

Integração entre modelagem paramétrica, simulação térmica e geometria complexa para a otimização do desempenho das edificações

Integration between parametric modeling, thermal simulation and complex geometry to optimize building performance

Integración entre modelado paramétrico, simulación térmica y geometría compleja para optimizar el rendimiento del edificio

Brunna Pereira de Oliveira

Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, UFPel, Brasil.
brunnappo26@gmail.com

Janice de Freitas Pires

Professora Doutora em Arquitetura e Urbanismo, UFPel, Brasil.
janicefpires@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho busca subsidiar estudos que contemplem a integração entre a geometria para arquitetura e simulações térmicas de referenciais arquitetônicos que possuem sua forma inspirada na natureza para compreender como tais superfícies impactam o conforto térmico dos usuários. Nesse contexto, desenvolve-se uma revisão bibliográfica sobre os conceitos e técnicas envolvidos em tais tipos de simulações e sistematiza-se o saber envolvido por meio de esquemas visuais e tabelas, visando contribuir com novas estruturas de saber que podem servir de suporte à ação projetual de estudantes de Arquitetura e Urbanismo, no sentido de despertar para soluções que se alinham com a diminuição do impacto ambiental provocado pelo ambiente construído. Além disso, também se apresenta um exercício de simulação térmica a partir da análise e comparação do tempo de incidência solar direta sobre a envoltória de dois tipos de superfícies geométricas – um cilindro (geometria elementar) e uma superfície complexa, utilizada na obra *Hyperions* (um catenoide, inspirado na natureza). Tais estudos já permitiram observar um desempenho térmico em que na superfície do catenoide existe um maior número de horas de insolação, tanto no verão como no inverno. A partir deste estudo, tem-se o objetivo de avançar para uma avaliação da radiação solar incidente, em termos de quantidade de energia, na envoltória de tais superfícies para confrontar os cenários e compreender de que maneira a forma geométrica influencia concretamente nas questões de conforto térmico para, assim, avançar para a etapa de estruturação de atividades didáticas.

PALAVRAS-CHAVE: Geometria complexa. Modelagem paramétrica. Simulação Térmica.

ABSTRACT

*The present work seeks to subsidize studies that contemplate the integration between geometry for architecture and thermal simulations of architectural references that have their form inspired by nature to understand how such surfaces impact the thermal comfort of users. In this context, a bibliographical review is developed on the concepts and techniques involved in such types of simulations and the knowledge involved is systematized through visual schemes and tables, aiming to contribute with new structures of knowledge that can support the design action of Architecture and Urbanism students, in the sense of awakening to solutions that are in line with the reduction of the environmental impact caused by the built environment. In addition, a thermal simulation exercise is also presented based on the analysis and comparison of the time of direct solar incidence on the envelope of two types of geometric surfaces – a cylinder (elementary geometry) and a complex surface, used in the work *Hyperions* (a catenoid, inspired by nature). Such studies have already allowed us to observe a thermal performance in which there are a greater number of hours of sunlight on the surface of the catenoid, both in summer and winter. Thus, based on this study, the aim is to advance towards an assessment of the incident solar radiation, in terms of the amount of energy, on the envelope of such surfaces, in order to confront the scenarios and understand how the geometric shape concretely influences the thermal comfort issues in order to advance to the stage of structuring didactic activities.*

KEYWORDS: Complex geometry. Parametric modeling. Thermal Simulation.

RESUMEN

*El presente trabajo busca subsidiar estudios que contemplem la integración entre geometría para arquitectura y simulaciones térmicas de referentes arquitectónicos que tengan su forma inspirada en la naturaleza para entender cómo dichas superficies impactan en el confort térmico de los usuarios. En este contexto, se desarrolla una revisión bibliográfica sobre los conceptos y técnicas involucradas en este tipo de simulaciones y se sistematizan los conocimientos involucrados a través de esquemas y tablas visuales, con el objetivo de contribuir con nuevas estructuras de conocimiento que puedan sustentar la acción proyectual de la Arquitectura y el Urbanismo. estudiantes, en el sentido de despertar a soluciones que estén en consonancia con la reducción del impacto ambiental causado por el entorno construído. Además, también se presenta un ejercicio de simulación térmica basado en el análisis y comparación del tiempo de incidencia solar directa sobre la envoltura de dos tipos de superficies geométricas: un cilindro (geometría elemental) y una superficie compleja, utilizada en la obra *Hyperions* (una catenoide, inspirada en la naturaleza). Dichos estudios ya nos han permitido observar un comportamiento térmico en el que hay un mayor número de horas de luz solar en la superficie de la catenoide, tanto en verano como en invierno. Así, a partir de este estudio, se pretende avanzar hacia una valoración de la radiación solar incidente, en términos de cantidad de energía, sobre la envoltura de dichas superficies, para afrontar los escenarios y comprender cómo influye concretamente la forma geométrica. los temas de confort térmico para avanzar a la etapa de estructuración de las actividades didáticas.*

PALABRAS CLAVE: Geometría compleja. Modelado paramétrico. Simulación Térmica.

