Revista Científica em Educação a Distância

Revisão

ISSN 2177-8310
DOI: 10.18264/eadf.v15i1.2455

Mapeamento de Ferramentas sobre Economia Circular: Sugestões para Aplicação em Cursos de Engenharia EaD

Mapping Tools for Circular Economy: Suggestions for Application in Distance Learning Engineering Courses

Camila Gonçalves CASTRO[1]
Gustavo ROMERO[2]
Julia Romano SANCHES[3]
Bruno Noronha RODRIGUES[4]
Gabriel Rodrigues Martins MOREIRA[3]
Ana Lúcia Gabas FERREIRA[3]

[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais,
[2]Universidade de Campinas.
[3]Universidade de São Paulo.
[4]Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará.

camila.castro@ifmg.edu.br

Resumo

Este artigo apresenta o mapeamento de ferramentas de economia circular (EC) voltadas para construção de material didático e aplicação de atividades no ensino de cursos de engenharia na modalidade de Educação a Distância (EaD). A partir de uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) realizada nas bases de dados Scopus e Web of Science, foram identificados 42 artigos que discutem ferramentas práticas de EC. Essas ferramentas incluem modelos para avaliação de circularidade, suporte à decisão, design circular, implementação em cadeias de suprimentos e treinamento, oferecendo uma base para professores de engenharia adaptarem seu conteúdo didático. Na sequência, são propostas atividades síncronas e assíncronas que utilizam essas ferramentas para promover o aprendizado interativo e prático dos alunos, preparando-os para os desafios da sustentabilidade e economia circular. A conclusão destaca os desafios de interação entre os achados dos artigos selecionados e sua aplicação em diferentes contextos e modalidades de engenharia, evidenciando o papel crucial da mediação docente no uso do material didático sugerido. Também reitera o necessário compromisso entre adequação do processo ensino-aprendizado ao desenvolvimento de competências técnicas e comportamentais voltadas à circularidade e sustentabilidade.

Palavras-chave: Economia circular. Ferramentas de ensino. Educação a distância. Engenharia. Sustentabilidade.

CC BY

Recebido 29/01/2025
Aceito 18/02/2025
Publicado 28/03/2025

Editores responsáveis:
Daniel Salvador
Carmelita Portela

COMO CITAR ESTE TRABALHO

ABNT: CASTRO, C. G. *et al*. Mapeamento de Ferramentas sobre Economia Circular: Sugestões para Aplicação em Cursos de Engenharia EaD. **EaD em Foco**, v. 15, n. 1, e2455. doi: https://doi.org/10.18264/eadf.v15i1.2455

Mapping Tools for Circular Economy: Suggestions for Application in Distance Learning Engineering Courses

Abstract

This article presents a mapping of circular economy (CE) tools aimed at developing educational materials and activities for distance education (DE) in engineering courses. Based on a Systematic Literature Review (SLR) conducted on the Scopus and Web of Science databases, 42 articles discussing practical CE tools were identified. These tools include models for circularity assessment, decision support, circular design, implementation in supply chains, and training, providing a foundation for engineering educators to adapt their teaching content. Subsequently, synchronous and asynchronous activities utilizing these tools are proposed to foster interactive and hands-on learning, preparing students for the challenges of sustainability and circular economy. The conclusion highlights the challenges of aligning the findings from the selected articles with applications across different engineering contexts and modalities, emphasizing the critical role of teacher mediation in utilizing the suggested educational materials. It also reiterates the need to balance the teaching-learning process with the development of technical and behavioral competencies aimed at circularity and sustainability.

Keywords: *Circular economy. Teaching tools. Distance education. Engineering. Sustainability.*

1. Introdução

Em setembro de 2015, a Assembleia Geral da ONU adotou a Agenda 2030 (ONU, 2015), que reúne 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), cada um com ações específicas para transformar o mundo até 2030. O preâmbulo do documento afirma que todos os dezessete objetivos, contemplando 169 metas, são integrados, indivisíveis e balanceiam as três dimensões do desenvolvimento (econômica, social e ambiental) por igual. Não haveria, portanto, hierarquia entre os objetivos, do que se conclui que suas conexões permitem estudos amplamente conectados.

Dois objetivos merecem destaque preliminar. O primeiro é o 12, que visa assegurar padrões de produção e consumo sustentáveis. Dentro desse objetivo, a meta 12.a, que se destaca por propor o fortalecimento da capacidade científica e tecnológica para tornar os padrões de produção e consumo mais sustentáveis. Associada à essa meta, localiza-se o objetivo 4, que valoriza o aprendizado como processo vitalício e contínuo, em particular aquele voltado à aquisição de conhecimento necessário para a promoção do desenvolvimento sustentável (meta 4.7). Adotando como ponto de partida o ODS 12, Raman et al. (2024) constroem um mapeamento bibliográfico que identifica sinergias entre estudos de ODS, e observam que os ODS 12 e 4 recebem relativamente menos atenção que outras relações, como, por exemplo, da ODS 12 com ODS 13 (ação climática).

O mesmo trabalho de Raman et al. (2024) identifica, no tratamento dos microdados, que o tópico de economia circular é recorrente nos trabalhos analisados. Esse achado permite um elucidativo percurso investigativo. Entende-se que o pleno alcance da ODS 12 passa pelo reconhecimento da importância da diretriz educacional no desenvolvimento das competências necessárias. Nesse sentido, destaca-se o debate sobre economia circular (EC) como alternativa sustentável e contraponto ao modelo linear de produ-

ção (extrair-produzir-descartar) (Korhonen et al., 2018) e como metodologia mesma de educação voltada à sustentabilidade. A EC é definida como um sistema econômico que evita o esgotamento de recursos, fecha ciclos de energia e materiais, e promove o desenvolvimento sustentável em níveis micro, meso e macro (Prieto-Sandoval et al., 2018). A EC requer inovações ambientais cíclicas e regenerativas na forma como a sociedade legisla, produz e consome.

