



SCALE-TECH LEARNING: UM MODELO ESCALONADO PARA FORMAÇÃO INOVADORA EM ENGENHARIA ELÉTRICA BASEADO EM DEEP TECHS

SCALE-TECH LEARNING: A SCALED MODEL FOR INNOVATIVE TRAINING IN ELECTRICAL ENGINEERING BASED ON DEEP TECHS

Armando Heilmann¹, Karla Ingrid P. Cuellar Heilmann²

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v44p220-236.2025

RESUMO: O artigo aborda os desafios históricos enfrentados pela formação em Engenharia Elétrica na conciliação entre teoria e prática, destacando a dificuldade de transposição dos conceitos acadêmicos para contextos reais de trabalho. Em resposta a esse cenário, propõe-se a adoção de metodologias ativas – como *PBL*, *PjBL*, *Flipped Classroom*, Ensino Híbrido e *Peer Instruction* – amplamente reconhecidas por promoverem aprendizado significativo, colaborativo e baseado na resolução de problemas complexos. A inovação central do artigo é a introdução da metodologia *Scale-Tech Learning*, que combina os princípios de tecnologias disruptivas (*Deep Techs*) com o processo de *Scaling-Up*, adaptados para o ambiente educacional. Tal metodologia estrutura o aprendizado em cinco fases interdependentes: Fixação, Raciocínio, Abstração, Memorização e Explicação (*FRAME*), associadas a um sistema de avaliação progressiva denominado *Knowledge Readiness Levels (KRLs)* – inspirado nos *Technology Readiness Levels (TRLs)* da NASA. O Plano Individual de Aprendizagem (*PIA*) é apresentado como instrumento metodológico central, permitindo que o progresso discente seja monitorado com precisão, integrando metas personalizadas, evidências de aprendizagem e recursos tecnológicos como *MATLAB* e *Arduino*. A metodologia foi aplicada em um estudo piloto com 78 alunos de graduação, revelando: i) aumento de 36% na transição de *KRL 3* para *KRL 4*; ii) 78% dos estudantes atingindo o *KRL 4*; e iii) redução de 40% no tempo de prototipagem. O artigo defende a diversificação da metodologia *Scale-Tech Learning* para múltiplos níveis de ensino (técnico, graduação e pós-graduação), destacando seu potencial para impulsionar a inovação tecnológica e promover a articulação entre ensino, pesquisa e extensão. A proposta está alinhada com as diretrizes da Resolução CNE/CES nº 1/2022 (Brasil, 2022) e com o Marco Legal da Inovação, oferecendo uma alternativa validada empiricamente para a transformação curricular em Engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Engenharia Elétrica; *Scale-Tech Learning*; *KRLs*; *TRLs*; *PIA*.

ABSTRACT: This article addresses the historical challenges faced by Electrical Engineering education in reconciling theory and practice, highlighting the difficulty of transposing academic concepts to real work contexts. In response to this scenario, we propose the adoption of active methodologies – such as *PBL*, *PjBL*, *Flipped Classroom*, *Hybrid Learning* and *Peer Instruction* – widely recognized for promoting meaningful, collaborative learning based on the resolution of complex problems. The central innovation of the article is the introduction of the *Scale-Tech Learning* methodology, which combines the principles of disruptive technologies (*Deep Techs*) with the *Scaling-Up* process, adapted to the educational environment. This methodology structures learning in five interdependent phases: Fixation, Reasoning, Abstraction, Memorization and Explanation (*FRAME*), associated with a progressive assessment system called *Knowledge Readiness Levels (KRLs)* – inspired by NASA's *Technology Readiness Levels (TRLs)*. The *Individual Learning Plan (PIA)* is presented as a central methodological instrument, allowing student progress to be accurately monitored, integrating personalized goals, learning evidence, and technological resources such as *MATLAB* and *Arduino*. The methodology was applied in a pilot study with 78 undergraduate students, revealing: (i) a 36% increase in the transition from *KRL 3* to *KRL 4*; (ii) 78% of students reaching *KRL 4*; and (iii) a 40% reduction in prototyping time. The article defends the scalability of the *Scale-Tech Learning* methodology for multiple levels of education (technical, undergraduate, and postgraduate), highlighting its potential to drive technological innovation and promote the articulation between teaching, research, and extension. The proposal is aligned with the guidelines of CNE/CES Resolution No. 1/2022 and with the Legal Framework for Innovation, offering an empirically validated alternative for curricular transformation in Engineering.

KEYWORDS: Electrical Engineering; *Scale-Tech Learning*; *KRLs*; *TRLs*; *PIA*.

¹ Prof. Dr. no Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, heilmannufpr@gmail.com

² Profa. Dra. na Câmara Pedagógica de Serviço Social, Universidade Federal do Paraná, karlacuellar@ufpr.br



INTRODUÇÃO

A formação em Engenharia Elétrica enfrenta o desafio permanente de articular conhecimento teórico com aplicação prática, essencial para capacitar profissionais a solucionar problemas complexos em setores estratégicos, como geração e distribuição de energia, sistemas embarcados, redes de telecomunicações e automação industrial. Estudos indicam que cerca de 40% dos egressos encontram dificuldades em transpor conceitos acadêmicos para contextos reais de trabalho, evidenciando uma lacuna formativa crítica (Ribeiro, 2008).

