

## Artigo Técnico

<sup>a</sup> Seção de Engenharia de Software e Transportes Inteligentes, Tecnologias Digitais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

### Projeto de heliodon automatizado de pequenas dimensões e de baixo custo para uso como ferramenta educacional.

*Design of a small-scale, low-cost, automated heliodon to be applied as an educational tool.*

Gabriel Borelli Martins<sup>a\*</sup>

Palavras-chave: heliodon; estudos de insolação; geometria solar; conforto térmico.

*Keywords: heliodon; solar studies; solar geometry, thermal comfort.*

## Resumo

Estudos de insolação em projetos arquitetônicos são fundamentais sob o aspecto de sustentabilidade. Um estudo adequado permite aproveitar a iluminação natural da melhor forma possível, além de ser importante nas avaliações de conforto térmico, melhorando a eficiência energética do projeto como um todo. Estes estudos envolvem conceitos de geometria solar, que são ensinados nas escolas de Arquitetura e de Engenharia Civil. O ensino de geometria solar é um desafio, já que demanda dos alunos certo nível de abstração, com a compreensão da movimentação aparente do sol para um observador na Terra e de projeções em diagramas solares. Dispositivos como heliodons são ferramentas educacionais úteis, que facilitam o trabalho do docente, bem como a compreensão dos estudantes, principalmente daqueles que estão tendo o primeiro contato com geometria solar. Contudo, nem sempre as escolas de arquitetura e de engenharia dispõem de recursos e do espaço físico necessário para a construção de um laboratório com um heliodon. Neste trabalho é apresentado o projeto de um heliodon alternativo de pequenas dimensões e de baixo custo que pode ser utilizado pelo docente em sala de aula. Ademais, foi desenvolvido um software com interface gráfica para ser integrado ao dispositivo físico. O conjunto é de acesso livre e serve como ferramenta educacional nas disciplinas que envolvem conceitos de geometria solar.

## Abstract

*Solar studies in architectural projects are essential from a sustainability perspective. An appropriate study allows for the optimal use of daylight and is crucial for thermal comfort evaluations, enhancing the overall energy efficiency of the project. These studies involve concepts of solar geometry, which are taught in schools of Architecture and Civil Engineering. Teaching solar geometry presents a challenge, as it requires students to possess a certain level of abstraction, including an understanding of the apparent movement of the sun, as well as projections in solar diagrams. Devices such as heliodons are valuable educational tools that facilitate the instructor's work and enhance students' comprehension, particularly for those encountering solar geometry for the first time. However, not all architecture and engineering schools have the resources or physical space required to build a laboratory equipped with a heliodon. This paper presents the design of an alternative, small-scale, low-cost*

*heliodon that can be used by instructors in the classroom. Additionally, software with a graphical interface has been developed to integrate with the physical device. Both the hardware and the software are open-source and serve as educational tools in subjects involving solar geometry concepts.*

## 1 Introdução

O uso de diagramas solares e de ferramentas computacionais de geometria solar em projetos arquitetônicos é uma prática cada vez mais relevante, considerando o adensamento dos centros urbanos e a necessidade de se encontrar soluções que sejam eficientes sob o aspecto energético. A redução do tempo de uso de iluminação artificial, bem como a otimização do tempo de uso de sistemas de ar condicionado e de aquecimento, são fatores importantes na busca por edifícios zero carbono.

Vale ressaltar que o ensino de geometria solar nos cursos de Arquitetura e de Engenharia Civil pode ser bastante desafiador, conforme mencionado por Pajek *et al.* (2018), uma vez que envolve noções do movimento solar aparente para um observador na Terra e sua projeção na forma de diagrama, ou seja, requer certa abstração por parte do estudante. O heliodon é um dispositivo mecânico utilizado para simular a posição solar em determinado horário e posição geográfica com o objetivo de estudar os padrões de sombra formados por modelos reduzidos (CONRADO *et al.*, 2022). Embora existam ferramentas de design mais precisas, o heliodon continua sendo extremamente útil no ensino (PAJEK *et al.*, 2018), sobretudo para os alunos que estão tendo o primeiro contato com geometria solar.