Contudo, há uma lacuna conceitual significativa entre sustentabilidade e economia circular, como observam Geissdorfer et al. (2017). Volume considerável da literatura a respeito de economia circular tende a subestimar o potencial holístico da sustentabilidade em favor de abordagens focadas na performance econômica e ambiental da circularidade – a dimensão social, nesse caso, é atingida de forma incidental (Corvellec et al., 2022). Por esse motivo, Geissdorfer et al. (2017) advogam em favor de uma concepção de economia circular que não estabelece relação hierárquica com a sustentabilidade, e sim outra em que a EC atua como ferramenta de sustentabilidade. Essa reorientação conceitual favorece que o estudo da EC privilegie a investigação de diversidade de estratégias e soluções complementares entre si e que permitam renovada adaptabilidade aos desafios de sustentabilidade.

Diante dessa interdependência entre a EC e a sustentabilidade, é importante identificar ferramentas pedagógicas que possibilitem o ensino desses conceitos em cursos de engenharia, especialmente na modalidade a distância, de forma a preparar futuros profissionais para enfrentar os desafios de produção e consumo sustentáveis alinhados aos ODS. Com base nisso, foi elaborada a seguinte pergunta de pesquisa: quais são as principais ferramentas e recursos disponíveis na literatura sobre economia circular para o ensino em cursos de engenharia na modalidade de Educação a Distância (EaD)?

Esse problema de pesquisa reconhece que a disseminação do conhecimento técnico da EC deva ser feita em estruturas de ciência aplicada, como nas grades curriculares de engenharia, utilizando as diretrizes da educação a distância (EaD). O objetivo é mapear as principais ferramentas e recursos disponíveis na literatura sobre economia circular (EC) para apoiar o ensino de engenharia na modalidade de Educação a Distância (EaD), sem implicar, como já dito acima, em hierarquização de soluções. A proposta é que essa seleção de ferramentas permita conceber o ensino em engenharia dentro das prerrogativas de diversidade e adaptabilidade.

A EaD é uma modalidade educacional onde docentes e discentes estão separados temporal e espacialmente, utilizando tecnologias de informação e comunicação (TIC). Patricia Behar (2009) destaca que essa modalidade de ensino oferece um espaço de ensino e aprendizado *sui generis*, "heterárquico", onde a hierarquia do conhecimento é menos significativa que o ritmo individual de aprendizado e a autonomia na interação com os materiais de aprendizagem. Essa orientação pedagógica se alinha à proposta de estudo da EC desenvolvida por Geissdorfer et al. (2017), e, com isso, não apenas as ferramentas de EC, mas também a metodologia de estudo dessas ferramentas, estabelecem uma relação de complementaridade.

A EaD compensa a ausência física do docente com uma variedade de objetos de aprendizagem, antecipando lacunas decorrentes da diversidade de contextos educacionais. Mostra-se aí adequada a abordagem de design instrucional (DI) fixa, que foca na organização, sequenciamento, localização, recuperação, exibição e reutilização de conteúdos (Filatro e Cairo, 2015). A falta de materiais didáticos sobre EC e a concentração da bibliografia em estudos de caso impõem uma realidade instrucional que se adapta melhor ao DI fixo.

Se o processo completo de DI segue, naturalmente, as etapas do modelo ADDIE (análise, *design*, desenvolvimento, implementação e avaliação), este artigo se concentra na fase de análise, etapa em que necessidades futuras são vislumbradas, porém sem acesso direto ao conteúdo programático específico (Munhoz, 2016). Um fluxo ideal de produção de material didático para EaD é o seguinte:

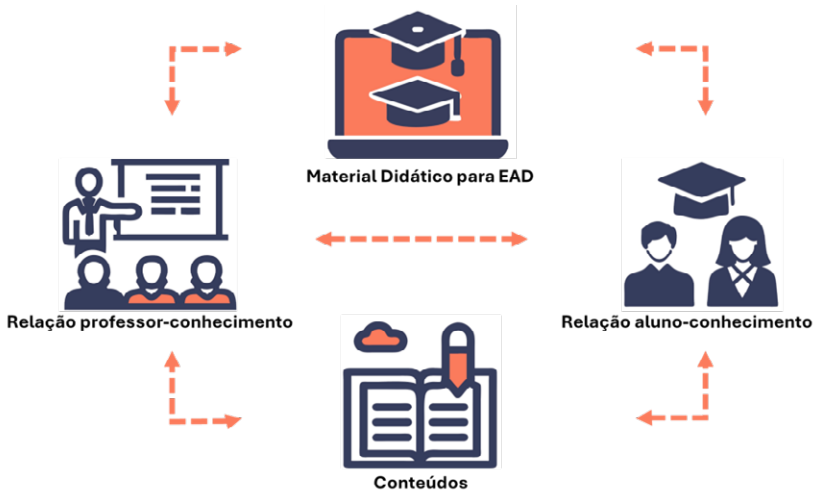

Figura 1: Fluxograma dos processos de mediação professor-aluno em EaD.
Fonte: ENFAM e Sousa (2018, p. 30)

A catalogação e descrição de ferramentas de EC atende duas etapas (duas "setas") específicas do fluxograma acima. A primeira delas: a seta que indica a interação entre o material didático para EaD e a relação professor conteúdo. A segunda delas: a seta que indica a interação entre os conteúdos e a relação professor-conhecimento. Essa perspectiva não é acidental: um material no formato portfólio de ferramentas e atividades garante não somente o máximo alcance para diversas modalidades de engenharia, mas também privilegia a mediação docente em seu contexto educacional particular. Afinal, como identificado em estudo de caso conduzido por Orofino et al. (2022), uma interação inadequada entre conteúdos síncronos e assíncronos pode induzir ao silêncio e evasão do discente do EaD.

Os autores (Orofino *et al.*, 2022) identificaram a importância da condução de fóruns temáticos, cuja ideia geral é a introdução de uma atividade de viés prático alinhada ao conteúdo programático teórico de cada módulo da disciplina ministrada. Nessa situação, ao contrário de fóruns de dúvidas genéricos, a definição temática estimula um debate focado que, por sua vez, conduz os estudantes à efetiva participação em atividades síncronas conduzidas pelo docente. Sendo assim, a apresentação de um material de apoio que contenha ferramentas e aplicações da EC pode impulsionar, de maneira análoga, essa interação assíncrona e síncrona nos cursos de engenharia EaD.

