



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
CECAU - Colegiado do Curso de
Engenharia de Controle e Automação



Bruno Hudson Souza Silva

Processo de atualização de material didático baseado na teoria da carga cognitiva

Ouro Preto, 2026

Bruno Hudson Souza Silva

Processo de atualização de material didático baseado na teoria da carga cognitiva

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro(a) de Controle e Automação.

Orientador: Professora Dra Karla Boaventura Pimenta Palmieri

Ouro Preto
2026



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bruno Hudson Souza Silva

Processo de atualização de material didático baseado na teoria da carga cognitiva

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro

Aprovada em 20 de julho de 2026

Membros da banca

Dra - Karla Boaventura Pimenta Palmieri - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra - Luciana Gomes Castanheira - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Caio Fernando Teixeira Portela - Universidade Federal de Ouro Preto

Karla Boaventura Pimenta Palmieri, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 22/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Karla Boaventura Pimenta Palmieri, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/07/2026, às 07:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1145075** e o código CRC **0EDD0145**.

Agradecimentos

Expresso minha profunda gratidão aos professores e à minha orientadora pela condução técnica, paciência e valiosas contribuições acadêmicas, que foram fundamentais para o desenvolvimento e a consolidação deste trabalho. Agradeço também à Universidade Federal de Ouro Preto e a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a concretização deste projeto de pesquisa, contribuindo de maneira significativa para o meu aperfeiçoamento pessoal e formação profissional como engenheiro.

Agradeço, de forma muito especial, à minha família pelo apoio incondicional, incentivo constante e compreensão ao longo de toda a minha trajetória acadêmica, especialmente nos momentos de maior dedicação e desafios. Minha gratidão estende-se aos meus amigos e aos meus irmãos da República Mataburro, pela convivência diária, apoio mútuo e pelas experiências compartilhadas que tornaram a caminhada em Ouro Preto inesquecível e essencial para quem me tornei hoje.

Resumo

O avanço da Indústria 4.0 tem imposto novas exigências à formação de profissionais nas áreas de Automação e Informática Industrial, tornando essencial a integração entre teoria e prática no processo de ensino-aprendizagem. Surge, então, a proposta, a partir, da alta densidade técnica dos manuais tradicionais que impõe uma sobrecarga mental aos estudantes iniciantes, dificultando a assimilação de competências operacionais. Para sanar esse gargalo, o material proposto contempla as atividades práticas orientadas estruturadas sob os preceitos da Teoria da Carga Cognitiva de Sweller (2002) e dos princípios de aprendizagem multimídia de Mayer (2002). O recurso didático utiliza o *software* MasterTool em conjunto com a maleta didática Training Box Duo (Unidade Central de Processamento CPU DU351), aplicando o Princípio da Contiguidade Espacial por meio de capturas de tela adjacentes e sinalizações gráficas direcionadas para facilitar a compreensão dos conceitos, promover a aprendizagem ativa e estimular a autonomia dos estudantes. A arquitetura do material atua como um suporte estratégico unificado para o acompanhamento das aulas práticas, guiando o discente desde a parametrização lógica de Entradas e Saídas (*I/Os*) discretas e analógicas até a integração de redes industriais e o desenvolvimento de telas sinópticas dinâmicas no sistema supervisor Elipse E3. A validação metodológica do guia instrucional foi conduzida por meio de uma pesquisa-ação com estudantes da graduação, utilizando critérios estatísticos padronizados através dos métodos de Métrica Única de Usabilidade (*Single Usability Metric* - Kindlund (2005)) e da Escala de Usabilidade do Sistema (*System Usability Scale* - Brooke (1995)). Nesse contexto, este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo o desenvolvimento de uma apostila interativa voltada à disciplina de Informática Industrial da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), com foco na utilização de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs).

Palavras-chave: Informática industrial. Automação industrial. Controlador Lógico Programável. Ensino-aprendizagem. Apostila interativa.

Abstract

The continuous advancement of Industry 4.0 has imposed new demands on engineering education, requiring a practical mastery of complex industrial ecosystems that integrate field control and process supervision. In the context of the Industrial Informatics discipline at the Federal University of Ouro Preto, it was observed that the high technical density of traditional commercial manuals frequently imposes a severe mental overload on beginner students, hindering the assimilation of operational skills. Faced with this scenario, this work presents the development of a didactic workbook structured under the tenets of John Sweller's Cognitive Load Theory and Richard Mayer's principles of multimedia learning. The educational product was designed to linearize the instructional transposition of the Altus Training Box Duo didactic kit (DU351 CPU), applying the Spatial Contiguity Principle through adjacent screen captures and directed graphic signaling. The architecture of the material guides the learner from the logical parameterization of discrete and analog I/Os in the MasterTool IEC XE environment to the integration of industrial networks and the development of dynamic synoptic screens in the Elipse E3 supervisory system. The methodological validation of the material was conducted through action research with undergraduate students, utilizing standardized statistical criteria through the SUM (Single Usability Metric) and SUS (System Usability Scale) methods. The experimental results demonstrated a significant increase in the execution efficiency of laboratory tasks and a drastic reduction in hardware commissioning errors, consolidating the effectiveness of the proposed instructional design as an advance organizer capable of optimizing working memory and enhancing student protagonism in complex automation activities.

Key-words: Cognitive Load. Industrial Automation. MasterTool IEC. Elipse E3. Usability.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxograma da apostila	19
Figura 2 – Iniciando aplicação	20
Figura 3 – Componentes da maleta Training Box Duo da Altus	25
Figura 4 – Níveis de tensão elétrica da maleta	26
Figura 5 – Guia de comunicação da maleta e MasterTool	28
Figura 6 – Exemplo do selo (latch) em Ladder no <i>software</i>	28
Figura 7 – Guia inicial do Elipse E3	29
Figura 8 – Guia da criação do gêmeo digital Elipse E3	30
Figura 9 – Guia do VerticalPercentFill	30
Figura 10 – Análise de eficiência temporal no Projeto Integrador (MasterTool IEC) demonstrando o tempo individual e o comportamento bimodal da turma.	37
Figura 11 – Distribuição bimodal da turma.	37
Figura 12 – Protocolo sequencial de validação da apostila didática.	53
Figura 13 – Ficha de coleta de dados SUM - Sistema de Controle Automático	53
Figura 14 – Arquitetura do escore SUM: dimensões, pesos e fórmulas de padronização.	54
Figura 15 – Questionário de satisfação pós-tarefa (componente SUM).	55
Figura 16 – Questionário SUS adaptado para avaliação da apostila didática.	56
Figura 17 – Questionário SUS adaptado para avaliação da apostila didática.	57
Figura 18 – Escala de interpretação do escore SUS para a apostila didática.	58

Lista de abreviaturas e siglas

CLP	Controlador Lógico Programável
SUS	Escala de Usabilidade de Sistema
SUM	Métrica Única de Usabilidade

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativas e Relevância	10
1.2	Objetivo	11
1.3	Organização e estrutura	11
1.4	Declaração sobre o uso de Inteligência Artificial	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	Sistemas de Automação e a Maleta Altus Training Box	13
2.2	Teoria da Carga Cognitiva	13
2.3	Teoria da Aprendizagem Multimídia e o Princípio de Mayer	14
2.4	Aprendizagem Significativa e Organizadores Prévios	15
3	METODOLOGIA	16
3.1	Caracterização do Trabalho	16
3.2	Materiais e Ferramentas	17
3.3	Procedimentos para o Desenvolvimento do Material Didático	17
3.3.1	Seleção de Conteúdo e Requisitos Técnicos	18
3.3.2	Design Instrucional e Arquitetura de Informação	19
3.4	Aplicação dos Princípios de Usabilidade (Método SUM e SUS)	21
3.4.1	Métrica Única de Usabilidade (SUM)	21
3.4.2	Escala de Usabilidade de Sistema (SUS)	22
3.5	Plano de Validação e Teste com Usuários	23
4	DESENVOLVIMENTO DO MATERIAL DIDÁTICO	25
4.1	Módulo de <i>hardware</i> : A Maleta Training Box Duo	25
4.2	Módulo de Programação: Ambiente MasterTool IEC	26
4.3	Módulo de Supervisão: Integração com Elipse E3	28
4.4	Projeto Integrador: Estudo de Caso	31
4.5	Transposição Didática e Refinamento Visual	31
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	33
5.1	Análise Isolada dos Indicadores de Desempenho e Usabilidade	34
5.1.1	Eficácia (Taxa de Conclusão)	34
5.1.2	Eficiência (Tempo de Execução)	35
5.1.3	Taxa de Erros Operacionais	38
5.1.4	Satisfação Percebida (SEQ)	39

5.2	Consolidação da Métrica Unificada de Usabilidade (SUM)	40
5.2.1	Análise do Cenário Otimizado (Grupo de Sucesso)	42
5.2.2	Análise da Escala de Usabilidade Subjetiva (SUS)	42
5.2.3	Correlação entre os Indicadores Objetivos (SUM) e Subjetivos (SUS)	44
5.2.4	Dificuldades Observadas, Impacto na Aprendizagem e Melhorias Propostas	46
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	Referências	50
	APÊNDICE A – PROTOCOLO DETALHADO DE VALIDAÇÃO E	
	INSTRUMENTOS DE COLETA	52
A.1	Protocolo de Aplicação do Teste	52
A.2	Coleta de Dados para o Método SUM	53
A.3	Questionário de Satisfação Pós-Tarefa (componente SUM)	54
A.4	Questionário Escala de Usabilidade de Sistema (SUS)	55
A.5	Cálculo e Interpretação do Escore SUS	56
A.6	Triangulação e Análise Integrada dos Resultados	58

1 Introdução

O avanço contínuo da Indústria 4.0 tem transformado significativamente o cenário da Automação e do Controle de Processos, exigindo que os futuros profissionais dominem não apenas os fundamentos teóricos, mas também as habilidades práticas necessárias para operar Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). No entanto, essa evolução tecnológica traz consigo uma densidade de informações que pode sobrecarregar o estudante. Como aponta Sweller (2002), o excesso de elementos interativos, a má organização dos materiais de apoio e a fragmentação das informações nos materiais podem gerar uma carga cognitiva extrínseca que dificulta a construção de esquemas mentais sólidos.

Estudos recentes destacam que a integração de práticas laboratoriais ao ensino teórico é fundamental, mas sua eficácia depende diretamente da forma como a informação é apresentada. Em disciplinas como Informática Industrial, o aluno frequentemente enfrenta o “Efeito da Atenção Dividida”, sendo forçado a integrar mentalmente manuais de *hardware*, interfaces de *software* e roteiros de aula fisicamente separados. Segundo Mayer (2002), essa fragmentação prejudica o aprendizado, pois obriga o cérebro a gastar recursos em busca de informações em vez de focar na resolução do problema técnico.

Diante desse contexto, o presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma apostila didática integrada para a disciplina de Informática Industrial da UFOP. O material proposto diferencia-se por aplicar o Princípio da Contiguidade Espacial de Mayer (2002), unificando teoria e aplicação direta no uso dos *softwares* MasterTool ALTUS S.A. (2024a) e Elipse E3 ELIPSE SOFTWARE (2025) em conjunto com a maleta didática Training Box Duo, da Altus ALTUS S.A. (2024b). A intenção é que o material atue como um “organizador prévio” Ausubel (2000), facilitando a ancoragem de conceitos complexos de automação por intermédio de um fluxo de aprendizado contínuo.

1.1 Justificativas e Relevância

A justificativa deste trabalho reside na necessidade de potencializar o processo de ensino-aprendizagem na disciplina de Informática Industrial, integrando ferramentas tecnológicas de ponta à prática pedagógica. A relevância da proposta manifesta-se na introdução de um material de apoio estruturado para o *software* MasterTool e a maleta Training Box Duo, atuando como um facilitador estratégico para a consolidação de competências técnicas. Ao oferecer um suporte organizado e dedicado, o projeto otimiza o acompanhamento das aulas laboratoriais, mas também promove o protagonismo e a autonomia dos estudantes na programação de CLPs. Dessa forma, o trabalho contribui

para as metodologias de ensino no curso, proporcionando uma transição mais fluida entre a teoria e a prática profissional, garantindo uma melhora no aproveitamento acadêmico e técnico.

1.2 Objetivo

Elaborar uma solução educacional para a disciplina de Informática Industrial, estruturada para a melhora do processo de ensino-aprendizagem e da autonomia dos estudantes.

1.3 Organização e estrutura

Este trabalho está organizado em seis capítulos fundamentais, estruturados de forma a conduzir o leitor desde a fundamentação teórica até a validação prática do material didático desenvolvido.

- O Capítulo 1 (Introdução) apresenta a contextualização do tema, a proposta de centralização de múltiplos manuais técnicos na disciplina Informática Industrial, os objetivos e a justificativa para a criação de uma apostila integrada;
- O Capítulo 2 (Referencial Teórico) estabelece as bases conceituais, abordando tanto os aspectos técnicos da automação industrial quanto as teorias de carga cognitiva e aprendizagem multimídia que norteiam o *design* do material;
- O Capítulo 3 (Metodologia) detalha os procedimentos técnicos adotados, caracterizando a pesquisa-ação e descrevendo as ferramentas e métricas de usabilidade (SUM e SUS) utilizadas para validar o projeto;
- No Capítulo 4 (Desenvolvimento do Material Didático), é apresentada a construção da apostila propriamente dita, detalhando os módulos de *hardware*, programação e supervisão;
- O Capítulo 5 (Resultados e Discussão) expõe os dados coletados na validação com os alunos, discutindo o impacto da apostila na redução da carga cognitiva;
- O Capítulo 6 (Considerações Finais) apresenta as conclusões da pesquisa, discute as limitações encontradas e propõe direcionamentos para trabalhos futuros.

1.4 Declaração sobre o uso de Inteligência Artificial

Durante a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial generativa exclusivamente como suporte auxiliar para revisão ortográfica, aprimoramento da redação, sugestões de estrutura textual e adequação da linguagem acadêmica.

2 Revisão de literatura

2.1 Sistemas de Automação e a Maleta Altus Training Box

A automação industrial moderna fundamenta-se na integração de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e sistemas de Interface Homem-Máquina(IHM). De acordo com a [ALTUS S.A. \(2024b\)](#), a maleta Training Box Duo é projetada para simular ambientes industriais reais, integrando o *hardware* ao *software* de programação MasterTool. No entanto, a complexidade técnica desses manuais é voltada para profissionais experientes, o que gera uma barreira inicial para o estudante de graduação.

2.2 Teoria da Carga Cognitiva

A base pedagógica e estrutural deste trabalho reside nos pressupostos da Teoria da Carga Cognitiva, formulada originalmente por John Sweller. Conforme aponta [Sweller \(2002\)](#), a memória de trabalho humana possui uma capacidade estritamente limitada no armazenamento e processamento simultâneo de novas informações, podendo ser facilmente sobrecarregada por elementos irrelevantes ou mal organizados, o que caracteriza a carga cognitiva extrínseca. De acordo com [Paas, Renkl e Sweller \(2003\)](#), as inovações no *design* instrucional devem focar na otimização dos recursos mentais dos estudantes, direcionando o esforço cognitivo para a carga relevante ou germânica, que é aquela que efetivamente contribui para a construção e a automatização de esquemas mentais duradouros na memória de longo prazo.