Na literatura são encontrados vários dispositivos de características mecânicas distintas. Fernandes e Cunha (2011) fazem um compilado desses dispositivos, apresentando suas vantagens e desvantagens, em termos de intuição no uso, facilidade de operação, manutenção, fabricação, custo, fixação das maquetes e dimensão.

A dimensão costuma estar diretamente associada à precisão requerida, sendo desejável utilizar modelos em escalas não muito pequenas. Devido à distância entre o sol e a Terra, os raios solares atingem a superfície terrestre aproximadamente paralelos (FERNANDES, GRZYBOWSKI, RIBEIRO, 2013). Para conseguir esse efeito com uma fonte luminosa fixa (lâmpada), pode-se utilizar lentes colimadoras ou limitar

a região ocupada do modelo reduzido, de modo que os efeitos de divergência dos raios estejam dentro do limite tolerável para a aplicação.

Os dispositivos com fonte luminosa fixa têm a vantagem de poder utilizar uma fonte luminosa bastante distante do modelo, reduzindo as distorções geradas pela incidência dos raios luminosos. O próprio sol pode ser utilizado como fonte luminosa, como é o caso do dispositivo portátil desenvolvido pelo MIT, mostrado na **FIGURA 1**. Neste caso, o posicionamento do modelo em relação à fonte luminosa é feito por meio de uma mesa com três graus de liberdade. Embora o dispositivo possa ser mais compacto, do ponto de vista educacional a abordagem adiciona uma camada de abstração, tornando-o menos intuitivo para o estudante.

**Figura 1 - Heliodon portátil com fonte luminosa fixa (sol) desenvolvido pelo MIT.**



Fonte: Andersen et al. (2007).

Alguns dispositivos apresentam a fonte luminosa presa a uma haste. Podem ser projetados com mesa móvel ou com mesa fixa. No caso de mesas móveis, há a desvantagem de serem pouco intuitivos, a exemplo do heliodon mostrado na **FIGURA 1**. Mais comuns, e com certa variabilidade de design, são os heliodons de arcos. Podem apresentar um arco, múltiplos arcos, mesa móvel, mesa fixa e diversos níveis de automatização. Um exemplo é o heliodon do Laboratório de Conforto Ambiental do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, mostrado na **FIGURA 2**. No geral, são dispositivos que demandam de espaços maiores para instalação e podem apresentar custo elevado, dependendo dos materiais utilizados e do grau de automatização. Contudo, tendem a ser mais intuitivos para os estudantes, sobretudo os de mesa fixa.

**Figura 2 - Heliodon de arcos fixos com mesa móvel do Laboratório de Conforto Ambiental da USP.**



**Fonte: Laboratório de Conforto Ambiental - USP**

Neste artigo é proposto um dispositivo de fácil construção, utilizando métodos de manufatura aditiva convencionais, bastante acessíveis nos dias de hoje, tanto para professores quanto para alunos, que possa ser facilmente transportado, automatizado e que, além da indicação física da posição solar, indique ao estudante o diagrama solar correspondente, por meio de um software integrado ao sistema mecânico. Como o objetivo principal é o de atender a uma demanda educacional, especialmente pensando naqueles que estão tendo o primeiro contato com geometria solar, a precisão da sombra gerada não foi um

aspecto primordial de design. Tanto software quanto hardware são abertos e mantidos no repositório do projeto <https://github.com/gborelli89/mini-heliodon> (MARTINS, 2024).

Nas pesquisas que foram realizadas, o autor não encontrou um outro dispositivo intuitivo que aliasse versatilidade, facilidade de manufatura, automatização e integração com um software que mostre o diagrama solar correspondente à posição da fonte luminosa. Peña *et al.* (2020) apresenta o projeto de um equipamento portátil e de baixo custo para uso educacional, que pode vir a ser automatizado, mas sem mostrar resultados de aplicação. Além disso, o software que menciona em seu artigo (não implementado e sem detalhes adicionais) tem como objetivo único a automatização do dispositivo, diferentemente do que é proposto neste trabalho em que, além da automatização, é proposta a projeção simultânea do diagrama solar correspondente, estratégia interessante sob o aspecto educacional.