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho faz parte do projeto de pesquisa AMPARA (Análise, Modelagem PARAMétrica e Fabricação Digital da geometria complexa da arquitetura: construção de referenciais didáticos para o ensino de projeto) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAUrb) da Universidade Federal de Pelotas, UFPel. O objetivo principal do projeto é a estruturação de referenciais didáticos que abarquem a geometria complexa da arquitetura em conjunto com as técnicas de representação por modelagem paramétrica e fabricação digital a partir da análise do emprego de um conjunto de superfícies matemáticas e suas propriedades de desempenho.

Ao longo de tais estudos, identificou-se que algumas destas superfícies complexas da arquitetura vinculam-se às estruturas da natureza devido as suas propriedades de otimização estrutural. Devido a isso, as atividades se concentraram em ampliar a compreensão destas abordagens e investir na explicitação de tal saber, buscando identificar relações com outros temas abordados na formação em arquitetura, especialmente no atelier de projeto. Atualmente, o projeto já passou por uma revisão bibliográfica que investigou as relações existentes entre o comportamento da natureza, a metodologia projetual, soluções arquitetônicas, os conceitos de Tectônica e Estereotômica – abordados no ateliê de projeto– e a representação gráfica. A partir do objetivo de subsidiar um processo de análise acerca da potencialidade da estruturação desses saberes à ação projetual, esta primeira etapa do projeto promoveu a explicitação dos saberes que envolvem a Biomimética como uma alternativa de soluções arquitetônicas em conjunto com a utilização da modelagem paramétrica no processo de projeto, “que se configuram não apenas como um recurso ao método de projeto, mas também como subsídios importantes à ação projetual e formativa” (OLIVEIRA; PIRES, 2021)

Como seguimento, o projeto passou por um processo de estruturação de referenciais didáticos, realizado em OLIVEIRA; PIRES (2022), explicitando os saberes envolvidos na geração de geometrias complexas e a sua integração com as abordagens apresentadas aos estudantes de Arquitetura no atelier de projeto no início do curso da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de origem dos estudos em questão. Tal estruturação foi realizada a partir de análises geométricas e das modelagens paramétricas de uma obra referencial – o Restaurante Los Manantiales, de Félix Candela – e de uma atividade da disciplina de Projeto de Arquitetura II do curso de Arquitetura da mesma universidade, realizada, anteriormente, pela autora deste estudo no ano de 2019. Os saberes foram explicitados no formato de uma rede de conceitos em mapas conceituais desenvolvidos no software CMAP tools (<https://cmap.ihmc.us/>). Isso permitiu a integração dos conceitos abarcados anteriormente, na revisão bibliográfica, a partir de estudos de casos de arquitetura que oferecem uma estrutura de saber a ser acessada para subsidiar processos formativos.

No momento em que o projeto se encontra, evidenciou-se a necessidade de investigar de que maneiras o ambiente construído a partir de geometrias complexas inspiradas na natureza impactam no meio ambiente. Isso porque, segundo GONÇALVEZ e DUARTE (2006), observou-se ao longo dos anos, especialmente após a Segunda Guerra Mundial, uma banalização internacional da abordagem da arquitetura bioclimática para lidar com questões ambientais ao substituí-la por mecanismos artificiais de controle do conforto nas edificações. No entanto, a importância da arquitetura bioclimática é retomada quando escritórios de arquitetura do mundo todo evidenciam esta problemática ao incorporarem a urgência do tema

em suas metodologias projetuais (PAIXÃO; PIRES, 2022) de modo a buscar tecnologias que reduzam o impacto de suas edificações.

Sob esse contexto, o projeto paramétrico, uma das abordagens tecnológicas atuais de representação em arquitetura, surge com um grande potencial de concepção de projetos responsivos. De acordo com WOODBURY (2010), tal modo de representação baseia-se em um modelo digital descrito através de parâmetros e relações entre os seus entes geométricos que possibilitam uma grande variedade de soluções alternativas. Esse tipo de processo projetual, tem sido utilizado na concepção de edificações com superfícies de geometrias complexas que contempla contribuições em vários tipos de desempenho – térmico, estrutural e de conforto ambiental – e permite executar análises dinâmicas e simulações termo energéticas em tempo real por meio de modelos digitais paramétricos associativos. Tais simulações viabilizam aferições em diversos aspectos do projeto com cálculos complexos resolvidos com agilidade (FONSECA; PEREIRA; CLARO, 2010). Assim, a modelagem paramétrica, vinculada à simulação térmica, configura-se como grande potencial a explorações (DA SILVA; SILVA; GÓES, 2020) que aporem o ato de projetar.