Para o contexto específico do Laboratório de Informática Industrial, o fenômeno mais crítico identificado durante a condução das aulas práticas é o chamado Efeito da Atenção Dividida. Como bem adverte [Sweller \(2002\)](#), esse efeito prejudicial ocorre quando o estudante é forçado a integrar mentalmente múltiplas fontes de informação que estão separadas no espaço ou no tempo, tais como manuais de fabricantes, interfaces de *software* e roteiros de bancada fisicamente distintos. Essa necessidade contínua de alternar o foco visual e mental gera uma carga cognitiva extrínseca elevada, que não contribui para a aprendizagem da lógica de automação em si, mas é consumida pela busca e integração de informações fragmentadas, justificando o desenvolvimento de um material didático centralizado e unificado.

Estudos recentes no ensino de engenharia ([Silva e Santos \(2023\)](#)) apontam que o desenvolvimento de habilidades de programação em ambientes de automação industrial é altamente propenso a gerar sobrecarga cognitiva intrínseca e síncrona. Isso ocorre devido à

necessidade do estudante gerenciar simultaneamente a sintaxe da linguagem (ex: Ladder), a lógica de intertravamento do processo e o mapeamento físico de variáveis, validando a necessidade de designs instrucionais preditivos e sequenciais.

2.3 Teoria da Aprendizagem Multimídia e o Princípio de Mayer

Para solucionar o problema estrutural da atenção dividida no ambiente laboratorial, esta fundamentação ampara-se nos pressupostos da Teoria da Aprendizagem Multimídia desenvolvida por Richard Mayer. De acordo com [Mayer \(2002\)](#), o aprendizado humano torna-se significativamente mais eficaz e profundo quando palavras (sejam em formato de textos escritos ou comandos verbais) e imagens (ilustrações, diagramas ou capturas de tela) correspondentes são apresentadas próximas umas das outras no espaço e no tempo, o que consolida o chamado Princípio da Contiguidade Espacial. A dispersão física de manuais técnicos e roteiros de aula gera uma sobrecarga que pode ser mitigada ao unificar o conteúdo descritivo e o suporte visual em um único fluxo contínuo de leitura, permitindo que o estudante processe os novos estímulos de maneira integrada e natural.

Conforme postulam [Mayer e Moreno \(2003\)](#), a arquitetura da memória de trabalho humana possui canais duplos independentes e de capacidade limitada para o processamento de informações visuais e auditivas. Quando o material didático oferecido força o estudante a alternar constantemente o foco de sua atenção entre múltiplas fontes dispersas e fisicamente separadas, ocorre uma sobrecarga desnecessária dos recursos cognitivos disponíveis. Na arquitetura de informação desenvolvida para esta apostila, o Princípio da Contiguidade Espacial foi aplicado de forma direta: as capturas de tela dos ambientes MasterTool IEC e Elipse E3 foram estrategicamente posicionadas de maneira adjacente e integrada aos respectivos textos de instrução de procedimento técnico. Essa disposição ergonômica reduz a necessidade de varredura visual e busca por informações complementares, liberando a capacidade de processamento de curto prazo exclusivamente para a construção de esquemas e modelos mentais coerentes sobre a lógica de automação industrial implementada na bancada.

Complementarmente, a estruturação visual do material didático incorpora o Princípio da Sinalização (ou Evidenciação) também sistematizado por [Mayer \(2002\)](#). Este princípio estabelece que o aprendizado é melhor quando são inseridos elementos visuais que guiam a atenção para os aspectos cruciais e centrais do conteúdo em exibição. Na transposição didática executada neste projeto, as imagens inseridas não cumprem papel meramente ilustrativo; elas receberam tratamentos e edições gráficas dedicadas, tais como setas indicativas de direção, caixas de contorno e realces cromáticos aplicados nos menus e botões específicos onde o aluno deve interagir. Essa abordagem instrucional funciona como um filtro preventivo de atenção, mitigando a carga cognitiva extrínseca gerada por

interfaces complexas de *software* e acelerando o processo de familiarização técnica com as ferramentas de engenharia de controle.

2.4 Aprendizagem Significativa e Organizadores Prévios

A estruturação do conteúdo também é amparada por [Ausubel \(2000\)](#), que define a aprendizagem significativa como o processo de ancoragem de novos conceitos a conhecimentos já existentes. A apostila atua como um organizador prévio, fornecendo uma estrutura lógica (desde o histórico do CLP até um projeto mais complexo) que serve de “ponte” cognitiva para o estudante. De acordo com [Ausubel \(2000\)](#), essa organização hierárquica facilita a retenção a longo prazo e a transferência do conhecimento para situações práticas de laboratório.

Diante do panorama teórico exposto, que articula com rigor as restrições da arquitetura cognitiva humana descritas por [Sweller \(2002\)](#) e [Mayer \(2002\)](#) com a necessidade de uma infraestrutura técnica integrada em automação industrial, consolida-se a base científica para a reestruturação dos guias de laboratório. A otimização do processo de aprendizagem identificado durante as atividades laboratoriais depende diretamente da aplicação prática dessas diretrizes educacionais no desenho de ferramentas voltadas ao protagonismo discente. Dessa forma, o capítulo subsequente apresenta detalhadamente a metodologia de pesquisa-ação adotada para a modelagem do material didático, bem como descreve o plano experimental e os critérios estatísticos baseados nos métodos SUM e SUS que foram utilizados para validar a eficácia do produto resultante em campo.

3 Metodologia

Neste capítulo, apresentam-se os procedimentos metodológicos que orientam o desenvolvimento e a validação do material didático. A estrutura abrange desde a classificação da pesquisa até os instrumentos de coleta e análise de dados utilizados no ambiente laboratorial.

3.1 Caracterização do Trabalho

Quanto à sua finalidade, classifica-se como aplicada. Alinhada à dinâmica de ensino no Laboratório de Informática Industrial da UFOP, o estudo busca produzir conhecimentos voltados a uma evolução prática: a unificação e a otimização do fluxo de manuais e roteiros na disciplina. O objetivo central é o desenvolvimento de uma solução educacional que utilize a Teoria da Carga Cognitiva Sweller (2002) para o processo de ensino-aprendizagem, para melhor aproveitamento do esforço mental dos estudantes durante as práticas de automação.

No que se refere à abordagem do assunto, o trabalho define-se como uma pesquisa de natureza quali-quantitativa (métodos mistos). A opção por esta estratégia fundamenta-se na premissa de que o uso conjunto de ambas as formas de investigação “proporciona uma maior compreensão dos problemas de pesquisa” do que o uso de cada uma isoladamente CRESWELL (2010, p.238). No contexto deste estudo, a vertente qualitativa manifesta-se pela observação direta e sistemática do comportamento dos discentes no laboratório, enquanto a abordagem quantitativa é estabelecida pela aplicação dos métodos Métrica de Usabilidade Única do inglês *Single Usability Metric* (SUM) e Escala de Usabilidade do Sistema do inglês *System Usability Scale* (SUS). Essa convergência permite que os detalhes qualitativos das dificuldades dos alunos sejam validados e mensurados por tendências numéricas de desempenho e satisfação.

Em relação aos procedimentos técnicos, adota-se a pesquisa-ação. Nesta modalidade, o pesquisador assume um papel ativo no ambiente de estudo, interagindo diretamente com os sujeitos da pesquisa no laboratório. Segundo a fundamentação deste método, o processo ocorre de forma iterativa, permitindo que os roteiros didáticos sejam testados, avaliados e refinados em tempo real. Dessa forma, a apostila resultante não é apenas um produto estático, mas uma ferramenta moldada a partir das oportunidades de aprimoramento identificadas durante as atividades laboratoriais no Departamento de Engenharia de Controle e Automação (DECAT).

3.2 Materiais e Ferramentas

Os recursos de *hardware* utilizados como base para o desenvolvimento e validação do material didático centram-se na maleta Training Box Duo, da fabricante Altus. Este sistema consiste em uma solução compacta projetada para simular ambientes de automação industrial, tendo como unidade central o Controlador Programável (CP) DU351. O equipamento dispõe de uma Interface Homem-Máquina (IHM) incorporada com visor gráfico de 3,2”, além de uma arquitetura de E/S que inclui entradas e saídas digitais, canais analógicos e suporte a protocolos de comunicação como o Modbus RTU. Segundo o fabricante, a linha foi desenvolvida especificamente para “prover soluções completas e compactas para uso em laboratórios de ensino e pesquisa”[ALTUS S.A. \(2024b\)](#).

No âmbito da programação, o trabalho utiliza o *software* MasterTool IEC, que segue a norma internacional IEC 61131-3. Esta ferramenta possibilita o desenvolvimento de lógicas em seis linguagens distintas (Diagrama de Escada, Diagrama de Blocos de Função, Texto Estruturado, Lista de Instruções, Gráfico de Função Sequencial e Gráfico de Função Contínua), oferecendo a flexibilidade pedagógica necessária para a disciplina. Um diferencial estratégico é o recurso de simulação nativo, que permite a prática e a execução de testes mesmo “quando não utilizando a Training Box Duo”[ALTUS S.A. \(2024a\)](#). A integração desta ferramenta visa converter a densidade técnica das funcionalidades do *hardware* em um fluxo de aprendizado contínuo e acessível ao discente.

Finalmente, utiliza-se o *software* Elipse E3 como plataforma de sistema supervisório (SCADA). Diferente da interface local da maleta, o Elipse E3 atua no monitoramento de nível superior, permitindo a comunicação com o controlador para a gerência de variáveis de processo. Conforme a documentação técnica, o sistema possibilita a criação de telas sinóticas, o gerenciamento de alarmes e o armazenamento de dados em históricos, oferecendo “escalabilidade e conectividade para diversas aplicações de automação”[ELIPSE SOFTWARE \(2025\)](#). Esta ferramenta é fundamental para que o aluno compreenda a integração entre o controle de campo e a supervisão em tempo real no ambiente da disciplina de Informática Industrial.

3.3 Procedimentos para o Desenvolvimento do Material Didático

O desenvolvimento da apostila fundamentou-se no princípio da transposição didática, adaptando o saber técnico complexo dos diferentes materiais para um saber pedagógico acessível, ensinável e compatível com os objetivos e o cronograma da disciplina de Informática Industrial. Para isso, utilizou-se a Teoria da Carga Cognitiva de [Sweller \(2002\)](#) como filtro, focando nos elementos essenciais para a operação da maleta Training Box Duo. O objetivo foi garantir que o material atuasse como um facilitador, evitando a sobrecarga mental e permitindo que o estudante direcione seu esforço para a resolução de

problemas práticos de automação.

A estruturação dos roteiros foi concebida para integrar teoria e ação, visando uma aprendizagem mais profunda e a segurança do aluno no laboratório. Dessa forma, ao alinhar as instruções do material com a execução na bancada Altus, o roteiro promove uma possibilidade de desempenho superior, respeitando o Princípio da Contiguidade de Mayer (2002).

“...a experiência indica que a aprendizagem é mais significativa com as metodologias ativas de aprendizagem. Além disso, os alunos que vivenciam esse método adquirem mais confiança em suas decisões e na aplicação do conhecimento em situações práticas.” BARBOSA (2013, p.56)

Por fim, adotou-se o ciclo iterativo da pesquisa-ação para o refinamento do produto final. Durante as sessões laboratoriais na disciplina de Informática Industrial, o autor atuou de forma participante, observando as dificuldades de interação dos discentes com o *hardware* e o *software* MasterTool. Esse *feedback* qualitativo permitiu ajustes contínuos na redação dos procedimentos e na clareza das ilustrações. Este processo assegurou que a versão final da apostila fosse validada pela realidade de campo, resultando numa ferramenta tecnicamente precisa e pedagogicamente eficiente para o ensino de automação.

3.3.1 Seleção de Conteúdo e Requisitos Técnicos

A seleção dos conteúdos programáticos que compõem o material didático fundamentou-se em uma análise criteriosa do Plano de Ensino da disciplina de Informática Industrial. O processo priorizou competências essenciais para a formação do engenheiro, como a lógica de programação *Ladder*, o tratamento de variáveis analógicas e a configuração de *drivers* de comunicação, garantindo a interoperabilidade entre o nível de campo e a supervisão. A intenção foi estruturar uma base teórica robusta que suporte a transição para a prática laboratorial, alinhando o ensino às demandas tecnológicas da Indústria 4.0 e às competências presente na ementa da matéria de informática industrial.

O critério primordial para a organização dos tópicos residiu na necessidade de acolher e nivelar discentes que não possuem contato prévio com Controladores Lógicos Programáveis (CLP), linguagens da norma IEC 61131-3 ou sistemas supervisórios SCADA. Dessa forma, aplicou-se o princípio da transposição didática para converter fonte de conhecimento dispare, em roteiros de aprendizagem lógica e sequencial. Esse encadeamento visa proporcionar ao estudante iniciante a construção de esquemas mentais sólidos, permitindo que ele progrida desde o reconhecimento físico do *hardware* até o desenvolvimento autônomo de projetos integradores de complexidade industrial.

No âmbito dos requisitos técnicos, estabeleceram-se as condições mínimas de *software* e *hardware* necessárias para assegurar a plena replicabilidade dos experimentos

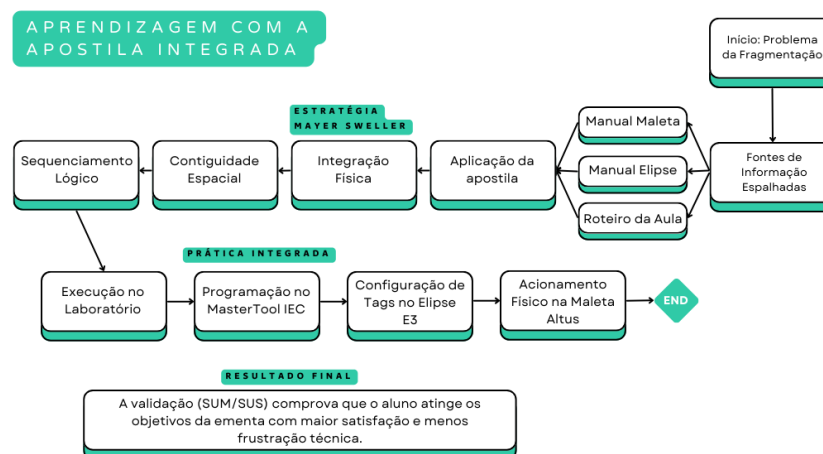
descritos. É imperativa a utilização dos ambientes de programação MasterTool IEC e de supervisão Elipse E3, devidamente integrados às bibliotecas de comunicação específicas da linha de controladores Altus. A padronização dessas ferramentas visa mitigar erros de compatibilidade durante as sessões práticas, assegurando que o foco cognitivo do aluno permaneça na resolução de problemas de automação e não em obstáculos técnicos decorrentes de configurações inconsistentes de *software*.

Quanto à infraestrutura física, o material pressupõe o emprego da maleta didática Training Box Duo, equipada com o Controlador Programável DU351. Os requisitos de conectividade incluem a parametrização rigorosa de endereços IP e máscaras de sub-rede, habilitando a comunicação via protocolos Modbus RTU ou TCP/IP entre o controlador físico e a estação de trabalho. Tal rigor na configuração de rede é fundamental para que o estudante compreenda a hierarquia da automação e desenvolva autonomia no comissionamento de sistemas, simulando com precisão o cenário de operação e monitoramento de processos encontrado no cotidiano da engenharia de controle.