A incorporação de metodologias ativas no Ensino Superior, especialmente em cursos de Engenharia, tem sido amplamente debatida na literatura acadêmica nos últimos anos. Tais metodologias são reconhecidas por promoverem uma aprendizagem mais significativa, colaborativa e voltada à resolução de problemas complexos, ao contrário da abordagem tradicional centrada na transmissão unidirecional de conteúdos (Graham, 2006; Felder e Silverman, 1988).

A Tabela 1, a seguir, sintetiza as características, vantagens, desafios e contextos de aplicação das metodologias ativas mais frequentemente empregadas em currículos de Engenharia. Entre as abordagens analisadas estão a Aprendizagem Baseada em Problemas (*Problem Based Learning – PBL*), a Aprendizagem Baseada em Projetos (*Project Based Learning – PjBL*), o Ensino Híbrido (*Blended Learning*), a Sala de Aula Invertida (*Flipped Classroom*) e o Aprendizado por Pares (*Peer Instruction*) (Felder e Silverman, 1988; Biggs e Tang, 2011; Lima e Sauer, 2015).

A análise comparativa revela que a escolha metodológica deve considerar não apenas os objetivos de aprendizagem, mas também aspectos contextuais como infraestrutura disponível, perfil dos estudantes e formação docente. Além disso, observa-se que metodologias como o *PBL* e o *PjBL* têm mostrado elevada aderência nos cursos de Engenharia por permitirem a articulação entre teoria, prática e desenvolvimento de competências transversais (Elmôr *et al.*, 2019).

A incorporação do conceito de Níveis de Maturidade Tecnológica (*Technology Readiness Levels – TRLs*) no contexto educacional tem se mostrado uma abordagem eficaz para alinhar práticas pedagógicas com as demandas contemporâneas da formação em Engenharia. Originalmente desenvolvido pela NASA, e amplamente adotado por agências como a Comissão Europeia e o Departamento de Defesa dos Estados Unidos (EUA), o modelo *TRL* permite avaliar o grau de maturidade de uma tecnologia desde sua concepção teórica até sua implementação em escala operacional (Mankins, 1995).



Tabela 1 – Comparativo entre metodologias ativas aplicadas à Educação em Engenharia

Metodologia Ativa	Características Principais	Vantagens Pedagógicas	Desafios Identificados
<i>Problem-Based Learning</i>	Foco na resolução de problemas reais e abertos	Favorece raciocínio crítico e autonomia do estudante	Necessita mediação docente constante
<i>Project-Based Learning</i>	Integra conteúdos por meio de projetos multidisciplinares	Integra teoria à prática; simula ambiente profissional	Requer tempo estendido e avaliação criteriosa
<i>Flipped Classroom</i>	Estudantes estudam conteúdos teóricos antes da aula	Maximiza uso do tempo em sala para aplicação prática	Exige autonomia discente e infraestrutura digital
<i>Peer Instruction</i>	Uso de perguntas conceituais com resposta entre pares	Favorece a argumentação e a metacognição	Pode ser desafiador sem cultura de colaboração
<i>Ensino Híbrido</i>	Combina ensino presencial e online de forma estratégica	Flexibiliza a aprendizagem e amplia acessibilidade	Requer planejamento e integração coerente dos meios

Fonte: elaborada pelos autores.

No ambiente acadêmico, especialmente nos cursos de Engenharia, a adaptação dos TRLs pode ser interpretada como uma ferramenta para mensurar a maturidade de soluções tecnológicas desenvolvidas por discentes, especialmente no contexto de disciplinas integradoras, projetos interdisciplinares e metodologias baseadas em aprendizagem por projetos (*Project Based Learning – PBL*) (Wilensky e Resnick, 1999a).

Ao aplicar os TRLs na educação, propõe-se uma equivalência entre os níveis de prontidão tecnológica e as etapas do desenvolvimento educacional do aluno: TRL 1–3 seriam compatíveis com o aprendizado teórico e conceitual; TRL 4–6 com o desenvolvimento de protótipos e validações em ambiente controlado (laboratórios didáticos, por exemplo); e TRL 7–9 com a experimentação em ambientes reais de aplicação, seja por meio de estágios, parcerias com empresas ou laboratórios de prototipagem avançada e incubadoras universitárias. Essa associação tem sido particularmente útil na estruturação de currículos mais aderentes às diretrizes da nova formação em engenharia, conforme a Resolução CNE/CES nº 1, de 6 de abril de 2022 (Brasil, 2022), que enfatiza a integração entre



teoria e prática, o estímulo à inovação e à resolução de problemas reais. A citação dessa Resolução mostra-se essencial à fundamentação do presente estudo, pois estabelece as Diretrizes Curriculares Nacionais para os cursos de graduação em Engenharia, orientando a formação superior com ênfase na promoção de competências técnicas, cognitivas e socioemocionais, bem como no protagonismo discente em contextos de aprendizagem ativa. Nesse sentido, a proposta metodológica *Scale-Tech Learning* – articulada pela estrutura FRAME, pelos níveis de prontidão do conhecimento (KRLs) e pelo Plano Individual de Aprendizagem (PIA) – alinha-se diretamente aos pressupostos estabelecidos pelo Conselho Nacional de Educação, conferindo legitimidade institucional à inovação didático-pedagógica apresentada. Diversas instituições têm incorporado essa lógica por meio de núcleos de inovação, laboratórios de prototipagem e projetos de extensão tecnológica, permitindo aos estudantes avançarem de forma consciente por níveis crescentes de maturidade e complexidade ao longo da graduação (Ribeiro, 2008).

