



# Inovações e tendências no ensino e pesquisa em conforto ambiental e sustentabilidade do ambiente construído



Cláudia Naves David Amorim  
Gustavo de Luna Sales  
Joára Cronemberger Ribeiro Silva  
Luciane Cleonice Durante  
Simone Berigo Büttner  
(Organizadores)





# Inovações e tendências no ensino e pesquisa em conforto ambiental e sustentabilidade do ambiente construído

Cláudia Naves David Amorim  
Gustavo de Luna Sales  
Joára Cronemberger Ribeiro Silva  
Luciane Cleonice Durante  
Simone Berigo Büttner  
(Organizadores)

2022



## Equipe editorial

**Organizadores** Cláudia Naves David Amorim  
Gustavo de Luna Sales  
Joára Cronemberger Ribeiro Silva  
Luciane Cleonice Durante  
Simone Berigo Büttner

**Coordenação Geral VI ENANPARQ** Sylvia Ficher, Presidente de Honra, PPG-FAU/UNB;  
Ricardo Trevisan, Presidente, PPG-FAU/UNB;  
Pedro Paulo Palazzo de Almeida, PPG-FAU/UNB  
Carolina Pescatori Candido da Silva, PPG-FAU/UNB

**Coordenação Científica VI ENANPARQ** Ana Paula Campos Gurgel, FAU/UNB  
Benny Schvarsberg, PPG-FAU/UNB  
Cláudia Naves David Amorim, PPG-FAU/UNB  
Erica Mitie Umakoshi Kuniuchi, DAU/UNB  
Joára Cronemberger Ribeiro Silva, PPG-FAU/UNB  
Leandro de Souza Cruz, FAU/UNB  
Maria Fernanda Derntl, PPG-FAU/UNB  
Vanda Alice Garcia Zaroni, FAU/UNB  
Milena D'Ayala Valva, TECCER/UEG

**Projeto gráfico e diagramação** Isabella Capanema

Textos, imagens, figuras e ilustrações são de responsabilidade dos autores.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida por qualquer meio sem a autorização dos autores.

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Inovações e tendências no ensino e pesquisa em  
conforto ambiental e sustentabilidade do  
ambiente construído [livro eletrônico] /  
organização Cláudia Naves David Amorim...  
[et al.]. -- 1. ed. -- Cuiabá, MT :  
Ed. dos Autores, 2022.  
PDF.

Vários autores.  
Outros organizadores: Gustavo de Luna Sales,  
Joára Cronemberger Ribeiro Silva, Luciane Cleonice  
Durante, Simone Berigo Büttner.  
Bibliografia.  
ISBN 978-65-00-54215-8

1. Acústica (Arquitetura) - Aspectos ambientais  
2. Arquitetura 3. Conforto ambiental 4. Projeto  
ambiental integrado 5. Sustentabilidade I. Amorim,  
Cláudia Naves David. II. Sales, Gustavo de Luna.  
III. Silva, Joára Cronemberger Ribeiro. IV. Durante,  
Luciane Cleonice. V. Büttner, Simone Berigo.

22-132135

CDD-720

### Índices para catálogo sistemático:

1. Conforto ambiental : Arquitetura : Projetos 720

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

# Índice

+ Prefácio	6
+ Apresentação	10
+ Parte 1. Ensino	13
14	O ensino de Conforto Térmico: uma busca por métodos mais integrados com as práticas projetuais Simone Berigo Büttner e Flávia Maria de Moura Santos
26	Relato da experiência de ensino-aprendizagem em Acústica Arquitetônica em Berçário localizado em Cuiabá/MT Luciane Cleonice Durante, Ivan Julio Apolonio Callejas e Daniela Barros Silva Freire Andrade
38	Metodologia ativa aplicada ao ensino integrado de Conforto Lumínico e Arquitetura de Interiores Karyna de Andrade Carvalho Rosseti, Everton Nazareth Rossete Junior e Elisa Pagliarini Cox
48	Exploraciones pedagógicas en confort y eficiencia energética realizadas por el Grupo de Investigación EMAT en Colombia Jorge Hernán Salazar Trujillo
58	Integrando graduação e pós-graduação no ensino de Conforto: Uma experiência na Universidade Federal de Minas Gerais Roberta Vieira Gonçalves de Souza e Rejane Magiag Loura
+ Parte 2. Pesquisa	69
70	Projeto Ambiental Integrado: ensino e pesquisa-ação no projeto de edifícios de balanço energético nulo Cláudia Naves David Amorim, Joára Cronemberger Ribeiro Silva e Ayana Dantas
84	Critérios de avaliação de sistemas de certificação e interface com o conforto ambiental de edificações residenciais Luciane Cleonice Durante, Carolina Mendonça Zina e Raquel Naves Blumenschein
94	Experimentos de condições ambientais na iniciação científica embasados nos princípios da Cultura Maker Vanda Alice Garcia Zanoni, Pedro Henrique Gonçalves e Caio Frederico e Silva
107	Ensino de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e Design Circular em Arquitetura e Urbanismo: Resultados de Pesquisa-Ação no curso da Unicamp Vanessa Gomes
+ Perfil dos autores	122

## Parte 2. Pesquisa

the Global Observing System: n. 488. 10. ed. Geneva, 2017.

ZANONI, V. A. G. et al. Estudo higrotérmico na autoconstrução: simulação computacional e medições em campo. Ambiente Construído, v. 20, p. 109-120, 2020.

## Ensino de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e Design Circular em Arquitetura e Urbanismo: Resultados de Pesquisa-Ação no curso da Unicamp

**Vanessa Gomes**

Universidade Estadual de Campinas, vangomes@unicamp.br

Entre 2013 e 2020, a disciplina Arquitetura e Construção Sustentável, no curso de arquitetura e urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), alcançou aproximadamente 240 estudantes regulares, e experimentou diferentes abordagens de conteúdo. O aprofundamento inicial em certificações de edificações foi gradualmente reduzido, enquanto o foco em Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) aumentava. Desde 2017, a disciplina passou a ter como projeto semestral a realização de ACV de edificações. Iniciando por edificações escolares, considerou-se, de maneira integrada, a simulação de energia operacional e a análise dos impactos incorporados nos materiais, construção, uso e fim de vida. Este capítulo enfatiza a pesquisa-ação realizada nas ofertas da disciplina em 2019 e 2020, sendo a última delas, já impactada pelas circunstâncias de pandemia. A partir da edição de 2019, os tópicos teóricos em pegada ecológica, ACV e projeto para economia circular foram fixados por exercícios de complexidade incremental que culminavam num projeto semestral. A complexidade do objeto de projeto foi controlada, para oferecer a oportunidade de explorar percepções oferecidas pela ACV e pelo rastreamento de metas de design circular, impostas como objetivos prioritários de projeto, no redesenho e otimização da solução proposta. Isto finalmente abriu espaço para a realização de um ciclo completo de análise-síntese-análise, tão valioso para a atividade de projeto. Por fim, discute-se melhorias alcançadas e vislumbradas para o futuro, pela disponibilização de uma ferramenta automatizada para facilitar a realização de ACVs e permitir redirecionar a ênfase para experimentações de projeto.

**Palavras-chave:** Ensino de graduação. Arquitetura e urbanismo. Avaliação de Ciclo de vida (ACV). Economia circular. Cradle to Cradle (C2C).

### 1. Introdução

Entre 2013 e 2020, a disciplina AU701 | Arquitetura: Projeto e Construção sustentável, no curso de Arquitetura e Urbanismo (AU) da Universidade de Campinas (UNICAMP), alcançou aproximadamente 240 estudantes regulares, e experimentou diferentes abordagens de conteúdo. O foco inicial em certificações ambientais foi gradualmente incorporando aspectos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Com o tempo, o aprofundamento em certificações – sempre mantido a pedido dos discentes – foi gradualmente reduzido e o tema passou a ser explorado no formato de aula teórica complementada por seminário discente, enquanto o foco em ACV aumentava.

Nas edições de 2013 e 2014, houve clara ênfase em avaliação ambiental de edificações. Os ciclos de Pesquisa-Ação (AR, do acrônimo em inglês Action Research) referentes a 2015 e 2016 evidenciaram que apesar da dedicação dos alunos, o projeto final precisava de mais tempo, preferencialmente em sala de aula. Essa limitação é particularmente delicada em cursos noturnos, como o da UNICAMP, principalmente para estudantes cursando os últimos anos, quando praticamente todos já estagiam ou trabalham e a disponibilidade para encontro presencial se torna

muito restrita. Como resultado, em 2017, o número de aulas teóricas foi reduzido para destinar sete aulas para o projeto semestral. Naquela oferta, os discentes foram expostos, pela primeira vez, à realização de ACV de edificação completa e de simulação computacional de energia para estimar o desempenho ambiental de um projeto escolar público padrão, mas simulado em climas diferentes. Em 2018, repetiu-se a temática do edifício escolar-padrão, desta vez do Fundo Nacional para Desenvolvimento da Educação (FNDE) ([www.fnde.gov.br](http://www.fnde.gov.br)<sup>1</sup>), estudado da perspectiva de ciclo de vida completo, incluindo tanto impactos operacionais quanto aqueles incorporados em materiais, construção, uso e fim de vida útil.

Este capítulo enfatiza o desenho e os resultados referentes às duas ofertas seguintes - 2019 e 2020 - dedicadas à inclusão de objetivos de projeto para economia circular. A última edição foi ministrada remotamente, devido às circunstâncias de pandemia. Estas duas experiências correspondem à quarta etapa de uma pesquisa-ação com oito anos de duração, descrita por Gomes (2022) como “Atraindo borboletas”, em referência ao “Butterfly diagram” proposto pela Ellen McArthur Foundation (2019).

Uma pesquisa-ação é um método interativo e cíclico de coleta de informação. A “Ação” refere-se

1 Parte do Plano de Ações Articuladas (PAR), uma estratégia de assistência técnica e financeira, iniciada em 2007 pelo Plano de Metas Compromisso Todos pela Educação, para o planejamento plurianual das políticas de educação, visando a ampliação da oferta, permanência e melhoria das condições escolares.