3.3.2 Design Instrucional e Arquitetura de Informação

O desenvolvimento da arquitetura de informação do material didático fundamentou-se em estratégias de design instrucional voltadas à redução da carga cognitiva extrínseca, conforme sistematizado no fluxograma de aprendizagem apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da apostila



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Este diagrama ilustra a transição de um conjunto de informações distribuídas em diferentes materiais para uma estrutura integrada, onde a apostila unifica manuais de

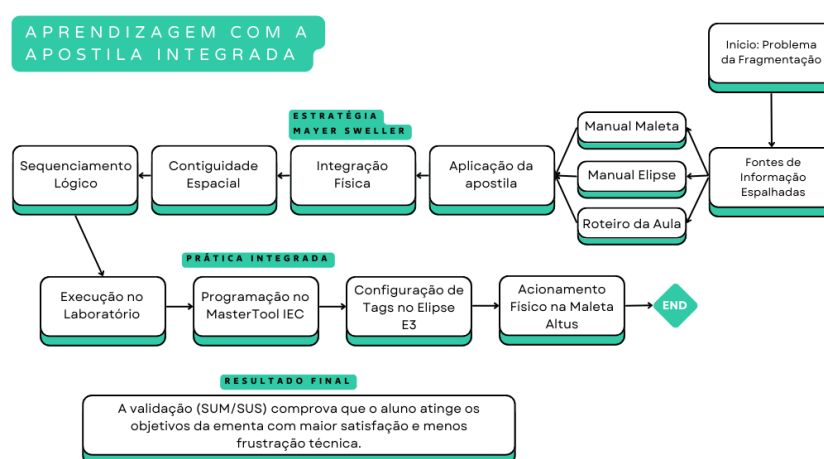
hardware, *software* e roteiros de aula. A aplicação dessas estratégias visa transformar o processo de aprendizagem em um fluxo contínuo, permitindo que a execução laboratorial ocorra de forma lógica e sequencial, desde a programação no ambiente MasterTool IEC até o acionamento físico na maleta didática.

A estruturação visual das instruções foi norteada pelo Princípio da Contiguidade Espacial de Richard Mayer, que busca mitigar os danos causados pela fragmentação do conteúdo. A necessidade desta abordagem é fundamentada pela definição clássica do impacto negativo da dispersão de informações no aprendizado, conforme descrito pelo autor:

“Sweller e seus colegas usam o termo efeito da atenção dividida para se referir a qualquer prejuízo na aprendizagem causado pelo fato de os alunos terem que integrar fontes díspares de informação.” Mayer (p.119 2002, tradução nossa.)

No design da apostila, capturas de tela dos *softwares* MasterTool e Elipse E3 foram estrategicamente posicionadas adjacentes às descrições dos procedimentos, combatendo o efeito supracitado, mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Iniciando aplicação



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Ao evitar que o discente alterne constantemente o foco entre múltiplos documentos e interfaces, preserva-se a capacidade da memória de trabalho para o processamento de conceitos essenciais da lógica de automação industrial. Esse cuidado com a carga cognitiva é o que diferencia o material didático de manuais puramente técnicos, garantindo que o esforço mental do aluno seja direcionado exclusivamente à resolução da atividade proposta.

Complementarmente, a organização macroscópica do conteúdo utilizou o conceito de “organizadores prévios” proposto por Ausubel (2000). Esta técnica consiste na apresentação de ideias âncoras mais genéricas e inclusivas que servem de ponte cognitiva entre o conhecimento prévio do aluno e os novos conteúdos técnicos de complexidade crescente. Ao iniciar com conceitos fundamentais de *hardware* e evoluir progressivamente para projetos integradores, como o projeto final, a apostila fornece uma estrutura hierárquica que facilita a ancoragem e a retenção do conhecimento a longo prazo. Essa progressão assegura que o estudante desenvolva a autonomia necessária para aplicar soluções de engenharia em cenários reais.

A integração física entre a teoria descrita no material e a prática na maleta Altus consolida uma metodologia ativa de aprendizagem, conforme detalhado na etapa de “Prática Integrada” do fluxograma de desenvolvimento. O alinhamento entre o design instrucional e a arquitetura de informação garante que o produto educacional não seja apenas um manual de consulta, mas um mediador pedagógico capaz de aumentar a satisfação e reduzir a frustração técnica do discente. Essa abordagem rigorosa permite que os objetivos da ementa sejam atingidos com maior eficiência, possibilitando a avaliação da eficácia da apostila integrada por meio dos métodos de usabilidade propostos.

3.4 Aplicação dos Princípios de Usabilidade (Método SUM e SUS)

A validação do material didático proposto foi estruturada a partir de uma abordagem mista, combinando indicadores de desempenho técnico com a percepção subjetiva de usabilidade dos usuários. Para assegurar a eficácia da apostila no contexto da disciplina de Informática Industrial, foram adotados dois métodos complementares de avaliação: a métrica SUM e a escala SUS. Enquanto a primeira prioriza na precisão e eficiência da execução das tarefas laboratoriais, a segunda mensura o grau de satisfação e a facilidade de interface percebida pelo discente. Essa combinação permite uma análise holística, garantindo que o material seja tecnicamente preciso e pedagogicamente acessível para alunos iniciantes.

3.4.1 Métrica Única de Usabilidade (SUM)

O método Métrica Única de Usabilidade (SUM), proposto por Kindlund (2005), surge como uma solução para a fragmentação das métricas de usabilidade, que tradicionalmente analisam eficácia, eficiência e satisfação de forma isolada. A premissa central do modelo é a padronização dessas variáveis distintas através de técnicas estatísticas de Six Sigma, permitindo que dados com unidades diferentes — como tempo em segundos, taxas de erro e escalas de satisfação — sejam combinados em um único escore contínuo. No contexto desta pesquisa, o SUM possibilita uma avaliação objetiva de quão bem o discente interage

com a apostila, fornecendo uma visão sumarizada do desempenho global nas tarefas de programação e configuração industrial.

A arquitetura do SUM baseia-se no cálculo de escores-Z para cada um dos quatro componentes principais: taxa de conclusão da tarefa (eficácia), tempo de execução (eficiência), taxa de erros e satisfação pós-tarefa. Ao converter esses valores experimentais em uma escala comum, o método mitiga as distorções causadas por métricas com variâncias desiguais, garantindo que cada aspecto da usabilidade contribua de forma equilibrada para o resultado final. Conforme explicam [Sauro e Lewis \(2016\)](#), a aplicação de técnicas estatísticas baseadas na distribuição normal padrão permite a padronização e a comparação direta de variáveis de naturezas completamente distintas, transformando dados brutos de desempenho e escalas ordinais subjetivas em um índice métrico unificado e robusto para análise de usabilidade.

Diferente de abordagens puramente qualitativas, o SUM oferece uma variável quantitativa que pode ser utilizada em testes de hipóteses e análises de regressão, conferindo maior robustez científica aos resultados do TCC. Ao aplicar este método, é possível identificar não apenas se o material didático é “bom” de forma genérica, mas exatamente em qual dimensão da usabilidade ele apresenta maior impacto. Assim, a métrica SUM serve como um termômetro técnico da eficácia do design instrucional, assegurando que o objetivo pedagógico de nivelar alunos sem experiência prévia em CLPs seja atingido com uma margem de confiança estatística comprovada.

3.4.2 Escala de Usabilidade de Sistema (SUS)

Como complemento à análise de desempenho, utilizou-se a System Usability Scale (SUS), um instrumento psicométrico desenvolvido por [Brooke \(1995\)](#) para mensurar a satisfação subjetiva e a facilidade de uso em contextos específicos. Conforme o autor destaca [Brooke \(1995\)](#), a usabilidade não é uma qualidade absoluta, mas sim apropriada ao propósito de um artefato dentro de um contexto de uso. No caso deste trabalho, o SUS permite capturar a percepção dos discentes sobre a interação com o material didático e os *softwares* de automação, oferecendo uma medida de “qualidade de uso” que é independente da tecnologia utilizada, mas sensível à experiência do aluno.

O questionário é composto por dez itens que alternam entre afirmações positivas e negativas, reduzindo o viés de resposta e forçando o avaliado a ler cada afirmação com atenção. Os alunos respondem utilizando uma escala Likert de cinco pontos, variando de “Discordo Totalmente”(1) a “Concordo Totalmente”(5). Este método foi selecionado para a validação da apostila por ser uma ferramenta de baixo custo e alta fiabilidade, capaz de fornecer um escore único que reflete se o design instrucional, fundamentado nos princípios de Mayer e Ausubel, conseguiu mitigar a carga cognitiva e proporcionar uma aprendizagem segura e confiante na maleta Training Box Duo.

A pontuação final do SUS é calculada por meio de uma normalização que converte a soma das respostas numa escala de 0 a 100. Segundo Brooke, este valor não representa uma percentagem, mas sim um escore que pode ser comparado com médias de mercado para classificar a usabilidade do sistema. Para o sucesso deste TCC, espera-se que a apostila atinja escores que a posicionem como um material de alta aceitabilidade, garantindo que o estudante de engenharia consiga focar-se na lógica de controle e automação, em vez de desperdiciar recursos mentais desnecessários a tentar compreender a estrutura do manual ou as interfaces de *software*.

3.5 Plano de Validação e Teste com Usuários

O processo de validação empírica do material didático foi estruturado para reproduzir com fidelidade as condições operacionais do ambiente de laboratório da disciplina de Informática Industrial, garantindo o rigor e a isenção na coleta de dados. Os testes foram conduzidos com uma amostra de 18 estudantes regularmente matriculados no curso de Engenharia de Controle e Automação da UFOP que não possuíam experiência prévia comprovada com o *software* MasterTool IEC, assegurando que o material fosse avaliado sob a perspectiva estrita do seu público-alvo. Para mitigar interferências exógenas e isolar variáveis que pudessem comprometer a fidedignidade dos indicadores, estabeleceu-se um rito experimental padronizado e sequencial. O percurso completo de aplicação das sessões, as diretrizes cirúrgicas fornecidas aos participantes e os formulários físicos de anotação de campo encontram-se detalhados integralmente no [Apêndice A](#) deste trabalho.

A arquitetura do teste foi dividida em fases consecutivas que permitiram o cruzamento entre o desempenho prático dos voluntários e a avaliação subjetiva do ecossistema de aprendizagem. Inicialmente, na etapa de execução cronometrada, os discentes realizaram de forma autônoma o Projeto Integrador da Estufa atuando diretamente sobre a maleta Altus Training Box Duo (CPU DU351), enquanto o avaliador registrou a Taxa de Conclusão, o tempo de execução e a frequência de erros lógicos ou de pinagem. Imediatamente após o encerramento da atividade, aplicou-se o questionário de satisfação pós-tarefa de três itens baseados na escala Likert, cujas respostas individuais foram normalizadas de acordo com o modelo estatístico proposto por [Silva e Santos \(2023\)](#) para alimentar a Métrica Única de Usabilidade (*Single Usability Metric* - SUM).

Por fim, após o encerramento de todas as dinâmicas de bancada, os estudantes responderam de forma anônima e digital ao questionário psicométrico clássico System Usability Scale (SUS), desenvolvido originalmente por [Brooke \(1995\)](#). As dez afirmações alternadas do SUS permitiram mensurar o nível global de usabilidade e o Grau de Aceitabilidade do produto instrucional sob a perspectiva ergonômica e cognitiva do utilizador. A etapa final do plano experimental consistiu na triangulação integrada dos

dados, cruzando os índices paramétricos objetivos obtidos pelo SUM com a percepção subjetiva de satisfação avaliada pelo SUS. Esse arranjo metodológico misto viabilizou um diagnóstico robusto da apostila, fornecendo as evidências matemáticas necessárias para comprovar a eficácia do *design* instrucional na mitigação da carga cognitiva extrínseca.

4 Desenvolvimento do Material Didático

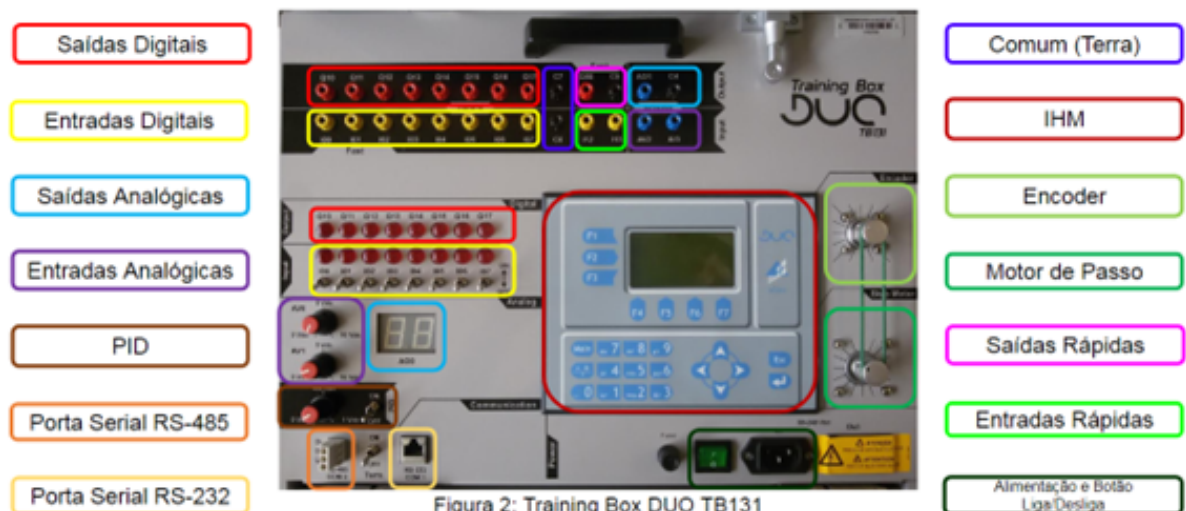
4.1 Módulo de *hardware*: A Maleta Training Box Duo

O primeiro módulo instrucional do produto educacional é dedicado à desmistificação e ao reconhecimento estrutural do *hardware* que compõe a maleta didática Altus Training Box Duo (Modelo TB131). Na dinâmica laboratorial tradicional, o discente frequentemente experimenta um aumento na carga cognitiva intrínseca ao se deparar com um equipamento industrial real repleto de bornes, chaves e barramentos sem uma correlação lógica imediata com a memória do controlador. Para mitigar essa barreira inicial de aprendizado, a apostila introduz uma arquitetura de informação focada no mapeamento visual simétrico, estabelecendo uma correspondência direta entre cada elemento físico acoplado ao painel da maleta e o seu respectivo endereço de operador lógico no ambiente de programação.

O material didático detalha minuciosamente a topologia física do equipamento, dividindo-a didaticamente em zonas de interface síncronas que reproduzem o ecossistema de uma planta industrializada compacta.

Conforme ilustrado na Figura 3, a apostila setoriza visualmente o painel frontal da maleta em blocos coloridos isolados, mapeando as dezesseis entradas digitais e saídas digitais a relé, as interfaces analógicas de tensão operando na faixa padrão de 0 a 10 V, e as conexões rápidas dedicadas ao acoplamento do *encoder* incremental e do motor de passo. Essa estratégia de *design* instrucional atua de forma preventiva na redução da ansiedade operacional do estudante, fornecendo uma base sólida de segurança para o manuseio dos bornes elétricos e para a posterior fiação dos circuitos lógicos nas bancadas de teste.

Figura 3 – Componentes da maleta Training Box Duo da Altus



Fonte elaborado pelo autor.

Adicionalmente, o texto da apostila dedica atenção rigorosa aos aspectos de segurança de *hardware* e preservação do patrimônio tecnológico do laboratório, traduzindo as especificações severas do manual do fabricante para uma linguagem acessível à graduação. O roteiro instrui o aluno sobre a obrigatoriedade do uso do borne de Comum (Terra) como referência elétrica mandatória para o fechamento de malhas de sinal, além de alertar sobre os limites de corrente suportados pelas saídas digitais para evitar a queima de canais por curto-circuito. Ao associar os potenciômetros físicos do bloco PID diretamente às palavras de entrada analógica (%IW4 a %IW7), o material atua como um organizador prévio ideal, preparando cognitivamente o estudante para realizar a transposição de variáveis físicas do mundo real em dados numéricos manipuláveis via *software*, mostrado na Figura 4 a seguir:

Figura 4 – Níveis de tensão elétrica da maleta

Saídas Digitais

Pontos de saída que enviam sinais digitais (0 ou 1) para atuar sobre dispositivos como relés, lâmpadas, motores, etc. Representam as ações do CLP no processo.