Além disso, a utilização dos TRLs como referencial para o desenvolvimento de projetos educacionais favorece a inserção de ferramentas de *assessment* mais precisas, permitindo que docentes e coordenadores monitorem não apenas o progresso acadêmico tradicional, mas também a evolução tecnológica e empreendedora dos alunos.

Adicionalmente, estudos anteriores (Papert, 1980; Biggs e Tang, 2011) demonstram que a aplicação pedagógica dos TRLs está associada ao aumento da motivação discente, à melhoria da retenção de conteúdos e à intensificação das competências práticas e inovadoras, especialmente quando integrados com metodologias ativas como o *Design thinking*, *Problem-Based learning* e *Lean startup* (Graham, 2006; Lima e Sauer, 2015; Elmôr *et al.*, 2019).

Portanto, a transposição dos TRLs para a Educação em Engenharia, especialmente no eixo da prototipagem curricular, representa uma estratégia contemporânea facilmente validada por pares para fortalecer a interseção entre formação acadêmica, inovação tecnológica e impacto socioeconômico.

Nesse contexto, apresentamos o *Scale-Tech Learning*, metodologia inovadora que combina princípios de *Deep Tech* e *Scaling-Up* para superar as limitações dos modelos tradicionais de ensino. Diferentemente de abordagens convencionais, frequentemente fragmentadas e excessivamente teóricas, esta proposta integra sistematicamente: i) ferramentas cognitivas avançadas; ii) modelagem computacional; iii) prototipagem rápida; e iv) um sistema de validação progressiva do aprendizado por meio dos *Knowledge Readiness Levels (KRLs)*.



A estrutura metodológica se organiza em cinco fases interdependentes:

Fixação (F): sistematização do conhecimento teórico mediante técnicas de organização cognitiva de conteúdos (mapas mentais e/ou conceituais, quadros sinóticos, tabelas comparativas, fluxogramas, diagrama de blocos, fichamentos temáticos, plataformas LMS, como Moodle, Google Classroom). Essa abordagem antecipa a aprendizagem, permitindo que o tempo de sala seja direcionado à resolução de problemas ou discussões críticas. A lógica didática se aproxima da proposta de *Just-in-Time Teaching* (Novak, 2011), ao favorecer uma preparação ativa e responsiva por parte dos estudantes.

Raciocínio (R): desenvolvimento de pensamento crítico por meio da resolução de problemas estruturados (estudos de caso técnico, debates em sala de aula, atividades com limite de recurso).

Abstração (A): implementação prática via modelagem computacional e experimentação em laboratório (uso de *software* de modelagem, plataformas de prototipagem, simulações computacionais).

Memorização (M): consolidação do conhecimento por meio de técnicas ativas de retenção (autoexplicação verbal ou escrita, testes interativos, *storytelling*, ensino por pares);

Explicação (E): validação final mediante comunicação técnica e defesa de soluções (apresentações por *slides*, simulações, relatórios técnicos, *pitch* de soluções para problemas reais).

Este artigo tem como objetivo demonstrar a eficácia da estrutura *Scale-Tech Learning* no Ensino de Engenharia, em nível de graduação, com validação baseada em *KRLs*, de modo a fornecer parâmetros mensuráveis para implementação desta metodologia em diferentes contextos formativos. A seguir, o trabalho se desenvolve-se em quatro seções: fundamentação teórica, detalhamento metodológico, proposta de validação e considerações finais.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ensino baseado em *Deep Techs* e *Scaling-Up*

O paradigma *Deep Tech* emerge como referência fundamental para o desenvolvimento de tecnologias disruptivas, caracterizando-se por: i) elevada complexidade técnica; ii) longo ciclo de maturação; e iii) potencial transformador



em setores estratégicos (Light e Cox, 2001). No contexto educacional, sua aplicação à Engenharia Elétrica permite reestruturar o processo de aprendizado mediante *níveis progressivos de prontidão* – análogos aos *Technology Readiness Levels (TRLs)*, porém adaptados à esfera pedagógica (*Knowledge Readiness Levels – KRLs*). Nossos estudos mostraram que essa abordagem sistemática viabiliza a transição gradual entre conceitos teóricos e aplicações práticas, com validações intermediárias que asseguram a consolidação das competências técnicas (Wilensky e Resnick, 1999b).

Paralelamente, o processo de *Scaling-Up*, originalmente aplicado ao escalonamento de tecnologias emergentes (Mankins, 1995), é ressignificado no âmbito educacional como mecanismo de ampliação controlada da complexidade. Sua implementação ocorre por meio de ciclos iterativos que integram:

Validação conceitual (domínio teórico);

Experimentação supervisionada (laboratórios e simulações);

Aplicação em cenários reais (projetos integradores).

A conjugação entre *Deep Techs* e *Scaling-Up* estabelece, assim, um arcabouço metodológico robusto para superar a dicotomia teoria-prática ainda prevalente na formação em Engenharia Elétrica.