## 2 Procedimento metodológico

O projeto foi dividido em três etapas: elaboração do dispositivo mecânico, automação e desenvolvimento de software básico.

### 2.1 Dispositivo mecânico

Para o projeto do dispositivo mecânico, foram consideradas as diversas possibilidades encontradas na literatura. Neste trabalho foram priorizados: a utilização de um esquema de movimentação intuitivo e de fácil interpretação pelo estudante, a praticidade no transporte, o material e o método de manufatura.

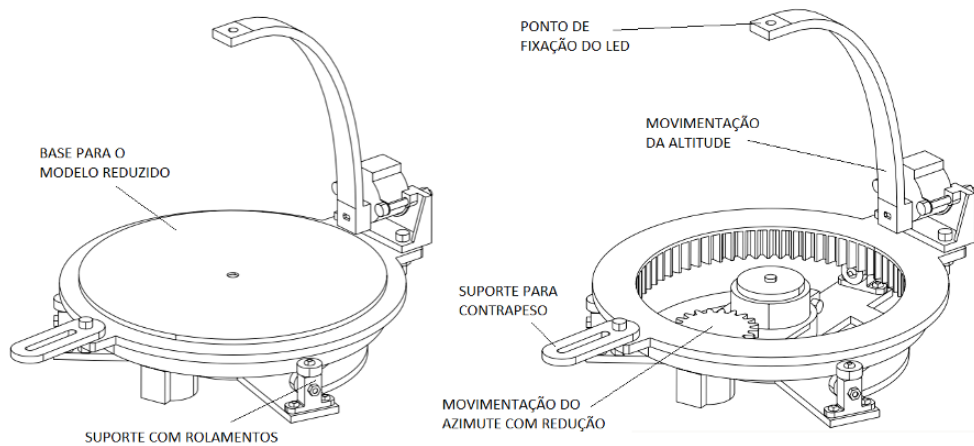
Pensando em aliar o aspecto intuitivo ao desenvolvimento de um dispositivo compacto e de fácil transporte, foi adotado o esquema de uma fonte luminosa presa a uma haste. A altitude pode ser controlada facilmente com a movimentação angular da haste, de modo que a mesa não precise se inclinar, o que dificultaria a interpretação do estudante. Contudo, para que seja possível simular várias latitudes, longitudes, dias e horários, é necessário que o movimento angular da haste seja combinado com a rotação da mesa. Para que o dispositivo permaneça intuitivo e interessante sob o aspecto didático, pode-se marcar os pontos cardeais diretamente na mesa.

Foi utilizada manufatura aditiva com PLA, material comumente empregado nas impressoras 3D de filamento de uso doméstico. Outros materiais comuns, como ABS, podem ser adotados. Nada impede que o projeto seja adaptado para outros métodos de manufatura e materiais, como corte a laser de MDF ou de acrílico. Isso permitiria a construção de dispositivos maiores (desde que haja compatibilização dos motores de passo e drivers) e mais precisos, mas penalizaria a facilidade no transporte e montagem.

A estrutura foi separada em duas partes, uma fixa e uma móvel. A parte móvel fica apoiada sobre rolamentos do tipo 623ZZ. A movimentação do azimute é feita por meio de um motor de passo e de um sistema redutor. Já a movimentação da altitude é feita diretamente por meio de uma haste fixada a um segundo motor de passo, parafusado na parte móvel da estrutura. Trata-se, portanto, de um sistema de dois graus de liberdade, cujo desenho esquemático é mostrado na **FIGURA 3**.