Entradas Digitais

Pontos que recebem sinais digitais de sensores ou botões. São os sinais de entrada que o CLP usa para tomar decisões.

Saídas Analógicas (AO)

Geram sinais variáveis (ex: 0 a 10 V) para controlar dispositivos como válvulas proporcionais, inversores, etc.

Entradas Analógicas

Recebem sinais variáveis (ex: de 0 a 10 V ou 4 a 20 mA) de sensores como termopares, transmissores de pressão, etc.

Comum (Terra)

Ponto comum de referência elétrica para as entradas e saídas. Essencial para o funcionamento correto do sistema.

Fonte elaborado pelo autor.

4.2 Módulo de Programação: Ambiente MasterTool IEC

O segundo módulo do recurso didático propõe a transposição instrucional das etapas de engenharia de *software* voltadas à configuração e programação lógica da CPU DU351. Como a densidade técnica dos manuais técnicos dos fabricantes, frequentemente sobrecarrega o estudante iniciante devido ao excesso de informação, a arquitetura da apostila buscou linearizar o fluxo de inicialização do *software* MasterTool IEC. O material guia o discente desde a execução do aplicativo até a abertura obrigatória do arquivo

de *template* nominal denominado `Modelo_DU350_DU351_v110.pro`. Essa abordagem atua preventivamente na redução da carga cognitiva extrínseca, garantindo que as tabelas de mapeamento e as bibliotecas nativas de comunicação do fabricante já estejam devidamente pré-carregadas na árvore de recursos da aplicação.

Para combater o Efeito da Atenção Dividida, o *design* instrucional do material utiliza capturas de tela adjacentes e tratadas graficamente com molduras de realce na cor vermelha, alinhando-se ao Princípio da Contiguidade Espacial. O texto orienta o operador de forma imperativa a clicar sobre a pasta de Unidades de Organização de Programa (*POUs* - *Program Organisation Units*), gerando uma nova POU do tipo Programa estruturada na linguagem de Diagrama Ladder (*LD*). É dada ênfase especial ao mecanismo de declaração de variáveis discretas do tipo booleano (**BOOL**), detalhando o preenchimento dos campos lógicos de classe (**VAR**), nome simbólico e associação com os endereços físicos de *hardware* da maleta, tais como as chaves de entrada e sinalizadores visuais.

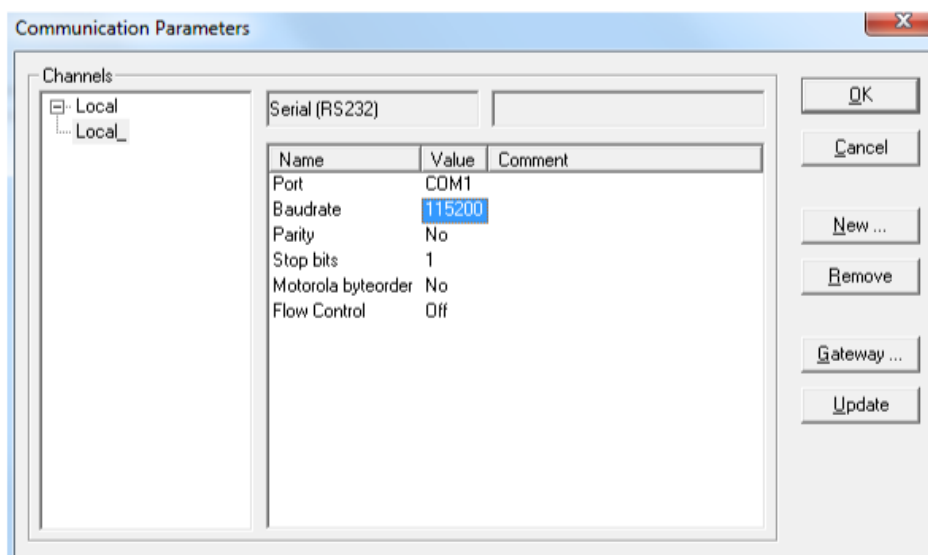
Posteriormente, a apostila aborda um dos principais desafios de comissionamento de bancada, uma das etapas que tradicionalmente demanda maior atenção dos estudantes, identificados em sessões laboratoriais anteriores: a parametrização dos canais de comunicação serial. Conforme apresentado na Figura 5, o aluno é instruído a navegar pelo menu superior através do caminho dinâmico **Comunicação > Parâmetros de comunicação...** para configurar a interface física de acoplamento do computador com a maleta didática. O material detalha a necessidade de ajustar o identificador da porta lógica de comunicação para o canal serial **COM1** e forçar a taxa de transmissão de dados (*Baudrate*) para o patamar de controle de 115200 bps por meio de cliques duplos na interface gráfica. Esse detalhamento preventivo blinda o ambiente de teste contra erros de sincronismo, permitindo o correto *login* e carregamento do código compilado.

Por fim, o módulo culmina na contextualização e execução do primeiro circuito clássico de automação discreta: a partida direta de uma carga com retenção, conhecido industrialmente como circuito de selo ou *Latch*, como visto na Figura 6. A apostila realiza a ancoragem cognitiva desse novo conceito conectando-o aos diagramas elétricos tradicionais baseados em contadores e botoeiras elétricas. A transposição didática demonstra graficamente como dispor em paralelo o contato normalmente aberto da saída digital **SELO** (**%QX1.0**) junto ao botão de partida **BTON** (**%IX0.0**), posicionando o contato normalmente fechado de parada **BTOFF** (**%IX0.1**) em série como intertravamento de segurança. A explicação textual detalha as três fases do fluxo elétrico virtual (Início, Ativação e Desligamento), garantindo que o estudante compreenda o determinismo e a natureza sequencial da varredura executada pela CPU do CLP.

Figura 5 – Guia de comunicação da maleta e MasterTool

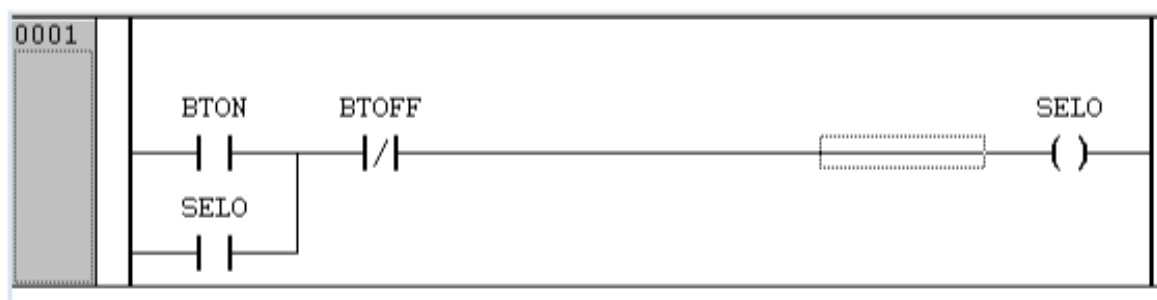
37

Basta seguir o caminho Comunicação > Parâmetros de comunicação...



Certifique que os parâmetros estejam iguais ao exemplo, para alterar o Baudrate basta dar dois cliques até que o valor seja 115200, verifique se a porta está como COM1, com todos os parâmetros corretos basta dar um OK

Retirado do *software* Mastertool IEC.

Figura 6 – Exemplo do selo (latch) em Ladder no *software*

Retirado do *software* Mastertool IEC.

4.3 Módulo de Supervisão: Integração com Elipse E3

O terceiro módulo de desenvolvimento do material didático aborda a transposição didática dos conceitos de monitoramento de nível superior, orientando o estudante na criação de interfaces sinóticas digitais e na configuração de redes industriais. Conforme destacado na fundamentação teórica, a passagem do controle local para a supervisão centralizada frequentemente impõe uma barreira cognitiva devido à necessidade de gerenciar múltiplos *softwares* em tempo real. Com o propósito de aprimorar esse processo, a apostila

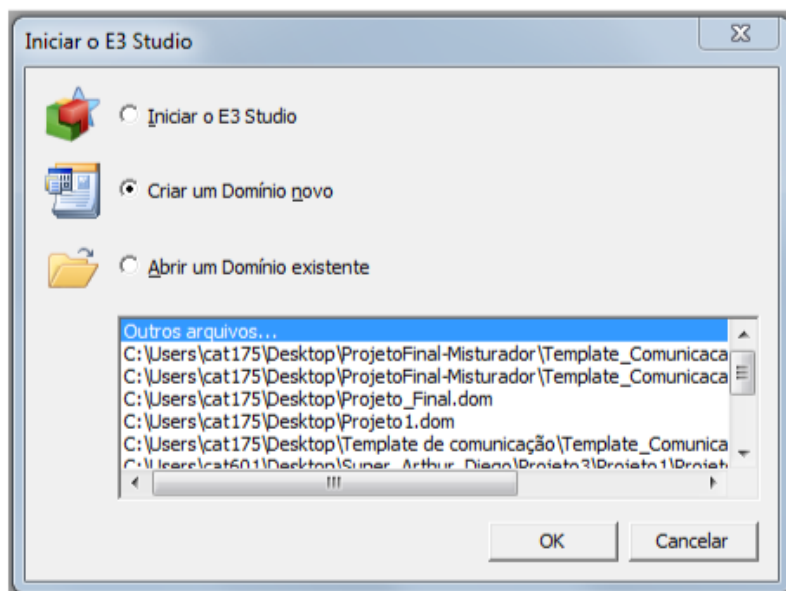
lineariza as etapas iniciais no ambiente Elipse E3, estruturando o conteúdo em um guia passo a passo que orienta desde a criação de um novo Domínio de aplicação até a correta inicialização do ambiente de engenharia *E3 Studio*, utilizando capturas de tela síncronas para guiar o olhar do operador. Mostrado na Figura 7

Figura 7 – Guia inicial do Elipse E3

Criando um Novo Domínio

O Domínio é o "espaço de trabalho" onde o Elipse E3 armazena todas as configurações do seu projeto, incluindo as telas, os drivers de comunicação com a maleta e o banco de dados. Siga os passos abaixo para iniciar a sua aplicação:

Iniciando o E3 Studio Abra o software Elipse E3 Studio. Ao iniciar, o sistema apresentará uma tela de boas-vindas. Como estamos iniciando um projeto do zero, selecione a opção para criar um novo projeto. O assistente de configuração será iniciado automaticamente.



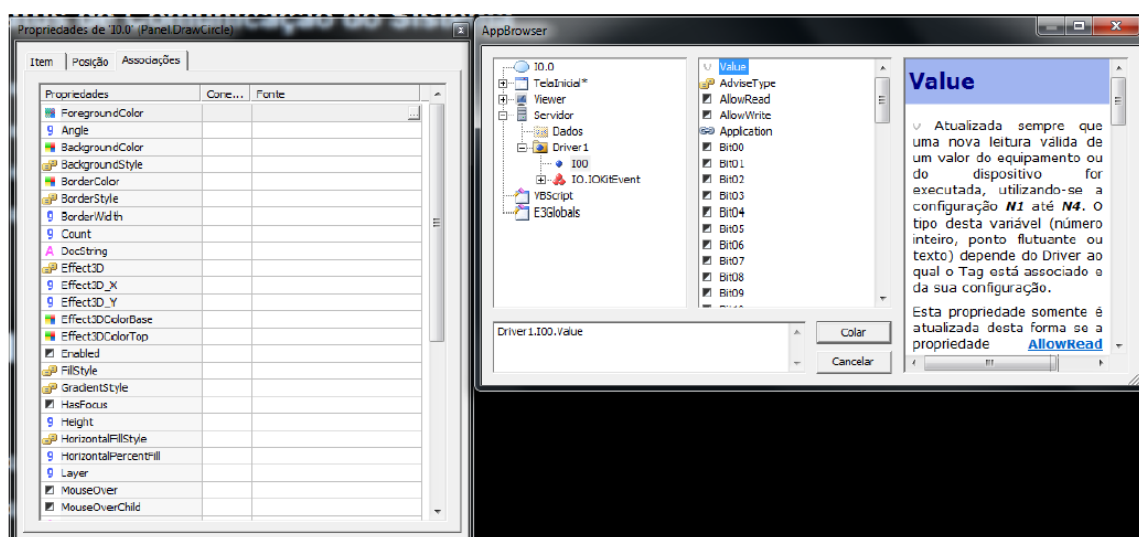
Retirado do *software* Elipse E3.

A engenharia de comunicação e o sincronismo de dados entre a estação de supervisão e a maleta de campo são detalhados a partir da inserção e parametrização do *driver* dinâmico `Modbus.dll`. Alinhado ao [ELIPSE SOFTWARE \(2025\)](#), o material didático instrui o discente a configurar rigorosamente os parâmetros operacionais da camada física e de protocolo, estabelecendo o identificador do escravo ($N1 = 1$), os códigos de função de leitura e escrita ($N2$), e a taxa de transmissão serial em 115200 bps. Esse detalhamento estruturado é fundamental para reduzir falhas típicas de *timeout* e erros de varredura no barramento Modbus RTU, permitindo que o estudante compreenda a hierarquia da Pirâmide da Automação por meio do comissionamento prático de variáveis de rede.

Posteriormente, o *design* instrucional foca na usabilidade e na ergonomia cognitiva do operador através do desenvolvimento do chamado "Gêmeo Digital" da maleta didática. A

apostila orienta o aluno a desenhar telas sinóticas intuitivas no *E3 Studio*, utilizando objetos gráficos animados que mudam de estado elétrico e cromático (como círculos representando LEDs que alternam entre verde e vermelho) com base em associações digitais diretas (*Value*), como mostrado na Figura 8. Para as variáveis analógicas complexas, o roteiro ensina a mapear os registros de entrada (%IW4) a *tags* internas vinculadas a retângulos preenchidos verticalmente (*VerticalPercentFill*), como mostrado na Figura 9. Essa estratégia visual reproduz graficamente a dinâmica de tanques de nível e termômetros industriais, aplicando os critérios de Sauro e Lewis (2016) para converter dados numéricos brutos em representações ergonômicas de chão de fábrica.

Figura 8 – Guia da criação do gêmeo digital Elipse E3



Retirado do *software* Elipse E3.

Figura 9 – Guia do *VerticalPercentFill*

Elemento	Propriedade	Conexão	Fonte
TAG Interna	Value	Simples	IW4.value
Driver IW4	Value	Reversa	TAG Interna
Display	Value	Simples	TAG Interna
Retângulo interno	VerticalPercentFill	Simples	TAG Interna

Feito essas configurações realize o teste e verá que conforme o potenciômetro muda de valor, o display irá mostrar esse valor e o retângulo interno irá mudar também.

Retirado do *software* Elipse E3.

4.4 Projeto Integrador: Estudo de Caso

O quarto subcapítulo de desenvolvimento detalha a modelagem e a execução da atividade macro da apostila, caracterizada como o ápice do percurso formativo proposto: o projeto integrador de controle automático de um projeto. Conforme discutido na metodologia, a fixação isolada de comandos de *software* não garante a transferência de conhecimento de longo prazo se o discente não for desafiado a coordenar sistemas de forma sistêmica. Para superar essa lacuna, o estudo de caso exige a aplicação simultânea de todos os blocos lógicos estudados previamente, demandando que o estudante integre a leitura de sensores analógicos de temperatura e umidade, trate intertravamentos lógicos de segurança em Diagrama Ladder e desenvolva uma interface gráfica de comando e monitoramento centralizado de nível superior.