Organização metodológica do estudo de caso

A amostra é composta por estudantes do curso de Engenharia Elétrica, matriculados no nível de graduação em uma Instituição de Ensino Superior (IES), no semestre letivo de 2024/1 e 2024/2. Participam do estudo 78 discentes, divididos aleatoriamente em dois grupos: Grupo Controle ($n = 38$) e Grupo Experimental ($n = 40$). Todos os participantes cursam uma disciplina obrigatória específica do 3º período noturno do curso de Engenharia Elétrica, ministrada por docente com formação na área, de agora em diante, denominada “Estudo de Caso”.

A pesquisa adota um delineamento *quasi-experimental* com dois grupos paralelos:

Grupo Controle: segue o plano de ensino tradicional, com aulas expositivas e avaliações convencionais.

Grupo Experimental: recebe a mesma carga horária e conteúdo programático, mas com a aplicação estruturada da metodologia FRAME (Formação Racional Ativa e Modular de



Engenheiros) e do método KRL (*Knowledge Reflection Learning*), integrando atividades de aprendizagem ativa, autoavaliações e prototipagem didática.

Ambos os grupos são submetidos a um pré-teste, com o objetivo de estabelecer a linha de base dos conhecimentos prévios. Ao final do semestre, os estudantes realizam um pós-teste padronizado, com itens construídos segundo a Taxonomia de Bloom.

Metodologia FRAME-KRL aplicada com PIA

Inspirado no conceito de *Technology Readiness Levels (TRLs)* desenvolvido pela NASA (Mankins, 1995), o *framework Knowledge Readiness Levels (KRLs)* foi adaptado para o contexto educacional, estabelecendo uma taxonomia de cinco níveis progressivos para avaliação da maturidade do aprendizado da disciplina ministrada para o curso de Engenharia Elétrica. Essa estrutura hierárquica se fundamenta no princípio de que a aquisição de competências técnicas ocorre por meio de estágios sequenciais de complexidade crescente, conforme demonstrado a seguir.

No **KRL 1 (Compreensão Teórica)**, os alunos assimilam conceitos fundamentais por meio de recursos didáticos tradicionais, como a análise das leis de *Kirchhoff* em circuitos elétricos básicos. Esta fase corresponde à organização inicial do conhecimento, conforme proposto na etapa de Fixação da metodologia FRAME.

O **KRL 2 (Aplicação Estruturada)** representa a capacidade de resolver problemas padronizados utilizando ferramentas analíticas. Um exemplo característico inclui o cálculo de parâmetros em circuitos elétricos, em que os alunos aplicam conhecimentos teóricos em contextos controlados.

A transição para o **KRL 3 (Modelagem e Experimentação)** ocorre quando os estudantes desenvolvem modelos computacionais (utilizando plataformas como MATLAB ou PSIM) ou protótipos físicos (com Arduino, por exemplo).

No **KRL 4 (Adaptação Contextual)**, os alunos demonstram capacidade de transferir conhecimento para cenários não estruturados, como na temática de analisar os efeitos da propagação de ondas eletromagnéticas para diferentes meios, considerando variáveis técnicas e econômicas específicas.

O ápice do desenvolvimento ocorre no **KRL 5 (Domínio e Transferência)**, quando os estudantes não apenas aplicam, mas também explicam e sintetizam conhecimentos de forma interdisciplinar. A produção de vídeos tutoriais



exemplifica a etapa, que incorpora comunicação técnica eficaz e integração de conceitos diversos.

Tal estrutura hierárquica apresenta correlação direta com as etapas FRAME da metodologia *Scale-Tech Learning*, criando um sistema integrado de avaliação do desenvolvimento discente. A progressão por meio dos níveis KRLs permite mensurar não apenas a aquisição de conhecimentos, mas também o desenvolvimento de competências técnicas e cognitivas essenciais para a formação em Engenharia Elétrica.

A operacionalização dos KRLs é viabilizada pelo *Plano Individual de Aprendizagem (PIA)*, que: mapeia cada etapa FRAME (Fixação-Raciocínio-Abstração-Memorização-Explicação) aos KRLs correspondentes; estabelece metas personalizadas de progressão do conhecimento a partir da fixação do conteúdo; e inclui instrumentos de autoavaliação baseados em rubricas alinhadas aos níveis de prontidão.

São diferenciais pedagógicos:

Rastreabilidade: o PIA permite monitorar a transição entre KRLs por meio de evidências concretas (relatórios de simulação para KRL 3).

Flexibilidade: adaptável a diferentes disciplinas (Circuitos Elétricos vs. Eletromagnetismo) mantendo a estrutura base.

Validação Empírica: a metodologia FRAME-KRL foi aplicada em um estudo piloto com 78 alunos de Engenharia Elétrica de uma universidade pública da Região Sul do Brasil, que estavam cursando entre o 3º e 5º período. A progressão nos KRLs foi monitorada por meio do Plano Individual de Aprendizagem (PIA), com uso de rubricas alinhadas aos níveis de maturidade.

O Plano Individual de Aprendizagem (PIA) (Figura 1) emerge como elemento central na operacionalização da metodologia *Scale-Tech Learning*, constituindo-se como ferramenta pedagógica que materializa a transição entre os pressupostos teóricos e sua aplicação prática em contextos educacionais. Fundamentado nos princípios de aprendizagem autorregulada (Elmôr *et al.*, 2019) e alinhamento construtivo (Biggs e Tang, 2011), este instrumento foi concebido para estruturar o processo de aquisição de competências em Engenharia Elétrica de forma sistemática e personalizada.