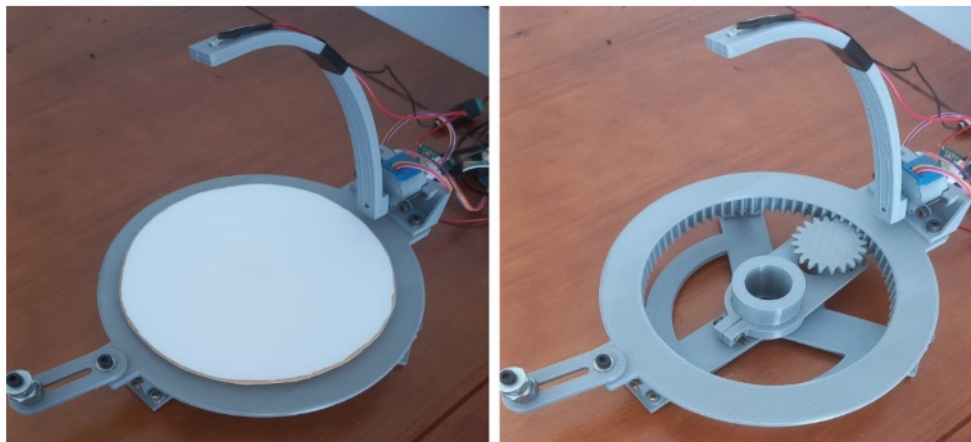
Como a parte móvel da estrutura fica apenas apoiada nos rolamentos, foi necessária a inclusão de um contrapeso, cujo suporte é indicado na **FIGURA 3**, para equilibrar o peso do motor de passo responsável pela movimentação da altitude, com o seu suporte e haste. O sistema mecânico montado, conforme apresentado na **FIGURA 4**, propicia a simulação de qualquer latitude, longitude, dia e horário.

**Figura 3 – Representação esquemática do heliodon projetado.**



**Fonte: elaborado pelo autor.**

Figura 4 - Heliodon montado.

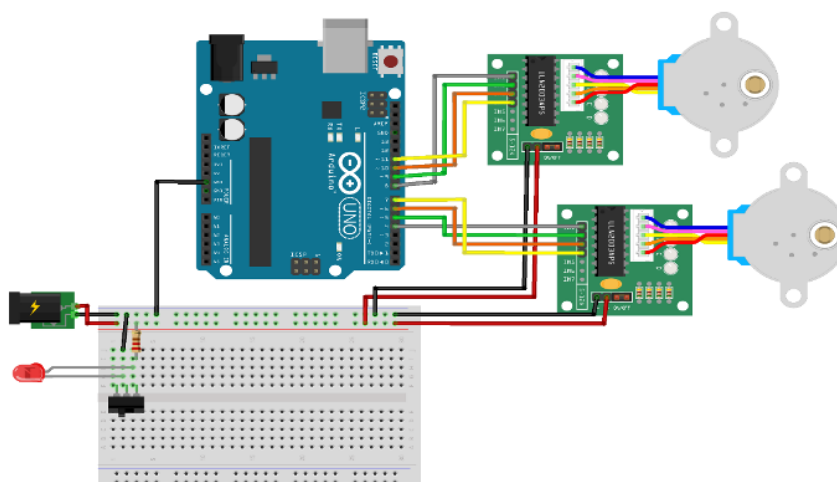


Fonte: elaborado pelo autor.

## 2.2 Automatização da posição da fonte luminosa e software de controle

Para a automatização do sistema mecânico foi empregado um Arduino Uno para controle dos dois motores de passo simultaneamente, conforme indicado na **FIGURA 5**. O acionamento da fonte luminosa (LED) foi feito mecanicamente, por meio de uma chave liga/desliga. Pequenas mudanças podem ser feitas para que o acionamento seja feito via software. A fonte luminosa deve ser posicionada diretamente na haste fixada ao motor de passo responsável pela movimentação da altitude (vide **FIGURA 3**).

Figura 5 - Esquema eletrônico.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a determinação da posição relativa do sol (posição da fonte luminosa no dispositivo mecânico desenvolvido), foi utilizada a biblioteca Pysolar (STAFFORD et al., 2023). O posicionamento é feito com o acionamento dos dois motores de passo simultaneamente. Foram implementadas três simulações básicas em Python, que são brevemente descritas no **Quadro 1**.

