



Experiência didática aliando simulações computacionais ao Planejamento Energético Urbano

Teaching experience integrating simulations and urban energy planning

Ingrid Stephanie de Moraes, mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Universidade Federal de Minas Gerais

ing.morais92@gmail.com

Rejane Magiag Loura, Dra., professora associada do Departamento de Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo, Universidade Federal de Minas Gerais

rejane@arq.ufmg.br

Número da sessão temática da submissão – [7]

Resumo

Este artigo aborda a experiência didática adquirida em uma disciplina de graduação focada em simulações aliadas ao planejamento energético urbano. Áreas de duas cidades brasileiras foram estudadas no *City Energy Analyst*, programa criado pela ETH Zürich que lida com aspectos energéticos e urbanos simultaneamente. Para as simulações, utilizou-se uma das bases do programa destinada a países quentes (SG) e a recém-criada base brasileira (BR), fruto de uma dissertação. A disciplina introduz os alunos ao Planejamento Energético Urbano e simulações, além de aplicar BR de forma prática. Como metodologia, a disciplina de 30 horas apresentou uma abordagem teórico-prática. Sensibilizações ao *software* e explanação de conceitos pertinentes foram feitas. Simulações de demanda energética e potenciais de fontes de energia foram executadas, com resultados apresentados para um representante da ETH Zürich. Conclui-se que a disciplina atingiu seus objetivos didáticos, constatando também o potencial do CEA no Brasil e da base brasileira criada.

Palavras-chave: Simulação; Planejamento Energético Urbano; Docência.

Abstract

This article discusses the educational experience acquired in a 30-hour undergraduate module focused on simulations allied with urban energy planning. Areas of two Brazilian cities were studied using *City Energy Analyst*, a tool developed by ETH Zürich that addresses energy and urban aspects simultaneously. For the simulations, one of the program's databases designed for hot countries (SG) and the newly created Brazilian database (BR), a product of a Master's dissertation, were used. The students were introduced to Urban Energy Planning and simulations, with a practical application of BR. The module presented a theoretical-practical approach as its methodology. Test simulations with CEA and the explanation of relevant concepts were done. Simulations on energy demand and potential energy sources were conducted, with results presented to an ETH Zürich researcher. It is concluded that the module achieved its educational goals, assessing the potential of BR and CEA in Brazil.

Keywords: *Computer simulation; Urban Energy Planning; Teaching.*

1. Introdução

O presente artigo aborda a experiência didática em uma disciplina de graduação focada em aliar simulações computacionais ao planejamento energético urbano, conceito que pode propiciar a ampliação da descarbonização do parque edificado brasileiro. O potencial do *software* utilizado, o *City Energy Analyst* (CEA), é discutido e a criação de uma base de dados brasileira para esse programa, desenvolvida como produto de uma dissertação, é destacada. O principal objetivo deste trabalho é discutir, no contexto da graduação, o processo de ensino-aprendizagem de uma ferramenta digital voltada ao planejamento energético urbano.

1.1. O conceito de Planejamento Energético Urbano ou *Urban Energy Planning* (UEP)

As atividades humanas têm sido as principais responsáveis por acelerar as mudanças climáticas no planeta desde 1800, sobretudo pela queima de combustíveis fósseis como petróleo, gás e carvão (NAÇÕES UNIDAS, 202-). Na escala urbana, cidades contribuem com mais de 80% do PIB mundial, mas também respondem por 70% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) (NAÇÕES UNIDAS, 2023). Países de alta renda geram 10 vezes mais impactos climáticos do que aqueles com menor poder econômico (TEIXEIRA, 2024).

Enquanto uma urbanização acelerada tem se manifestado de forma contínua em países em desenvolvimento, o mesmo já não ocorre em nações desenvolvidas (NAÇÕES UNIDAS, 2023). Mais de 50% da população mundial habita áreas urbanas e a expectativa é que, até 2050, esse número chegue a 70%. Já em nações de economia emergente, estima-se que cerca de 60% de seus habitantes viverão em áreas urbanas até 2030 (NAÇÕES UNIDAS, 2023). O processo de urbanização é um dos maiores desafios deste século, sobretudo diante das mudanças climáticas e da necessidade de um uso mais sustentável de fontes de energia. As edificações consomem até 70% da energia primária global e as cidades utilizam mais de 2/3 da energia mundial. Decisões ligadas à energia e à infraestrutura vão diferenciar espaços urbanos resilientes daqueles com precariedade estrutural (HONG *et al.*, 2020).

Propostas voltadas ao planejamento energético urbano têm ganhado um caráter de emergência, mas a complexidade de cidades como as da América Latina traz obstáculos para a formulação de políticas públicas verdadeiramente sustentáveis (SANTOS *et al.*, 2022). Os desafios urbanos nesses territórios envolvem aspectos como a busca por financiamento, ações para redução das emissões de GEEs, estratégias de adaptação e mitigação dos impactos das mudanças climáticas, bem como meios para atingir a sustentabilidade urbana (OLABI; ABDELKAREEM, 2022 *apud* SANTOS *et al.*, 2022).