à intervenção numa prática existente em contextos sociais específicos (por exemplo, uma oferta de disciplina) para promover a mudança e a melhoria. A “Pesquisa”, por sua vez, envolve a observação e análise sistemática das mudanças devidas a intervenções específicas. Este ciclo oferece oportunidades para explorar práticas de ensino, desenvolvimento curricular e comportamento dos estudantes num ambiente real de ensino-aprendizagem, com reflexão contínua para melhorar os processos (KOWALTOWSKI et al., 2019).

A pesquisa-ação é basicamente um processo em espiral (Figura 1), com etapas variáveis que normalmente começam com a identificação de um problema (1), seguido pela postulação de soluções potenciais, a partir das quais um plano de ação é elaborado (2) e implementado (3). A etapa de observação compreende a coleta de dados e a análise de resultados (4). Depois disso, todo o processo de AR é refletido em (5): o problema é reavaliado e os resultados são interpretados para verificar o sucesso da intervenção. Um novo ciclo pode então começar, até que o problema seja resolvido, permitindo que os pesquisadores sejam parte ativa de uma experiência (KOWALTOWSKI et al., 2019).

## 2. Método

Para identificar dinamicamente as lacunas e responder aos pontos fortes e fracos das soluções propostas, aplicamos a AR como um estudo formativo do progresso. Por ser amplamente percebida como uma abordagem viável para ajudar os instrutores a

desenvolver sua prática de ensino enquanto aprimora sua competência profissional, a AR tem sido cada vez mais aplicada em instituições de ensino superior (ZUBER-SKERRITT, 1992; KEMBER; KELLY, 1993; ADAMSON, 2010), incluindo temas relacionados à sustentabilidade (JOHNSTON, 2007; KOWALTOWSKI et al., 2019; UGAYA et al., 2020).

Dentre as perguntas que embasaram esta investigação, destacam-se quatro questionamentos amplos:

- Quais os conteúdos teóricos mínimos e suficientes para transmissão da base necessária para o desenvolvimento dos exercícios e do projeto semestral (de forma a liberar o máximo espaço para aplicação no desenvolvimento de projeto e sua avaliação)?
- Qual a carga horária e dinâmicas de ensino-aprendizagem mais adequadas para sensibilização e capacitação em modelagem de ciclo de vida compatível com estudantes de Arquitetura e Urbanismo e com aplicação a edificações?
- Como despertar a percepção e estimular a dinâmica entre estimativa de desempenho e retroalimentação do processo decisório durante o desenvolvimento de projeto?
- Como equilibrar avaliações formativas e somativas para assegurar apreensão de conceitos e desenvolvimento de competências esperadas? Quais focos tais avaliações deveriam ter?

E, mais especificamente, nas duas últimas ofertas:

- O formato concentrado e o conteúdo de aulas teóricas é adequado e suficiente para apoiar o desenvolvimento dos projetos semestrais?
- Qual o melhor balanço entre complexidade e abrangência de modelagem para o projeto semestral?
- Como facilitar a familiarização inicial/sala de aula invertida para tópicos iniciais dos discentes com os temas da disciplina e assegurar a efetiva integração de ACV ao processo projetual?

A introdução de apresentação preliminar auxilia na identificação de aspectos críticos, desvios de compreensão e modelagem do problema, pontos fortes, dificuldades e erros de interpretação, e oportunidades de melhoria do projeto, assegurando que seja efetivamente informado e refinado a partir de resultados de desempenho ambiental?

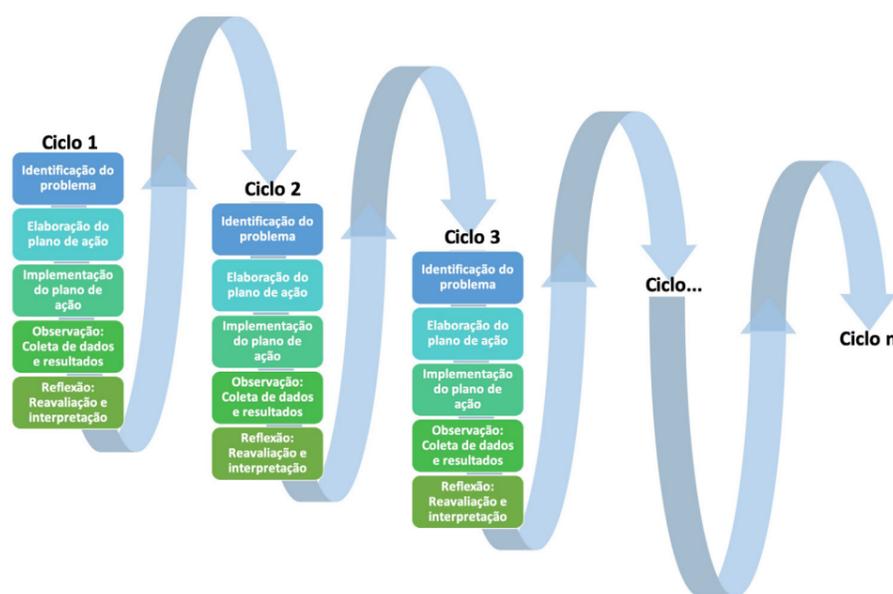
Este recorte da pesquisa envolveu 64 estudantes que cursaram a disciplina no período em tela. Em cada ano do estudo, o ciclo de AR compreendeu o protocolo de cinco etapas descrito anteriormente. Os instrumentos de avaliação utilizados na pesquisa englobaram a avaliação cruzada da equipe de ensino e dos discentes. A avaliação pelas docentes ocorreu ao longo e logo após cada oferta. A avaliação discente consistiu na discussão informal e feedback em sala de aula no início e no encerramento do curso, além de convite para preenchimento de questionários de avaliação on-line enviados para alunos das duas turmas, para estimular a reflexão quanto ao progresso de aprendizagem. A confiabilidade foi reforçada pela repetição da aplicação do instrumento. O primeiro questionário (diagnóstico inicial) avaliava a base de conhecimento do processo de projeto dos alunos que cursaram a disciplina em 2019 e 2020. Já o segundo questionário (avanço de conhecimento e desenvolvimento de habilidades) foi aplicado também aos alunos que cursaram a disciplina em 2018, como calibração adicional. O questionário foi pré-testado para a compreensão das perguntas antes das aplicações. O conteúdo corresponde aos critérios de avaliação do curso.

## 3. Avaliação de ciclo de vida (ACV): aplicação a edificações completas e estado de informações para ensino na graduação

A ACV é uma técnica para avaliar os impactos ambientais desde a extração dos recursos naturais até o descarte final de um produto ou serviço (ISO, 2006) (Figura 2a). Para se quantificar os impactos ambientais, considera-se todas as interações dos fluxos de materiais e energia com o ambiente (aspectos ambientais) que acontecem durante o ciclo de vida do produto. A fronteira do sistema do produto identifica quais processos e fases do ciclo de vida estão compreendidos pelo estudo de ACV, sendo que o mais recomendado é analisar o ciclo completo, configurando um sistema do berço ao túmulo ou “cradle-to-grave” (Figura 2b).

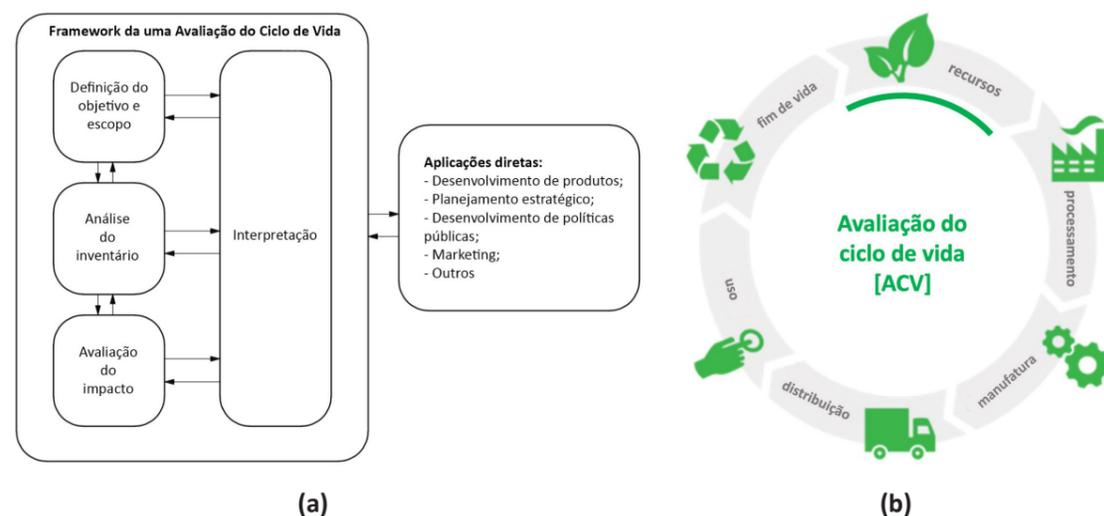
Quando se aplica ACV a edificações (ACVed), é preciso considerar não só os estágios do ciclo de vida dos produtos que a compõem (Figura 3a), mas o ciclo de vida da edificação em si (Figura 3b). A norma europeia EN 15978:2011 (CEN, 2011) é a principal referência para a realização de estudos na escala da edificação, enquanto a norma EN15804+A1:2013 (CEN, 2013) orienta a produção de declarações ambientais de produtos de construção.