Do ponto de vista da transposição técnica, o projeto foi estruturado para simular uma demanda real de chão de fábrica, forçando a convergência nativa entre as ferramentas de engenharia de campo e supervisão. O material orienta o aluno a estruturar o algoritmo no *software* MasterTool IEC, utilizando blocos comparadores matemáticos parametrizados para acionar instrumentos que simulam um projeto industrial real.

4.5 Transposição Didática e Refinamento Visual

O encerramento do capítulo dedicado ao desenvolvimento do produto educacional detalha o processo de filtragem e simplificação ergonômica aplicado aos manuais técnicos originais dos fabricantes Altus e Elipse *software*. Conforme discutido na fundamentação teórica, a documentação comercial padrão possui uma densidade de informações que gera sobrecarga cognitiva e transposta diretamente para o ambiente de graduação. Para realizar uma transposição didática eficiente, o material desenvolvido removeu ramificações operacionais secundárias, concentrando-se estritamente nas rotinas lógicas essenciais para a execução das práticas laboratoriais na disciplina. Esse refinamento instrucional atua como um filtro cognitivo, alinhado aos critérios de [Paas, Renkl e Sweller \(2003\)](#) para maximizar o aproveitamento da memória de trabalho do discente sob condições de laboratório.

No âmbito da redação técnica e da organização gráfica, a apostila adota uma linguagem direta e objetiva, com instruções predominantemente no modo imperativo (como "Clique em..." ou "Configure para..."). Essa estratégia visa minimizar a carga cognitiva extrínseca associada à interpretação dos procedimentos, permitindo que os estudantes concentrem seus recursos cognitivos na compreensão dos conceitos e na execução das atividades propostas. Complementarmente, foram inseridos quadros de atenção destacados e seções dedicadas à "Solução de Problemas" (*Troubleshooting*) ao longo de todos os capítulos formativos. A inclusão desses elementos preventivos baseou-se no mapeamento prévio das dúvidas, erros de compilação e falhas de comunicação Modbus mais recorrentes

cometidos pelos estudantes em semestres anteriores. Essa abordagem de *design* instrucional preditivo blindava o percurso pedagógico, reduzindo interrupções por falhas operacionais básicas e mitigando a necessidade de suporte direto contínuo por parte do docente em sala de aula.

5 Análise e Discussão dos Resultados

Este capítulo destina-se à apresentação, análise e discussão dos dados empíricos coletados durante a etapa de validação da metodologia aplicada. Para avaliar de forma robusta e integrada a eficácia instrucional da apostila e a usabilidade do ecossistema educacional baseado na maleta *Altus Training Box Duo* e no *software* MasterTool IEC, adotou-se uma abordagem metodológica baseada em múltiplos indicadores de desempenho e percepção subjetiva.

O processo de implementação e validação do material didático seguiu uma abordagem longitudinal ao longo do período letivo. A apostila desenvolvida foi adotada como o material instrucional base da disciplina de Informática Industrial, sendo utilizada ativamente pelos estudantes em todas as aulas práticas conduzidas em laboratório. Ao longo do semestre, os alunos progrediram de forma sequencial pelos 7 capítulos iniciais do guia, os quais abordavam de maneira estruturada a arquitetura da maleta didática, a navegação na interface do *software* MasterTool IEC e os fundamentos da programação em lógica Ladder.

Após a conclusão dessa etapa formativa de aprendizagem, a validação final do material ocorreu por meio da aplicação do Projeto Integrador. Esta atividade prática macro foi implementada em formato de avaliação individual, exigindo que os estudantes realizassem de forma autônoma a transposição de requisitos lógicos e o comissionamento do *hardware*. Como critério rigoroso de avaliação e validação da retentividade do conhecimento, a prática foi executada totalmente sem consulta à apostila, funcionando como um teste de transferência para mensurar a eficácia do material didático na consolidação das competências técnicas na memória de longo prazo dos alunos.

Para a realização desta avaliação prática, ficou estabelecida a meta regulamentar de conclusão dentro do tempo máximo de 70 minutos para a entrega da lógica rodando e atuando fisicamente na maleta, caracterizando a interrupção por *timeout* caso este limite fosse atingido. Adicionalmente, definiu-se o tempo de 40 minutos como o limiar de excelência (valor ótimo de desempenho), servindo como linha de base para identificar estudantes de alta performance técnica.

As interações foram monitoradas continuamente para o registro do tempo total gasto e a contagem de erros operacionais graves de compilação ou parametrização de *hardware* — adotando-se o teto de tolerância técnica de até 2 erros para entregas ágeis. Imediatamente após o encerramento da atividade, foram aplicados os questionários de satisfação pós-tarefa e de usabilidade subjetiva SUS para coletar as percepções dos estudantes, cujos dados isolados e consolidados são analisados a seguir.

5.1 Análise Isolada dos Indicadores de Desempenho e Usabilidade

Antes de consolidar os dados na métrica unificada SUM, torna-se indispensável analisar o comportamento da amostra frente a cada indicador de usabilidade e desempenho de forma isolada. Essa etapa permite diagnosticar quais dimensões da interação foram mais impactadas pelo processo formativo baseado na apostila desenvolvida ao longo do semestre.

Para subsidiar essa análise, os dados quantitativos brutos coletados individualmente durante a avaliação do Projeto Integrador estão consolidados na Tabela 1, mapeando o desempenho dos 18 estudantes quanto à eficácia, eficiência, contagem de erros operacionais e satisfação pós-tarefa.

Tabela 1 – Dados brutos de desempenho e satisfação coletados na prova avaliativa.

Aluno	Conclusão (S/N)	Tempo (min)	Erros Cometidos	Média Satisfação pós-tarefa (1–5)
1	S	31,0	0	4,3
2	S	41,0	0	4,3
3	S	40,0	0	4,0
4	S	40,0	0	5,0
5	S	42,0	0	4,3
6	N	70,0	3	4,6
7	N	70,0	3	5,0
8	S	28,0	0	4,6
9	S	32,0	0	4,6
10	N	70,0	3	4,0
11	S	22,0	0	4,6
12	N	70,0	3	3,0
13	S	60,0	0	4,3
14	S	51,3	0	3,6
15	S	48,0	0	5,0
16	S	48,0	0	4,3
17	S	44,3	0	4,3
18	S	28,0	0	5,0

Fonte: Dados extraídos pelo autor (2026).

A partir dos registros apresentados na Tabela 1, procedeu-se à avaliação detalhada de cada subdimensão de usabilidade, conforme discutido nos tópicos subsequentes.

5.1.1 Eficácia (Taxa de Conclusão)

A eficácia reflete a capacidade dos estudantes de completarem o Projeto Integrador com sucesso, gerando uma lógica Ladder funcional e transferida para a maleta *Altus*

Training Box Duo. Dos 18 estudantes avaliados, 14 obtiveram sucesso pleno dentro da janela temporal estipulada, resultando em uma Taxa de Conclusão Global de 77,8%.

Considerando que a atividade foi realizada em formato de avaliação e totalmente sem consulta ao material didático, este índice superior a três quartos da turma denota um elevado nível de transferência de conhecimento. Sob a ótica da Teoria da Carga Cognitiva, isso indica que o uso continuado da apostila ao longo do semestre propiciou a formação e a consolidação de esquemas mentais robustos na memória de longo prazo dos alunos. Inversamente, os Alunos 6, 7, 10 e 12 (22,2% da amostra) não conseguiram finalizar a integração e foram interrompidos por *timeout*, sendo que dois deles desistiram antes do tempo final ser atingido.

5.1.2 Eficiência (Tempo de Execução)

A eficiência mensura o esforço temporal despendido pelos estudantes para a consolidação e execução da prática proposta. Para quantificar essa dimensão de desempenho, determinou-se a média amostral ($\bar{X}_{Tempo}$) e o desvio padrão amostral (s_{Tempo}) de toda a turma ($N = 18$). A média amostral foi calculada a partir do somatório de todos os tempos individuais (X_i) dividido pelo número total de participantes, conforme expresso na Equação 5.1:

$$\bar{X}_{Tempo} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (5.1)$$

Substituindo os valores experimentais brutos coletados em laboratório, nos quais os alunos que sofreram *timeout* receberam a atribuição do tempo limite regulamentar de 70 minutos:

$$\bar{X}_{Tempo} = \frac{1}{18} \cdot \left[31,0 + 41,0 + 40,0 + 40,0 + 42,0 + 4 \cdot (70,0) + 28,0 + 32,0 + 22,0 + 60,0 + 51,3 + 2 \cdot (48,0) + 44,3 + 28,0 \right] \quad (5.2)$$

$$\bar{X}_{Tempo} = \frac{793,6}{18} \approx 44,09 \text{ minutos}$$

A média de tempo geral de toda a turma situou-se em aproximadamente 44,1 minutos, valor que se aproxima significativamente do limiar de excelência de 40 minutos estipulado originalmente como o valor ótimo para um desempenho de alta performance. A meta operacional de 40 minutos estabelecida para o limiar de excelência foi parametrizada com base no tempo de execução de referência do próprio desenvolvedor do material didático, que concluiu o comissionamento e a programação do projeto integrador em 20 minutos. Na literatura de Engenharia de Usabilidade e Avaliação de Desempenho Humano,

é um critério metodológico consagrado adotar o desempenho de um usuário especialista associado a um fator multiplicador (neste caso, $2\times$) como indicador padrão para sistemas eficientes. Esse fator de escala acomoda o tempo necessário para o processamento de novos conceitos, a leitura reflexiva dos roteiros e a execução segura das conexões de fiação na maleta pelos estudantes, tornando o patamar de 40 minutos um indicador realista e estatisticamente para qualificar um desempenho discente como aceitável dentro dos parâmetros estabelecidos.

Para mensurar a dispersão desses tempos e entender a variabilidade da turma, calculou-se o desvio padrão amostral (s_{Tempo}). Utilizou-se o fator de correção de Bessel ($N - 1$) no denominador para garantir uma estimativa não viesada para pequenas amostras, conforme apresentado na Equação 5.3:

$$s_{Tempo} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_{Tempo})^2}{N - 1}} \quad (5.3)$$

O somatório dos quadrados dos desvios em relação à média amostral ($\bar{X}_{Tempo} = 44,0889$) foi determinado por:

$$\sum_{i=1}^{18} (X_i - 44,0889)^2 \approx 5107,32$$

Substituindo os valores correspondentes na formulação estatística:

$$s_{Tempo} = \sqrt{\frac{5107,32}{17}} = \sqrt{300,43} \approx 17,33 \text{ minutos}$$

O elevado valor do desvio padrão ($s_{Tempo} = 17,33$ minutos) quantifica estatisticamente o comportamento bimodal da amostra, evidenciado no mapeamento de desempenho individual e na distribuição de frequências da turma (**Figura 10A** e **Figura 10B**). Esse fenômeno divide nitidamente os estudantes em dois subgrupos operacionais: de um lado, um bloco altamente eficiente ($n = 14$), que incorporou e automatizou a manipulação da interface do *software* MasterTool IEC de forma fluida ao longo do semestre; de outro, um grupo menor ($n = 4$) cujos tempos foram censurados no limite regulamentar de 70,0 minutos por *timeout* (**Figura 10A**). Essa polarização sugere que a ocorrência de bloqueios na transposição lógica, combinada à pressão temporal sob condições de avaliação, pode ter gerado um acúmulo severo de carga cognitiva extrínseca e intrínseca nesse segundo subgrupo, comprometendo a fluidez na execução das rotinas. Não obstante, estudos investigativos mais aprofundados mostram-se necessários para isolar e quantificar conclusivamente a contribuição exata desse fator psicológico.

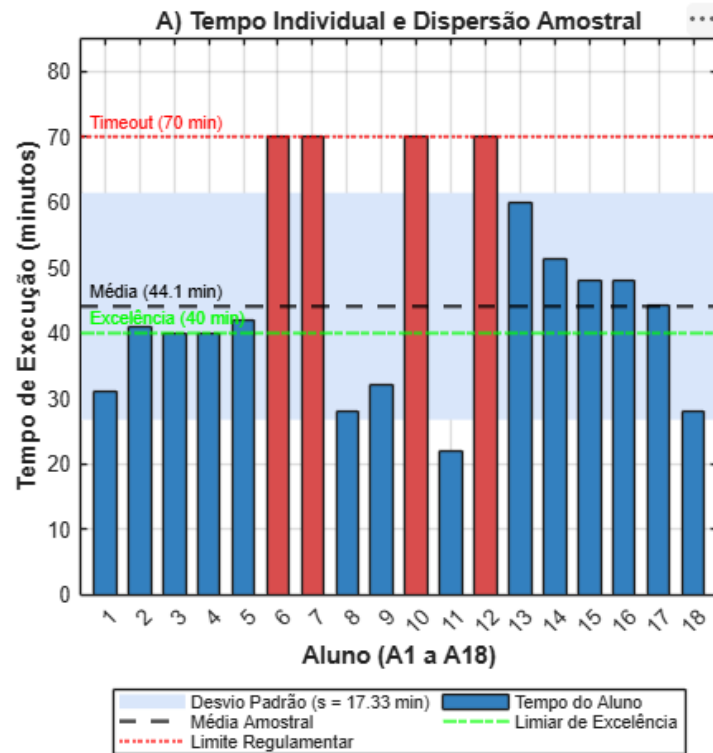


Figura 10 – Análise de eficiência temporal no Projeto Integrador (MasterTool IEC) demonstrando o tempo individual e o comportamento bimodal da turma.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

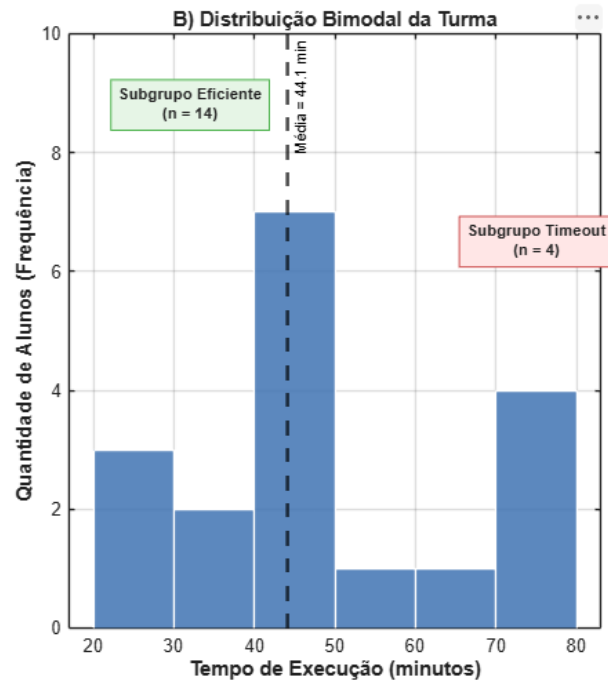


Figura 11 – Distribuição bimodal da turma.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.1.3 Taxa de Erros Operacionais

A contagem de erros operacionais foi balizada por um limite de tolerância técnica baseado na oportunidade de erro igual a 2. Cometer mais de dois erros graves de compilação ou parametrização de *hardware* inviabilizaria a entrega funcional dentro do tempo ágil. Para o comportamento do grupo, calculou-se a média aritmética de erros ($\bar{X}_{Erros}$) conforme a Equação 5.4:

$$\bar{X}_{Erros} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (5.4)$$

Substituindo os dados experimentais obtidos na Tabela 1, em que apenas os 4 alunos que sofreram *timeout* acumularam a penalidade de 3 erros e os demais obtiveram taxa zero de falhas:

$$\bar{X}_{Erros} = \frac{0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 3 + 3 + 0 + 0 + 3 + 0 + 3 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0}{18} \quad (5.5)$$

$$\bar{X}_{Erros} = \frac{12}{18} \approx 0,67 \text{ erros por aluno} \quad (5.6)$$

A variabilidade no índice de falhas cometidas durante a execução foi avaliada por meio do desvio padrão amostral (s_{Erros}), expresso na Equação 5.7:

$$s_{Erros} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_{Erros})^2}{N - 1}} \quad (5.7)$$

O somatório dos quadrados dos desvios em relação à nova média amostral obtida ($\bar{X}_{Erros} = 0,6667$) resultou em:

$$\sum_{i=1}^{18} (X_i - 0,6667)^2 = 30,00$$

Aplicando os valores na equação do desvio padrão amostral com a correção de Bessel:

$$s_{Erros} = \sqrt{\frac{30,00}{17}} = \sqrt{1,7647} \approx 1,33 \text{ erros}$$

A análise detalhada revela que 14 dos 18 alunos (77,8% da amostra) apresentaram taxa zero de erros operacionais ao final do desenvolvimento. Esse resultado constitui um indicativo de que a metodologia estruturada na apostila cumpriu o seu papel preditivo e preventivo. Embora a prova tenha sido executada sem consulta direta, o padrão instrucional visual consolidado nos 7 capítulos formativos anteriores — com ênfase em pinagens de

hardware, configurações de IP e declarações de tipos de variáveis — mitigou a formação de equívocos conceituais, blindando os estudantes contra falhas típicas do ambiente MasterTool IEC. Os únicos alunos que estouraram esse teto foram os quatro participantes que sofreram *timeout*, atingindo a penalidade de 3 erros devido à completa desestruturação lógica sob a pressão do encerramento temporal.