**Quadro 1 – Simulações básicas implementadas no software.**

Nome do comando	Descrição
<code>onepoint_sim</code>	Simulação de uma posição solar, dada latitude, longitude, data e horário.
<code>oneday_sim</code>	Simulação da posição solar em um dia completo, hora a hora, dada latitude, longitude e data.
<code>month_sim</code>	Simulação da posição solar mês a mês, para a mesma posição geográfica (latitude e longitude), ano, dia e hora.

**Fonte:** elaborado pelo autor.

As simulações podem ser executadas diretamente por linha de comando, e retornam os valores de altitude e de azimute do sol. Os valores de altitude e de azimute são argumentos da função `move`, que é responsável pela movimentação da fonte luminosa do heliodon. Por se tratar de software aberto, o usuário tem bastante flexibilidade para criar as próprias funções e simulações na linguagem Python. A documentação mostrando como importar as bibliotecas necessárias, conectar o dispositivo e realizar uma simulação simples via linha de comando é dada no repositório do projeto.

Para facilitar o uso da ferramenta por professores e estudantes, foi criada uma interface gráfica (GUI) que projeta o diagrama solar simultaneamente à movimentação da fonte luminosa do heliodon. Neste diagrama, há a possibilidade de plotar linhas auxiliares, como as linhas dos solstícios, dos equinócios, do caminho do sol no dia escolhido (simulação `oneday_sim`) e do caminho do sol durante o ano para o mesmo dia e horário em cada mês (simulação `month_sim`).

## 2.3 Materiais

A lista básica de materiais para a construção do dispositivo mecânico proposto é apresentada na TABELA 1. Na data em que foram comprados, os materiais utilizados para a confecção do projeto somaram, aproximadamente, R\$200,00. Pode haver uma variação significativa neste valor, a depender, principalmente, da data e do local de compra dos componentes eletrônicos. Por esse motivo, os valores não são apresentados individualmente na TABELA 1. Cerca de metade dos custos, para um dispositivo com essas dimensões e manufaturado com uma impressora 3D de filamento, está na placa de desenvolvimento (Arduino Uno) e nos motores de passo com drivers e fonte chaveada.

**Tabela 1 – Principais materiais necessários para a construção do heliodon.**

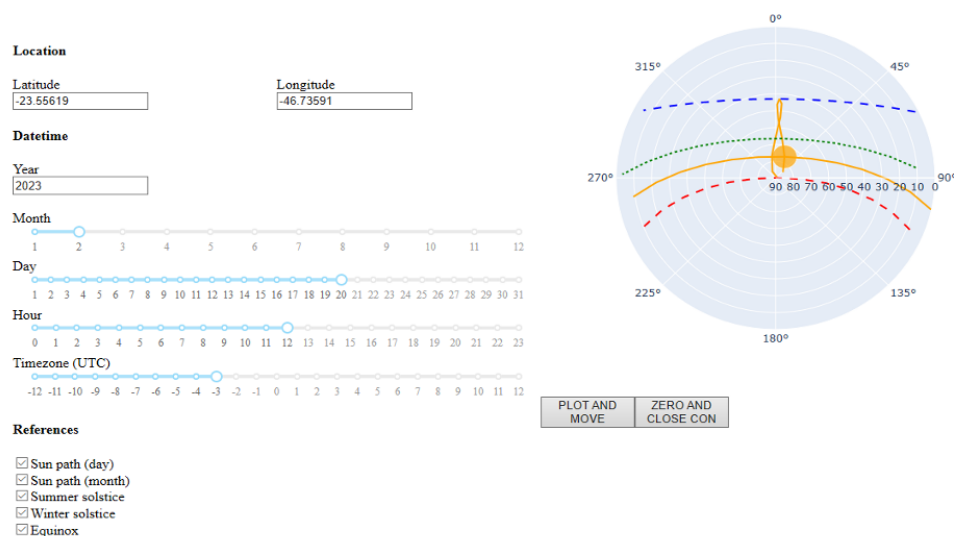
Descrição	Quantidade
Motor de passo 28BYJ-48	2
Driver de motor de passo ULN2003	2
LED branco de alto brilho 5 mm	1
Resistor 100 $\Omega$	1
Chave liga/desliga	1
Fonte chaveada 5 V 1 A e conector	1
Arduino Uno	1
Rolamento 623ZZ	6
Parafuso M4 x 12 mm	2
Parafuso M4 x 20 mm	5
Parafuso M4 x 30 mm	2
Porca M4	9
Arruela M4	13
Parafuso M3 x 10 mm	9
Parafuso M3 x 16 mm	3
Porca M3	12
Chapa revestimento branco $\varnothing$ 150 mm x 3 mm	1
Filamento PLA	Aprox. 150 g