2. Metodologia

A abordagem de Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) foi adotada neste trabalho para o mapeamento de ferramentas da economia circular desenvolvidas e publicadas em artigos científicos. Em primeiro lugar, foi definido um conjunto específico de palavras relevantes para o campo de investigação, nomeadamente "economia circular" e "ferramentas". Para fins de especificação, os artigos foram buscados pelas palavras-chaves. A *string* de busca utilizada foi: *KEYWORD* (("circular economy") *AND* ("tool*" OR "toolkit")). Foram consultados apenas resultados em idioma inglês.

A busca foi realizada no Scopus e Web of Science em agosto de 2024. O processo de seleção encontrou 313 estudos na base de dados Scopus e 101 na Web of Science. Os artigos foram avaliados de acordo com seus títulos e resumos, e 71 foram selecionados, seguindo os critérios de inclusão e seleção, como mostrado na figura 2, para a fase de leitura do texto completo. A leitura dos artigos na íntegra resultou na seleção de 39 artigos considerados adequados para a pesquisa (todos descritos na tabela constante no Apêndice juntamente com o seu número de identificação). Os demais foram considerados fora de escopo.

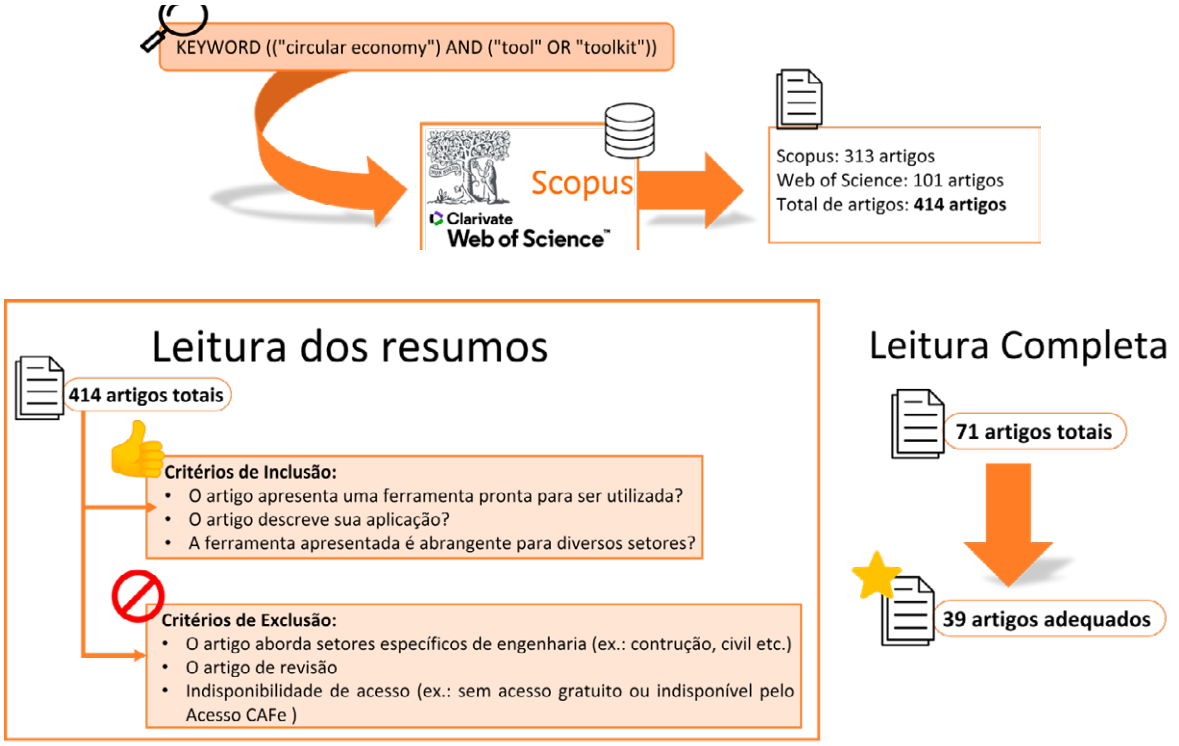

Figura 2 - Esquema de seleção dos artigos
Fonte: Imagem dos autores

3. Resultados e Discussão

Foram revisados e selecionados 39 artigos a partir de um total de 414 resultados obtidos nas bases de dados Scopus e Web of Science. Esses artigos foram escolhidos com base na generalização e aplicabilidade das ferramentas e recursos descritos para o ensino de economia circular em cursos de graduação em engenharia na modalidade EaD.

Para organizar e analisar as ferramentas e recursos identificados na revisão sistemática da literatura, foram criadas categorias para as ferramentas de economia circular, facilitando a busca por professores de EaD, para adaptar aos respectivos cursos de engenharia. Além da identificação dos autores e da categoria das ferramentas, a análise de cada uma inclui: (a) Adaptável para EaD, que avalia se a ferramenta pode ser adaptada para o ensino a distância; (b) Atividades Síncronas, que verifica se a ferramenta permite atividades realizadas em tempo real; (c) Atividades Assíncronas, que indica se a ferramenta permite atividades realizadas de forma independente pelo aluno. Essas categorias foram escolhidas para facilitar a análise detalhada e a discussão sobre a aplicabilidade e importância de cada ferramenta para o ensino de engenharia a distância, permitindo uma visão abrangente e crítica das opções disponíveis. Estas categorias também facilitam para professores buscarem ferramentas como materiais didáticos.

3.1. As ferramentas para EC

Os artigos selecionados foram distribuídos em seis categorias. As **Ferramentas de Avaliação de Circularidade** medem o grau de circularidade em produtos, processos ou sistemas, identificando oportunidades para aumentar a sustentabilidade. As f**erramentas de Suporte à Decisão** auxiliam na tomada de decisões estratégicas, guiando a escolha de práticas que melhor implementam a economia circular. As **Ferramentas de Projeto Circular** são focadas no *design* de produtos e serviços que promovem a reuti-

lização, reciclagem e remanufatura, facilitando a criação de soluções mais sustentáveis. As **Ferramentas de Implementação em Cadeias de Suprimentos** adaptam ou criam cadeias de suprimentos circulares, garantindo a eficiente reutilização de materiais e prolongando o ciclo de vida dos produtos. Por fim, as **Ferramentas de Treinamento** são desenvolvidas para capacitar profissionais e estudantes, proporcionando materiais didáticos e simulações que ajudam a entender e aplicar os princípios da economia circular em diferentes contextos. Na figura 3, é apresentada a distribuição da quantidade de ferramentas encontradas por categoria criada.