Figura 1: Ciclos de uma pesquisa-ação



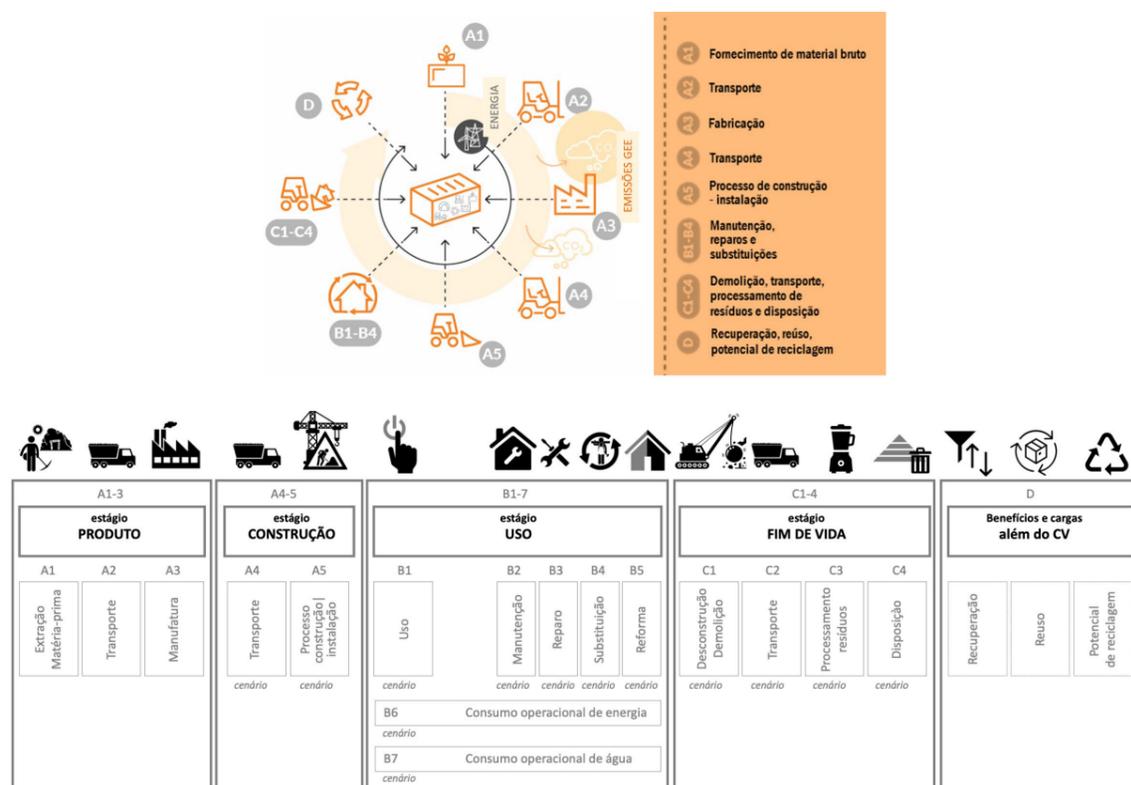
Fonte: Gomes (2022)

Figura 2: Etapas de uma ACV segundo a norma ISO 14040:2006 (a) e ciclo de vida de um produto a ser inventariado em uma avaliação (b).



Fontes: ISO 14040:2006 (ISO, 2006) (a) e autoria própria (b).

Figura 3: Estágios de ciclo de vida de um produto de construção (a), segundo a norma EN15804+A1:2013 (CEN,2013), segue a estrutura modular proposta na norma EN 15978 (CEN, 2011), para edificações (b). Os estágios B5, B6 e B7 aplicam-se apenas a edificações. O chamado “Módulo D”, referente a benefícios e cargas ambientais para além do ciclo de vida estudado, pode ser relatado, separadamente, independentemente da escala de avaliação.



Fonte: IEA EBC Annex 57 (PASSER, 2016) e CEN (2013) (a) e CEN (2011) (b)

As últimas três ou quatro décadas testemunharam uma ênfase em eficiência energética. Com a redução substancial do consumo operacional de energia proporcionado, por exemplo, pela Diretiva Europeia de desempenho energético de edificações (Diretiva 2010/31/UE, Diretiva 2012/27/UE), o impacto incorporado tornou-se proporcionalmente mais importante (GOMES et al., 2018, VILCHES; GARCIA-MARTINEZ; SANCHEZ-MONTAÑES, 2017; SEO et al., 2016), e estudos recentes concentram-se cada vez mais na redução simultânea de energia operacional e dos impactos incorporados (BIRGISDOTTIR et al., 2017; CABEZA et al., 2013).

Para edifícios novos ou retrofits, a notável redução do impacto operacional em climas temperados e frios ocorria, normalmente mediante a adição de materiais isolantes, por exemplo, que traziam uma contribuição importante de impactos literalmente presos aos edifícios.

Este período foi amplamente inspirado pela participação no IEA EBC Annex 57, um consórcio internacional de pesquisa instituído em 2011 no âmbito do Programa de Energia em Edificações e Comunidades (EBC), da Agência Internacional de Energia (IEA), que tratava exatamente de procedimentos para estimativa de energia e emissões incorporados e respectivos indicadores (SEO et al., 2016; LÜTZKENDORF; BALOUKTSI, 2016). Dentro da sala de aula, os alunos ganhavam novas competências para além das certificações, ao se familiarizarem com mais esta discussão na fronteira do conhecimento internacional, e com o SimaPro, uma das plataformas de ACV mais utilizadas mundialmente. Os estudantes eram expostos a esta ferramenta nos exercícios de fixação, mas não a utilizavam no projeto semestral: em função do tempo restrito, a equipe docente fornecia os coeficientes de impacto dos materiais utilizados nos projetos e nas propostas de intervenção.

O principal ponto forte de uma ACV está justamente na possibilidade de se examinar o ciclo de vida inteiro, para evitar o risco de transferência de impactos de uma etapa a outra. Imagine o leitor que apenas dois materiais concentrem cerca de 88% da massa numa edificação. Isto já daria uma boa indicação da importância destes dois itens. Agora, considerando o número de reposições e intervenções de manutenção, cuja necessidade é uma função da vida útil dos componentes relativamente ao sistema estrutural da edificação, vários outros itens podem se tornar relativamente relevantes também. O mesmo se aplica ao fim de vida: a falta de alternativas viáveis

para evitar disposição em aterro também pode colocar vários materiais como pontos de atenção. Estas percepções se perdem se apenas o estágio de produto for considerado.

Uma ACV fornece estimativas de impactos em várias categorias simultaneamente, e isto é verdadeiramente essencial. Uma edificação é, da perspectiva da ACV, uma coleção de materiais, em uma coleção de componentes e elementos construtivos. Alguns deles têm impacto importante em termos de energia e emissões, enquanto outros – como o cobre e outros metais – não se destacam tanto nestas categorias, mas têm impactos importantíssimos em termos de toxicidade humana e de ecossistemas. Ao se limitar a análise a apenas duas categorias, esta percepção se perde e arrisca-se a descobrir, mais adiante, que coisas muito importantes foram ignoradas.

Por ser uma técnica muito intensiva no uso de dados, numa ACV trabalha-se, conceitualmente, com dados em primeiro e em segundo plano. Colocando de maneira simplificada, dados de primeiro plano são os dados de interesse da análise, sobre os quais se pode intervir na tomada de decisão. Já os dados de segundo plano apoiam a análise de interesse ao completar em base de dados de inventários de ciclo de vida. O problema é que não havia dados de produtos nacionais nem de primeiro, nem de segundo plano inseridos nas grandes bases de dados.

Em 2017, um pequeno financiamento vindo da Suíça permitiu que um consórcio de instituições de pesquisas brasileiras se juntasse para produzir os primeiros conjuntos de dados de produtos de construção nacionais a serem disponibilizados na Ecoinvent, a base de dados secundários de inventário de ciclo de vida mais utilizada mundialmente em estudos de ACV (SILVA et al., 2018<sup>2</sup>). Esta foi uma contribuição fundamental, pois, a partir daquele momento, avaliações sobre produtos brasileiros poderiam usar dados nacionais, em vez de datasets genéricos chamados de “resto do mundo” (ROW) disponibilizados na base de dados, mas que revelam um nível muito baixo de conhecimento da realidade local.

<sup>2</sup> Clínquer, cimento (de acordo com os tipos de cimento aplicáveis a cada país) e concreto (várias dosagens), para Brasil, Peru e Colômbia; e areia, brita, escória granulada de alto-forno, argila calcinada, concreto reforçado com fibras e bloco de concreto, somente para o Brasil.

#### 4. Inserção e consolidação do tema na disciplina (2017-18)

Toda a fase inicial da pesquisa-ação reflete amplamente a participação nas atividades do IEA EBC *Annex 57* (2012-2016), consórcio internacional de pesquisa vinculado ao Programa Energia em Edificações e Comunidades (EBC) da Agência Internacional de Energia (IEA) dedicado ao estudo de energia e carbono incorporados em edificações.

A esta altura, a ACV estava definitivamente inserida no plano de curso, e era necessário que os estudantes a conhecessem melhor. Em alinhamento ao avanço proporcionado pelas atividades de pesquisa nacionais, os estudantes da disciplina trabalhavam com estes mesmos dados, já coletados para o contexto brasileiro. A hipótese foi que os estudantes precisavam menos de um professor e mais de tempo para experimentar em ambiente de ensino-aprendizagem. As aulas teóricas foram reduzidas para cerca de 50% da carga horária. Adicionalmente, houve uma mudança substantiva no projeto semestral, e os estudantes passaram a construir uma planilha de dados do zero e a realizar a avaliação operacional de energia, utilizando um *software* simples (*Sefaira*), suficiente para assegurar alguma base para discussão, sem criar uma complexidade que sobrecarregasse as equipes.

Na edição de 2017, os estudos de caso consistiam em projetos da Escola-Padrão da prefeitura Rio de Janeiro e, projetos-padrão do Fundo Nacional para Desenvolvimento da Educação (FNDE) ([www.fnde.gov.br](http://www.fnde.gov.br)), supondo pares de projetos iguais implantados nas cidades do Rio de Janeiro e de Campinas. O objetivo era demonstrar a influência do clima e logística de fornecimento induzidos pela localização dos projetos, com dois focos principais. Primeiro, na colaboração e trabalho de equipe, e no desempenho de papéis predeterminados e que reproduziam uma organização real de trabalho: em cada equipe, havia um grupo de analistas e outro de simuladores. O segundo foco era na comparação de resultados com base em ACV: eles faziam o diagnóstico, propunham a intervenção e avaliavam novamente. Com este escopo já intenso, não se propunha intervenção no projeto original.