5.1.4 Satisfação Percebida (SEQ)

A satisfação pós-tarefa coletou a percepção imediata dos estudantes em relação à experiência subjetiva de execução prática do circuito, aplicando o questionário *Single Question Expectation* (SEQ) em uma escala ordinal de 1 a 5. A média de satisfação ($\bar{X}_{Sat}$) foi calculada utilizando a Equação 5.8:

$$\bar{X}_{Sat} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (5.8)$$

Substituindo as avaliações individuais fornecidas pelos voluntários imediatamente após o encerramento da dinâmica:

$$\bar{X}_{Sat} = \frac{1}{18} \cdot \left[4,3 + 4,3 + 4,0 + 5,0 + 4,3 + 4,6 + 5,0 + 4,6 + 4,6 + 4,0 + 4,6 + 3,0 + 4,3 + 3,6 + 5,0 + 4,3 + 4,3 + 5,0 \right] \quad (5.9)$$

$$\bar{X}_{Sat} = \frac{78,8}{18} \approx 4,38 \text{ pontos}$$

O desvio padrão amostral para este indicador (s_{Sat}) quantifica o grau de consenso ou dispersão das opiniões dadas pelos estudantes em relação à percepção de facilidade esperada, conforme a Equação 5.10:

$$s_{Sat} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_{Sat})^2}{N - 1}} \quad (5.10)$$

O somatório dos desvios quadráticos a partir da média amostral estabelecida ($\bar{X}_{Sat} = 4,3778$) forneceu o seguinte resultado:

$$\sum_{i=1}^{18} (X_i - 4,3778)^2 \approx 5,11$$

Substituindo os valores na formulação matemática:

$$s_{Sat} = \sqrt{\frac{5,11}{17}} = \sqrt{0,301} \approx 0,55 \text{ pontos}$$

A obtenção de uma média de 4,38 pontos associada a um desvio padrão reduzido de apenas 0,55 demonstra uma forte convergência positiva da turma em direção à aprovação do ecossistema de aprendizagem.

5.2 Consolidação da Métrica Unificada de Usabilidade (SUM)

A análise isolada dos indicadores de usabilidade fornece diagnósticos valiosos sobre as dimensões individuais de desempenho da amostra. Contudo, para uma validação global e estatisticamente rigorosa do material didático, torna-se necessário unificar essas variáveis de naturezas distintas — binárias, temporais e escalas ordinais — em uma métrica única, padronizada e comparável. Para tanto, aplicou-se a metodologia *Single Usability Metric* (SUM), proposta por [Kindlund \(2005\)](#).

O método SUM baseia-se na normalização dos dados brutos por meio do cálculo do Escore-Z para cada um dos quatro indicadores monitorados, tomando como referência a média (μ) e o desvio padrão (s) amostrais da turma, além das metas operacionais estabelecidas. Como apontado por [Sauro e Lewis \(2016\)](#), a padronização via escore padronizado é fundamental para remover os efeitos de escala das variáveis originais, permitindo que o tempo em minutos e a contagem de erros sejam ponderados sem distorcer o indicador final. Após o cálculo desses Escores-Z individuais, extraiu-se a média aritmética simples dos quatro fatores para cada aluno, a qual foi convertida para uma escala percentual utilizando a função de distribuição cumulativa normal padrão, resultando no indicador unificado SUM apresentado na Tabela 2.

$$Z = \frac{X - \mu}{s} \quad (5.11)$$

Inversamente, para as métricas de Tempo (Z_{Tempo}) e Erros (Z_{Erros}), a escala de orientação foi invertida conforme a Equação 5.12, garantindo que menores tempos de execução e menores taxas de erros gerassem escores estatísticos positivos na composição do índice unificado:

$$Z = \frac{\mu_{baseline} - X}{s} \quad (5.12)$$

No cálculo do escore de eficiência (Z_{Tempo}), adotou-se a abordagem baseada em linha de base (*baseline*), substituindo-se a média amostral pelo limiar de excelência de 40 minutos ($\mu_{baseline} = 40$), estabelecido como o valor ótimo de desempenho. Para os participantes que sofreram interrupção por *timeout*, aplicou-se a técnica estatística de censura de dados, fixando o tempo limite regulamentar de 70 minutos e a penalidade máxima de 3 erros operacionais.

Adotou-se a abordagem baseada em linha de base (*baseline*), substituindo-se o tempo dos participantes que sofreram *timeout* pelo limiar de excelência estabelecido de 40 minutos ($\mu_{baseline} = 40$). É importante ressaltar que a média aritmética exibida posteriormente na Tabela 2 representa o desempenho real observado da amostra ($\bar{X} = 44,1$ minutos), servindo como indicador do comportamento do grupo, enquanto o parâmetro fixo de controle de desempenho $\mu_{baseline}$ foi mantido estritamente para a padronização e cálculo dos Escores-Z individuais.

Tabela 2 – Consolidação dos indicadores e cálculo da métrica unificada SUM.

Aluno	Conclusão	Tempo (min)	Erros	Satisfação	Z_{Efic}	Z_{Tempo}	Z_{Erros}	Z_{Sat}	Média Z	SUM (%)
1	1	31,0	0	4,3	0,53	0,52	0,50	-0,14	0,35	63,8%
2	1	41,0	0	4,3	0,53	-0,06	0,50	-0,14	0,21	58,2%
3	1	40,0	0	4,0	0,53	0,00	0,50	-0,68	0,09	53,5%
4	1	40,0	0	5,0	0,53	0,00	0,50	1,14	0,54	70,6%
5	1	42,0	0	4,3	0,53	-0,12	0,50	-0,14	0,19	57,6%
6	0	70,0	3	4,6	-1,88	-1,73	-1,75	0,41	-1,24	10,8%
7	0	70,0	3	5,0	-1,88	-1,73	-1,75	1,14	-1,06	14,6%
8	1	28,0	0	4,6	0,53	0,69	0,50	0,41	0,53	70,3%
9	1	32,0	0	4,6	0,53	0,46	0,50	0,41	0,48	68,3%
10	0	70,0	3	4,0	-1,88	-1,73	-1,75	-0,68	-1,51	6,6%
11	1	22,0	0	4,6	0,53	1,04	0,50	0,41	0,62	73,2%
12	0	70,0	3	3,0	-1,88	-1,73	-1,75	-2,50	-1,97	2,5%
13	1	60,0	0	4,3	0,53	-1,15	0,50	-0,14	-0,07	47,4%
14	1	51,3	0	3,6	0,53	-0,65	0,50	-1,41	-0,26	39,8%
15	1	48,0	0	5,0	0,53	-0,46	0,50	1,14	0,43	66,6%
16	1	48,0	0	4,3	0,53	-0,46	0,50	-0,14	0,11	54,3%
17	1	44,3	0	4,3	0,53	-0,25	0,50	-0,14	0,16	56,4%
18	1	28,0	0	5,0	0,53	0,69	0,50	1,14	0,72	76,3%
Média	77,8%	44,1	0,67	4,38	0,00	-0,24	0,00	0,00	-0,06	55,9%

Fonte: Dados extraídos pelo autor (2026). *Nota:* A linha de Média exibe o valor amostral real medido em laboratório. Para o cálculo do indicador padronizado Z_{Tempo} , utilizou-se o parâmetro fixo $\mu_{baseline} = 40$ minutos conforme o planejamento experimental.

A análise global da Tabela 2 aponta para um escore médio unificado SUM de 55,9% ao considerar a totalidade da amostra avaliada ($N = 18$). Sob a perspectiva métrica de usabilidade, esse patamar representa um índice de desempenho bom e acima da média de mercado (estabelecida em 50,0%), o que reflete a robustez do material instrucional mesmo diante da severidade inerente ao modelo matemático clássico do SUM ao lidar com cenários de dados censurados por interrupção de tempo. A atribuição compulsória das penalidades máximas para os Alunos 6, 7, 10 e 12 deslocou os Escores-Z desses indivíduos para regiões de forte cauda negativa, reduzindo o indicador consolidado geral da turma.

Este comportamento estatístico nitidamente bimodal explicita uma segmentação clara na amostra: de um lado, o grupo que logrou êxito pleno na transferência de conhecimento e consolidação de esquemas mentais para operação do *software* MasterTool IEC de forma autônoma e sem consulta; de outro, o subgrupo que sucumbiu ao teto temporal de laboratório devido ao acúmulo de carga cognitiva intrínseca.

5.2.1 Análise do Cenário Otimizado (Grupo de Sucesso)

A fim de reduzir a interferência do tempo adaptativo individual dos usuários e mensurar com precisão a real eficácia instrucional do material desenvolvido, procedeu-se à reconfiguração estatística da métrica unificada, extraíndo-se da amostra os quatro participantes que sofreram *timeout*. Esse refinamento permitiu avaliar estritamente o subgrupo composto pelos 14 estudantes que concluíram o Projeto Integrador com sucesso ($N_{sucesso} = 14$).

Como resultado dessa filtragem, o indicador de usabilidade global SUM saltou de 55,9% para 65,5% através da conversão integradora baseada no Escore-Z médio do subgrupo de sucesso ($\bar{Z}_{sucesso} = 0,40$). Este resultado é estatisticamente significativo, pois ultrapassa o limiar de 65,0% adotado na literatura de usabilidade como o divisor para sistemas de alta performance técnica. O índice atesta que a apostila oferece um grau de usabilidade para o contexto de engenharia industrial, cujas interfaces e requisitos de lógica apresentam barreiras naturais de alta complexidade.

Dentro deste espectro de sucesso, destacam-se os desempenhos dos Alunos 1, 4, 8, 9, 11, 15 e 18, os quais superaram a marca de 63% de usabilidade unificada. O Aluno 18 obteve a maior eficiência global do ensaio, atingindo a marca de 76,3% no SUM.

5.2.2 Análise da Escala de Usabilidade Subjetiva (SUS)

A avaliação da usabilidade de uma estratégia de ensino não se limita aos indicadores objetivos de desempenho técnico, como tempo e taxas de erro. Mostra-se relevante avaliar a percepção subjetiva de satisfação, complexidade e operabilidade sob a perspectiva dos próprios usuários. Para cumprir este escopo, aplicou-se o questionário System Usability Scale (SUS), desenvolvido por John Brooke, imediatamente após o encerramento da atividade prática. O SUS é composto por 10 itens validados que alternam afirmações positivas e negativas em uma escala Likert de cinco pontos, variando de discordo totalmente (1) a concordo totalmente (5).

Os dados brutos coletados individualmente para cada uma das dez afirmações do questionário estão consolidados na Tabela 3, mapeando a resposta de cada um dos 18 estudantes da amostra.

Tabela 3 – Respostas brutas coletadas através do questionário SUS.

Afirmção / Item do Questionário	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18
1. Usaria a apostila com frequência	5	4	5	5	5	5	4	3	4	4	3	3	5	5	5	5	3	5
2. Desnecessariamente complexa	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	3	1	2
3. Fácil de usar	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	5	5	4	5	4
4. Precisaria de apoio do professor	1	1	3	3	1	2	1	1	1	2	4	1	1	1	3	2	1	1
5. Seções bem integradas	3	3	5	4	5	5	4	5	5	4	4	3	4	5	5	4	5	4
6. Muita inconsistência	2	1	3	1	1	5	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
7. Aprendizagem muito rápida	5	3	3	3	5	5	5	4	5	4	2	3	5	5	5	5	5	5
8. Muito trabalhosa de usar	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1
9. Sentiu-se confiante ao usar	4	3	3	5	4	5	5	5	5	4	3	3	4	5	5	5	5	5
10. Aprendizado prévio necessário	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	5	1	4	1	2	1	1

Fonte: Dados extraídos pelo autor (2026).

O cálculo do escore global SUS de cada participante seguiu o algoritmo padrão da metodologia. Para as perguntas ímpares (positivas), a pontuação de cada item é obtida subtraindo 1 da nota atribuída pelo aluno ($X_i - 1$). Para as perguntas pares (negativas), o cálculo é invertido, subtraindo a nota atribuída pelo aluno de 5 ($5 - X_i$). O somatório dessas 10 pontuações individuais corrigidas é multiplicado por 2,5, convertendo o índice para uma escala centesimal de 0 a 100 pontos. A Tabela 4 apresenta a consolidação dos escores obtidos pela amostra avaliada.

Tabela 4 – Pontuação obtida no questionário SUS e classificação de usabilidade.

Aluno	Conclusão	Escore SUS (0–100)	Classificação Adjetiva
1	S	82,5	Excelente
2	S	87,5	Melhor Imaginável
3	S	80,0	Excelente
4	S	82,5	Excelente
5	S	90,0	Melhor Imaginável
6	N	67,5	Boa
7	N	70,0	Boa
8	S	90,0	Melhor Imaginável
9	S	90,0	Melhor Imaginável
10	N	62,5	Marginal
11	S	77,5	Excelente
12	N	35,0	Pobre
13	S	85,0	Excelente
14	S	77,5	Excelente
15	S	85,0	Excelente
16	S	72,5	Boa
17	S	90,0	Melhor Imaginável
18	S	90,0	Melhor Imaginável
Média	77,8%	78,6	Excelente

Fonte: Dados extraídos pelo autor (2026).

A média global do escore SUS para a totalidade da amostra ($N = 18$) situou-se

em 78,6 pontos. De acordo com os referenciais psicométricos consolidados na literatura de usabilidade, marcas superiores ao limiar de 68,0 pontos posicionam o sistema avaliado acima da média global de mercado. O patamar de 78,6 pontos confere ao material a classificação adjetiva de excelente usabilidade, inserindo a apostila no Grau A de aceitabilidade. Este resultado valida a apostila como guia instrucional autônomo para o ecossistema MasterTool IEC.