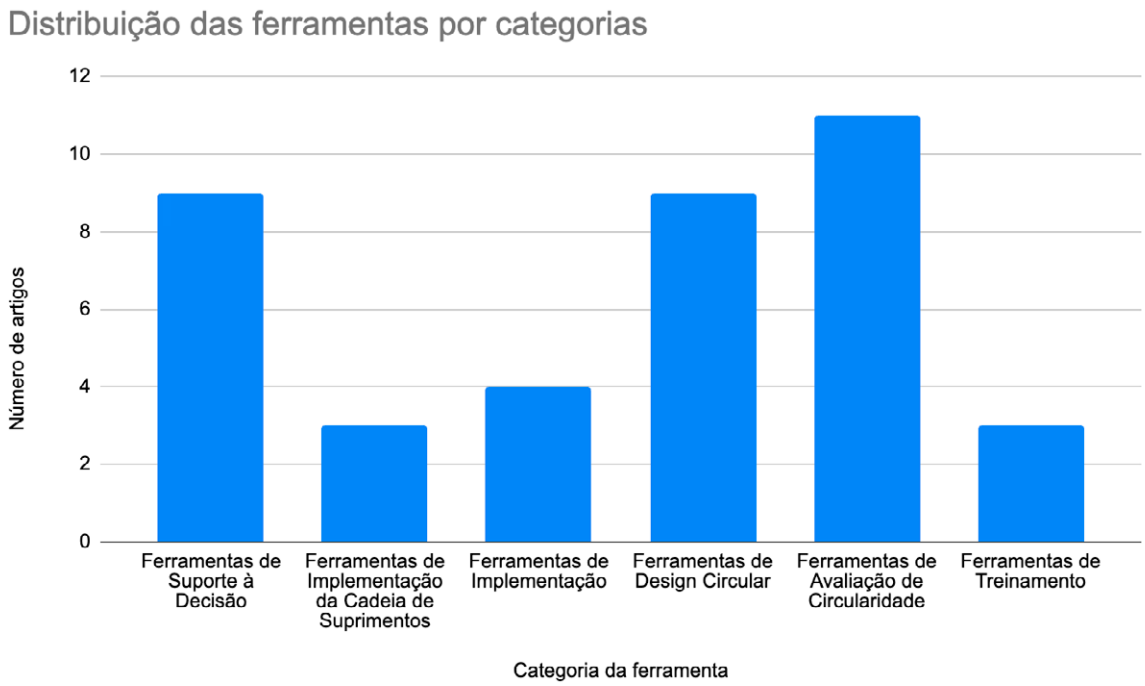

Figura 3 - Distribuição das ferramentas por categoria

Fonte: Elaboração dos autores

A seguir, são discutidas cada uma dessas categorias em pormenores, sendo que a referência completa relacionado ao ID (xx) de cada artigo estão no apêndice deste artigo.

Ferramentas de Suporte à Decisão: As ferramentas desta categoria são utilizadas para apoiar processos decisórios críticos em projetos de economia circular. Elas fornecem *insights* com base em dados e modelos analíticos para reduzir a incerteza e aumentar a eficácia nas escolhas empresariais. O estudo "*Scale without mass*" (1) desenvolveu uma ferramenta para apoiar a expansão das práticas de remanufatura na indústria de eletrodomésticos, enquanto o trabalho de "*Modeling the circular economy in environmentally extended input-output*" (29) utiliza uma aplicação web para modelar a economia circular em cadeias de suprimentos, fornecendo suporte baseado em dados para decisões de otimização. Essas ferramentas são cruciais para empresas que precisam tomar decisões informadas sobre o melhor caminho para adotar práticas circulares.

Ferramentas de Avaliação de Circularidade: Estas ferramentas são projetadas para medir e monitorar o grau de circularidade de produtos, processos ou organizações, ajudando a identificar onde melhorias podem ser feitas. O "*EnvPack*" (23,24) oferece uma ferramenta baseada em LCA para avaliar o impacto ambiental de cadeias de embalagens, enquanto "*The Circular Rebound Tool*" (33) é uma ferramenta que ajuda empresas a evitar efeitos de rebote, garantindo que os benefícios ambientais de novos modelos de negócios circulares não sejam anulados. Ferramentas como essas são essenciais para garantir que as iniciativas de circularidade realmente entreguem os benefícios esperados.

Ferramentas de Design Circular: Estas ferramentas ajudam a desenvolver produtos e serviços que são otimizados para circularidade, prolongando sua vida útil e facilitando o reuso, reparo ou reciclagem. O estudo "*A Circular Economy toolkit as an alternative to improve the application of PSS methodologies*" (5) desenvolve uma ferramenta para integrar práticas circulares em sistemas produto-serviço, enquanto o "*Use2Use Design Toolkit*" (34) foca no *design* centrado no usuário para promover o consumo circular. Essas ferramentas são importantes para empresas que desejam integrar práticas circulares logo nas fases iniciais de *design* de produtos e serviços.

Ferramentas de Implementação da Cadeia de Suprimentos: Estas ferramentas são voltadas para a integração da economia circular nas cadeias de suprimentos, garantindo que todas as partes da cadeia contribuam para a circularidade. Um exemplo é a ferramenta apresentada em *"A C-Lean framework for deploying Circular Economy in manufacturing SMEs"*, (3) que combina princípios Lean e economia circular para melhorar a eficiência e reduzir desperdícios em PMEs de manufatura. Outro exemplo é aquele discutido em *"A Classification Tool for Circular Supply Chain Indicators"* (39), que propõe uma ferramenta de classificação para avaliar a circularidade em cadeias de suprimentos multiatividade. Essas ferramentas são vitais para garantir que as cadeias de suprimentos estejam alinhadas com os objetivos de circularidade das empresas.