Figura 1 – Modelo do plano individual de aprendizagem da metodologia Scale-Tech Learning

PLANO INDIVIDUAL DE APRENDIZAGEM – SCALE-TECH LEARNING

Disciplina: _____ Semestre: _____ Estudante: _____

I. SUA MISSÃO DE APRENDIZAGEM

"Se você pudesse aprender qualquer coisa nesta disciplina... o que seria?"

1. O que você quer aprender nesta disciplina?
_____2. Por que isso é importante para você ou para o mundo?

3. O que você já sabe sobre esse tema (se souber)?

 Nada ainda Tenho uma noção superficial Já li ou estudei algo Tenho experiência prática

Especifique: _____

II. MAPA DO SEU APRENDIZADO (FRAME + KRL)

Complete as seções com base no que você espera realizar durante o semestre.

Etapa	Objetivo	Sua Ação Pessoal
F – Fixação	Organizar os conceitos centrais.	_____
R – Raciocínio	Relacionar teorias com aplicações.	_____
A – Abstração	Modelar, simular, programar ou prototipar.	_____
M – Memorização	Consolidar o conteúdo.	_____
E – Explicação	Ensinar e compartilhar o que aprendeu.	_____

III. SUAS ESTRATÉGIAS E FONTES

4. Onde você vai buscar conhecimento?

 Livro-texto Artigos científicos Vídeos Podcasts Simuladores / Softwares Outros: _____

5. Onde vai armazenar suas anotações, ideias e materiais?

 Caderno físico OneNote Google Drive GitHub Outro: _____**IV. SUA ROTINA DE APRENDIZADO**

6. Quando você vai estudar de forma intencional e ativa?

Dias da semana: _____ Horário reservado: _____

7. Quanto tempo por semana você pretende dedicar ao seu plano de aprendizagem?

 1h 2h 4h Outro: _____**V. INTEGRANDO ACTION LEARNING**

8. Como você pretende colocar seu aprendizado em ação durante o semestre?

 Resolver um problema real Participar de projeto técnico Criar algo novo Ajudar colegas

Outro: _____

VI. AUTOEFICÁCIA E COMPROMISSO

9. Como você avalia sua confiança para executar este plano?

 Baixa Média Alta

10. Um compromisso final com seu próprio aprendizado:

"Durante este semestre, eu me comprometo a..." _____

Fonte: elaborada pelos autores.

O PIA se organiza em três eixos estruturantes. O primeiro se refere ao estabelecimento de metas de aprendizagem claramente vinculadas aos *Knowledge Readiness Levels (KRLs)*, em que os discentes articulam objetivos específicos, como "desenvolver modelos computacionais de circuitos elétricos (*KRL 3*)" ou "projetar circuitos eletrônicos aplicados (*KRL 4*)". Este processo de definição de objetivos não apenas orienta a trajetória formativa, mas também promove a reflexão metacognitiva sobre as próprias necessidades de aprendizagem (Felder e Silverman, 1988; Wilensky e Resnick, 1999a; Graham, 2006).

O segundo eixo compreende o detalhamento das atividades correspondentes a cada etapa do ciclo FRAME (Fixação, Raciocínio, Abstração, Memorização,



Explicação). Por meio desse mapeamento, os estudantes planejam ações concretas que vão desde a elaboração de mapas conceituais para consolidação teórica (Fixação/KRL 1) até a produção de materiais instrucionais que demonstrem domínio do conteúdo (Explicação/KRL 5). Tal estrutura sequencial garante a progressão hierárquica das competências, conforme preconizado pela taxonomia dos KRLs.

O terceiro eixo integra a seleção estratégica de recursos didáticos e ferramentas tecnológicas. O PIA orienta os alunos na escolha de plataformas como MATLAB para modelagem computacional (KRL 3) ou Arduino para prototipagem física (KRL 4), além de sugerir métodos de documentação e armazenamento de evidências de aprendizagem. Essa dimensão operacional reflete a integração entre teoria e prática que caracteriza a abordagem *Scale-Tech Learning*.

Como instrumento de mediação pedagógica, o PIA apresenta três características distintivas. Primeiramente, sua flexibilidade permite adaptações a diferentes perfis de aprendizagem e contextos disciplinares, mantendo simultaneamente o rigor metodológico. Em segundo lugar, o caráter documental do plano viabiliza o acompanhamento sistemático do progresso discente por parte tanto do aluno quanto do docente. Por fim, sua estrutura integradora facilita a transição entre os diversos níveis de prontidão do conhecimento, funcionando como mapa orientador para a jornada de aprendizagem.

A concepção do PIA incorpora ainda mecanismos de autorregulação, incluindo espaços para autoavaliação periódica e planejamento de rotinas de estudo. Esses elementos reforçam o desenvolvimento da autonomia discente, competência essencial para a formação em Engenharia em um contexto de rápidas transformações tecnológicas.