Mencionado pela primeira vez em 1978, o *Urban Energy Planning* (Planejamento Energético Urbano) aborda a unidade harmônica entre o planejamento urbano e o energético, envolvendo as vantagens e desafios de ambos simultaneamente. Trata-se de uma maneira relevante de abordar os problemas e oportunidades atuais para melhoria no planejamento urbano considerando estratégias de sustentabilidade e eficiência energética (COLLAÇO, 2019). O correto planejamento de sistemas de energia urbanos contribui para o processo de tomada de decisão e para ações que atendam a demanda energética local (JING *et al.*, 2021). Dentre os obstáculos para a implementação do UEP, cita-se o desconhecimento por parte das cidades de seus sistemas energéticos, do perfil de oferta de energia e do potencial local de recursos energéticos (COLLAÇO & BERMAN, 2021). Há, ainda, uma desconexão entre políticas de energia e legislações urbanas: no contexto brasileiro, enquanto a formulação de



diretrizes energéticas ocorre em âmbito federal (IEA; EPE; MME, 2021), a regulamentação territorial é de competência municipal. COLLAÇO (2019) argumenta que, em decorrência dessa desarticulação, a política energética nacional não consegue abranger as forças e os impactos de aplicação do planejamento energético em nível local.

As formas atuais de planejamento urbano têm intensificado as emissões e o consumo de energia, enquanto o planejamento energético visa o oposto: aumentar a produção de energia e minimizar impactos com o aumento da eficiência. No contexto do UEP, é essencial conciliar os desafios e as forças de ambas as áreas. Entre os aspectos que o influenciam, destacam-se a densidade urbana e uso do solo, o transporte, a demanda energética e a cobertura vegetal (COLLAÇO, 2019). O planejamento urbano pode abrir oportunidades para geração de energia limpa e auxiliar na previsão de conflitos em áreas ocupadas por outras funções econômicas, como a agricultura (GUO et al., 2020; KAYIMA, 2023 *apud* GOMES & BARROS, 2023). No entanto, para uma transição embasada em fontes renováveis, as formas de planejamento atuais precisarão ser modernizadas, já que recursos de origem solar, eólica e resíduos são distribuídos em nível local (COLLAÇO, 2015 *apud* SIQUEIRA & BERMANN, 2020).

Ao aliar as duas esferas de forma harmoniosa, o UEP pode reduzir a emissão de GEEs, otimizar a demanda de energia local, promover redução das injustiças socioambientais e garantir a segurança energética. O poder público, gestores e criadores de legislações nas esferas municipal, estadual e federal são atores indispensáveis para sua implementação (COLLAÇO, 2019). Para evitar uma nova crise energética nacional, é crucial que tal planejamento atinja todos os níveis administrativos, apoiando-se em políticas públicas (ZAWADZKI, 2021 *apud* GOMES & BARROS, 2023).

1.2. Simulações como ferramentas de planejamento e o potencial do CEA

O uso de ferramentas digitais para realizar simulações em edificações iniciou-se na década de 60, com as primeiras tendo foco no desempenho energético da envoltória. O escopo se expandiu e permitiu estudos que envolviam aspectos como ventilação, iluminação e aquecimento (GONÇALVES & BODE, 2015 *apud* NASCIMENTO & ROCHA, 2023). A geometria de um edifício é um dos fatores determinantes para seu desempenho (SAMUELSON et al., 2016 *apud* DE SOUZA et al., 2021), provando que projetistas são responsáveis por diversas decisões que interferem nesse quesito já nas fases iniciais de projeto, como orientação, iluminação, ventilação, entre outros. Tais definições influenciam diretamente o consumo de energia da edificação (AIA, 2019 *apud* DE SOUZA et al., 2021).

O uso de simulações computacionais para avaliar o desempenho de edificações permite que o usuário analise soluções de forma integrada, contribuindo para a tomada de decisão e permitindo a comparação de alternativas antes do início das obras. Estudos que consideram as características do projeto favorecem a escolha das melhores estratégias, garantindo conforto aos usuários e menor impacto ambiental. Não obstante, o número de profissionais da construção civil que utilizam essas ferramentas é reduzido, pois muitos não tiveram contato com elas na graduação e não possuem uma base teórica sólida para interpretar os resultados (NASCIMENTO & ROCHA, 2023). Além disso, grande parte das decisões ligadas ao desempenho é tomada tardiamente no processo projetual, o que compromete sua eficácia e obriga projetistas a dependerem de tecnologias de alto custo para solucionar problemas (NEMBRINI; SAMBERGER; LABELLE, 2014; SAMUELSON et al., 2016 *apud* DE SOUZA et al., 2021). Análises bioclimáticas são essenciais para garantir níveis satisfatórios de desempenho e ferramentas digitais podem traduzir, através de dados, a ocorrência de fenômenos e suas consequências. Para tanto, é crucial que o projetista possua uma sólida base

teórica sobre as variáveis envolvidas (GONÇALVES & BODE, 2015 *apud* NASCIMENTO & ROCHA, 2023).

No planejamento energético urbano, a modelagem é uma estratégia útil desde a década de 70 (NAKATA, 2004 *apud* COLLAÇO, 2019). Modelos urbanos de energia buscam investigar e responder questões relevantes nesse contexto a partir da conciliação de dados coletados nas cidades e o uso de ferramentas de simulação energética. Cenários de simulação, por exemplo, buscam criar uma visualização da geração e demanda energética baseada no sistema descrito para o local (COLLAÇO, 2019). Quando a modelagem computacional é feita na escala urbana e envolve um grupo de edificações com o objetivo de avaliar seu desempenho, dá-se o nome de *Urban Building Energy Modeling* ou UBE (HONG *et al.*, 2020).