Ferramentas de Implementação: Estas ferramentas são práticas, focadas em operacionalizar a transição para a economia circular em diferentes contextos. Um exemplo é descrito no estudo "*A circular economy and industrial ecology toolbox for developing an eco-industrial park"* (4), que propõe um conjunto de ferramentas para ajudar na criação de parques eco-industriais baseados na sinergia de materiais e energia entre diferentes indústrias. Já o *"Circular Clock Model"* (15) oferece um modelo de implementação para empresas que buscam integrar práticas circulares em suas operações, equilibrando teoria e prática. Essas ferramentas ajudam a transformar a economia circular em ações concretas dentro das organizações.

Ferramentas de Treinamento: Ferramentas dessa categoria são voltadas para educar e conscientizar profissionais e estudantes sobre os princípios e práticas da economia circular. O artigo *"A generative toolkit to help raise industrial design students' awareness of low metal recycling rates"* (8) é um exemplo que foca em aumentar a conscientização dos estudantes de *design* industrial sobre a reciclagem de metais. A investigação *"Using serious games for (social) engagement in vision development for circular business parks"* (38) utiliza jogos como ferramenta de engajamento social para o desenvolvimento de visões circulares em parques de negócios. Essas ferramentas são essenciais para capacitar futuros profissionais a implementarem práticas circulares em seus respectivos campos.

Para concluir este tópico, é apresentada na figura 4 a intersecção entre as áreas de concepção de cada estudo e as respectivas categorias de ferramenta identificadas logo acima. Essa figura evidencia o papel estratégico da mediação docente dos conteúdos, garantindo o máximo de extensão a aplicabilidade das ferramentas. Reitere-se que cada um desses artigos está identificado por número próprio (de 1 a 39) na tabela constante no **Apêndice** deste artigo, e que há possibilidade de algumas ferramentas identificadas por esses artigos enquadrarem-se em mais de uma categoria de aplicação, bem como em mais de uma área de engenharia.

Figura 4 - Mapa das ferramentas de economia circular

Fonte: Elaboração dos autores.

3.2. Indicação de uso das ferramentas no EaD

As sugestões de atividades apresentadas neste trabalho oferecem um ponto de partida para que professores adaptem e implementem práticas educativas voltadas ao ensino de economia circular em cursos de engenharia. Como alertam Calvo et al. (2024), apesar da crucial relevância de uma visão holística e sistemicamente orientada pensar a sustentabilidade, os currículos de engenharia tendem a privilegiar excessivamente atividades voltadas à resolução de problemas (especialmente matemáticos), limitando o desenvolvimento criativo dos engenheiros em potencial. Os grupos de atividade, que são sugeridos a seguir, foram elaborados considerando momentos síncronos e assíncronos, baseados na análise das ferramentas de economia circular da revisão sistemática, e têm o intuito de facilitar o ensino e o aprendizado dos alunos, principalmente no contexto da EaD, favorecendo uma visão geral e completa de todos os processos necessários à consecução da EC. As propostas visam promover a reflexão crítica, o desenvolvimento de habilidades práticas e o engajamento ativo dos alunos, permitindo que os professores selecionem e personalizem as abordagens de acordo com suas disciplinas e objetivos de aprendizagem.

Atividades síncronas:

Os artigos analisados fornecem uma base para a execução de diferentes tipos de atividades educacionais focadas em economia circular, que podem ser integradas a cursos de engenharia. Uma sugestão de atividade são as **simulações**, que recriam cenários práticos relacionados a temas como avaliação de circularidade, seleção de locais, redes industriais e reutilização de resíduos. Interessante, nesse sentido, a interpretação de Moretti e Malizia (2015), que sugere que os ambientes de aprendizagem imersiva, apesar de não possuírem correspondência direta com o mundo físico, provocam novos sentidos e significados para a existência física. Explicam as autoras que comunidades estruturadas em ambiente virtual centrado na prática "são, com certeza, comunidades para aprender (...) O espaço, o meio, faz com que, ao falar 'de

dentro', do que está sendo vivenciado, experienciado, o usuário vai se tornando parte desse híbrido, atribuindo sentidos, significando, produzindo movimentos multimodais" (Moretti e Malizia, 2015, p. 146-147).

Essa conclusão encontra suporte em experimento conduzido por Davidovitch et al. (2006), que investigaram a conduta de estudantes que utilizavam um simulador de projetos de engenharia. A efetividade do aprendizado mostrou-se superior quando o simulador deixava de criar os cenários para cada etapa da simulação e permitia, ao invés, que os cenários fossem gerados a partir da tomada de decisão dos próprios estudantes. Isso permitiu exercício da complexidade, interconectividade e novidades envolvidas no processo decisório, aproximando a experiência teóricas da prática.

Outra sugestão de atividade são as **discussões sobre temas específicos**, como logística reversa, integração com Indústria 4.0, prontidão para economia circular e metodologias de Avaliação de Ciclo de Vida (LCA). Essas discussões promovem o debate crítico, incentivando a troca de ideias entre os alunos e o aprofundamento nos conceitos centrais da economia circular.

Além das simulações e discussões, uma sugestão importante são as **oficinas de desenvolvimento** e os ***workshops* temáticos**. Nas oficinas, os alunos podem explorar soluções práticas para desafios de *design* circular, modularidade e eficiência de recursos, trabalhando de forma colaborativa para desenvolver produtos e sistemas alinhados aos princípios da economia circular. Vale observar que essas oficinas podem ser trabalhadas tanto com apoio de laboratórios virtuais, em que o acesso remoto é feito por meio de um recurso simulado, quando por laboratórios remotos, nos quais os experimentos com *hardwares* reais são acessados e controlados remotamente pelos alunos (Silva et al. 2020). Nos dois casos, é o exercício ativo das partes envolvidas no processo aprendizado os componentes fundamentais, mais que o recurso laboratorial em si. Com a intervenção docente premeditada, o estudante se torna peça na construção do experimento. Estudo de Miesner e Schallert (2025) concluiu que o interesse dos estudantes de engenharia nas atividades *online* está fortemente relacionado à presença docente, aqui entendida como uma combinação de desígnio, facilitação e direcionamento dos processos cognitivos sociais. Nas palavras das autoras, os experimentos "mostraram que os sentimentos dos estudantes de estarem relacionados ou conectados ao seu instrutor serviram de mediação à relação entre a presença docente e ao interesse [nas aulas]" (Ibid., p. 17, tradução própria).