Fonte: elaborado pelo autor.

### 3 Resultados e discussão

A junção do dispositivo físico com a representação gráfica de diagramas solares é bastante interessante sob o aspecto educacional. A **FIGURA 6** mostra a interface gráfica do software desenvolvido. O diagrama à direita foi gerado considerando as coordenadas geográficas, a data e o horário indicados nos campos à esquerda. O círculo em amarelo corresponde à posição da fonte luminosa. Conforme indicado, podem ser plotadas as seguintes linhas de referência: do solstício de inverno em azul tracejado, do solstício de verão em vermelho tracejado, do equinócio em verde pontilhado, do caminho do sol em amarelo contínuo (exemplo do dia 20/02/2023 e do ano de 2023 para os dias 20 de todos os meses, às 12 horas).

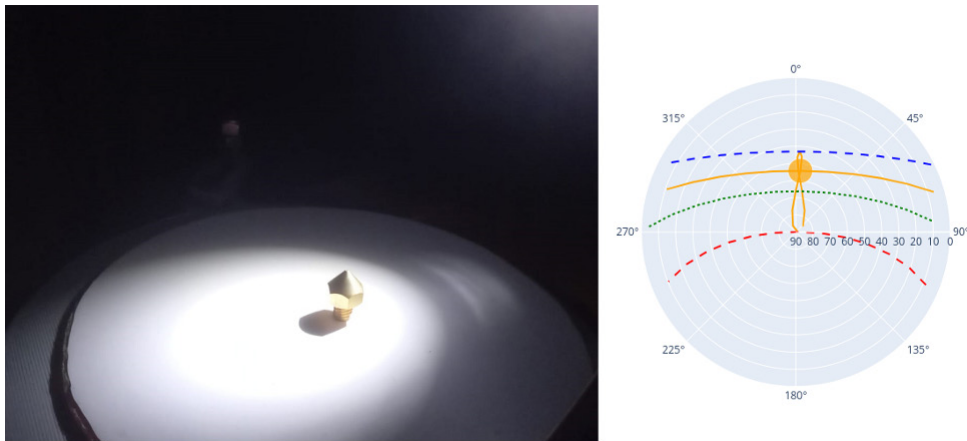
Figura 6 – Exemplo de diagrama solar.



Fonte: elaborado pelo autor.

A **FIGURA 7**, por sua vez, traz um exemplo da integração do software com o dispositivo mecânico construído. À esquerda temos a projeção da sombra de um elemento dourado, posicionado no centro da mesa do heliodon, ao passo que à direita temos o diagrama solar correspondente. Dada a dimensão do heliodon e a sua função educacional, deve-se privilegiar o uso de elementos de geometria simples.

Figura 7 – Sombra de modelo de geometria simples (esq.) com respectivo diagrama solar (dir.).



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme mencionado anteriormente, o dispositivo proposto tem baixo custo, é pequeno e de manufatura simples. Isso permite que professores o utilizem em sala de aula para a realização de experimentos de baixa complexidade, prendendo a atenção do aluno e ajudando com a interpretação das projeções apresentadas nos diagramas solares. Ademais, os estudantes podem construir o dispositivo e explorá-lo por conta própria, fixando ainda mais conceitos fundamentais e desenvolvendo uma série de habilidades adicionais.