Para equilibrar o trabalho demandado com o período disponível para o projeto semestral e permitir o enfoque desejado nas análises e discussões, a equipe docente (docente + assistente(s) de ensino) fornecia os coeficientes de impacto dos materiais listados para a versão do projeto em estudo, e eventualmente

realizava as ACVs individuais ainda faltantes. Aos estudantes cabia conduzir as tarefas de simulação computacional e de alimentação da planilha inventário no ciclo de vida da edificação. Equipes de cerca de seis componentes proativamente indicavam aqueles envolvidos em cada atividade, além do coordenador. Além do trabalho intraequipe, os coordenadores de equipe, planilhadores e simuladores realizavam reuniões transversais com seus pares nas equipes estudando o caso em outra cidade, para desenvolvimento das análises comparativas e síntese correspondentes. Como resultado do ciclo de AR, constatou-se que os estudantes adquiriram as competências esperadas, mas restava com pouca reflexão quanto a aplicabilidade e possibilidades de influenciar o projeto e sua utilização.

Desta forma, para o ciclo de AR seguinte, em 2018, manteve-se o foco na colaboração e trabalho de equipe e nos papéis desempenhados, mas especificamente visando gerar informações para informar um decisor, por exemplo, um gestor público que tivesse que escolher – da perspectiva ambiental – entre construir uma escola com 12 salas de aula ou três escolas com 4 salas, com base na aplicação da técnica de ACV.

Se, do ponto de vista do gestor, pode parecer mais atrativo inaugurar três escolas, do ponto de vista ambiental esta seria também a melhor alternativa? Três escolas são três inaugurações, atendem a mais bairros com menos deslocamento, sobrecarregando menos a estrutura viária local, e as cidades normalmente dispõem de mais terrenos menores. Por outro lado, numa escola com 12 salas se aproveita uma mesma infraestrutura básica para atender a um número maior de alunos.

Aos estudantes foi posto o desafio de (i) realizar a simulação energética; (ii) montar a planilha de dados de inventário para os modelos de quatro e de doze salas, com e sem quadra esportiva e, a partir de seus resultados, extrair conclusões para; (iii) subsidiar a opção por um ou outro modelo escolar; e (iv) apontar três pontos críticos que poderiam ser melhorados para reduzir impactos. Este exercício com número restrito de pontos de intervenção objetivava evidenciar os benefícios e consolidar de vez a incorporação da ACV no processo de projeto, diante da limitação de tempo disponível. Adicionalmente, a forma de comunicação de resultados precisa ser tornada compreensível por decisores e outros usuários da informação não especialistas, como o gestor público neste caso.

A planilha de inventário da etapa de produto segue a mesma estrutura clássica consolidada para orçamentos de obras, iniciando pelos serviços preliminares até a cobertura. O inventário da edificação então é completado segundo os estágios seguintes do ciclo de vida: construção, com respectivas perdas; uso, com respectivas manutenções, e fim de vida. Não foram solicitadas as estimativas para além do ciclo de vida em tela (Módulo D).

Assim, foram surgindo percepções como: “... *se eu colocar mais salas, o aumento do impacto é pequeno...*”. Ou: “... *acrescentar uma quadra a uma escola pequena aumenta o impacto em 1/3. Já para uma escola maior, o aumento é apenas de 10%... talvez escolas menores possam compartilhar o equipamento esportivo entre si ou com escolas maiores...*”. Ou, ainda: “... *ao triplicar o número de salas, o impacto não cresce na mesma proporção... há um ganho aparente quando se concentra um número maior de crianças nessas escolas*”. O mesmo podia ser observado para as emissões, evidenciando sua relação de proporcionalidade com o fluxo de energia.

Finalmente, os estudantes identificaram que o tipo de cimento e o material das esquadrias e dos barracões utilizados no canteiro de obras, e fizeram proposições de alteração, que resultariam numa redução de 15% do impacto original, maior até do que a que motivou a discussão sobre tamanho mais apropriado da estrutura escolar. Mais uma vez, novas competências eram estimuladas, para além da avaliação integrada de impactos operacionais e incorporados: agora os estudantes (analistas) também se aprofundavam no uso do SimaPro, e o utilizavam para justificar suas propostas de intervenção sobre o projeto público padrão.

A apresentação final foi realizada simultaneamente por todos os discentes, em um grande grupo, contemplando os resultados individuais de cada equipe e uma metanálise de todos os achados. Estudantes e equipe docente consideraram os resultados excelentes, mas a avaliação de curso ainda apontava o tempo restrito para a realização do projeto semestral, mesmo sendo as ACVs realizadas previamente pelas docentes; e o pouco domínio da técnica e *software* de ACV em si, pelo mesmo motivo.

#### 5. Resultados e discussão

Os dois ciclos de AR aqui enfatizados coincidiram com a participação nas atividades do IEA EBC *Annex 72* (2018-22), que – a partir dos achados do Anexo 57, que o antecedeu – objetiva a harmonização de

procedimentos, estabelecimento de métricas, e desenvolvimento de *benchmarks* para avaliação do ciclo de vida de edificações, sem se limitar àquelas duas categorias de impactos incorporados (energia e emissões) tratadas em seu predecessor, e fornecendo uma imagem ambiental muito mais completa. Em nosso grupo de pesquisa na UNICAMP, por exemplo, costumemente trabalhamos com um conjunto de 13 categorias de impacto, que incluem as categorias obrigatórias para a comunicação de declarações ambientais de produtos de construção, ao lado de algumas outras opcionais relevantes.

Pudemos, então, começar a “atrair borboletas”, isto é: extrapolar o recorte do berço ao túmulo, característico da ACV tradicional, para considerar aspectos do chamado “berço ao berço” (“*cradle-to-cradle*”). Tratados em ACV no “Módulo D” (“Benefícios e cargas além do ciclo”), tais aspectos compõem o cerne do modelo de economia circular, representada pelo “diagrama borboleta” (Figura 4).

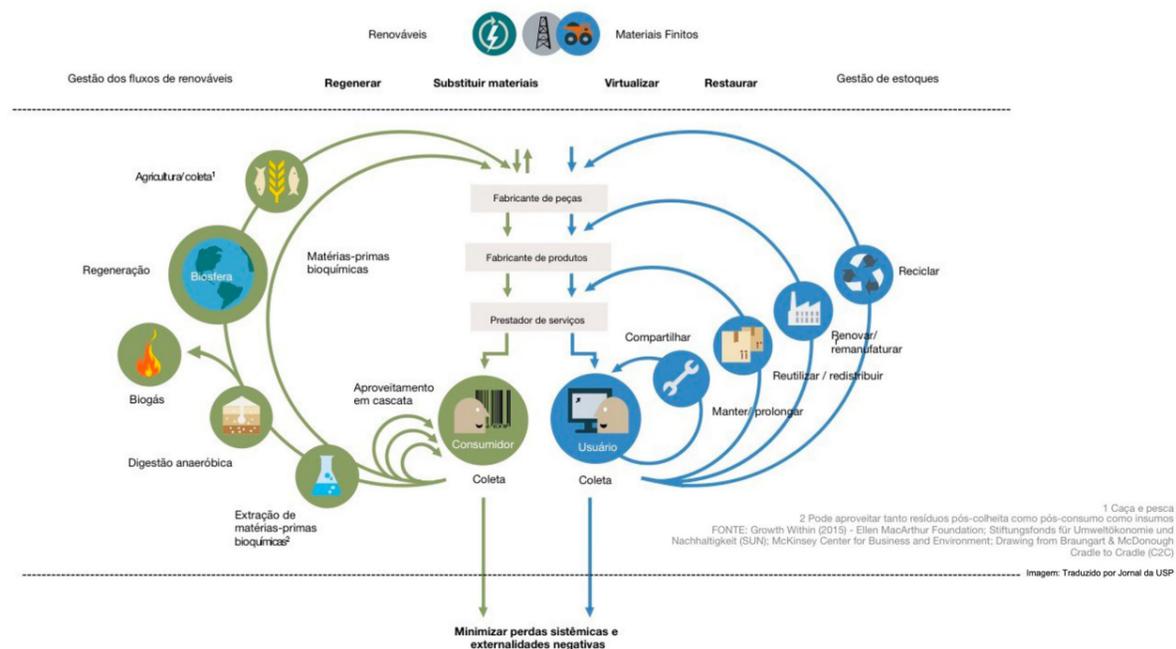
#### 5.1 Inserção de objetivos de design circular

A economia circular distingue ciclos biológicos (à esquerda) e ciclos técnicos (à direita). O consumo ocorre apenas nos ciclos biológicos, onde alimentos e materiais de base biológica (como algodão ou madeira) são projetados para alimentar o sistema através de processos como compostagem e digestão anaeróbica. Estes ciclos regeneram sistemas vivos, como o solo, que fornecem recursos renováveis para a economia. Já os ciclos técnicos recuperam e restauram produtos, componentes e materiais através de estratégias, como reutilização, reparo, remanufatura ou (em último recurso) reciclagem.

Este modelo (STAHEL, 2019) apoia-se em uma série de escolas de pensamento, como o biomimetismo (BENYUS, 1997), o capitalismo natural (HAWKEN; LOVINS; LOVINS, 1999), a filosofia de design “*Cradle-to-cradle (C2C)*” (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2002), a ecologia industrial (LIFSET; GRAEDEL, 2002; GRAEDEL; ALLENBY, 2003), a economia de desempenho (economia funcional de serviços) (STAHEL, 2010) e a abordagem de sistemas de economia azul (PAULI, 2010).

Sustentado por uma transição para fontes renováveis de energia, o modelo circular representa uma mudança sistêmica para gradualmente dissociar a atividade econômica do consumo de recursos finitos, bem como construir capital econômico, natural e social e resiliência a longo prazo, para atender às

Figura 4: Diagrama borboleta



Fonte: Ellen McArthur Foundation (2019). Tradução: Jornal da USP

necessidades das pessoas, dentro dos limites do planeta. Alcançar uma economia circular implica em repensar e redesenhar a maneira como fazemos as coisas, com base em três princípios basilares: primeiro, de eliminar o próprio conceito de resíduos e poluição; segundo, de manter os materiais e produtos em circulação pelo máximo tempo possível; terceiro, regenerar sistemas naturais para sustentar tudo isto.