Por outro lado, o subgrupo de participantes atingidos pelo limite de tempo avaliou o ecossistema de aprendizagem de maneira marcadamente penalizada, resultando em uma média isolada de 58,8 pontos, considerada marginal. Destaca-se o comportamento do Aluno 12, que obteve o menor escore da pesquisa (35,0 pontos), o que se correlaciona diretamente ao fato de ter assinalado nota máxima na necessidade de suporte do professor e na percepção de que precisaria aprender muitas coisas antes de avançar.

Sob a perspectiva do design de interfaces e ergonomia cognitiva, este decréscimo acentuado no bloco de interrupção não reflete a presença de falhas intrínsecas no layout ou na estrutura da apostila. O fenômeno quantifica o viés de frustração do usuário face ao insucesso operacional da tarefa. Os estudantes que apresentaram menor tempo de familiarização com a plataforma acumularam uma sobrecarga cognitiva intrínseca crítica ao realizarem o teste sem consulta.

A incapacidade de processar as variáveis de parametrização lógica no tempo regulamentar gerou ansiedade e esgotamento da memória de trabalho. Consequentemente, o sentimento de incapacidade técnica tendeu a ser projetado de forma reativa sobre o material de suporte, reduzindo os índices de usabilidade subjetiva atribuídos por esses alunos. O fato de os Alunos 6 e 7 terem sustentado avaliações de 67,5 e 70,0 pontos mesmo sob *timeout* reforça que a estrutura da apostila preservou sua integridade ergonômica mesmo em condições adversas.

A consistência dos dados do questionário SUS reforça as conclusões obtidas na métrica unificada SUM. O material didático desenvolvido apresenta qualidades ergonômicas e instrucionais robustas para a transposição do conhecimento em engenharia de automação. A interface textual e visual cumpre os requisitos de clareza e previsibilidade de ações necessárias para guiar o discente na configuração física e lógica do CLP, pressupondo o cumprimento integral do percurso formativo proposto.

5.2.3 Correlação entre os Indicadores Objetivos (SUM) e Subjetivos (SUS)

A etapa final da validação do material didático consiste no cruzamento dos dados quantitativos de desempenho obtidos na métrica unificada SUM com as percepções qualitativas mensuradas através do escore SUS. O objetivo dessa análise integrada é verificar a consistência metodológica do ensaio, identificando se os resultados práticos

de eficácia e eficiência operacional refletem de maneira fiel a experiência subjetiva de usabilidade relatada pelos estudantes.

Ao projetar os índices individuais de cada participante, constata-se uma forte correlação linear positiva entre o desempenho real em laboratório e o grau de satisfação com a apostila. Os estudantes que demonstraram maior facilidade na transposição dos requisitos lógicos para o ambiente MasterTool IEC — alcançando marcas elevadas de eficiência temporal e taxa zero de erros — foram os mesmos que atribuíram os maiores escores de usabilidade subjetiva.

Esse fenômeno é evidenciado de forma nítida nos registros dos Alunos 5, 8, 9, 17 e 18. Este grupo de alta performance técnica obteve índices SUM situados na faixa de 57,6% a 76,3%, os quais se alinharam com precisão a escores SUS consolidados em 90,0 pontos, alcançando o patamar adjetivo de melhor imaginável. Essa convergência matemática indica que a correta automatização dos esquemas mentais promovida pelo material instrucional reduz a carga cognitiva germânica, gerando um sentimento de autoconfiança e fluidez metodológica durante a execução da prática.

Inversamente, o comportamento estatístico do subgrupo que sofreu interrupção por limite de tempo confirmou a sensibilidade mútua das métricas face ao insucesso da tarefa. Os Alunos 6, 7, 10 e 12 sofreram uma queda drástica em seus indicadores unificados SUM devido à aplicação de penalidades severas de dados censurados, fixando-se na faixa de 2,5% a 14,6%. Esse declínio no desempenho prático foi acompanhado por uma redução correspondente nos escores SUS, que recuaram para a classificação de usabilidade marginal e pobre.

A convergência desses extremos reforça o modelo de causalidade da Teoria da Carga Cognitiva aplicado ao design instrucional. O desengajamento acadêmico e a ausência de consolidação prévia dos conceitos estruturados nos capítulos formativos da apostila geraram um bloqueio operacional sob condições de avaliação. A sobrecarga na memória de trabalho resultou em lentidão e erros sequenciais, comprometendo tanto os indicadores objetivos de eficiência quanto a percepção subjetiva de facilidade de uso do material de suporte.

A identificação dessas tendências paralelas permite concluir que o ecossistema educacional construído é estatisticamente consistente e academicamente robusto. O material didático cumpre com rigor os critérios de viabilidade e transposição didática estabelecidos na matéria de Informática Industrial. As discrepâncias pontuais observadas na amostra não apontam para falhas ergonômicas ou lacunas de conteúdo na apostila, mas sim para a necessidade de compromisso e engajamento discente como requisito mandatório para a eficácia do método de autoestudo assistido.

5.2.4 Dificuldades Observadas, Impacto na Aprendizagem e Melhorias Propostas

A análise integrada dos indicadores quantitativos e qualitativos permite diagnosticar não apenas o grau de viabilidade do material didático, mas também as barreiras operacionais e cognitivas manifestadas durante o processo de validação. Mapear as dificuldades observadas em laboratório e compreender como elas interferem no resultado final é um passo indispensável para mensurar o real impacto pedagógico da apostila na aprendizagem e propor refinamentos estruturais para versões futuras.

Durante a execução da atividade prática avaliativa do Projeto Integrador, a principal dificuldade observada concentrou-se na transposição autônoma de requisitos lógicos abstratos para a sintaxe da linguagem Ladder, somada ao comissionamento de variáveis globais e locais no ambiente MasterTool IEC. Para o subgrupo de estudantes que sofreu interrupção por *timeout* (Alunos 6, 7, 10 e 12), a pressão temporal associada à ausência de consulta direta disparou um efeito cascata de erros sequenciais de compilação. Do ponto de vista prático da engenharia de controle, esses erros manifestaram-se prioritariamente como falhas de sintaxe na instanciação de blocos funcionais de temporizadores (TON/TOF), inversão de contatos logicamente abertos/fechados na rotina de intertravamento de segurança e, criticamente, na sobreposição ou incorreção do endereçamento físico das memórias de I/O (entradas e saídas analógicas) mapeadas na CPU DU351. Essa desestruturação lógica inicial gerou um bloqueio cognitivo que impediu o avanço nas etapas de parametrização de rede e comunicação com o *software* supervisor Elipse E3, inviabilizando o acionamento e a validação final na maleta física Altus Training Box Duo e interferindo diretamente na redução drástica dos índices SUM e SUS desse bloco de alunos.

Esses resultados sugerem que a efetividade do material didático depende do envolvimento dos estudantes com as atividades propostas e com as aulas práticas. Os alunos que acompanharam regularmente o percurso de aprendizagem apresentaram menos dificuldades na realização das tarefas práticas. Para os alunos que mantiveram o engajamento contínuo ao longo do semestre, a apostila atuou como um agente catalisador, consolidando modelos mentais robustos na memória de longo prazo e permitindo que realizassem uma prática complexa de engenharia de forma totalmente independente. Por outro lado, para os discentes que apresentaram menor envolvimento com as atividades propostas, a avaliação sem consulta expôs a ausência de base conceitual, demonstrando que a progressão sequencial e o domínio dos capítulos formativos iniciais são requisitos obrigatórios para a resolução de problemas de maior complexidade que requerem conhecimentos de automação e atuação mais autônoma por parte dos estudantes.

A identificação dessas lacunas e comportamentos fornece subsídios fundamentais para propor melhorias específicas na estrutura da apostila, visando aumentar a capacidade do material didático de apoiar a aprendizagem, mesmo diante de fatores externos que

possam reduzir o envolvimento dos estudantes. A primeira melhoria proposta consiste na inclusão de fluxogramas de tomada de decisão e matrizes de diagnóstico de falhas operacionais rápidas ao final de cada capítulo. Esses blocos visuais serviriam para orientar de forma ágil o estudante quando ocorressem erros típicos de compilação ou perda de comunicação com o CLP, mitigando o acúmulo de carga cognitiva intrínseca em momentos de pressão e reduzindo a dependência de suporte direto do professor.

A segunda proposta de melhoria envolve a atualização e expansão do banco de exercícios e estudos de caso para promover uma proximidade cada vez maior com problemas reais do ambiente industrial. Atualmente, embora as práticas de laboratório simulem com sucesso processos dinâmicos, o material didático pode ser enriquecido ao incorporar requisitos de projetos baseados em situações verídicas de chão de fábrica, tais como o tratamento de falhas em sensores, lógicas de intertravamento de segurança industrial e controle de esteiras com contagem de rejeitos. Essa contextualização prática avançada tende a elevar o engajamento dos estudantes, conectando os fundamentos lógicos estudados na maleta didática com as demandas reais que serão encontradas na atuação profissional dentro do setor de automação.

6 Considerações Finais

O desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso foi motivado pela oportunidade de aprimorar e atualizar o material didático utilizado no ensino prático de programação de Controladores Lógicos Programáveis, visando apoiar o aprendizado dos estudantes durante a realização das atividades laboratoriais. Tomando como base a maleta didática Altus Training Box Duo e o *software* MasterTool IEC, este trabalho teve como objetivo analisar e implementar melhorias no material didático da disciplina, utilizando princípios da Teoria da Carga Cognitiva como referência para sua reorganização e aperfeiçoamento, de modo a favorecer o processo de aprendizagem nas atividades práticas de automação industrial.

Para assegurar a qualidade ergonômica e pedagógica do material, adotou-se a abordagem iterativa da pesquisa-ação como *framework* de design instrucional. Os ciclos iterativos de prototipagem e refinamento contínuo permitiram moldar o conteúdo de acordo com o ritmo de processamento da memória de trabalho dos usuários. A validação empírica realizada no Capítulo 4 forneceu os subsídios quantitativos e qualitativos necessários para atestar o sucesso dessa abordagem. A taxa de eficácia global de 77,8% na conclusão de um projeto integrador complexo executado totalmente sem consulta demonstrou que o material cumpriu o papel de transferir e consolidar conhecimentos duradouros na memória de longo prazo da maioria dos estudantes.

O cruzamento dos indicadores práticos e subjetivos reforçou a consistência estatística da pesquisa. O índice unificado da Métrica de Usabilidade Única (SUM) alcançou a marca de 65,5% no cenário otimizado que isolou o subgrupo de sucesso. De forma complementar, a aplicação da Escala de Usabilidade do Sistema (SUS) resultou em uma média real de 78,6 pontos para a totalidade da turma, qualificando a apostila com o adjetivo de excelente usabilidade e inserindo o produto instrucional no Grau A de aceitabilidade de mercado.

Os desvios e quedas pontuais verificados nos indicadores de desempenho foram analiticamente associados a fatores exógenos de comportamento discente, como o desengajamento crônico e a falta de assiduidade na fixação dos capítulos formativos. Esse comportamento bimodal explicitou que, embora o material instrucional possuía barreiras ergonômicas mitigadas e alto grau de clareza conceitual, a eficácia do método de autoestudo assistido permanece intrinsecamente vinculada ao compromisso mínimo do estudante com o percurso pedagógico proposto.

Com base nas dificuldades mapeadas nas bancas de laboratório, foram consolidadas propostas de melhoria contínua para futuras versões do material didático. Destacam-se a inclusão de matrizes visuais de diagnóstico de falhas operacionais rápidas ao término

de cada capítulo e a expansão do banco de estudos de caso orientados a problemas reais do chão de fábrica industrial, visando aproximar o ambiente acadêmico das demandas de mercado e elevar o engajamento dos discentes através da contextualização prática avançada.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a expansão deste *framework* instrucional para o desenvolvimento de módulos avançados focados na integração do *software* MasterTool IEC com protocolos de comunicação de Redes Industriais como Modbus TCP/IP e OPC UA. Sugere-se também a aplicação de testes de retenção de conhecimento a longo prazo com os mesmos estudantes após determinados períodos de afastamento da plataforma, bem como o mapeamento da carga cognitiva por meio de métricas psicofisiológicas complementares, garantindo a evolução contínua das metodologias de ensino em informática industrial.

Referências

ALTUS S.A. *Manual de programação Ladder do MasterTool IEC XE (MT8000)*. 2024. Disponível em: https://www.altus.com.br/wp-content/uploads/2024/11/manual_de_programacao_ladder_mt8000.pdf. Acesso em: 5 dez. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 10, 17.

ALTUS S.A. *TB13X: Training Box Duo*. 2024. Disponível em: https://www.altus.com.br/wp-content/uploads/2024/11/tb13x_-_training_box_duo.pdf. Acesso em: 5 dez. 2025. Citado 3 vezes nas páginas 10, 13, 17.

AUSUBEL, David P. *The Acquisition and Retention of Knowledge: A Cognitive View*. Springer Dordrecht, 2000. v. 1. Springer Dordrecht. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-015-9454-7>. Citado 4 vezes nas páginas 10, 15, 21.

BARBOSA, Eduardo F. MOURA; Dácio G. Metodologias ativas de aprendizagem na Educação Profissional e Tecnológica. *Boletim Técnico Do Senac*, Boletim Técnico Do Senac, v. 39, p. 48–67, 2013. DOI: [10.1016/0959-4752\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90003-5). Citado 1 vez na página 18.

BROOKE, John. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, v. 189, nov. 1995. Citado 6 vezes nas páginas 4, 22, 23, 55, 56.

CRESWELL, John W. *Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto*. ARTMED® EDITORAS.A., 2010. v. 3. ARTMED® EDITORAS.A. Disponível em: https://www.unirio.br/cla_novo/ppgcp/processo-seletivo/mestrado-edital-n-01-2023/bibliografia/creswell-john-w-projeto-de-pesquisa-metodos-qualitativo-quantitativo-e-misto-porto-alegre-armed-2010-capitulo-8/at_download/file. Citado 1 vez na página 16.

ELIPSE SOFTWARE. *Manual do Elipse E3: Guia de Referência*. 2025. Disponível em: <https://docs.elipse.com.br/documents/pt-br/e3/latest/manual/e3/>. Acesso em: 5 dez. 2025. Citado 3 vezes nas páginas 10, 17, 29.

KINDLUND, Sauro e. A method to standardize usability metrics into a single score. *CHI 2005: Technology, Safety, Community: Conference Proceedings - Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 401–409, abr. 2005. Citado 6 vezes nas páginas 4, 21, 40, 53–55.

LEWIS, James R.; SAURO, Jeff. The factor structure of the system usability scale (SUS). *International Journal of Human–Computer Interaction*, Taylor & Francis, v. 34, n. 12, p. 1147–1152, 2018. DOI: [10.1080/10447318.2017.1399328](https://doi.org/10.1080/10447318.2017.1399328). Nenhuma citação no texto.

MAYER, Richard E. *THE PSYCHOLOGY OF LEARNING AND MOTIVATION*. Elsevier Science (USA), 2002. v. 42. University of California, Santa Barbara. Disponível em: <https://www.jsu.edu/online/faculty/MULTIMEDIA%20LEARNING%20by%20Richard%20E.%20Mayer.pdf>. Citado 9 vezes nas páginas 4, 10, 14, 15, 18, 20, 57.

MAYER, Richard E.; MORENO, Roxana. Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational Psychologist*, Routledge, v. 38, n. 1, p. 43–52, 2003. DOI: [10.1207/S15326985EP3801_6](https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_6). Citado 1 vez na página 14.