O ensino de desempenho da construção durante a graduação é de considerável relevância (DE SOUZA *et al.*, 2021), pois torna-se uma oportunidade de sensibilizar os alunos quanto ao tópico e conciliar a teoria à prática. Há experiências relatadas na literatura nas quais simulações computacionais são inseridas em disciplinas voltadas ao conforto ambiental de edifícios (NASCIMENTO & ROCHA, 2023), à eficiência energética (DE SOUZA *et al.*, 2021) e ao planejamento energético na escala urbana (MORAIS, 2024). O Quadro 1 compila alguns exemplos de ferramentas de simulação para as escalas do edifício e da cidade.

Quadro 1: Exemplos de programas de simulação disponíveis no mercado.

Software	Escala	Plataforma	Acesso	Público	Exemplos de variáveis
City Energy Analyst (CEA)	U R B	Desktop / Web	Gratuito	Arquitetos, urbanistas, autoridades locais, estudantes, universidades	Radiação solar, demanda energética, emissões, custos de sistemas, potenciais de energia, otimização, etc.
ENVI-met	A N	Desktop	Pago		Cenários climáticos, análises ambientais, fluxos de radiação, temperatura, etc.
SimScale	A	Web			Aerodinâmica de edificações, conforto térmico, impacto urbano dos ventos.
EnergyPlus	E D I	Desktop	Gratuito	Arquitetos, engenheiros, consultores de energia, etc.	Condicionamento de ar, conforto térmico, eficiência energética, simulações de carga térmica, etc.
Climate Studio	F Í C		Pago		Análises climáticas, estudos de sombreamento, análises de luz natural e artificial, modelagem energética, etc.
Design Builder	I O				Luz natural, energia, ar-condicionado, custos, análises para certificação, etc.

Fonte: MORAIS (2024), adaptado.

É essencial incluir o tema de desempenho nos currículos de instituições de ensino superior, mesmo que sejam poucas aquelas que integrem projeto e conforto ambiental (NASCIMENTO & ROCHA, 2023). A ausência dessa conexão limita a capacidade do aluno de implementar estratégias bioclimáticas em projetos, impactando negativamente sua formação profissional (SOUZA *et al.*, 2021 *apud* NASCIMENTO & ROCHA, 2023). Para fomentar a utilização dessas ferramentas na graduação, recomenda-se a escolha de *softwares* de baixa complexidade e fácil acesso (SOUZA *et al.*, 2021 *apud* NASCIMENTO & ROCHA, 2023), sugestão que reforça a escolha do CEA como simulador ideal para a disciplina abordada neste artigo.

Criado por pesquisadores da ETH Zürich em 2013, o CEA é um programa gratuito e de código aberto que lida com aspectos de planejamento energético e urbano simultaneamente. Ele possui uma interface gráfica intuitiva (Figura 1), o que o diferencia de outras ferramentas disponíveis, ainda que estas tenham usos e escalas distintas. O CEA permite analisar e otimizar sistemas de energia em bairros e cidades (FONSECA *et al.*, 2016), além de viabilizar

estudos de demandas e fornecimento de energia para edificações em escala distrital (HONG *et al.*, 2020). Também integra métodos e dados para simular o desempenho energético de edificações, potenciais locais de produção de energia e outros tipos de análises multicritério (FONSECA *et al.*, 2016). A partir de dados de entrada configurados pelo usuário - como a delimitação da área de estudo (com volumetria retirada do *OpenStreetMap*) e de seu entorno, escolha de arquivos climáticos, caracterização de edificações quanto a quesitos construtivos, de uso, ocupação e condicionamento de ar - o CEA produz resultados abrangendo variáveis como radiação solar, demanda energética, potenciais de produção de energia de diversas fontes, emissões, entre outras. De acordo com JOHARI *et al.* (2020), ele foi capaz de produzir a combinação mais abrangente entre UBE e modelos urbanos.

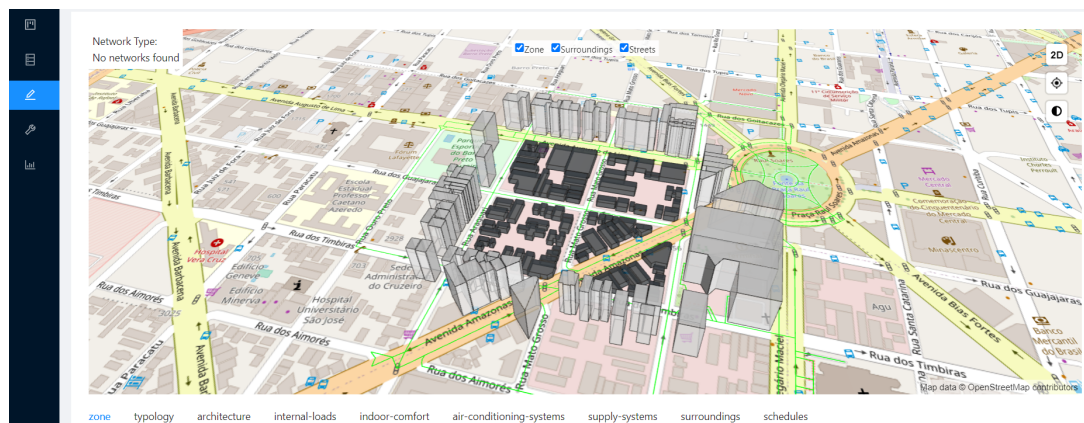


Figura 1: Interface do CEA, com volumetria retirada do *OpenStreetMap*. Fonte: As autoras.