Trata-se de um projeto aberto. Nada impede que o design seja melhorado, que as soluções mecânicas apresentadas sejam empregadas como inspiração para o desenvolvimento de dispositivos maiores, que o software seja adaptado para um dispositivo automatizado já existente ou até mesmo utilizado à parte, sem qualquer mecanismo físico de apoio. No caso da manufatura de um dispositivo maior, a flexibilidade do transporte e do uso em sala de aula poderia ser perdida, com um ganho no que diz respeito à precisão das sombras formadas e do tamanho e complexidade dos modelos reduzidos utilizados.

### 3.1 Melhorias e trabalhos futuros

O projeto é aberto para melhorias, seja do dispositivo mecânico em si, seja do software proposto. Uma possibilidade futura, de simples implementação, é a adoção de sensores de fim de curso para evitar a perda de referência dos motores de passo.

O próximo passo essencial é o de testar o dispositivo em sala de aula. Com isso será possível compreender melhor se o dispositivo de fato facilita o aprendizado e quais são os pontos que precisam ser melhorados.

## 4 Conclusões

O heliodon desenvolvido foi pensado para ser utilizado como ferramenta educacional nos cursos de Arquitetura e de Engenharia Civil. A manufatura simples e o custo reduzido fazem com que o dispositivo seja acessível a professores e a estudantes de geometria solar. A automação e a interface gráfica, com a apresentação simultânea dos diagramas solares correspondentes ao posicionamento da fonte luminosa no dispositivo mecânico, têm o potencial de facilitar a compreensão e de desenvolver aspectos cognitivos de visão espacial nos estudantes.

Por se tratar de um projeto completamente aberto, o dispositivo permite grande flexibilidade, seja de alteração dos elementos mecânicos, com o objetivo de melhorar o projeto para as necessidades do usuário, seja de implementação de novas simulações. As sugestões de melhorias, bem como novas ferramentas implementadas podem ser submetidas no repositório GitHub do projeto.

## 5 Referências

ANDERSEN, M. *et al.* **The Heliodome project**: an innovative approach in assessing solar-optical properties of light-redirecting materials in combination with sun course simulations. In: CISBAT 2007 – RENEWABLES IN A CHANGING CLIMATE: INNOVATION IN THE BUILT ENVIRONMENT, 2007.

CONRADO, L. S. *et al.* Review of heliodon developments and computational tools for building shadow analysis. **Buildings**, v.12, n.5, p. 627, 2022.

FERNANDES, L. C.; CUNHA, E. Ensino de geometria solar: Proposta de heliodon alternativo In: XI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO e VII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2011, Búzios.

FERNANDES, L. C.; GRZYBOWSKI, J. M. V.; RIBEIRO, A. A. G. A. Desenvolvimento, execução e teste de simulador de trajetória solar aparente. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO e VIII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2013, Brasília.

LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL. Instituto de arquitetura e urbanismo da Universidade de São Paulo. Heliodon. Consulta geral a homepage. Disponível em <<https://www.iau.usp.br/laboratorios/lca/index.php/heliodon-2>> s.d. Acesso em 20 de novembro de 2024.

MARTINS, G. B. Mini-heliodon. **Consulta geral a homepage**. Disponível em <https://github.com/gborelli89/mini-heliodon>. 2024. Acesso em 29 fev. 2024.

PAJEK, L.; POTOČNIK, J.; DOVJAK, M.; BOŽIČEK, D.; ŠUBIC, N.; KUNIČ, R.; KOŠIR, M. Using heliodon for solar building design education in the age of computer simulations. In: EUROSUN 2018 CONFERENCE PROCEEDINGS, 2018.

PEÑA, J. M. *et al.* Design of a portable, low-cost, heliodon prototype for the teaching of solar geometry and irradiance in bioclimatic architecture. **Journal of Physics Conference Series**. IOP Publishing, 2020.

STAFFORD, B. *et al.* Pysolar. **Consulta geral a homepage**. Disponível em <https://github.com/pingswept/pysolar>. Versão. 0.11, 25 jul. 2023. Acesso em 29 fev. 2024.

SZOKOLAY, S. Solar geometry. In: PLEA NOTES: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, University of Queensland, 2ª edição revisada, 2007.

10.29327/2152495.8.27-4