PAAS, Fred; RENKL, Alexander; SWELLER, John. Cognitive load theory and instructional design: Recent developments. *Educational Psychologist*, Routledge, v. 38, n. 1, p. 1–4, 2003. DOI: [10.1207/S15326985EP3801_1](https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_1). Citado 2 vezes nas páginas 13, 31.

PARK, Jaewhan; JUNG, Wondea. A study on the method for calculating human error probabilities (HEPs) based on human performance data. *Nuclear Engineering and Technology*, Korean Nuclear Society, v. 39, n. 2, p. 131–140, 2007. Citado 1 vez na página 54.

SAURO, Jeff; LEWIS, James R. *Quantifying the user experience: Practical statistics for user research*. Cambridge, MA: Morgan Kaufmann, 2016. p. 384. Citado 2 vezes nas páginas 22, 30, 40.

SILVA, Lucas Mendes; SANTOS, Ricardo Rodrigues. Desenvolvimento de sistemas instrucionais e uso de bancadas didáticas no ensino superior de engenharia de automação. *Revista de Ensino de Engenharia*, v. 42, n. 2, p. 89–104, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 13, 23.

SWELLER, John. Cognitive load theory. *sciencedirect*, University of NSW, Australia, v. 4, p. 295–312, 2002. DOI: [10.1016/0959-4752\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90003-5). Citado 8 vezes nas páginas 4, 10, 13, 15–17, 57.

APÊNDICE A – Protocolo Detalhado de Validação e Instrumentos de Coleta

O protocolo de validação da apostila foi estruturado para reproduzir, com fidelidade, as condições do ambiente real de laboratório da disciplina de Informática Industrial, garantindo que a coleta de dados ocorra de forma padronizada, controlada e eticamente orientada. Os testes serão conduzidos com uma amostra de alunos regularmente matriculados no Curso de Engenharia de Controle e Automação da UFOP que não possuam experiência prévia comprovada com o *software* MasterTool IEC, assegurando que o material seja avaliado na perspectiva do público-alvo para o qual foi projetado.

Cada sessão de teste será dividida em cinco etapas sequenciais — ambientação, execução de tarefas, avaliação pós-tarefa, avaliação subjetiva global e análise integrada dos dados — conforme sintetizado no protocolo apresentado na Figura 12. Essa estrutura rigorosa é necessária para isolar variáveis externas que poderiam comprometer a confiabilidade dos resultados, garantindo que os escores obtidos reflitam exclusivamente a qualidade do design instrucional da apostila, a motivação do aluno, frequência nas aulas e práticas desenvolvidas.

A.1 Protocolo de Aplicação do Teste

A Figura 12, detalha as cinco etapas do protocolo, indicando as atividades, os instrumentos de coleta e o método de avaliação associado a cada fase.

Figura 12 – Protocolo sequencial de validação da apostila didática.

Etapas	Fase	Atividade	Instrumentos / Dados Coletados	Método de Avaliação
1	Ambientação (10 min)	Apresentação oral da apostila.	Observação qualitativa do avaliador.	—
2	Execução dos Roteiros (40–80 min)	Realização do roteiro prático da apostila (Estufa).	Cronômetro, ficha de erros e taxa de conclusão por tarefa.	SUM (eficácia, eficiência e erros)
3	Avaliação pós-tarefa (5 min por roteiro)	Preenchimento do questionário de 3 itens de satisfação imediatamente após cada tarefa.	Escala Likert 1–5 (facilidade, satisfação, tempo percebido).	SUM (satisfação pós-tarefa)
4	Avaliação subjetiva final (10 min)	Preenchimento do questionário SUS (10 itens) em formato digital, anônimo.	Escore SUS individuais; escore médio do grupo.	SUS (satisfação global)
5	Análise e cruzamento dos dados	Cálculo do escore SUM e SUS; triangulação dos resultados quantitativos com as observações qualitativas.	Escore SUM final; escore SUS médio; relatório diagnóstico.	SUM + SUS integrados

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A.2 Coleta de Dados para o Método SUM

Durante a fase de execução, cada discente realizará o roteiro prático selecionado da apostila, enquanto o avaliador atua como observador passivo. Para alimentar a métrica SUM, serão cronometrados o tempo de execução do roteiro e registradas a taxa de sucesso (conclusão) e a ocorrência de erros, conforme a Figura 13.

Figura 13 – Ficha de coleta de dados SUM - Sistema de Controle Automático

Aluno	Conclusão (S/N)	Tempo (min)	Nº de Erros cometidos	Oport. de Erro	Media Satisfação pós-subtarefa (1–5)
Aluno 1				2	
Aluno 2				2	
Aluno 3				2	
Aluno 4				2	
Aluno 5				2	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os erros que impeçam o progresso do aluno serão tratados com intervenções padronizadas e devidamente contabilizados no cálculo de eficiência, conforme preconizado por Kindlund (2005). As oportunidades de erro serão mapeadas previamente pelo pesquisador

para cada roteiro, identificando as sub-tarefas críticas da configuração do MasterTool, à semelhança da abordagem de Cálculo da Probabilidade de Erro Humano (HEP) descrita por [Park e Jung \(2007\)](#).

A Figura 14 abaixo apresenta a arquitetura do escore SUM, detalhando as quatro dimensões avaliadas, seus pesos e as fórmulas de padronização (Z-equivalente) utilizadas para converter métricas de unidades distintas em uma escala comum comparável.

Figura 14 – Arquitetura do escore SUM: dimensões, pesos e fórmulas de padronização.

Dimensão / Critério	Métrica Coletada	Peso (Z)	Fórmula de Padronização (Z-equivalente)	Limite / Referência
Eficácia	Taxa de conclusão da tarefa (%)	0,25	$Z = \text{proporção de tarefas concluídas com sucesso} / \text{tarefas tentadas} \rightarrow \text{conversão para escore-Z pela tabela normal padrão}$	Meta: $\geq 80\%$ de conclusão (Kindlund, 2005)
Eficiência	Tempo de execução por tarefa (s)	0,25	$Z = (\text{Tempo-Limite} - \text{Tempo-Observado}) / \text{Desvio-Padrão}$ (valores positivos indicam desempenho acima do esperado)	Tempo-limite definido em sessão piloto ou por especialista (Kindlund, 2005)
Erros	Taxa de erros por sub-tarefa	0,25	$Z = (\text{Erros-Cometidos} / \text{Oportunidades-de-Erro}) \rightarrow \text{escore-Z pela tabela normal inversa}$	Número de oportunidades mapeado por roteiro (sub-tarefas do MasterTool/Elipse E3)
Satisfação	Questionário pós-tarefa (3 itens, escala 1–5)	0,25	$Z = (\text{Média-Satisfação} - 4) / \text{Desvio-Padrão}$ (limite de referência = 4,0 em escala de 5 pontos)	Limite 4,0 / 5,0 baseado em Nielsen & Levy (1994) apud Kindlund (2005)
ESCORE SUM FINAL	Média aritmética dos 4 escores-Z	1,00	$\text{SUM} = (Z_{\text{eficácia}} + Z_{\text{eficiência}} + Z_{\text{erros}} + Z_{\text{satisfação}}) / 4$	Positivo: desempenho acima do limite. Negativo: abaixo.

Fonte: Adaptado de Kindlund (2005).

A.3 Questionário de Satisfação Pós-Tarefa (componente SUM)

Imediatamente após a conclusão do roteiro prático, o discente responderá ao questionário de três itens de satisfação apresentado na Figura 5, desenvolvido com base nas questões pós-tarefa propostas por Kindlund [Kindlund \(2005\)](#). A aplicação imediata do instrumento visa capturar a percepção do usuário enquanto a experiência de uso ainda está vívida, reduzindo o viés de memória. As três perguntas abordam, respectivamente,

a facilidade percebida da tarefa, a satisfação geral com o uso da apostila e a percepção sobre o tempo despendido.

Figura 15 – Questionário de satisfação pós-tarefa (componente SUM).

Nº	Pergunta de Satisfação (pós-tarefa)	1 Muito difícil / Insatisfeito / Muito tempo	2	3 Neutro	4	5 Muito fácil / Satisfeito / Pouco tempo
Q1	Como você descreveria a dificuldade de concluir esta tarefa utilizando a apostila?	()	()	()	()	()
Q2	Qual é o seu grau de satisfação ao utilizar a apostila para realizar esta tarefa de automação?	()	()	()	()	()
Q3	Como você avalia o tempo que levou para concluir esta tarefa com o auxílio da apostila?	()	()	()	()	()

Fonte: Adaptado de Kindlund (2005).

A pontuação média das três respostas constituirá o componente de satisfação do escore SUM. O limite de referência adotado para a padronização será 4,0 em uma escala de 5 pontos, em consonância com a literatura de [Kindlund \(2005\)](#), que identifica esse valor como o limiar de sistemas com boa usabilidade.

A.4 Questionário Escala de Usabilidade de Sistema (SUS)

Ao final da sessão, após a conclusão de todos os roteiros práticos, será aplicado o questionário SUS, desenvolvido por [Brooke \(1995\)](#). O instrumento, apresentado na Figura 5, é composto por dez afirmações que alternam entre itens positivos (ímpares) e negativos (pares), mecanismo que reduz o viés de resposta e obriga o respondente a avaliar cada afirmação individualmente. Os alunos respondem em uma escala Likert de cinco pontos — de “Discordo Totalmente”(1) a “Concordo Totalmente”(5) — e o questionário será disponibilizado em formato impresso e anônimo para garantir o anonimato e a imparcialidade das respostas.

Figura 16 – Questionário SUS adaptado para avaliação da apostila didática.

Nº	Afirmção	1 Discordo totalmente	2	3 Neutro	4	5 Concordo totalmente
1	Eu acho que usaria esta apostila com frequência.	()	()	()	()	()
2	Eu achei a apostila desnecessariamente complexa.	()	()	()	()	()
3	Eu achei a apostila fácil de usar.	()	()	()	()	()
4	Eu acho que precisaria do apoio de um professor para conseguir usar esta apostila.	()	()	()	()	()
5	Eu achei que as diferentes seções da apostila estavam bem integradas entre si.	()	()	()	()	()
6	Eu achei que havia muita inconsistência nesta apostila.	()	()	()	()	()
7	Eu imagino que a maioria das pessoas aprenderia a usar esta apostila muito rapidamente.	()	()	()	()	()
8	Eu achei a apostila muito trabalhosa de usar.	()	()	()	()	()
9	Eu me senti muito confiante ao usar esta apostila.	()	()	()	()	()
10	Eu precisei aprender muitas coisas antes de conseguir avançar com esta apostila.	()	()	()	()	()

Fonte: Adaptado de Kindlund (2005).

A.5 Cálculo e Interpretação do Escore SUS

O cálculo do escore SUS segue a metodologia definida por [Brooke \(1995\)](#): para os itens positivos (1, 3, 5, 7 e 9), a contribuição individual é obtida subtraindo 1 da resposta marcada; para os itens negativos (2, 4, 6, 8 e 10), a contribuição é calculada subtraindo a resposta de 5. A soma das dez contribuições — cujo valor varia de 0 a 40 — é então multiplicada por 2,5, produzindo um escore final na escala de 0 a 100. A Figura 16 acima sistematiza esse processo de cálculo para facilitar a tabulação dos dados durante a análise.

Figura 17 – Questionário SUS adaptado para avaliação da apostila didática.

Nº	Afirmção (Resumida)	Respost a bruta (1-5)	Operaçã o	Contribuiçã o (0-4)	Tipo	Fórmula de Cálculo
1	Eu acho que usaria esta apostila com frequência.		Resposta - 1		Positivo	Contribuiçã o = Resposta - 1
2	Eu achei a apostila desnecessariamente complexa.		5 - Resposta		Negativ o	Contribuiçã o = 5 - Resposta
3	Eu achei a apostila fácil de usar.		Resposta - 1		Positivo	Contribuiçã o = Resposta - 1
4	Eu acho que precisaria do apoio de um professor para cons...		5 - Resposta		Negativ o	Contribuiçã o = 5 - Resposta
5	Eu achei que as diferentes seções da apostila estavam bem ...		Resposta - 1		Positivo	Contribuiçã o = Resposta - 1
6	Eu achei que havia muita inconsistência nesta apostila.		5 - Resposta		Negativ o	Contribuiçã o = 5 - Resposta
7	Eu imagino que a maioria das pessoas aprenderia a usar est...		Resposta - 1		Positivo	Contribuiçã o = Resposta - 1
8	Eu achei a apostila muito trabalhosa de usar.		5 - Resposta		Negativ o	Contribuiçã o = 5 - Resposta
9	Eu me senti muito confiante ao usar esta apostila.		Resposta - 1		Positivo	Contribuiçã o = Resposta - 1
10	Eu precisei aprender muitas coisas antes de conseguir avan...		5 - Resposta		Negativ o	Contribuiçã o = 5 - Resposta
TOTAL	Soma das contribuições (0-40)		× 2,5		—	SUS = Soma × 2,5 → escala 0-100

Fonte: Adaptado de Kindlund (2005).

A interpretação do escore SUS obtido seguirá os critérios qualitativos consolidados na literatura, sintetizados na Figura 7. Para o sucesso deste Trabalho de Conclusão de Curso, espera-se que a apostila integrada alcance um escore médio igual ou superior a 80, classificando-a na categoria “Ótimo” e confirmando sua alta aceitabilidade por parte dos discentes. Esse resultado, aliado a um escore SUM positivo, constituirá a evidência quantitativa de que o design instrucional fundamentado nos princípios de Mayer (2002) e Sweller (2002) foi eficaz na redução da carga cognitiva extrínseca e no estímulo à

aprendizagem autônoma no laboratório de Automação da UFOP.

Figura 18 – Escala de interpretação do escore SUS para a apostila didática.

Faixa de Pontuação	Classificação Qualitativa	Nota Escolar (Adjective Rating)	Interpretação para o TCC
≥ 90	Melhor imaginável	A+ / Excelente	O material elimina barreiras cognitivas e proporciona aprendizagem autônoma plena.
80 – 89,9	Ótimo	B / Bom	Alta aceitabilidade; apostila cumpre o objetivo pedagógico.
70 – 79,9	Bom	C / Regular	Aceitável, mas requer ajustes pontuais de clareza ou organização.
50 – 69,9	Razoável / Aceitável	D / Fraco	Problemas usabilidade significativos; revisão do design instrucional necessária.
< 50	Insatisfatório	F / Reprovado	Material inadequado; reestruturação completa recomendada.
Meta deste TCC: ≥ 80	Ótimo ou superior	B ou superior	Confirma que a apostila integrada reduz carga cognitiva e promove aprendizagem confiante.

Adaptado de Brooke (1995) e Sauro (2005).

A.6 Triangulação e Análise Integrada dos Resultados

O cruzamento dos dados de desempenho objetivo (SUM) com os dados de satisfação subjetiva (SUS) permitirá uma análise diagnóstica abrangente da eficácia da apostila. Um escore SUS elevado, aliado a um SUM positivo, comprovar que o material didático não apenas cumpre sua função técnica no contexto da maleta Altus Training Box Duo, mas também promove uma experiência de aprendizagem satisfatória para o corpo discente do DECAT/UFOP. Na hipótese de divergência entre os dois instrumentos — por exemplo, desempenho técnico satisfatório acompanhado de baixa satisfação subjetiva — as observações qualitativas registradas pelo avaliador durante a fase de execução servirão como terceira fonte de evidências para identificar e diagnosticar os pontos de melhoria do material.