Proposta de Validação Metodológica: protocolo integrado para implementação do *Scale-Tech Learning*

Para garantir que a metodologia *Scale-Tech Learning* possa ser aplicada de forma padronizada por professores de Engenharia Elétrica e gerar resultados mensuráveis, propomos um *Protocolo de Validação Metodológica*. Esse protocolo é baseado em *instrumentos de avaliação quantitativos e qualitativos*, permitindo que qualquer docente avalie a eficácia da metodologia em diferentes cenários, classificando-a de forma escalonada quanto à sua efetividade potencial, replicabilidade e necessidade de ajustes.



Resultados empíricos da Validação do *Scale-Tech Learning* com base nos *KRLs*

O *Protocolo de Validação Metodológica do Scale-Tech Learning* foi desenvolvido especificamente para aplicação em contextos de sala de aula, fundamentando-se em um sistema integrado de avaliação processual e de resultados. A estrutura proposta se alinha com os princípios de Mankins (1995) sobre níveis de prontidão tecnológica, adaptados ao domínio educacional por meio dos *Knowledge Readiness Levels (KRLs)*.

O estudo piloto realizado com 78 estudantes de graduação em Engenharia Elétrica demonstrou correlação positiva estatisticamente significativa entre a utilização do Plano Individual de Aprendizagem (PIA) e a progressão nos níveis de maturidade do conhecimento (*KRLs*), com coeficiente de correlação de Pearson $r = 0,72$ e $p < 0,01$ (Figura 2). A eficácia dessa abordagem foi confirmada na aplicação do estudo de caso apresentado, cuja análise dos PIAs indicou que 78% dos discentes atingiram o *KRL 4*, representando um avanço de 36 pontos percentuais em relação ao grupo controle, que houve uma redução média de 40% no tempo necessário para atividades de prototipagem e que 35% dos alunos apresentaram dificuldades na transição entre os níveis *KRL 2* e *KRL 3*. Esses resultados reforçam o papel do PIA como ferramenta eficaz para o acompanhamento sistemático da aprendizagem e a avaliação formativa no ensino de Engenharia.

Crítérios de Classificação Metodológica

O protocolo de validação da metodologia *Scale-Tech Learning* se apoia em uma estratégia de avaliação quantitativa baseada unicamente em evidências empíricas obtidas no contexto de aplicação educacional. A Tabela 2 sintetiza os critérios objetivos utilizados para a classificação da eficácia metodológica, com base nos níveis de prontidão do conhecimento (*Knowledge Readiness Levels – KRLs*).

Tabela 2 – Matriz de Validação do *Scale-Tech Learning*

Classificação	Crítérios Quantitativos (PIA)	Diretrizes Pedagógicas
Promissora	$\geq 75\%$ em <i>KRL 4-5</i>	Expansão curricular
Replicável	50-74% em <i>KRL 3-4</i>	Ajustes nos recursos didáticos
Requer Ajustes	$< 50\%$ atingindo <i>KRL 3</i>	Redesenho das etapas Abstração/Memorização

Fonte: elaborada pelos autores.



A classificação metodológica se fundamenta em dois eixos centrais de evidência:

1. Plano Individual de Aprendizagem (PIA): registros sistemáticos das etapas FRAME (Fixação, Raciocínio, Abstração, Memorização e Explicação) servindo como base documental de progressão cognitiva.
2. Avaliações formais: testes práticos, apresentações técnicas e métricas padronizadas de desempenho aplicados durante a execução dos módulos.

Essa abordagem assegura coerência com os fundamentos da avaliação formativa descritos por Biggs e Tang (2011), integrando simultaneamente indicadores objetivos de performance, conforme preconizado nos sistemas de maturidade tecnológica e educacional, inspirados por Mankins (1995).

Discussão dos resultados à luz da literatura

A discussão dos resultados, até então centrada em dados empíricos do estudo piloto, pode ser complementada com fundamentação teórica. Conforme evidenciado por Canto (2023), a integração de mecanismos de avaliação formativa em sala de aula, especialmente apoiados por tecnologia, é essencial para promover aprendizagem profunda em Engenharia (Trumbull e Lash, 2013). De forma análoga, estudos sobre *Learning Analytics* reforçam que a presença de *feedback* sistemático, associado a avaliações formativas, estimula a autorregulação e melhora o desempenho dos alunos em cursos superiores (Zhang *et al.*, 2023).

No contexto de Planos de Aprendizagem Individualizados (PIA), a literatura indica benefícios semelhantes aos relatados para *Individual Learning Plans (ILP)*, sobretudo no que se refere ao aumento da autonomia e ao alinhamento ao ritmo cognitivo do estudante (Winne e Perry, 2000). Isso é particularmente relevante para a metodologia *Scale-Tech Learning*, na qual o PIA possibilita o monitoramento contínuo dos níveis *KRL*, reforçando estratégias de autoavaliação e reflexão – práticas associadas à aprendizagem autorregulada (Zhang *et al.*, 2023).

Além disso, revisões sistemáticas em aprendizagem experiencial (*Flipped Classroom/Peer Instruction*) e baseada em projetos (*PBL/PjBL*) destacam que ambientes que combinam resolução de problemas com prototipagem apoiam o desenvolvimento de competências práticas e pensamento crítico em engenharia. O *Scale-Tech Learning*, ao integrar fases de Abstração e Explicação associadas aos níveis *KRL*, está em consonância com essas evidências, reforçando o valor pedagógico da prototipagem rápida e da modelagem computacional.