Ao transferir essas noções para a disciplina, possivelmente a primeira grande surpresa dos estudantes – maior até do que o tamanho da planilha de inventário – é descobrir que reciclagem, do ponto de vista de circularidade, não é a primeira ou a melhor opção. Mas, certamente, o segundo susto é constatar que menos de 9% da nossa economia é circular (CIRCLE ECONOMY, 2020), ou seja: muito pouco dos 92,8 bilhões de toneladas de materiais utilizados no planeta anualmente retorna para usos produtivos. Quase metade desta massa destina-se à construção e manutenção de casas, rodovias e infraestrutura.

Na lógica circular, os produtos são bancos de materiais; cada produto tem o seu valor e, principalmente, as decisões de projeto têm que ser guiadas pelo que acontece depois da vida útil. Para sensibilização dos estudantes, em 2019, introduzimos um exercício investigativo. Nós fornecíamos um *kit* de ferramentas para desmontagem de objetos de uso cotidiano – uma escova de dentes, um fone de ouvido, um radinho a pilha, um carrinho de brinquedo – e averiguação dos

elementos e peças que os compõem, quais são os materiais em cada peça, como é ciclo de vida de cada um deles, se há algum material tóxico envolvido ou alguma ameaça à recuperação destes materiais, e assim por diante. Na edição de 2020, oferecida durante a pandemia, os estudantes gravaram vídeos deste exercício e os carregaram na plataforma de aulas.

A experiência do ciclo AR 2018 apontou para que os estudantes pudessem realizar um projeto do início ao fim, cujo processo de projeto fosse alimentado tanto por conceitos *C2C* e design circular, quanto por informações de ACV, reinseridas dinamicamente no desenvolvimento do projeto. Assim, foram tomadas ações em quatro frentes principais: (1) nova revisão do conteúdo teórico mínimo necessário; (2) controle da complexidade do objeto de projeto, visando ampliar a exploração dos *insights* oferecidos pelos resultados da ACV e da métrica de circularidade selecionada; (3) metas ambientais a serem atendidas para aprovação na disciplina acordadas coletivamente entre docentes e as equipes; e (4) introdução de uma apresentação preliminar, formativa, a fim de permitir discussões transversais em grupo e *feedback* docente para melhorias antes da entrega final.

## 5.2 Ciclos AR 2019 e 2020

Para acrescentar a observação de metas de circularidade (fechamento de ciclos), as aulas teóricas foram reduzidas ao mínimo inevitável, e uma planilha calculadora era fornecida, e bastava que as equipes inserissem os materiais efetivamente utilizados nos projetos. Com isto, desde 2019 foi possível que os estudantes percorressem todas as bases do desenvolvimento de competências esperado: entendimento de ACV e da planilha de inventário; prática da plataforma de ACV, para montar os datasets faltantes e complementar um ou outro item do inventário propositalmente não fornecido; e, principalmente, o foco da única avaliação somativa mantida: um “desafio de design circular” com alimentação do processo decisório, desde o início da concepção do projeto, pelo desempenho ambiental obtido por ACV e por métricas de circularidade.

O conteúdo teórico foi refinado para a melhor aderência ao projeto semestral. Os tópicos teóricos em pegada ecológica; teoria de ACV; tutorial e prática de plataforma específica para ACV (*SimaPro*); ACV de edificações completas; ACV em escala meso-urbana; e projeto para economia circular / *C2C* – foram fixados por exercícios de dificuldade incremental que culminavam no projeto semestral. A complexidade do objeto de estudo foi controlada ao limitar o número de materiais/processos a modelar, para permitir maior familiarização com a modelagem no *SimaPro*, sem superonerar o tempo disponível para desenvolver o projeto semestral.

O escopo do projeto semestral (“desafio de design circular”) foi definido a partir de demanda identificada pelos próprios estudantes durante a discussão no seminário sobre estudo de viabilidade para certificação ambiental, que enfocou as instalações do edifício de sala de aulas da Faculdade. O objeto escolhido foi uma estrutura coberta no acesso principal à Faculdade, combinando funções de vigilância e espera de transporte coletivo. A estrutura deveria observar metas de design circular (o máximo possível de fechamento de ciclos dos recursos), ao menor impacto possível no ciclo de vida. Do ponto de vista didático, esse objeto era suficientemente simples, com número limitado de materiais, cujas ACVs poderiam ser realizadas dentro do tempo programado e auxiliar na fixação do conteúdo teórico e do uso de *software* específico. Pela natureza do objeto a projetar, a necessidade de simulação energética foi automaticamente suprimida. As metas ambientais a serem atendidas para aprovação na disciplina

foram acordadas coletivamente entre docentes e as equipes. A superação das metas acordadas definiria uma competição saudável pelo reconhecimento conjunto do melhor projeto, a ser apresentado para a diretoria da Faculdade, para apreciação.

Como de praxe, a equipe docente forneceu uma lista bastante completa de materiais com coeficientes de impacto pré-calculados, eventualmente realizando as ACVs faltantes para a versão do projeto em estudo. Aos estudantes cabia conduzir as tarefas de simulação computacional e de alimentação da planilha inventário no ciclo de vida da edificação, que embasavam as análises comparativas. Equipes de cinco a seis componentes organizaram-se nos papéis de projetistas, consultores ambientais e um coordenador. Além do trabalho intra-equipe, coordenadores de equipe e consultores ambientais (planilhadores) poderiam realizar reuniões transversais com seus pares das demais equipes, para desenvolvimento das planilhas de análise. Como desta vez os alunos realizariam as ACVs dos materiais, depois de se assegurar quanto à fixação dos conceitos e cálculos envolvidos, o balanceamento feito pelos instrutores consistiu no fornecimento de uma planilha contendo as fórmulas de cálculo para inventário de ciclo de vida. A montagem da planilha de inventário do zero ainda era solicitada, mas, assim que a avaliação formativa confirmava a fixação de conhecimento, a calculadora, que consumia muito tempo em sua preparação, era repassada às equipes.

O desafio de projeto circular (*Circular design Case*) foi inspirado na “*Circular Design Learning Journey*” desenvolvida pela *Ellen McArthur Foundation*, em associação à companhia global de design IDEO. O objetivo do exercício era oferecer uma experiência de aprendizado desafiando os estudantes a repensar sua visão de projeto (produtos, serviços e sistemas) para uma economia circular. O *briefing* compreendia entender produtos pela exploração do sistema de que ele faz parte, e imaginar como produto e sistema poderiam ser redesenhados de acordo com os três pontos principais da economia circular:

- Eliminar cargas ambientais através do projeto;
- Manter produtos e materiais em uso; e
- Regenerar sistemas naturais.

A apresentação do *Circular Design Case* introduzia a missão dos estudantes (projetar sob a lógica circular e aferir os impactos ambientais resultantes);

o objeto de projeto e as regras a observar. No caso de 2019, o objeto foi a atualização ambiental do ponto de vigilância no acesso frontal da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU) da UNICAMP. Como regras:

- A função de suporte de vigilância (guarita) deve ser preservada, com possibilidade de acréscimo de novas funções como bicicletário e espaço abrigado, área de vivência e interação, espera de vans, entre outros;
- A área utilizável era livre, desde que coubesse fisicamente no espaço externo da faculdade.
- Cumprimento dos requisitos de Projeto Circular, indicado pela parcela de ciclos fechados de materiais, dentre o total de materiais utilizados; e
- Demonstração do desempenho ambiental através de ACVs realizadas para uma síntese preliminar de projeto (*baseline*), e durante revisões de projeto até chegar à proposição final.

• Submissão de:

1. Mapeamento do sistema de interesse (diagrama de influência), ressaltando o limite do sistema e as oportunidades de circularidade; as forças que eventualmente impeçam aderência a economia circular; como novas oportunidades tornariam o sistema mais circular; e quem se beneficiaria disto. Por ser um processo exploratório, algumas iterações poderiam ser necessárias e utilizadas nos atendimentos, mas apenas a versão final seria entregue, feita à mão ou por *software* de livre escolha, na linguagem visual desejada;

2. Síntese da reflexão sobre as oportunidades circulares exploradas. Iniciada pela formulação da pergunta mais crítica para mudança do sistema, específica e orientada à ação, que poderia levar a um melhor projeto do sistema: “Se você pudesse fazer uma pergunta para tornar seu projeto mais circular, o que seria?”. Este seria o próprio desafio de projeto a ser endereçado. Onde você gostaria que outras pessoas mantivessem sua atenção?

3. Resultados das ACVs e indicador de circularidade, demonstrando como influenciaram a melhoria do projeto (planilha e análises correspondentes).

4. "Mágica" da proposição de projeto, demonstrando alto grau de confiança criativa.

Iniciando por um *workshop* e estudo investigativo, os estudantes examinavam produtos simples, utilizados cotidianamente:

- Reflita sobre a constituição do produto? De quais materiais é feito, como é a sua embalagem e trajetos até chegar às mãos do consumidor?
- Amplie o olhar para, além dos usuários finais, também considerar a rede mais ampla de partes interessadas? Como elas influenciam umas às outras?
- Examine os fluxos de materiais: De onde vem e para onde vão depois do uso?
- Você pode encontrar oportunidades para redesenhar este sistema?

Na sequência, estratégias de design circular foram tratadas em exposição específica e durante os atendimentos em *atelier*. O paradigma histórico de “extrair, produzir, descartar” depende de grande quantidade de energia e materiais baratos e facilmente acessíveis que polui e desperdiça recursos. Uma economia circular requer uma visão diferente de projeto para impulsionar a transição em direção a uma economia mais regenerativa.