O CEA é uma ferramenta com potencial para auxiliar tomadas de decisão em processos de retrofit, na melhoria do desempenho energético urbano e no estudo de potenciais de energia (FONSECA *et al.*, 2016). Atualmente, ele apresenta duas versões: a Web Demo, hospedada no site do programa, e a Desktop (CITY ENERGY ANALYST, 2024). Quanto aos dados de entrada para caracterização dos cenários a serem simulados, a ferramenta apresenta duas fontes de informação: arquivos climáticos obtidos gratuitamente no site *Climate One Building* ou criados pelo usuário, e sua base de dados própria. Sobre a última, a versão utilizada na disciplina (3.34.2) oferece a base suíça, definida pela sigla CH (*Confoederatio Helvetica*, antigo nome da nação em latim), voltada para países de clima temperado, e a SG (*Singapore*), destinada a países de clima quente. Na versão 3.37, houve a inclusão da base alemã DE (*Deutschland*). As bases do CEA são compostas pelas pastas *Archetypes*, *Assemblies* e *Components*, que reúnem informações sobre sistemas construtivos, rotinas de ocupação conforme o uso, definições para condicionamento artificial de ar, equipamentos para geração de energia elétrica e/ou térmica, além de fontes para produção de energia (CITY ENERGY ANALYST, 2024).

A primeira base brasileira para o CEA, denominada BR, foi produzida por MORAIS (2024) com o objetivo de aproximar o *software* do contexto do país, priorizando dados locais sempre que disponíveis e recorrendo a fontes externas apenas quando necessário. Com sua primeira versão destinada às cidades de Belo Horizonte, Matozinhos e outras com cenários urbanos e energéticos semelhantes, BR mantém a mesma estrutura das bases originais para garantir a compatibilidade com o CEA, mas com conteúdo majoritariamente baseado em fontes de dados brasileiras. As duas versões criadas por MORAIS (2024) para o CEA 3.34.2 e 3.37.x obtiveram registro concedido pelo CTIT-UFMG (Coordenadoria de Transferência e Inovação Tecnológica) em março de 2025.

Durante a pesquisa de MORAIS (2024), foram detectadas algumas fragilidades entre BR e o CEA, o que dificultou sua plena articulação para responder a questões urbanas e energéticas

relevantes no Brasil. Tais fragilidades são detalhadas no referido trabalho, mas uma merece destaque: as emissões incorporadas em sistemas construtivos. Apesar de o CEA permitir esse tipo de simulação, a base BR apresenta como lacuna os dados sobre emissões devido, sobretudo, à incompatibilidade de unidades entre o que é utilizado pelo programa (kgCO_2/m^2) e o que foi encontrado em documentos sobre análise de ciclo de vida (kgCO_2eq - quilos de dióxido de carbono equivalente). Isso justifica a ausência de simulações de emissões na disciplina. Vale ressaltar, contudo, que essa lacuna já está sendo abordada por pesquisadora vinculada à mesma instituição de ensino onde a base foi criada.

2. Procedimentos Metodológicos

Este artigo adotou o estudo de caso como método, por meio da descrição de uma experiência didática na graduação. A estrutura do texto visa apresentar, inicialmente, um embasamento teórico robusto sobre os principais pilares da disciplina. Em seguida, detalha-se o módulo em si, enfatizando sua origem e estruturação. As atividades em sala são descritas e os obstáculos encontrados durante o processo, discutidos. Por fim, destacam-se os principais aprendizados da experiência, bem como as potencialidades do uso do CEA no Brasil e da existência de uma base brasileira pronta para aplicação.

2.1. Caracterização da disciplina: Origem, público e estruturação

Originada a partir da pesquisa de MORAIS (2024), a disciplina, com carga horária de 30 horas, promoveu discussões sobre a integração entre os planejamentos urbano e energético no contexto brasileiro. Através de aulas teóricas e práticas, buscou-se sensibilizar os alunos de graduação sobre o uso do CEA e incentivá-los a desenvolver seu pensamento crítico acerca de simulações computacionais aplicadas ao planejamento energético urbano. Procurou-se, ainda, discutir de forma analítica os resultados obtidos nas simulações e a complexidade do CEA. Quatro áreas de duas cidades brasileiras, detalhadas a seguir, foram estudadas pela turma, composta por alunos de Arquitetura e Urbanismo da UFMG. O conteúdo lecionado na disciplina é apresentado no Quadro 2 e sua concepção, bem como condução, foi realizada de forma colaborativa pelas autoras.

Quadro 2: Estruturação da disciplina - 1º semestre/2024.

Data	Horário	Língua	Conteúdo
15/03	14h - 17h20	Português	Aula 1 - Apresentação da disciplina. Conceitos de energia
22/03			Aula 2 - Teoria sobre o CEA. Sensibilização prática
05/04			Aula 3 - Base de dados do CEA: contextualização e relevância
12/04			Aula 4 - Teoria sobre o <i>OpenStreetMap</i> ; momento prático de modelagem
19/04			Aula 5 - Apresentação da base BR e testes práticos com a mesma
26/04			Aula 6 - Prática - Simulações e suporte
03/05			Aula 7 - Orientações para organização dos resultados das simulações
10/05		Inglês	Aula 8 - Seminário com participação virtual de representante da ETH Zürich

Fonte: As autoras.

Exceto pelas aulas 1 e 8, os demais encontros foram de natureza teórico-prática com predominância da segunda abordagem. Na primeira hora das aulas 2 a 7, um embasamento teórico foi fornecido sobre o tópico do dia, juntamente com descrição dos produtos esperados. O tempo remanescente era destinado a atividades práticas, com apoio das autoras sempre que solicitado. Para as fases práticas e o seminário, a turma de 24 alunos foi dividida em quatro

grupos, compostos por 5 ou 7 integrantes, sendo cada equipe responsável por uma das áreas de estudo. A variação no número de membros por equipe foi motivada pela diferença de complexidade entre as regiões, que ia desde a escassez de dados disponíveis até a ausência de tais áreas urbanas modeladas para simulação.

