.html>. Acesso em: 02 jun. 2025.

HIDRAOIL. Símbolos hidráulicos – Recursos técnicos. Disponível em: <https://www.hidraoil.com/pt/recursos-tecnicos/simbolos-hidraulicos/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

HONEYWELL. Transdutor de pressão série FP5000 – Saída 0–10 V. Disponível em: <https://automation.honeywell.com/us/en/products/sensing-solutions/test-and-measurement/pressure-transducers/fp5000>. Acesso em: 08 jun. 2025.

HUADE BRASIL. Componentes hidráulicos: descubra quais são e suas funções no sistema. Disponível em: <https://www.huade.com.br/componentes-hidraulicos-descubra-quais-sao-e-suas-funcoes-no-sistema/>. Acesso em: 25 mai. 2025.

IEC. International Electrotechnical Commission. IEC 60204-1:2021 – Safety of machinery – Electrical equipment of machines. Genebra, 2021.

LENZE. Motoredutor Série GKR. Disponível em: <https://www.lenze.com/en-de/products/gearboxes/previous-products-gearboxes/gkr>. Acesso em: 21 jun. 2025.

MEAN WELL. Fonte de alimentação HDR-60-24 – Especificação técnica. Taipei, 2024. Disponível em: <https://www.meanwell.com>. Acesso em: 20 jun. 2025.

MEHRABI, M. G.; ULSOY, A. Galip; KOREN, Yoram. Manufacturing Systems and Their Design Principles. 1 ed. CRC Press, 2002.

PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROOTERJAHN, Karl-H.; ZIEMER, Ulrich. Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento de produtos e construção de máquinas. 2 ed. São Paulo: Blücher, 2009.

PARKER HANNIFIN. Mangueiras hidráulicas SAE 100 R2 – Catálogo técnico. Cleveland, 2024. Disponível em: <https://www.parker.com>. Acesso em: 10 jun. 2025.

SCHNEIDER ELECTRIC. Contator TeSys Deca LC1D09B7 – 24 V. Disponível em: <https://www.se.com/us/en/product/LC1D09B7/>. Acesso em: 03 mai. 2025.

SIEMENS. Controlador S7-1200 – Função de Data Logging. Disponível em: <https://support.industry.siemens.com/cs/mdm/109747174>. Acesso em: 25 mai. 2025.

SMC. Cilindro compacto Série CQ2 – 24 V. Disponível em: <https://www.smcusa.com/products/actuators/linear-actuators/standard/cq2-z~53389>. Acesso em: 26 jun. 2025.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. Reservatório hidráulico. Disponível em: <https://www.solucoesindustriais.com.br/reservatorio-hidraulico>. Acesso em: 01 jun. 2025.

TE CONNECTIVITY. Sensor de pressão digital MS5803 – I²C/SPI. Disponível em: https://www.te.com/.../MS5803-14BA_B3.pdf. Acesso em: 15 jun. 2025.

VERSATRONIC MOTORES. Motores elétricos industriais. Disponível em: <https://www.versatronicmotores.com.br/motores-eletricos-industriais>. Acesso em: 01 jun. 2025.

VICKERS. Hydraulic Training Bench – Operation and Maintenance Manual. Edition 03. 2001.

WEG. Contator CWM9 – Catálogo técnico. Jaraguá do Sul, 2024. Disponível em: <https://www.weg.net>. Acesso em: 12 jun. 2025.

WIKA. Manômetro eletrônico D-20-9 – Interface *CANopen*. Disponível em: https://www.wika.ca/upload/DS_PE8139_en_co_1527.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

WIKA. Transmissor de pressão P-30/P-31 – 4–20 mA. Disponível em: https://www.wika.com/en-us/p_30_p_31. WIKA. Acesso em: 11 jun. 2025.

YAN, Hong-Sen. Creative Design of Mechanical Devices. Singapore: Springer, 1998.

YASKAWA. Servo-driver Sigma-7 SERVOPACK. Disponível em: <https://www.yaskawa.com/products/motion/sigma-7-servo-products>. Acesso em: 28 mai. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR-10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Portaria MTb nº 3.214, de 8 jun. 1978 (com alterações posteriores). Brasília, DF: MTE, **[ano da versão consultada]**.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR-12: Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Portaria MTb nº 3.214, de 8

jun. 1978 (com alterações posteriores). Brasília, DF: MTE, **[ano da versão consultada]**.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. *Norma Regulamentadora NR-15: Atividades e Operações Insalubres*. Portaria MTb nº 3.214, de 8 jun. 1978 (com alterações posteriores). Brasília, DF: MTE, **[ano da versão consultada]**.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Matriz Morfológica Completa do *Retrofit*

Subfunção	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Acionamento manual	Alavanca c/ mola	Manivela	Pedal	Interruptor tátil
Acionamento elétrico	Botoeira 24 V	Solenóide 24 V	CLP (saída relé)	<i>Wireless</i> I/O
Medição e monitoramento	Sensor pressão 0–10 V	Manômetro 0–315 bar	Sensor nível ultrassônico	Manômetro eletrônico CANopen
Atuadores 12–24 V	Motoredutor DC	Servomotor 24 V	Válvula 24 V	Cilindro pneu 24 V
Controle / supervisão	CLP Delta AX-308E	PID em PC	Microcontrolador ESP32	SCADA OPC

Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE B – Check-list de Conformidade Normativa

Norma	Item-chave	Descrição resumida	✓ / N/A
NR-10	10.2.3	Condutores identificados e proteção diferencial-residual 30 mA	☒
NR-10	10.2.8	Seccionamento visível antes de energização	☒
NR-12	12.38	Botão de parada de emergência tipo cogumelo	☒
IEC 60204-1	9.4	Circuito de comando 24 V cc SELV	☒
IEC 60204-1	13.2	Cores de condutores; PE verde-amarelo	☒
IEC 60204-1	18.2	Ensaio de resistência de isolamento	☒
IEC 60204-1	20.4	Verificação funcional de parada de emergência	☒
NBR 5410	6.1.5	Seção mínima e proteção contra sobrecorrente	☒
ISO 4413	9.2.1	Válvula de alívio ajustada a 90 % press. nominal	☒
ISO 4413	12.5	Fator de segurança mangueiras 4 : 1 + proteção	☒

Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE C — Trechos normativos

Recortes dos artigos citados no texto, com numeração original, para consulta rápida.

C.1 — NR-10 (Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade)

10.1.1 – Objetivo

“Esta NR estabelece os requisitos e condições mínimas [...] garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores.”

10.2.3 – Documentação/diagramas

“As empresas estão obrigadas a manter esquemas unifilares atualizados [...] com as especificações do sistema de aterramento e dos dispositivos de proteção.”

10.2.8.2 – Medidas coletivas (prioridade)

“As medidas de proteção coletiva compreendem, prioritariamente, a desenergização e, na sua impossibilidade, o emprego de tensão de segurança.”

10.10.1 – Sinalização

“Deve ser adotada sinalização adequada de segurança, destinada à advertência e à identificação.”

C.2 — NR-12 (Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos)

12.4.13 – Interface de operação (baixa tensão)

“Devem [...] operar em extrabaixa tensão de até 25 VCA ou 60 VCC.”

12.6 – Dispositivos de parada de emergência (E-STOP)

12.6.1: “As máquinas devem ser equipadas com um ou mais dispositivos de parada de emergência.”

12.6.2: “Devem ser posicionados em locais de fácil acesso e visualização [...] desobstruídos.”

12.6.3 (d–f): “Prevalecer sobre os outros comandos; parada em tempo tão reduzido quanto tecnicamente possível; disponível a qualquer tempo.”

12.6.5: “O acionamento [...] deve resultar na retenção do acionador até que seja desacionado.”

12.6.8: “A parada de emergência deve exigir rearme (‘reset’) manual [...] após a correção do evento.”

12.7 – Componentes pressurizados

“Devem ser adotadas medidas adicionais de proteção das mangueiras, tubulações e demais componentes pressurizados [...]”

C.3 — IEC 60204-1 (Equipment of machines – Electrical)

Referência de uso no texto: separação força/controle e requisitos de parada de emergência.

E-STOP – Acesso e operação (resumo da EN/IEC 60204-1)

“Emergency stop devices must be easily accessed and operated [...]”

Rockwell Automation

C.4 — ISO 4413 (Hydraulic fluid power — Safety)

Proteção contra sobrepressão

“Preferred safeguards against excess pressure are one or more pressure limiting valves, which restrict pressure in all parts of the system.”

pilz.com

Hose assemblies (proibição de re-terminação / requisitos)

“Hose assemblies shall be constructed from hoses [...] que não tenham sido previamente usados; re-terminação contraria a ISO 4413.”

ANEXOS

ANEXO A – TRECHOS-CHAVE DAS NORMAS

Os excertos a seguir apresentam a redação essencial (parafraseada) dos itens normativos diretamente aplicáveis ao *retrofit* da bancada Vickers. Para o texto integral, consultar as publicações originais da IEC e ABNT.

IEC 60204-1:2021 – *ELECTRICAL EQUIPMENT OF MACHINES*

9.4 Tensão de comando – O circuito de comando deve operar em tensão reduzida de segurança (**SELV** ou **PELV**), normalmente **24 V CC**, para minimizar riscos de choque.

13.2 Identificação de condutores – Condutor de proteção (**PE**) deve ser verde-amarelo; condutor neutro azul claro; fios sob tensão podem usar cores distintas, evitando verde ou verde-amarelo.

18.2 Ensaio de resistência de isolamento – Após montagem, aplicar tensão de ensaio (**500 V CC**) por **1 min**; resistência mínima **1 MΩ**.

20.4 Função de parada de emergência – O dispositivo de parada de emergência deve ser testado para comprovar que, quando acionado, remove de imediato a energia de atuação e bloqueia o reinício até rearme intencional.

ABNT NBR ISO 4413:2019 – *SISTEMAS HIDRÁULICOS*

9.2.1 Dispositivo de alívio de pressão – O sistema deve possuir válvula de alívio ajustada a no máximo **90 %** da pressão nominal do componente de menor classe de pressão.