As estratégias de design circular exploradas foram:

- Produto como um serviço: ofertas que se concentram no arrendamento de uma solução, em vez da venda de um produto. Os serviços podem reduzir a volatilidade dos custos (Ao manter a propriedade dos produtos, os clientes não têm custos iniciais), e criar relacionamentos mais longevos com os clientes;
- Modularidade: divisão de um produto em peças menores, criadas para serem usadas e substituídas de forma independente;
- Extensão da vida útil: alongamento do ciclo de vida dos produtos através de remanufatura, conserto ou atualização, reduzindo custos, desperdício, emissões e necessidade de injeção de recursos virgens;
- Inteligência adicionada: adição de tecnologia (por exemplo, Internet das Coisas) e sensoriamento a materiais ou produtos, para coletar dados dos

usuários e gerar *insights* para melhorar a experiência do cliente (no exemplo: ajustar tarifas mensais de serviços com base em dados de uso real coletados);

Coleta para fechamento de ciclos materiais: prestação de um serviço de coleta de produtos antigos ou usados, para recuperar o valor nos materiais, reciclando-os ou reutilizando-os;

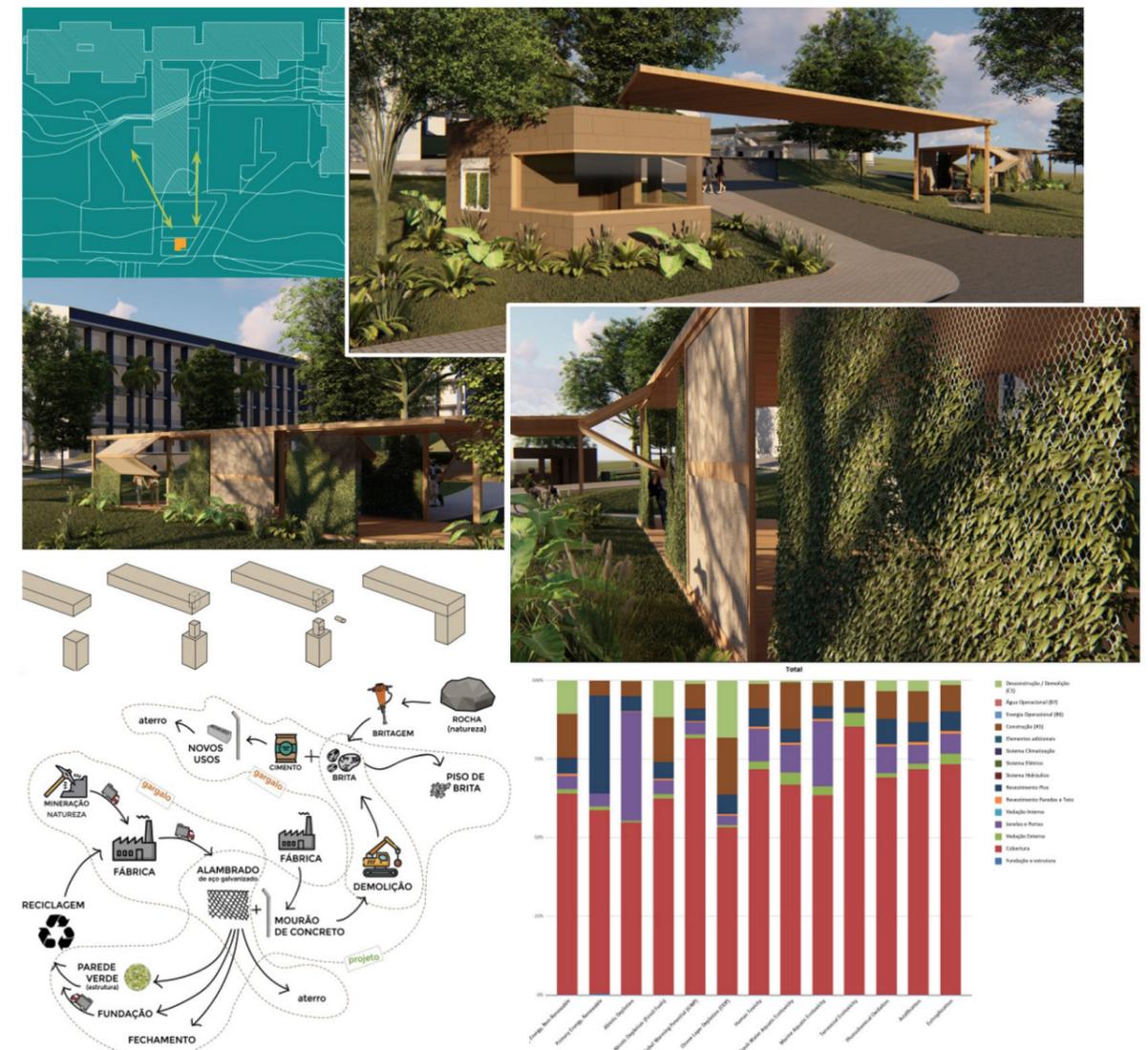
Escolha inteligente de materiais: Consideração do tratamento de fim de vida de um produto na escolha de materiais e insumos (duráveis, biodegradáveis, reciclados ou recicláveis).

Foi introduzida uma apresentação preliminar, formativa, cerca de três semanas antes da entrega final. Nela, os estudantes foram estimulados a

apontar inquietações e pontos que ainda não estivessem satisfeitos. Os instrutores entrevistaram e forneceram feedback passo a passo durante as apresentações de trabalhos. Resumos e instruções para o próximo passo foram imediatamente publicados no ambiente *Google Classroom* para orientar futuros desenvolvimentos. O fato de ser uma avaliação formativa e ainda haver tempo hábil para melhorar o projeto deixou os estudantes muito motivados e atentos aos comentários docentes e apresentações dos colegas.

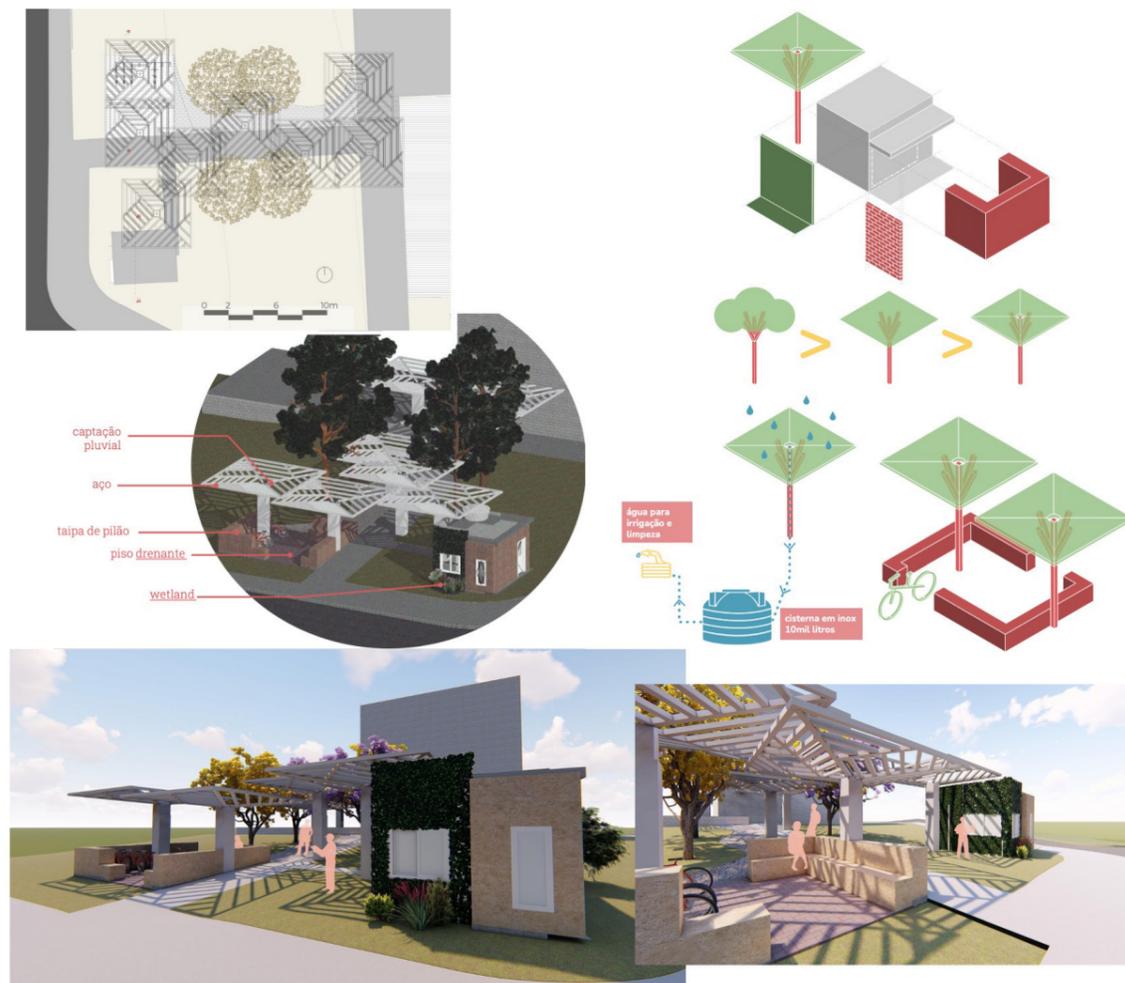
Finalmente, na sala de aula todos os grupos apresentaram os avanços finais (Figura 5 a Figura 7), o que permitiu a avaliação entre pares, seguida de uma discussão detalhada sobre os desafios de design experimentados pelos alunos. Todas as

Figura 5: Entrega do desafio de design circular: projeto do equipamento, conceito de desmontagem, mapeamento de sistema e gargalos de circularidade, e análise por ACV.



Fonte: Cortesia Equipe CHLMT

**Figura 6:** Entrega completa do desafio de design circular: projeto de equipamento urbano, lógica de projeto para desmontagem.



Fonte: Cortesia Equipe AAAACE

avaliações foram próximas da nota máxima, sendo algum eventual desvio mais relacionado a falhas nas entregas parciais individuais do que a desempenho insuficiente do projeto.

Em 2020, a mesma dinâmica de ensino-aprendizagem foi reaplicada, inclusive o exercício de projeto semestral. Um grande salto foi proporcionado para automatizar a realização da ACV, permitindo que futuras ofertas possam efetivamente resgatar o foco em projeto de arquitetura.

Numa parceria com o Instituto de Economia e com o Instituto de Computação da UNICAMP para atender a demandas da componente de sustentabilidade do Hub Internacional para Desenvolvimento Sustentável (HIDS), foi desenvolvida uma ferramenta *on-line* automatizada para cálculo da ACV.