As áreas de estudo originaram-se da pesquisa de MORAIS (2024) e foram selecionadas como exemplos da realidade brasileira que ilustram desigualdades socioeconômicas refletidas no tecido urbano, em cidades de portes distintos. A análise desses recortes permitiu avaliar a capacidade do *software* em responder a diferentes contextos locais. A Figura 2 exibe a delimitação das áreas estudadas: da esquerda para direita, parte dos bairros de Lourdes e Céu Azul, em Belo Horizonte; e parte da área central e do bairro Bom Jesus, em Matozinhos.

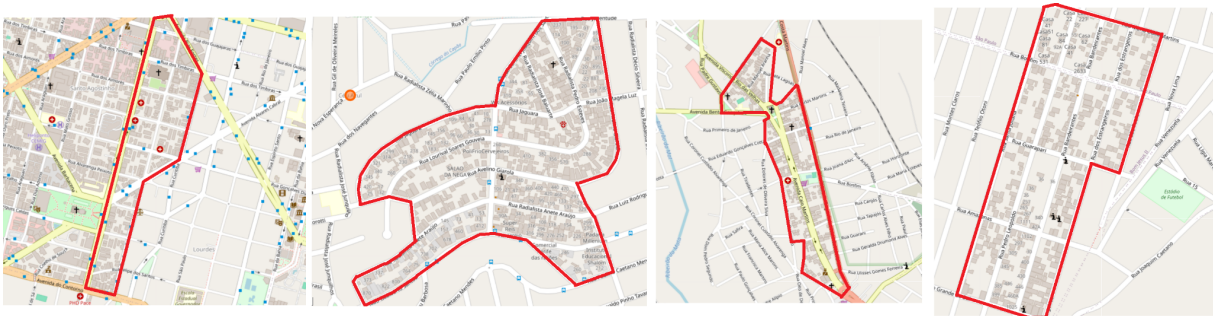


Figura 2: Delimitação das áreas de estudo. Fonte: OpenStreetMap (adaptado).

Em média, cada uma das quatro regiões abrange de 12 a 14 quarteirões. Como uma breve caracterização qualitativa feita via Google Maps, tem-se o seguinte:

- Recorte Lourdes (BH1): Região adensada e, majoritariamente, consolidada no centro da cidade, com edificações majoritariamente de grande porte, padrão construtivo médio a alto e usos diversos. Área integra o que é comumente definido como “cidade formal”, ou seja, a parte do tecido urbano onde há ampla legalidade fundiária, infraestrutura urbana disponível e concentração de investimentos públicos e privados (ARQFUTURO; LABORATÓRIO DE CIDADES, 2020). A cidade em questão dispõe de grande quantidade de dados, como os encontrados no site BH Map;
- Recorte Céu Azul (BH2): Região com menos adensamento, edificações de menor porte, baixo padrão construtivo e uso predominantemente residencial que está passando por mudanças no padrão de ocupação. Apresenta características típicas de “cidade informal”, representada por loteamentos irregulares, residências autoconstruídas e edificações erguidas sem acompanhamento técnico (ARQFUTURO; LABORATÓRIO DE CIDADES, 2020);
- Recorte do centro de Matozinhos (MTZ1): Área com densidade urbana mais alta e que sofre maior pressão imobiliária na cidade, embora as edificações sejam predominantemente de pequeno porte (até 2 pavimentos). Localizada em cidade com limitada disponibilidade de dados;
- Recorte Bom Jesus (MTZ2): Região semelhante ao bairro Céu Azul quanto ao porte e à tipologia construtiva predominante. Porém, área apresenta baixa ocupação dos terrenos e grande potencial de adensamento. Situada na mesma cidade de MTZ1.

Em termos climáticos, Belo Horizonte e Matozinhos apresentam similaridades devido à sua proximidade geográfica (PBH, 2017; PREFEITURA DE MATOZINHOS, 2017). Na esfera urbana, as maiores diferenças observadas concentram-se, sobretudo, em aspectos

construtivos (diversidade de usos, altimetria, formalidade das edificações) e na densidade urbana, tópicos abordados com diferentes graus de detalhamento pelo CEA.

Além do *software* mencionado, também foram ministradas práticas com o *OpenStreetMap*, plataforma online colaborativa e de acesso gratuito, da qual foram extraídas as volumetrias das edificações. Os alunos dos grupos de Matozinhos e Céu Azul - áreas até então inexistentes na ferramenta - executaram a modelagem para posterior uso nas simulações. Como dados de entrada, foram utilizados tanto arquivos climáticos quanto as bases de dados do próprio CEA. Para o primeiro, definiu-se o arquivo climático “Belo Horizonte - Carlos Prates” para BH1; “Belo Horizonte - Pampulha” para BH2, e “Belo Horizonte - Confins” para MTZ1 e MTZ2. Quanto aos dados nativos do CEA, simulações foram rodadas com as bases SG (original) e BR (nova) em todas as áreas. Os principais objetivos foram, em primeiro lugar, avaliar a relevância de uma base brasileira para simulações na escala da cidade e verificar a sensibilidade do CEA em detectar diferenças urbanas e energéticas entre Brasil e Singapura. Buscou-se, ainda, sensibilizar os alunos quanto às variáveis relevantes no planejamento energético urbano. O Quadro 3 apresenta os itens analisados nos recortes estudados.