Outra sugestão são os *workshops*, que têm um foco mais específico em temas como construção sustentável, *design* especulativo e inovação em modelos de negócios circulares, promovendo a aplicação prática dos conceitos em contextos específicos. A proposta dos *workshops* com temas definidos previamente corresponde à construção colaborativa que, segundo Garrison (2016), envolve eliminar o aspecto competitivo do pensamento em grupo não-focalizado. Em lugar de se propor atividades em que os alunos devem decidir o que é mais relevante, o docente qualifica os temas preliminarmente redirecionando o tempo que seria dispendido nessa decisão temática ao desenvolvimento efetivo de atividades que, como sugerido acima, envolvem especulação e criatividade. Essas atividades, sugeridas em conjunto e com a fundamental mediação docente, fornecem uma abordagem holística que combina teoria e prática, permitindo que os alunos não apenas compreendam os princípios da economia circular, mas também desenvolvam competências aplicáveis ao mercado de trabalho.

Atividades assíncronas:

As atividades assíncronas propostas, com base na seleção de artigos, também fornecem base para o aprendizado independente dos alunos. Uma sugestão é a **leitura guiada e análise de estudos de caso**, que permitirá aos alunos explorarem conceitos e aplicações de economia circular em diferentes contextos, a partir dos artigos fornecidos, os quais os professores e tutores podem selecionar os artigos com as melhores ferramentas e temas para as aulas específicas. Essa atividade pode ser sugerida por meio de fóruns de discussão, os quais, segundo investigação de Pires e Veloso (2023), encontram maior motivação entre alunos precisamente quando estão centrados em indicações técnicas, mais do que em questões

de ordem epistemológica. Essa atividade potencializa o papel do docente como moderador da discussão e modulador das respostas esperadas, no sentido de "construção e socialização do conhecimento a partir do diálogo" (Alves e Silva, 2020, p. 11). As leituras guiadas dos fóruns servirão como suporte para o aprofundamento teórico e reflexivo sobre os desafios e soluções da economia circular, incentivando o desenvolvimento de uma visão crítica.

Outra sugestão de atividade assíncrona é a **realização de questionários de reflexão e exercícios práticos**, que podem utilizar as ferramentas levantadas para avaliar a compreensão dos alunos sobre temas como fluxos de materiais, simbiose industrial e avaliação de políticas ambientais. Para essas atividades, cujo foco seria a avaliação formativa, sugere-se o procedimento de revisão pelos pares. Trata-se de metodologia de aprendizagem contínua, em que estudantes podem ser treinados para avaliar criticamente problemas com solução aberta, e, com isso, assumirem o protagonismo de seu aprendizado (Verleger et al., 2016). Apesar de a promissora perspectiva do aluno, de "desenvolver a habilidade crítica de revisão do trabalho, bem como ampliar seu aprendizado com uma solução diferente para o mesmo problema que resolveu e ainda refletir sobre as suas estratégias" (Werneck e Nelson, 2016, p. 8-9)", a avaliação pelos pares é ferramenta de aplicação desafiadora e ainda pouco explorada em contextos educacionais a distância (Hypolito et al., 2021). Por isso, propostas metodológicas, como a elaborada Haddadi et al. (2018), que exploram a criação de comunidades de aprendizagem em torno das avaliações por pares, trazem de volta ao centro da questão a importância da mediação docente na modulação dos objetivos de aprendizagem e direcionamento reflexivo e, sobretudo, a importância da construção de um método de avaliação com resultados consistentes. Além disso, **relatórios de avaliação e estudos comparativos**, com a utilização das ferramentas, facilitarão que os alunos façam análises detalhadas de soluções que podem ser aplicadas em diversos setores e disciplinas de engenharia. Essas sugestões de atividades, utilizando as ferramentas, proporcionam uma estrutura autônoma de estudo que complementa o aprendizado síncrono e facilita a aplicação prática dos conceitos discutidos.

3.3. Adaptação das ferramentas de economia circular

Para adaptar ferramentas de economia circular ao ambiente educacional, especialmente em cursos de engenharia, é fundamental simplificar e modularizar os conceitos complexos. Uma estratégia eficaz é dividir as ferramentas em módulos ou etapas menores, criando guias passo a passo e resumos visuais que tornam os conceitos mais acessíveis. Além disso, exercícios práticos, que ilustrem cada etapa do processo, podem ajudar os alunos a assimilarem o conhecimento de forma mais gradual e eficaz. A simplificação deve focar em manter a essência das ferramentas, enquanto as torna mais manejáveis e diretamente aplicáveis no contexto acadêmico.

Um segundo passo é fazer a contextualização na adaptação dessas ferramentas para torná-las relevantes para diferentes áreas da engenharia. Utilizar estudos de caso específicos para cada disciplina — como engenharia civil, mecânica ou ambiental — pode mostrar como os princípios da economia circular se aplicam a problemas reais enfrentados nessas áreas. Por exemplo, para engenharia civil, as ferramentas podem ser aplicadas em projetos de construção sustentável, enquanto em engenharia mecânica, podem focar na reutilização de materiais e no *design* para desmontagem. Essa personalização dos exemplos garante que os alunos vejam a relevância prática dos conceitos em suas futuras carreiras e incluam estas ferramentas no seu repertório de uso. As ferramentas serão úteis para assimilar os conceitos de economia circular e sustentabilidade e para fornecer uma base de atuação no mercado.

O terceiro passo é, portanto, integrar as ferramentas em atividades práticas, como projetos em grupo, laboratórios e simulações, é essencial para garantir a aplicação do aprendizado de forma concreta. O uso de ferramentas de interação *online* auxiliará a adaptação e a integração dos alunos ao desenvolverem atividades práticas síncronas em conjunto. Além disso, ao adaptar as ferramentas para diferentes engenharias, é importante considerar as especificidades de cada campo, ajustando os exemplos e as aplicações

práticas para refletir as realidades e demandas particulares de cada área. Essa abordagem prática e personalizada prepara os alunos para enfrentar desafios semelhantes no mercado de trabalho, solidificando seu entendimento e competência no uso de ferramentas de economia circular.