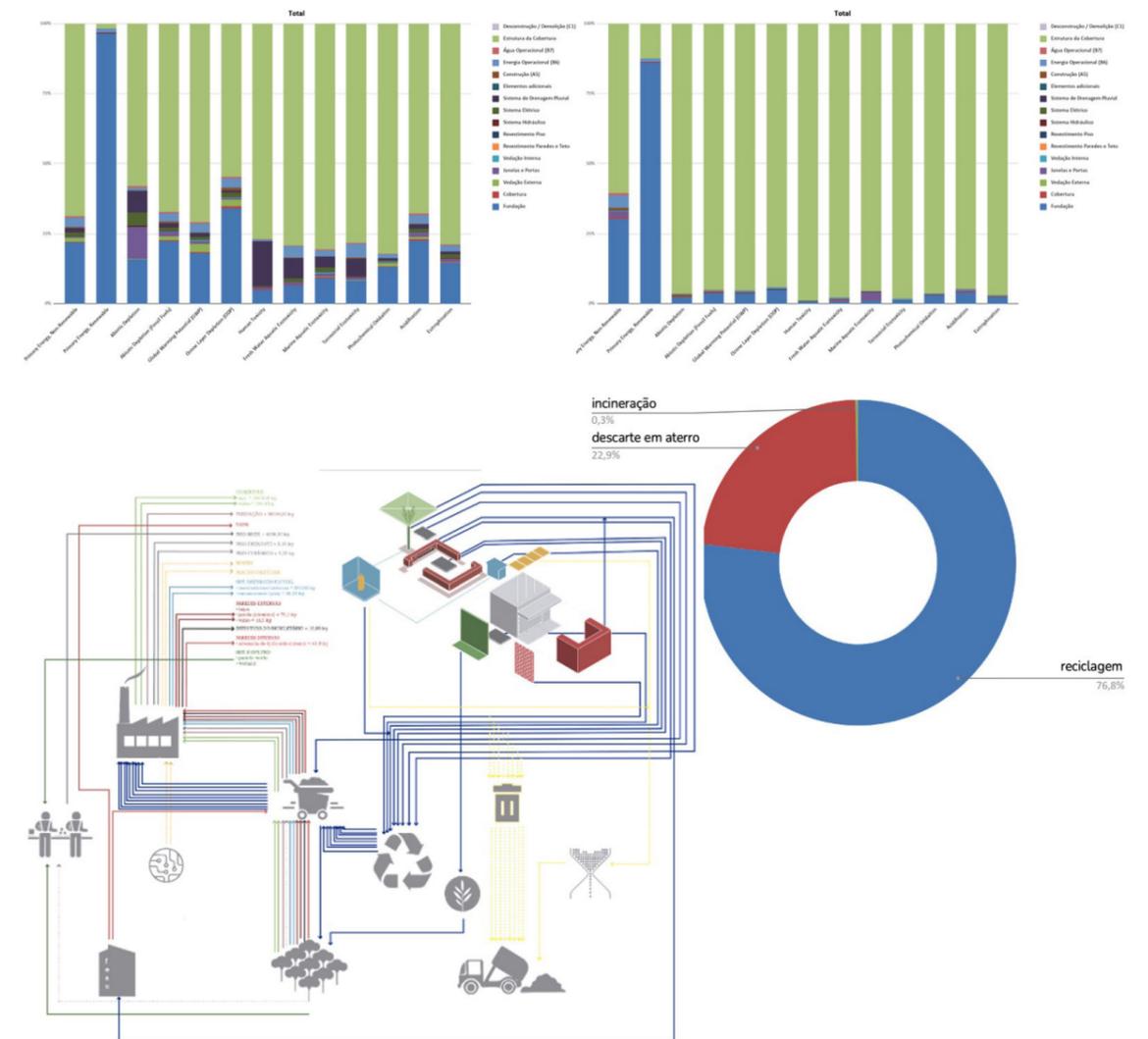
A interface da ferramenta permite que cada usuário cadastrado possa criar quantas avaliações desejar

ou editar ou deletar aquelas existentes. É possível ajustar aspectos como vida útil, fatores de reposição de componentes, para considerar necessidades de manutenção variadas.

A inserção de informações pode ser feita manualmente – escolhendo materiais a partir de uma lista pré-definida – ou utilizando um importador de um *template* em MS EXCEL, que faz o carregamento automático dos dados. A saída gráfica gera as análises de contribuição por material e por subsistema, assim como para o ciclo de vida completo ou dividido em seus diferentes estágios. As tabelas correspondentes podem ser baixadas para análise detalhada.

Isto permitirá que os estudantes em ofertas futuras finalmente possam entender a ACV e economia circular, com análises mais ágeis e que cedam máximo espaço para atividade-fim da disciplina: desenvolver projetos para sustentabilidade, contabilizando

**Figura 7:** Análise de impactos por ACV, mapeamento de sistema e identificação de gargalos de circularidade para estrutura de aço e de madeira (a). Mapeamento do sistema (“50 anos e 1 dia”) e indicador de fechamento de ciclos de materiais (linhas azuis no mapeamento) para a ACV III (b), refinada, evitando 77% de descarte em aterro.



Fonte: Cortesia Equipe AAAACE

e conhecendo as implicações de suas decisões, para exercer, com confiança, a responsabilidade ambiental que cabe a projetistas.

## 6. Considerações finais

Os ciclos da pesquisa-ação aqui descritos ilustram as estratégias para rebatimento dos avanços em pesquisa no tema no espaço de sala de aula, e a busca da simplificação admissível para que se possa avançar em termos pedagógicos e formativos. A análise da evolução a cada ciclo apoiou-se em quatro elementos essenciais: relação entre as componentes de exposição teórica e de aplicação; evolução dos elementos de avaliação formativa e somativa; foco das avaliações somativas; e alimentação do processo decisório durante o desenvolvimento de projeto.

A avaliação final da disciplina revelou a reação extremamente positiva dos estudantes diante da oportunidade de melhorar seus projetos e trabalhar os pontos indicados na avaliação docente, em vez de apenas conhecer suas notas finais; e de efetivamente entender os impactos de suas decisões enquanto projetistas e o que realmente deve ser considerado ao se nomear um projeto como mais sustentável ou não. Ao final do semestre, ficou naturalmente claro para os estudantes que esse procedimento poderia ser aplicado em seus Trabalhos Finais de Graduação e, posteriormente, em sua prática profissional.

## Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos aos auxiliares docentes – Lea Gejer e Lizzie Pulgrossi (2019 e 2020); e Iris Loche (2020); Arthur Baiocchi (2018); Ketlin

Montanari (2017); Giseli Colleto (2016); e Marcella Saade (2013 a 2016) – pelo empenho e ajuda na condução do desafio de implementar avaliações de desempenho ambiental a projetistas em formação. Aos Profs. Marcelo Cunha, do Instituto de Economia, e Juliana Borin, do Instituto de Computação da UNICAMP, pela motivação e operacionalização da ferramenta automatizada.

## Referências

ADAMSON, L. S. Action Research: A Protocol to Improve Student Learning. New Horizons for Learning, v. 8, n. 1, 2010. Baltimore: John Hopkins University School of Education.

BENYUS, J. M. Biomimicry: innovation inspired by nature. New York: Morrow. 1997.

BIRGISDOTTIR, H. et al. IEA EBC Annex 57 evaluation of embodied energy and CO<sub>2</sub>eq for building construction. *Energ Build*, n. 154, p. 72-80, 2017.

CABEZA, L.F. et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: a review. *Renew Sust Energ Rev.*, v. 29, p. 394–416, 2013.

CIRCLE ECONOMY. The Circularity Gap Report 2020. Amsterdam, 2020. 69 p. Disponível em: [shorturl.at/dzBR0](https://shorturl.at/dzBR0). Acesso em: 09 abr. 21.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2019). Circular economy systems diagram ("Butterfly Diagram"). February 2019. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>. Acesso em: 18/06/2021.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION - CEN. Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. EN 15804+A1. Brussels: CEN, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION - CEN. Sustainability of construction works- Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method. EN 15978. Brussels: CEN, 2011.

GOMES, V. et al. Exploring lifecycle energy and greenhouse gas emissions of a case study with ambitious energy compensation goals in a cooling-

dominated climate. *Energy and Buildings*, v. 1, p. 1, 2018.

GOMES, V. 2022. De elefantes a borboletas: ensinando responsabilidade de projeto para sustentabilidade. In: SILVA, C.P.C.; TENÓRIO, G.S.; BICALHO, P.S. (orgs.). *Limiaridade: processos e práticas em arquitetura e urbanismo*. p. 63-82. Curitiba: CRV, 2022.

GRAEDEL, T. E.; ALLENBY, B.R. *Industrial ecology*. Upper Saddle River, NJ.: Prentice Hall, 2003.

HAWKEN, P.; LOVINS, A. B.; LOVINS, L. H. *Natural capitalism: Creating the next industrial revolution*. Boston: Little, Brown and Co., 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION- ISO. *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. ISO 14040:2006. 2nd. ed. Geneva: ISO, 2006.

JOHN, V. M.; SILVA, V. G.; AGOPYAN, V. Agenda 21: uma proposta de discussão para o Construbusiness Brasileiro. In: II Encontro nacional e I Encontro Latino americano sobre edificações e comunidades sustentáveis, 2001, Canela - RS. II Encontro nacional e I Encontro Latino americano sobre edificações e comunidades sustentáveis, 2001. p. 91-98.

JOHNSTON, L. F. (Ed.). *Higher Education for Sustainability*. New York, NY: Routledge, 2012.

KEMBER, D.; KELLY, M. *Improving Teaching Through Action Research*. HERDSA green guides. v. 14. 42 p. Hammondville, AUS: Higher Education Research and Development Society of Australasia, 1993.

KOWALTOWSKI, D.C.C.K. et al. Action research and architectural sustainable design education: a case study in Brazil. *International Journal of Technology and Design Education*, v. 30, p. 815-836, 2019. Berlin: Springer Nature. DOI: 10.1007/s10798-019-09525-5. (Online first article).

LIFSET, R.; GRAEDEL, T. E. *Industrial ecology: goals and definitions*. In: AYRES, R.U.; AYRES, L.W. (Ed.). *A Handbook of Industrial Ecology*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Ltd., 2002. 704 p. DOI:10.4337/9781843765479.