Quadro 3: Variáveis analisadas em todos os conjuntos de simulação (CEA 3.34.2).

Abas	Scripts	Propósito
Data Management (Input)	<i>Archetypes mapper</i>	Designa propriedades de edificações e sistemas
	<i>Weather helper</i>	Define arquivo climático
	<i>Surroundings helper</i>	Extraí volumetria de entorno do <i>OpenStreetMap</i>
	<i>Terrain helper</i>	Define topografia com uma elevação específica
	<i>Streets helper</i>	Extraí vias do <i>OpenStreetMap</i>
Demand Forecasting (Output)	<i>Building solar radiation</i>	Calcula radiação solar de um determinado cenário
	<i>Building schedules</i>	Define rotinas de ocupação
	<i>Building energy demand</i>	Calcula demanda energética das edificações
Energy potentials (Output)	<i>Photovoltaic-thermal panels</i>	Calcula produção de energia elétrica e térmica de painéis híbridos
	<i>Photovoltaic panels</i>	Calcula produção de energia elétrica de painéis fotovoltaicos
	<i>Solar collectors</i>	Calcula produção de energia térmica de coletores solares
	<i>Shallow geothermal potential</i>	Apesar de não serem representativas nas áreas estudadas por envolverem retirada de energia térmica destas fontes, elas foram incluídas para traçar comparação de resultados entre as duas bases.
	<i>Water body potential</i>	
	<i>Sewage heat potential</i>	

Fonte: MORAIS (2024), adaptado.

As variáveis e caracterização dos dados construtivos foram definidas pelos grupos de acordo com a realidade urbana de suas respectivas áreas. Algumas informações iniciais disponíveis nos *scripts* mencionados, como largura da faixa do entorno, foram determinadas por valores padrão do *software*, a fim de simplificar parte da configuração. Devido à participação remota de um representante da ETH Zürich, membro da equipe desenvolvedora do CEA, o seminário final foi conduzido em inglês e contou com a presença de duas docentes de instituições federais brasileiras.

3. Discussões

Na aula inaugural, identificaram-se tanto alunos que possuíam experiências prévias com simulações quanto aqueles sem familiaridade com o tema. A interação com o CEA se iniciou com um exercício prático de sensibilização que teve como objetivo a familiarização dos



alunos com a interface e configurações da ferramenta, antes de as simulações com as áreas de estudo serem iniciadas. Nesse exercício, foram definidas as configurações dos dados de entrada que envolviam uma caracterização construtiva das edificações de uma pequena seção do centro de Belo Horizonte, seus sistemas de condicionamento de ar, fontes de energia e eletricidade, bem como definição de tecnologias para geração de energia solar. Ressalta-se que, embora o CEA apresente uma interface mais amigável do que outros *softwares*, o processo de uso não se mostrou intuitivo para todos os alunos. Naturalmente, o nível de experiência individual com simulações influenciou neste quesito. Como forma de oferecer uma base teórica aos estudantes, em todos os encontros - salvo o primeiro e o último - houve momentos de aula expositiva intercalados com exercícios práticos.

Nos momentos teóricos, a estruturação da base SG foi apresentada e uma comparação teórica entre ela e a base BR foi feita. A importância da utilização de dados de entrada de qualidade para obtenção de resultados compatíveis foi enfatizada, bem como a utilização de uma ferramenta complementar durante a disciplina: o *OpenStreetMap*. Com essa ferramenta, as áreas que ainda não estavam disponíveis para simulação no CEA foram modeladas (BH2, MTZ1 e MTZ2). Para solução de dúvidas e erros detectados durante os momentos práticos, as autoras ofereciam suporte aos alunos quando solicitado.

Em um segundo momento da disciplina, os estudantes começaram a desenvolver as simulações definidas para cada uma das quatro áreas de estudo propostas, todas agora modeladas. Os grupos deveriam simular o cenário atual e uma proposição futura a partir de definições de parâmetros urbanísticos feitas por eles, envolvendo dados como coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, área permeável, área mínima da unidade habitacional, entre outros. Além disso, um dado que diferenciou cenários atuais de futuros foram os equipamentos definidos para as tecnologias para geração de energia solar, sendo intercalados os usos de painéis fotovoltaicos mono e policristalinos. O seminário final, conduzido em inglês devido à presença de um convidado estrangeiro, contou com as apresentações dos grupos, comentários do convidado externo e, em seguida, discussão em português entre os participantes presenciais sobre aprendizados e desafios enfrentados durante a disciplina.

Observou-se que, para alguns grupos, os resultados se mostraram iguais independente da base utilizada, o que não era esperado, enquanto outros apontaram discrepâncias previstas devido às diferenças nos dados técnicos entre SG e BR. Notou-se, ainda, que algumas variáveis sequer geraram resultados no CEA, como as relacionadas à construções informais, configurando um cenário anômalo de gráficos vazios. Comparativamente, a base BR alcançou valores mais altos do que a SG em alguns gráficos. De forma preliminar, os resultados inesperados são justificados por duas hipóteses: uma que sugere baixa sensibilidade do CEA para diferenças entre as realidades de Singapura e do Brasil; e outra que aponta para possíveis erros na configuração dos dados de entrada pelos alunos. Quanto à primeira, o fato de o programa não considerar em suas simulações itens com relevante consumo energético/elétrico em tais tipologias, como chuveiros elétricos, gás de cozinha e ventiladores comuns, pode ter contribuído para tal resultado. A ausência de resposta a realidades como as descritas por construções informais é um ponto crítico que amplia o distanciamento entre essa versão da ferramenta e o contexto brasileiro.