ANÁLISE DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO PILOTO

A implementação piloto da metodologia *Scale-Tech Learning* revelou avanços significativos em coerência com os fundamentos teóricos de Mankins (1995), especialmente no que tange à adaptação dos *Technology Readiness Levels (TRLs)* para o escopo educacional, na forma dos *Knowledge Readiness Levels (KRLs)*. A análise dos dados obtidos a partir de uma amostra de 78 estudantes – distribuídos em grupo controle (n = 38) e grupo experimental (n = 40) – demonstra:

- a) aprimoramento de 36% nos níveis de preparação cognitiva dos participantes do grupo experimental, quando comparados ao grupo controle, indicando maior eficiência na transição entre níveis de prontidão do conhecimento (KRL 3 para KRL 4). Tal resultado valida a eficácia das estratégias integradas na metodologia, especialmente nas fases de *Fixação* e *Memorização*, conforme defendido por Felder e Silverman (1988);
- b) cerca de 78% dos estudantes do grupo experimental atingiram o KRL 4, evidenciando um avanço robusto na capacidade de transferência do conhecimento teórico para a aplicação prática. Esse indicador reforça a hipótese de que a metodologia promove não apenas o acúmulo de conhecimento, mas sua operacionalização efetiva.
- c) redução de 40% no tempo médio de prototipagem entre os integrantes do grupo experimental, particularmente na transição KRL 2 → KRL 3. O dado corrobora a eficiência do uso de ferramentas de modelagem computacional e validação empírica (como *MATLAB*), conforme previsto na fase de *Abstração* e *Explicação* da metodologia. Ainda assim, 35% dos estudantes do grupo experimental relataram dificuldades na transição entre os níveis KRL 2 e KRL 3, o que sugere a necessidade de refinamento nos mecanismos de orientação técnica e na customização dos percursos individuais de aprendizagem (aspectos que serão tratados na próxima fase de iteração metodológica).

Esses resultados reforçam a robustez da *Scale-Tech Learning* como abordagem educacional inovadora e aplicável em contextos de formação técnica e tecnológica, oferecendo evidências quantitativas de sua efetividade em promover aprendizagem ativa, aplicabilidade prática e progressão sistemática entre níveis de prontidão do conhecimento.



Aplicabilidade em diferentes Níveis de Ensino

O modelo proposto se configura como uma abordagem metodológica com estrutura modular e fundamentos consistentes em metodologias ativas, avaliação por competências e métricas de inovação educacional. Os resultados apresentados derivam exclusivamente de um estudo piloto aplicado no contexto da graduação em Engenharia Elétrica, sendo, portanto, nesse nível que sua eficácia foi observada e analisada. Embora sua arquitetura apresente características que sugerem adaptabilidade, a aplicação em outros níveis formativos – como cursos técnicos ou de pós-graduação – ainda carece de validação empírica específica. Assim, qualquer expansão de uso deve ser precedida por ajustes pedagógicos e investigações complementares que respeitem as particularidades de cada etapa educacional. Trata-se, portanto, de uma proposta metodológica promissora no Ensino Superior, cuja escalabilidade poderá ser explorada gradualmente mediante novos estudos.

No Ensino Superior, o modelo proposto pode ser incorporado como componente curricular interdisciplinar, promovendo a integração entre cursos de Engenharia, Ciência da Computação, Administração, Design e áreas afins, com foco na formação de competências técnicas e empreendedoras. Estruturado com base nas metodologias ativas, como a aprendizagem baseada em projetos (PBL), e ancorado em métricas reconhecidas como os *Technology Readiness Levels (TRLs)* e os *Knowledge and Technology Hybrid Indicators (KTH)*, o modelo permite avaliar de forma escalonada a maturidade do conhecimento e da inovação desenvolvida pelos estudantes ao longo do percurso acadêmico. Ao se alinhar às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) aplicáveis ao ensino superior, bem como aos princípios do Marco Legal da Inovação, essa abordagem visa estimular a transição entre a teoria e a prática, favorecendo o desenvolvimento de soluções aplicadas e a potencial articulação com programas institucionais de ensino, pesquisa e extensão. Embora os resultados obtidos em estudo piloto indiquem efeitos promissores, especialmente na consolidação das competências técnicas e na redução do tempo de prototipagem, sua adoção mais ampla ainda requer validações empíricas adicionais e adequação às especificidades curriculares de cada instituição.

Assim, o modelo não apenas contribui para o fortalecimento da cultura de inovação no ambiente educacional, mas oferece também caminhos práticos para a articulação de projetos com impacto regional e nacional, alinhando-se às políticas de fomento à ciência, tecnologia e inovação.



SÍNTESE CRÍTICA DA EXPERIÊNCIA PILOTO

A proposta metodológica *Scale-Tech Learning*, estruturada a partir do modelo FRAME e fundamentada em um sistema de avaliação baseado nos *Knowledge Readiness Levels (KRLs)*, apresenta-se como uma alternativa inovadora com potencial para qualificar a formação em Engenharia Elétrica. Ao integrar metodologias ativas, tecnologias emergentes (*Deep Techs*) e um sistema escalonado de avaliação formativa, a abordagem busca enfrentar limitações observadas no ensino tradicional, propondo um ecossistema educacional orientado ao desenvolvimento de competências aplicadas, tecnológicas e transversais. Embora os resultados preliminares sejam promissores, reconhece-se a necessidade de validações adicionais em diferentes contextos e com maior amplitude amostral para a consolidação de sua efetividade.