LÜTZKENDORF, T.; BALOUKTSI, M. Guideline for Design Professionals and Consultants. Part 1: Basics for the Assessment of Embodied Energy and Embodied GHG Emissions. *International Energy Agency Energy in*

*Buildings and Communities* (IEA EBC) Programme: Annex 57. 2016.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. *Cradle to Cradle: Remaking the way we make things*. New York: North Point Press, 2002.

PASSER, A. et al., 2016. IEA EBC Annex 57 Guidance to support construction product manufacturers in their decision-making process. *International Energy Agency – IEA*. Paris: International Energy Agency – IEA, Energy in Buildings and Communities Programme. November 2016.

PAULI, G. *The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*. A report to the Club of Rome. Taos, Paradigm publications, 2010.

SEO, S. et al. Evaluation of embodied energy and CO<sub>2</sub>eq for building construction (Annex 57), 2016. Disponível em: [www.annex57.org/wp/wp-content/uploads/2017/05/Summary-Report.pdf](http://www.annex57.org/wp/wp-content/uploads/2017/05/Summary-Report.pdf). Acesso em: 18/06/2021.

SILVA, F.B. et al. *Life Cycle Inventories of Cement, Concrete and Related Industries-Brazil*. Ecoinvent association, Zürich, Switzerland, 2018.

STAHEL, W. R. *The performance economy*. 2nd. ed. London: Palgrave-MacMillan, 2010. 350 p.

STAHEL, W. R. *The circular economy: A User's Guide*. New York: Routledge, 2019. (English Edition).

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. *LEED BD+C v4 Reference Guide Addenda Table*. Washington D.C., 2017.

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. *LEED Reference Guide for Building Design and Construction*. USGBC: Washington D.C., 2013.

UGAYA, C. M.L. et al. Spin off de ACV de A a Z: disciplina de ICV Avançado. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA - GCV 2020/21. Proceedings. Gramado, RS (on-line), 2020.

VILCHES, A.; GARCIA-MARTINEZ, A.; SANCHEZ-MONTAÑES, B. Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. *Energ Build*, n. 135, p. 286-301, 2017.

ZUBER-SKERRITT, O. *Action Research in Higher Education: Examples and Reflections*. London: Kogan Page Ltd., 1992.

## Perfil dos autores



**Ayana Dantas de Medeiros**

Arquiteta e urbanista, mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Brasília e doutoranda na área de Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade. Docente no Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Roraima e pesquisadora no Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética, com ênfase em ventilação e iluminação natural.



**Caio Frederico e Silva**

Arquiteto e Urbanista, doutor em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Brasília. Docente da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Desenvolve pesquisas na área de sustentabilidade do ambiente construído, eficiência energética e simulação computacional.



**Carolina Mendonça Zina**

Arquiteta e Urbanista pela Universidade Federal de Mato Grosso. Mestre em Sustentabilidade, Qualidade e Eficiência do Ambiente Construído pelo Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília e doutoranda no Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, na mesma linha. Atua nas áreas de Conforto Ambiental, Sustentabilidade e Análise do Ciclo de Vida.



**Cláudia Naves David Amorim**

Arquiteta e Urbanista, doutora em Tecnologias Energéticas e Ambientais na Università degli Studi di Roma "La Sapienza". Docente da Universidade de Brasília (UnB). Atua em pesquisas nas áreas de sustentabilidade e qualidade ambiental, principalmente nos seguintes temas: Iluminação natural, conforto ambiental, eficiência energética, projeto de arquitetura, reabilitação de edifícios e simulação computacional.



**Daniela Barros Silva Freire Andrade**

Psicóloga, doutora em Educação pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. Docente no Curso de Psicologia da UFMT e no Programa de Pós-Graduação em Educação. Coordenadora do Grupo de Pesquisa em Psicologia da Infância (GPPIN). Tem experiência em Psicologia da Aprendizagem e Desenvolvimento e da Psicologia Social com ênfase na Teoria das Representações Sociais. Desenvolve pesquisas sobre infâncias e com crianças no contexto da cidade, educação e atenção à saúde.



**Elisa Pagliarini Cox**

Arquiteta e Urbanista, doutora em Urbanismo pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Docente do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFMT. Atua em pesquisas nas áreas de projeto arquitetônico, clima urbano, urbanismo e produção do espaço.



**Everton Nazareth Rossete Junior**

Arquiteto e Urbanista, mestre em Urbanismo, História e Arquitetura da Cidade pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC e doutorando no Programa de Pós Graduação em Estudos de Cultura Contemporânea (PPG-ECCO) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Docente do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFMT. Atua em pesquisas nas áreas de Urbanismo, História, Arquitetura da Cidade e Poéticas, artes e culturas em Estudos de Cultura Contemporânea.



**Flávia Maria de Moura Santos**

Arquiteta e Urbanista, doutora em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Docente do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFMT e do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental. Atua nas áreas de sistemas urbanos, tecnologia construtiva, geografia urbana e conforto ambiental.



**Gustavo de Luna Sales**

Arquiteto e Urbanista, doutor em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Brasília. Docente da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UnB. Desenvolve pesquisas no Laboratório de Sustentabilidade Aplicada à Arquitetura e Urbanismo (LaSUS) e no grupo de pesquisa SiCAC - Simulação Computacional do Ambiente Construído, com foco em ventilação natural para o conforto térmico passivo e a qualidade do ar no espaço construído e aplicação da fluidodinâmica computacional na arquitetura e no urbanismo.



**Karyna de Andrade Carvalho Rosseti**

Arquiteta e Urbanista, doutora em Física Ambiental na linha de Análise Microclimática de Sistemas Urbanos pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). docente do Departamento de Arquitetura e Urbanismo UFMT. Desenvolve pesquisas relacionadas ao conforto ambiental, microclima urbano, modelagem computacional de sistemas urbanos, sustentabilidade e inovação de processos e produtos do ambiente construído.



**Luciane Cleonice Durante**

Engenheira Civil, doutora em Física Ambiental na linha de Conforto Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Docente do Departamento de Arquitetura e Urbanismo e Coordenadora do Laboratório de Tecnologia e Conforto Ambiental (LATECA) da UFMT. Possui interesse pela área de inovação, sustentabilidade e resiliência do ambiente construído.



**Pedro Henrique Gonçalves**

Arquiteto e Urbanista, doutor em Estruturas e Construção Civil pelo Programa de Pós-Graduação. Docente do curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Goiás - Regional Goiás,, onde são desenvolvidas pesquisas nas áreas de: tecnologia e inovação no ambiente construído, planejamento urbano climaticamente responsável e desempenho das edificações.



**Ivan Julio Apolonio Callejas**

Engenheiro Civil, doutor em Física Ambiental na linha de Análise Microclimática de Sistemas Urbanos pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Docente do Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Possui interesse na área de tecnologia do ambiente construído, com enfoque na sustentabilidade, voltados ao desempenho termo energético das edificações e desenvolvimento de materiais, produtos e processos construtivos inovadores.



**Joára Cronemberger Ribeiro Silva**

Arquiteta e Urbanista, doutora em Arquitetura e Construção pela Universidad Politécnica de Madrid. Docente da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UnB e vice-coordenadora do Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética (LACAM). Desenvolve pesquisas relacionadas a estratégias de eficiência energética, sustentabilidade e integração de sistemas fotovoltaicos no ambiente construído.



**Jorge Hernán Salazar Trujillo**

Arquiteto, mestre em Energias Renováveis com Aplicação na Edificação (Universidad Internacional de Andalucía, Espanha) e em Tecnologias Avançadas em Construção Arquitetônica (Universidad Politécnica de Madrid, Espanha). Professor titular da Universidad Nacional de Colombia. Fundador do grupo de pesquisa em Energia, Meio Ambiente, Arquitetura e Tecnologia. Atua em pesquisas relacionam-se a qualidade ambiental, vento, sol, luz energia e suas implicações nos projetos.



**Raquel Naves Blumenschein**

Arquiteta e Urbanista, doutora pelo Centro de Desenvolvimento Sustentável/UnB. Docente da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo/UnB e Diretora do Parque de Inovação e Sustentabilidade do Ambiente Construído – PISAC/PCTec/UnB. Desenvolve pesquisas com foco em Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade, Qualidade e Eficiência do Ambiente Construído e Projeto e Planejamento Edifício, Urbano e Regional.



**Rejane Magiag Loura**

Arquiteta e Urbanista, doutorado em Ciências e Técnicas Nucleares pela Universidade Federal de Minas Gerais. Docente do curso de Arquitetura e Urbanismo e do Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da UFMG. Áreas de interesse: abordagem integrada de eficiência energética, conforto ambiental e tecnologia da construção com vistas a resiliência de edificações e cidades frente às mudanças climáticas.



**Roberta Vieira Gonçalves de Souza**

Arquiteta e Urbanista, doutora em Engenharia Civil pela UFSC, Docente da Escola de Arquitetura da UFMG e no Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Atua na área de sustentabilidade do ambiente construído, eficiência energética e iluminação.



**Simone Berigo Büttner**

Arquiteta e Urbanista, especialista em Conforto Ambiental e Eficiência Energética, mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo (FAU/USP) e doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, na linha de Análise Microclimática de Sistemas Urbanos, da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Docente do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFMT. Atua em pesquisas nas áreas de inovação, sustentabilidade e resiliência do ambiente construído.



**Vanda Alice Garcia Zanoni**

Engenheira Civil, doutorado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Brasília. Docente do Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UNB. Principais temas de interesse: conservação do patrimônio moderno, HBIM, desempenho higrotérmico, monitoramento e simulações computacionais, condições de exposição, estado de conservação, durabilidade, degradação, manutenção e reabilitação das edificações, inspeções prediais, necessidades habitacionais, inadequação de moradia, melhoria habitacional e assistência técnica.



**Vanessa Gomes**

Arquiteta e Urbanista, Doutora em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Docente da Faculdade de Engenharia Civil e líder do Grupo de Pesquisa "Qualidade e Sustentabilidade do Ambiente Construído UNICAMP. Atua nas áreas de durabilidade de materiais e componentes, gestão ambiental e redução do impacto ambiental da construção civil.



**UnB**



**UFMT**

ISBN: 978-65-00-54215-8

**CSL**



9 786500 542158