Pelo viés do planejamento urbano, as quatro áreas estudadas representam uma compilação de cenários distintos presentes em diversas cidades brasileiras: de um lado, recortes urbanos consolidados e mais adensados, com acesso satisfatório à infraestrutura e maior formalidade construtiva; do outro, regiões não planejadas, menos populosas e com certa defasagem de infraestrutura urbana, ainda passíveis de sofrer alterações morfológicas e, por consequência, suscetíveis à maior especulação imobiliária. Do ponto de vista de planejamento energético, os



resultados obtidos pelos alunos apontaram que cenários futuros, com maior adensamento e alteração do uso do solo, consequentemente apresentaram maior demanda energética do que cenários atuais. Parâmetros urbanísticos como altimetria das construções, coeficiente de aproveitamento, área livre de cobertura para instalação de painéis fotovoltaicos e afastamento entre edificações - este último impactando no sombreamento do entorno - poderão interferir no potencial de geração de energia *on-site* (no local). Pelo ponto de vista da tecnologia, o nível de eficiência energética dos próprios equipamentos também entra nessa equação.

Quanto à disciplina em si, os principais apontamentos ao final da aula destacaram que a combinação entre a baixa familiaridade de alguns alunos com o tema de simulações e os erros advindos do programa consumiram tempo considerável das aulas, causando atraso na obtenção de dados por alguns grupos. Por outro lado, muitos enalteceram a integração de teoria e prática na disciplina, além do suporte dado pelas autoras. A abordagem do Planejamento Energético Urbano e do CEA como uma ferramenta de suporte para decisões foi elogiada. Alguns alunos, entretanto, sugeriram mais tempo para os momentos teóricos e para alcançar um maior aprofundamento nas simulações, enquanto outros propuseram a inclusão de exemplos reais de propostas de intervenções urbanas originadas a partir das análises de tais simulações.

4. Conclusão

Este artigo relatou a estruturação e a experiência obtida em disciplina de graduação oferecida em 2024, discutindo o processo de ensino-aprendizagem de uma ferramenta digital voltada ao planejamento energético urbano. Observou-se que a turma entregou resultados promissores, o que incentiva a continuação da disciplina nos próximos semestres. Houve amadurecimento do pensamento crítico dos alunos quanto ao uso de simulações energéticas na escala urbana. A caracterização das áreas de estudo foi clara e concisa, sobretudo para o convidado externo, criando contexto satisfatório para discussão dos resultados. Apesar de possuir um conteúdo teórico e prático robusto para 8 aulas, os objetivos da ementa foram alcançados. Destaca-se como contribuição concreta a primeira aplicação prática da base BR, comprovando sua robustez. A participação de um convidado estrangeiro também foi um ganho, propiciando aos alunos uma experiência para além dos limites da sala de aula.

Como um dos obstáculos da disciplina, erros encontrados durante o percurso consumiram considerável tempo das aulas. No entanto, observou-se que dificuldades antes presentes foram superadas com o uso contínuo do CEA. Ressalta-se que empecilhos do tipo são relativamente comuns em simulações computacionais, aspecto reforçado aos alunos como parte natural do aprendizado e do primeiro contato com o tema. Para futuras ofertas da disciplina, cogita-se ampliar o foco nas aulas sobre configuração dos dados de entrada, sobretudo se a maioria dos alunos possuir pouca ou nenhuma familiaridade com o tópico.

O CEA demonstrou potencial relevante de aplicação no Brasil, especialmente em estudos de radiação e análises de tecnologias para geração de energia solar. Contudo, ainda há necessidade de maior aproximação entre o programa e alguns cenários brasileiros, sobretudo quanto à caracterização das matrizes energética e elétrica nacionais, bem como das edificações da chamada “cidade informal” - aspectos que ilustram diferenças encontradas entre realidades urbanas e energéticas de países desenvolvidos e em desenvolvimento. Quanto à experiência dos alunos, embora o contato inicial com o CEA não tenha sido unanimemente intuitivo, é inegável que sua interface é consideravelmente mais amigável do que a de outros programas disponíveis no mercado. Isso, aliado ao acesso gratuito, favorece o aumento no



número de usuários e uma maior adesão à ferramenta, especialmente por uma parcela fundamental no contexto do Planejamento Energético Urbano: os órgãos públicos. A existência de uma base brasileira para o CEA representa uma tentativa de aproximar o programa aos cenários urbanos e energéticos nacionais sem recorrer à programação, ampliando sua adesão dentro de instituições governamentais locais, empresas e universidades. Como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se investigar de forma aprofundada as razões pelas quais o programa não demonstrou sensibilidade a cenários com construções atípicas ou informais.

O CEA apresenta potencial para apoiar a tomada de decisão em processos de planejamento energético urbano. No Brasil, configura-se um aliado oportuno para gestores e planejadores urbanos na formulação de políticas públicas. Capacitar futuros arquitetos e urbanistas ainda na graduação é um dos pontos-chave para aumentar a qualificação, relevância e consciência dos profissionais que atuarão na escala urbana.

Referências

ARQFUTURO; LABORATÓRIO DE CIDADES. Guia temático - Cidades: principais conceitos para entender o ambiente urbano. 33 p., 2020. Disponível em: <https://shre.ink/Mfmf>. Acesso em: 9 abr. 2025.