3.4. Desafios no uso destas ferramentas

Na aplicação de ferramentas de economia circular em cursos de engenharia, os desafios mais comuns incluem a necessidade de contextualização e adaptação dos conceitos. Ferramentas, como as que envolvem metodologias específicas, como PSS (Product-Service Systems) ou Lean, muitas vezes requerem ajustes para se tornarem relevantes no ambiente educacional. Isso significa que os professores precisam adaptar os conceitos para que façam sentido para os alunos, utilizando exemplos práticos e ajustando as metodologias para o contexto das disciplinas de engenharia.

Outro desafio significativo é a complexidade conceitual presente em algumas dessas ferramentas. Conceitos avançados, como o efeito rebote, exigem um entendimento mais profundo e podem necessitar de treinamento adicional para que professores e alunos os apliquem corretamente. Além disso, a quantificação de dados qualitativos e o uso de termos linguísticos complicam a aplicação dessas ferramentas, tornando o ensino e a prática mais desafiadores em sala de aula. Isso indica a necessidade de preparar materiais de apoio e módulos introdutórios para facilitar a compreensão.

Algumas ferramentas requerem a colaboração entre múltiplos *stakeholders* e a análise de cenários complexos, ampliando os desafios práticos na aplicação dessas ferramentas, especialmente em ambientes educacionais a distância. A dificuldade de simular interações colaborativas e avaliar a viabilidade econômica e os resultados ambientais de maneira prática pode limitar a eficácia dessas ferramentas no ensino. Portanto, é fundamental simplificar as ferramentas e fornecer suporte didático adequado para integrá-las de forma eficaz aos currículos de engenharia, garantindo que os alunos possam compreender e aplicar os princípios da economia circular em suas futuras carreiras.

4. Conclusão

O presente estudo contribui para a integração das ferramentas de economia circular no ensino de engenharia a distância, fornecendo uma base conceitual e prática que pode ser adaptada para diferentes contextos educacionais. No entanto, um dos desafios centrais identificados é que muitas dessas ferramentas são direcionadas principalmente para a engenharia de produção, deixando lacunas em sua aplicabilidade para outras áreas da engenharia, como a civil, ambiental e mecânica. Além disso, mesmo as ferramentas desenvolvidas especificamente para o ensino de economia circular frequentemente falham em oferecer uma adaptação adequada para o contexto educacional, especialmente no ensino a distância.

Outro ponto crítico é que os artigos científicos, enquanto instrumento de divulgação, deveriam facilitar o debate acadêmico e estabelecer um diálogo mais acessível entre os pesquisadores e os professores que estão na linha de frente da formação dos futuros engenheiros. No entanto, nem sempre essas ferramentas e metodologias são apresentadas de forma que possam ser facilmente implementadas no ambiente educacional. Isso cria uma desconexão entre as propostas teóricas e a prática docente, exigindo que os professores adaptem esses recursos para seus alunos. Engenheiros em formação precisam, mandatoriamente, estar cientes dos desafios ambientais e do papel de sua profissão na mitigação desses problemas.

Diante disso, há questões em aberto que merecem ser aprofundadas em pesquisas futuras. A investigação sobre a eficácia das ferramentas mapeadas no desenvolvimento de competências técnicas e comportamentais dos alunos de engenharia é uma dessas áreas. Estudos futuros também poderiam avaliar como a implementação dessas ferramentas em cursos EaD impacta o engajamento e a retenção dos

estudantes, especialmente em atividades práticas como simulações e *workshops*. Também é necessário explorar o desenvolvimento de materiais didáticos que integrem essas ferramentas de maneira mais acessível e escalável, contemplando as especificidades das diversas áreas da engenharia.

Por fim, considerando a rápida evolução das tecnologias de ensino e as demandas emergentes de circularidade nas práticas industriais, é essencial que a pesquisa continue avançando para identificar novas ferramentas e metodologias que capacitem futuros engenheiros a enfrentar os desafios da sustentabilidade. O sucesso na adaptação dessas ferramentas para o ensino a distância reside não apenas na tecnologia, mas na criação de abordagens didáticas que estimulem a autonomia, o pensamento crítico e a aplicação prática dos conceitos circulares no dia a dia profissional.

Biodados e contatos dos autores

CASTRO, C. G. é professora do Departamento de Engenharia de produção no Instituto Federal de Minas Gerais. Completou o seu doutorado na Universidade de São Paulo. Seus interesses de pesquisa incluem Sustentabilidade, *Design* de Produtos, Inovação, com destaque para Economia Circular. Atou na Concepção, *design* de métodos, coleta e análises de dados, e redação final deste artigo.

ORCID: 0000-0003-4446-4520
E-mail: camila.castro@ifmg.edu.br

ROMERO, G. é professor e coordenador do departamento de Economia e Negócios do Centro Universitário Faveni (Unifaveni). Cursa atualmente doutorado no Instituto de Economia da Unicamp, onde completou também o seu mestrado e graduação. Seus interesses de pesquisa incluem história do pensamento econômico, história das ideias e educação, com destaque para temas ligados à modernidade. Atou na coleta de dados, *design* de métodos, análises estatísticas e redação final deste artigo.

ORCID: 0000-0002-5570-2670
E-mail: gustavoromero.academia@gmail.com

SANCHES, J. R. é doutora no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção na Escola de Engenharia de São Carlos pela Universidade de São Paulo. Seus interesses de pesquisa são nas temáticas de Economia Circular, Sustentabilidade e Ecossistema Circular. Atou na coleta de dados, analises estatísticas e redação final deste artigo.

ORCID: 0000-0002-1714-9878
E-mail: sanchesjulia@usp.br

RODRIGUES, B. N. é professor do Departamento de Construção Civil do Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Ceará, Campus Quixadá. É aluno de Doutorado em Tecnologia Ambiental na Universidade de Campinas. Seus interesses de pesquisa incluem Infraestruturas Verdes e Ensino de Engenharia. Atou na coleta de dados e redação final deste artigo.

ORCID: 0000-0002-1379-5135
E-mail: bruno.noronha@ifce.edu.br

MOREIRA, G. R. M. é doutorando em química pelo Instituto de Química da Universidade de São Paulo. Seus interesses de pesquisa incluem e biopolímeros como veículos de entrega de complexos de metais para nutrição de corais afim de atenuar os efeitos do branqueamento. Atou na definição objetivos, coleta de dados e redação final deste artigo.