Os resultados empíricos obtidos, especialmente a elevação de 36% na transição de *KRL 3* para *KRL 4* e a redução de 40% no tempo de prototipagem, sugerem indícios positivos quanto à efetividade da abordagem em promover aprendizagens mais estruturadas e alinhadas a práticas formativas. A implementação do Plano Individual de Aprendizagem (PIA) demonstrou potencial como instrumento pedagógico de apoio, permitindo o acompanhamento da progressão discente com base em evidências individualizadas. Tais achados, embora preliminares, indicam possibilidades relevantes de aplicação da metodologia, cuja validade poderá ser mais bem consolidada mediante replicações em diferentes cenários educacionais.

A estrutura modular da metodologia, aliada à sua adaptabilidade no contexto do Ensino Superior, evidencia o potencial de aplicabilidade do *Scale-Tech Learning*, não apenas como ferramenta didática, mas como política curricular alinhada ao Marco Legal da Inovação, à Resolução CNE/CES nº 1/2022 e aos paradigmas contemporâneos de educação empreendedora e orientada por impacto.

Portanto, conclui-se que o *Scale-Tech Learning* se configura como uma estratégia educacional promissora, cuja eficácia inicial foi verificada por meio de um estudo piloto conduzido com alunos de graduação em Engenharia Elétrica. Os resultados obtidos sugerem um potencial relevante para reconfigurar práticas formativas ao integrar tecnologia, cognição e avaliação formativa em ciclos iterativos de aprendizagem. Ainda que os achados empíricos apontem para contribuições significativas, especialmente no desenvolvimento de competências técnicas e no engajamento discente, novas aplicações em diferentes contextos



educacionais serão necessárias para consolidar sua validade externa. Assim, o modelo se apresenta como uma contribuição inovadora e replicável para a evolução da educação tecnológica e científica, com especial aderência às diretrizes contemporâneas de ensino por competências e formação orientada por impacto.

REFERÊNCIAS

- BIGGS, J.; TANG, C. **Teaching for quality learning at university: what the student does**. Open University Press, 2011.
- BRASIL. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Superior. **Resolução CNE/CES nº 1, de 6 de abril de 2022**. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, n. 66, p. 81-83, 7 abr. 2022.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2017. Disponível em: <https://basenacionalcomum.mec.gov.br/>. Acesso em: 14 jul. 2023.
- CANTO FILHO, A. B. do. **Avaliação formativa na Engenharia Elétrica**. Porto Alegre: UFRGS, 2023.
- ELMÔR, G. F. et al. **Uma nova sala de aula é possível: aprendizagem ativa na educação em engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- FELDER, R. M.; SILVERMAN, L. K. Learning and teaching styles in engineering education. **Engineering Education**, v. 78, n. 7, p. 674-681, 1988.
- GRAHAM, C. R. Blended learning systems: definition, current trends, and future directions. In: BONK, C. J.; GRAHAM, C. R. (ed.). **The handbook of blended learning: global perspectives, local designs**. San Francisco: Pfeiffer, 2006.
- LIGHT, G.; COX, R. **Learning and teaching in higher education: the reflective professional**. London: Paul Chapman, 2001.
- LIMA, I. G.; SAUER, L. Z. Active learning based on interaction and cooperation motivated by playfull tone. **Proceedings...** Active Learning in Engineering Education, 13. San Sebastian, 2015.
- MANKINS, J. C. **Technology readiness levels: a white paper**. NASA, 1995.
- NOVAK, G. M. **Just-in-time teaching**. *New Directions for Teaching and Learning*, n. 128, 2011.
- PAPERT, S. **Mindstorms: children, computers, and powerful ideas**. New York: Basic Books, 1980.
- RIBEIRO, L. R. C. Aprendizagem baseada em problemas (PBL) na educação em engenharia. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 27, n. 2, 2008.
- TRUMBULL, E.; LASH, A. **Understanding formative assessment: insights from learning theory and measurement theory**. WestEd, 2013. Disponível em: http://www.wested.org/wp-content/files_mf/1370912451resource13071.pdf. Acesso em: 12 jan. 2025.
- SUKACKE, V. et al. Towards active evidence-based learning in engineering education: a systematic literature review of PBL, PjBL, and CBL. **Sustainability**, v. 14, n. 13955, 2022.
- WILENSKY, U.; RESNICK, M. **Thinking in levels: a dynamic systems approach to learning about complexity**. Cambridge: MIT Press, 1999a.



- WILENSKY, U.; RESNICK, M. Thinking in levels: a dynamic systems approach to making sense of the world. **Journal of Science Education and Technology**, v. 8, p. 3–19, 1999b.
- WINNE, P. H.; PERRY, N. E. Measuring self-regulated learning. In: ZIMMERMAN, B. J.; SCHUNK, D. H. (ed.). **Handbook of self-regulation**. Elsevier, 2000.
- ZHANG, K. E. *et al.* Learning analytics in formative assessment: a systematic literature review. **Journal of Measurement and Evaluation in Education and Psychology**, v. 14, 2023.