CITY ENERGY ANALYST. City Energy Analyst - Homepage. 2024. Disponível em: <https://www.cityenergyanalyst.com/>. Acesso em: 18 mai. 2024.

COLLAÇO, F. M. A.. Sinergias entre o Planejamento Energético e o Planejamento Urbano: Estudo de caso do Sistema de Energia Urbano da megacidade de São Paulo. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Energia e Meio Ambiente, Universidade de São Paulo. São Paulo, 233 p., 2019. Disponível em: <https://abrir.link/YKUoh>. Acesso em: 03 jul 2023.

COLLAÇO, F. M. A.; BERMANN, C.. Potencialidades do Planejamento Energético Local na redução da desigualdade na cidade de São Paulo. Ambiente & Sociedade. São Paulo, v. 24, p. 1-16, 2021. Disponível em: <https://abrir.link/FdehB>. Acesso em 18 set. 2024.

DE SOUZA, L. P.; MELO, A. P.; VAZ, C. E. V.; LAMBERTS, R.. Ensino de simulação termoenergética em edificações: Um estudo de caso com estudantes de arquitetura. XVI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC, 10 p., Palmas - TO, 2021. Disponível em: <https://shre.ink/M4r7>. Acesso em: 30 set., 2024.

FONSECA, J. A.; NGUYEN, T.; SCHLUETER, A.; MARECHAL, F.. City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. Energy and Buildings, v. 113, p. 202-226, 2016. Disponível em: <https://shre.ink/M4r1>. Acesso em: 08 set. 2023.

GOMES, J. B.; BARROS, V. G.. Cenário e políticas do Planejamento Energético: Energia solar e as necessidades do Planejamento Territorial. Revista de Ciências da Administração (Especial): Summit Cidades, Portal de Periódicos da UFSC, p. 1-17, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/adm/article/view/96280/55106>. Acesso em: 18 set. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Atlas da Eficiência Energética Brasil | 2022 - Relatório de indicadores. 2021. Disponível em: <https://shre.ink/M48P>. Acesso: 03 jul 2023.

HONG, T.; CHEN, Y.; LUO, X.; LUO, N.; LEE, S. H.. Ten questions on urban building energy modeling. Building and Environment, v. 168, 2020. Disponível em: <https://shre.ink/M4rR>. Acesso em: 08 set. 2023.



JING, R.; WANG, X.; ZHAO, Y.; ZHOU, Y.; Wu, J.; LIN, J.. Planning urban energy systems adapting to extreme weather. *Advances in Applied Energy*, v. 3, 10 p., 2021. Disponível em: <https://shre.ink/M4DA>. Acesso em: 16 set. 2024.

JOHARI, F.; PERONATO, G.; SADEGHIAN, P.; ZHAO, X.; WIDÉN, J.. Urban building energy modeling: State of the art and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 128, 16p., 2020. Disponível em: <https://shre.ink/M48K>. Acesso em: 10 set. 2023.

MORAIS, I. S.. Suitability Study of the City Energy Analyst software in the Brazilian Context. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) - Escola de Arquitetura e Design, Universidade Federal de Minas Gerais. 211 p. 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/79071>. Acesso em: 10 fev. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. É o momento das cidades: Não há saída sem investimento em desenvolvimento sustentável. Nações Unidas Brasil. 13 Novembro de 2023. Disponível em: <https://shre.ink/MgiW>. Acesso em: 9 abr. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. O que são mudanças climáticas?. Nações Unidas Brasil. 202-. Disponível em: <https://shre.ink/MgiK>. Acesso em: 9 abr. 2025.

NASCIMENTO, A. C. S., ROCHA, A. P. A. Aplicação de simulação computacional de desempenho ambiental de edifícios no processo de projeto. *Caderno PAIC - Programa de Apoio à Iniciação Científica*, v. 24, n. 1, 21 p., 2023. Disponível em: <https://cadernopaic.fae.edu/cadernopaic/article/view/537>. Acesso em: 30 set., 2024.

OPENSTREETMAP. Welcome to OpenStreetMap! - Homepage. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/#map=18/-19.92294/-43.94718>. Acesso em: 18 mai. 2024.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. Estudo realiza medição de altitudes em Belo Horizonte. Notícias. Disponível em: <https://shre.ink/M4rp>. Acesso em: 20 mai. 2024.

PREFEITURA DE MATOZINHOS. Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Matozinhos - MG. 603 p. 2017. Disponível em: <https://shre.ink/M4rs>. Acesso: 20 mai. 2024.

SANTOS, J. S. A.; FRAGA, A. A.; LUGÃO, L. R.; ALVAREZ, C. E. Eficiência energética e planejamento urbano frente às mudanças climáticas: uma revisão sistemática. In: 2º CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2. 2022, Vitória. Anais [...]. Vitória: UFES, 2022. p. 673-682. ISBN: 978-989-53626-0-8. Disponível em: <https://shre.ink/M4Ic>. Acesso em: 18 set. 2024.

SIQUEIRA, A. M. Q.; BERMANN, C.. Fundamentos do Planejamento Energético centralizado e do descentralizado. *Sociedade Brasileira de Planejamento Energético*, v. 26, n. 1, p. 33-44, 2020. Disponível em: <https://shre.ink/M48z>. Acesso em: 18 set. 2024.

TEIXEIRA, I. Países ricos geram 10 vezes mais impacto climático que países de menor renda. NAÇÕES UNIDAS, ONU News, seção Clima e Meio Ambiente, 01 de março de 2024. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2024/03/1828467>. Acesso em: 09 abr. 2025.