12.5 Mangueiras e conexões – Mangueiras flexíveis devem ter fator de segurança não inferior a **4:1** em relação à pressão máxima do circuito e ser protegidas contra abrasão e projeção de fluido.

Fonte: Síntese do Autor (2025) – baseado em IEC 60204-1:2021 e ABNT NBR ISO 4413:2019.

ANEXO B – DOCUMENTAÇÃO DE APOIO

Este anexo disponibiliza, em formato digital, todos os documentos consultados no desenvolvimento deste trabalho – normas técnicas (NR-10, NR-12, IEC 60204-1, ISO 4413), catálogos de fabricantes, manuais de componentes, artigos e relatórios de pesquisa.

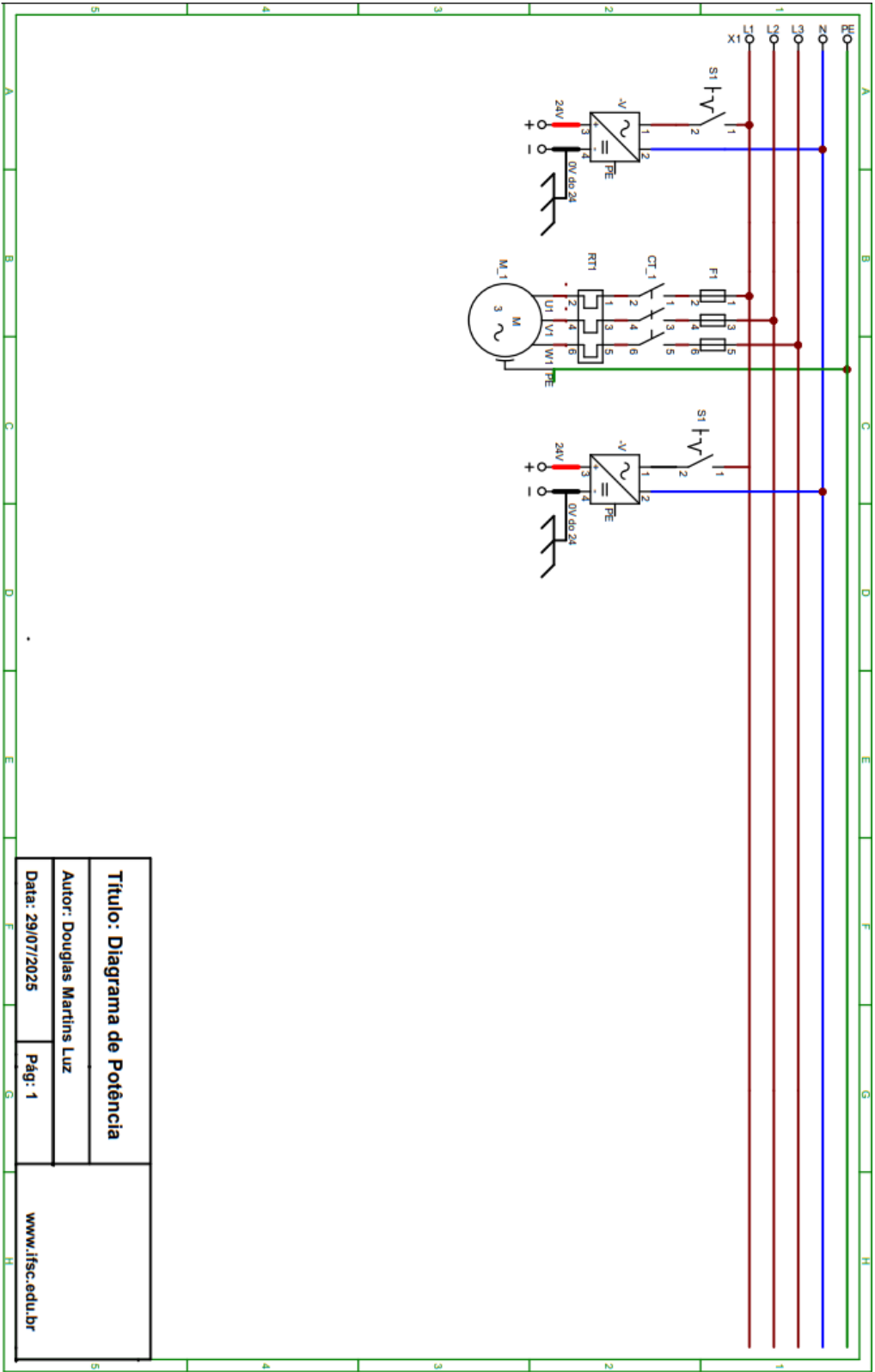
Repositório on-line:

Disponível em:

https://drive.google.com/drive/folders/18iHb_Vt-8vb9R_XNNEBcN3992hoKuH-p

Acesso em: 02 jul. 2025.

ANEXO D – CIRCUITO ELÉTRICO GERAL



ANEXO E – DIAGRAMA FUNCIONAL