ORCID: 0000-0002-1379-5135
E-mail: gabrielrmmoreira@usp.br

FERREIRA, A. L. G. é professora associada do Departamento de Ciências Básicas e Ambientais da Escola de Engenharia de Lorena na Universidade de São Paulo. Seus interesses de pesquisa incluem resíduos da agroindústria e biocombustíveis, com projetos financiados no Programa BIOEN/FAPESP. Atou na definição de objetivos e metodologia, supervisão e revisão deste artigo.

ORCID: 0000-0002-8361-8767
E-mail: gabas@usp.br

Referências Bibliográficas

ALVES, R. M. P.; LIMA, W. D. S. R. Mediação pedagógica na educação a distância: a atuação docente na produção textual colaborativa em fóruns de discussão. **Revista Paidéi@ - Revista Científica de Educação a Distância**, v. 12, n. 22, 2020. Disponível em: https://periodicosunimes.unimesvirtual.com.br/index.php/paideia/article/view/979/975 - Acesso em: 23 fev. 2025.

BEHAR, P. A. **Modelos pedagógicos em educação a distância**. Porto Alegre: Artmed, 2009.

CALVO, I. *et al.* A Methodology to Introduce Sustainable Development Goals in Engineering Degrees by Means of Multidisciplinary Projects. **Education Sciences**, v. 14, n. 6, p. 583, 28 maio 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-7102/14/6/583 - Acesso em: 23 fev. 2025.

CORVELLEC, H.; STOWELL, A. F.; JOHANSSON, N. Critiques of the circular economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 26, n. 2, p. 421–432, abr. 2022. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.13187 - Acesso em: 30 out. 2024.

DAVIDOVITCH, L.; PARUSH, A.; SHTUB, A. Simulation-based Learning in Engineering Education: Performance and Transfer in Learning Project Management. **Journal of Engineering Education**, v. 95, n. 4, p. 289–299, out. 2006. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00904.x - Acesso em: 24 fev. 2025.

ENFAM; SOUSA, J. V. **Guia de elaboração de materiais didáticos para uso na educação à distância**. Brasília: ENFAM, 2018. Disponível em: https://www.enfam.jus.br/wp-content/uploads/2018/01/Guia_EaD_AF-003.pdf - Acesso em: 30 out. 2024.

FILATRO, A; CAIRO, S. **Produção de conteúdos educacionais**. São Paulo: Saraiva, 2015.

GARRISON, D. R. **Thinking Collaboratively:** Learning in a Community of Inquiry. Routledge: Nova Iorque, 2016. *E-book* Disponível em: https://doi.org/10.4324/9781315740751 - Acesso em: 23 fev. 2025.

GEISSDOERFER, M. *et al.* The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, fev. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616321023. Acesso em: 30 out. 2024.

HADDADI, L. *et al.* Peer assessment and groups formation in massive open online courses. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 26, n. 5, p. 1873–1887, set. 2018. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cae.22005. Acesso em: 24 fev. 2025.

HYPOLITO, V. A. H. A.; ROSA, S. S.; LUCCAS, S. Uma Revisão sobre a Avaliação pelos Pares na Educação à Distância. **EaD em Foco**, v. 11, n. 1, 14 maio 2021. Disponível em: https://eademfoco.cecierj.edu.br/index.php/Revista/article/view/1362. Acesso em: 25 fev. 2025.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. **Ecological Economics**, v. 143, p. 37–46, jan. 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800916300325 - Acesso em: 30 out. 2024.

MIESNER, E.; SCHALLERT, D. L. Building bridges to engineering interest: Connections between student perceptions of instructor actions and interest in engineering classes. **Journal of Engineering Education**, v. 114, n. 1, p. e20621, jan. 2025. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jee.20621 - Acesso em: 24 fev. 2025.

MORETTI, G.; MALIZIA, P. Aprendizagem e virtualidade: práticas possíveis na sociedade do conhecimento. **Revista Docência do Ensino Superior**, v. 5, n. 2, p. 129–152, 7 jan. 2016. Disponível em: https://periodicos.ufmg.br/index.php/rdes/article/view/2035 - Acesso em: 23 fev. 2025.

MUNHOZ, A. S. **Projeto Instrucional para Ambientes Virtuais**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Transformando Nosso Mundo:** A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**.** S.l.: 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel - Acesso em: 30 out. 2024.

OROFINO, P. S. *et al.* Fatores que potencializam a participação e comunicação dos estudantes de ensino superior na modalidade a distância. **Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa - RELATEC**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 27-42, 2022. Disponivel em: https://relatec.unex.es/index.php/relatec/article/view/4121 - Acesso em: 30 out. 2024.

PIRES, R. M.; VELOSO, B. G. Os Fóruns de Discussão na Educação a Distância: Estudo de Caso num Curso de Especialização. **EaD em Foco**, v. 13, n. 1, p. e2030, 27 nov. 2023. Disponível em: https://eademfoco.cecierj.edu.br/index.php/Revista/article/view/2030/873 - Acesso em: 23 fev. 2025.

PRIETO-SANDOVAL, V.; JACA, C.; ORMAZABAL, M. Towards a consensus on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 605–615, abr. 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617332146 - Acesso em: 30 out. 2024.

RAMAN, R.; LATHABAI, H. H.; NEDUNGADI, P. Sustainable development goal 12 and its synergies with other SDGs: identification of key research contributions and policy insights. **Discover Sustainability**, v. 5, n. 1, p. 150, 10 jul. 2024. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/s43621-024-00289-0 - Acesso em: 23 fev. 2025.

SILVA, J. B. D. *et al.* Laboratórios Remotos como Alternativa para Atividades Práticas em Cursos na Modalidade EAD. **EaD em Foco**, v. 10, n. 2, 13 jul. 2020. Disponível em: https://eademfoco.cecierj.edu.br/index.php/Revista/article/view/942/547 - Acesso em: 23 fev. 2025.

VERLEGER, M. A.; RODGERS, K. J.; DIEFES-DUX, H. A. Selecting Effective Examples to Train Students for Peer Review of Open-Ended Problem Solutions. **Journal of Engineering Education**, v. 105, n. 4, p. 585–604, out. 2016. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jee.20148 Acesso em: 25 fev. 2025.