No entanto, assim como o projeto paramétrico exige uma série de conhecimentos sistemáticos e definições apoiadas na geometria (HERNANDEZ, 2006) para concepção de geometrias complexas – especialmente as inspiradas na natureza –, as simulações, em especial a térmica, também necessitam de conhecimento técnico e crítico (LEONE; FLORIO, 2021) não apenas para a programação da simulação, mas também para a interpretação dos resultados obtidos. Nesse sentido, “mostra-se imprescindível o domínio técnico e a utilização de ferramentas digitais que possam auxiliar a busca por resultados capazes de conciliar maior eficiência à forma, desempenho...” (LEONE; FLORIO, 2021).

Considerando a importância de tais abordagens para o contexto do ensino de arquitetura e a dificuldade inerente ao saber envolvido para lidar com tais geometrias e com simulações dinâmicas e integradas, bem como a escassez de acesso a informações sobre simulação térmica por modelagem paramétrica para os estudantes, identifica-se a necessidade da construção de referenciais didáticos que abarquem tais conceitos. Ademais, a maior parte dos trabalhos desenvolvidos limita-se a estudos exploratórios que não levam em consideração as influências das configurações geométricas previamente definidas.

Desse modo, o trabalho abarca um processo de revisão bibliográfica acerca das estruturas de saber que compreendem a simulação térmica e das suas possibilidades de realização dentro do software de modelagem tridimensional Rhinoceros com o plugg-in de modelagem paramétrica por programação visual Grasshopper e o plugg-in de simulação termo energética Ladybug, a fim de explicitar os elementos que integram este saber. O objetivo principal do estudo é subsidiar estudos que contemplem simulações térmicas de referenciais arquitetônicos que possuem sua geometria inspirada na natureza. Além disso, o presente artigo avança, de maneira preliminar, para tais estudos, visando maior compreensão do saber envolvido para futura proposição de atividades didáticas para arquitetura.

2. METODOLOGIA

O trabalho trata-se, em um primeiro momento, de um processo de revisão bibliográfica que fora desenvolvido a partir da leitura de sites, artigos e fontes bibliográficas sobre as possibilidades de vinculação entre a modelagem paramétrica e a simulação térmica,

em termos de conceituação e definição. Após isso, foi realizada a sistematização de tal revisão por meio de tabelas e mapas conceituais desenvolvidos no software CMAP tools (<https://cmap.ihmc.us/>). Isso se deu pela possibilidade de compartilhamento em rede, em servidores e sites, no formato html, seguindo a metodologia adotada em PIRES; PEREIRA; GONÇALVES (2017). Tais procedimentos foram realizados com objetivo de reconhecer e sistematizar as técnicas de simulação térmica a serem empregadas, compreendendo seus aspectos teóricos e tecnológicos.

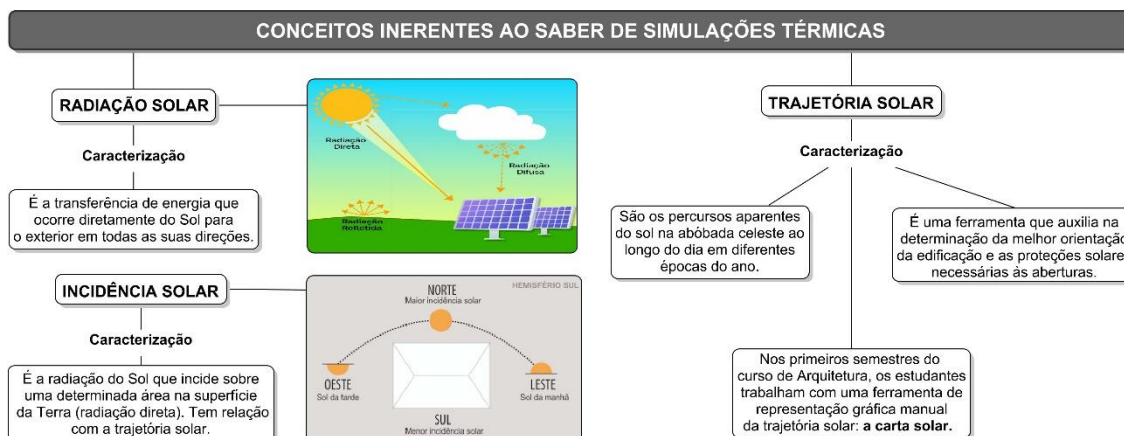
Posteriormente, a fim de avançar nos estudos preliminares de simulação térmica, fez-se um experimento analisando o tempo de incidência solar na envoltória de duas superfícies – uma com geometria elementar, conformada por um cilindro, e a outra com geometria complexa inspirada na natureza, em particular uma superfície catenoide, a partir de um caso de arquitetura referencial anteriormente estudado em seus aspectos teóricos (PAIXÃO; PIRES, 2022). Nesse sentido, identificaram-se cinco etapas para a realização de tais simulações:

- 1) Definição e modelagem do objeto de estudo: um cilindro como geometria elementar e o modelo geométrico do projeto Hyperions, do escritório Vicent Callebaut, que emprega catenoides como geometria base, conforme apresentado em PAIXÃO; PIRES (2022).
- 2) Obtenção dos dados meteorológicos do local do objeto de estudo, neste caso do projeto de arquitetura Hyperions (New Delhi, na Índia), especialmente devido aos impactos climáticos que esta região possui, a partir do EnergyPlus: <https://energyplus.net/weather>.
- 3) Definição dos dias que serão realizadas as simulações: foram adotados os dias referentes ao solstício de verão (21/06) e de inverno (21/12), sobretudo por possuírem altura, posicionamento solares e condições climáticas distintas, além de se conhecer a necessidade de maior incidência solar no inverno e menor no verão para o conforto térmico dos usuários.
- 4) Programação e geração da trajetória solar a partir do componente SunPath no software de modelagem tridimensional Rhinoceros com o plugg-in de modelagem paramétrica por programação visual Grasshopper e o plugg-in de simulação termo energética Ladybug, seguida da programação e simulação do tempo de incidência solar direta dos dias selecionados por meio do componente DirectSunHours.
- 5) Análise e discussão dos resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

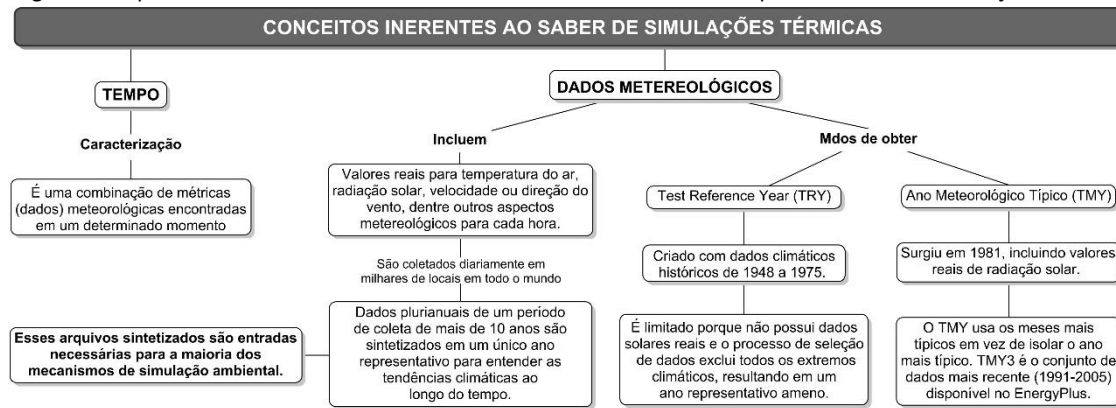
Em um primeiro momento, considerou-se a necessidade de explicitar alguns conceitos que permeiam as simulações térmicas de edifícios. Nesse sentido, realizou-se um mapa conceitual que abrange as definições de radiação, incidência e trajetória solar e de dados meteorológicos, bem como maneiras de ter acesso a eles, conforme pode ser observado nas Figuras 01 e 02.

Figura 1: Mapa conceitual com conceitos inerentes ao saber envolvido em simulações térmicas.



Fonte: Elaboração própria com base em CAICEDO (2013).

Figura 2: Mapa conceitual com conceitos inerentes ao saber envolvido nos tipos de dados das simulações térmicas.



Fonte: elaboração própria baseada em: <https://docs.ladybug.tools/ladybug-tools-academy/vi/climate-analysis/>

Fonte: Elaboração própria com base em CAICEDO (2013).

A partir de tais conhecimentos prévios e adquiridos, buscou-se compreender a abrangência e a forma de trabalhar com simulação térmica no *software* de modelagem tridimensional *Rhinoceros* com o *plugg-in* de modelagem paramétrica por programação visual *Grasshopper*. Nesse contexto, com base nos estudos de Smith (2013), sistematizou-se uma comparação entre as ferramentas para análise ambiental, existentes para tais programas, de acordo com o Quadro 01.

Quadro 1- Comparação entre as ferramentas de análise ambiental existentes.

Procedimento	Tecnologias de Análise ambiental				
	Ladybug	Heliotrope	Geco	Gerilla	Diva-for-Rhino
Análise climática	X	X*			
Estudo de orientação	X		X		X
Estudo de Iluminação natural	X		X		X
Modelagem de energia	X			X	X**

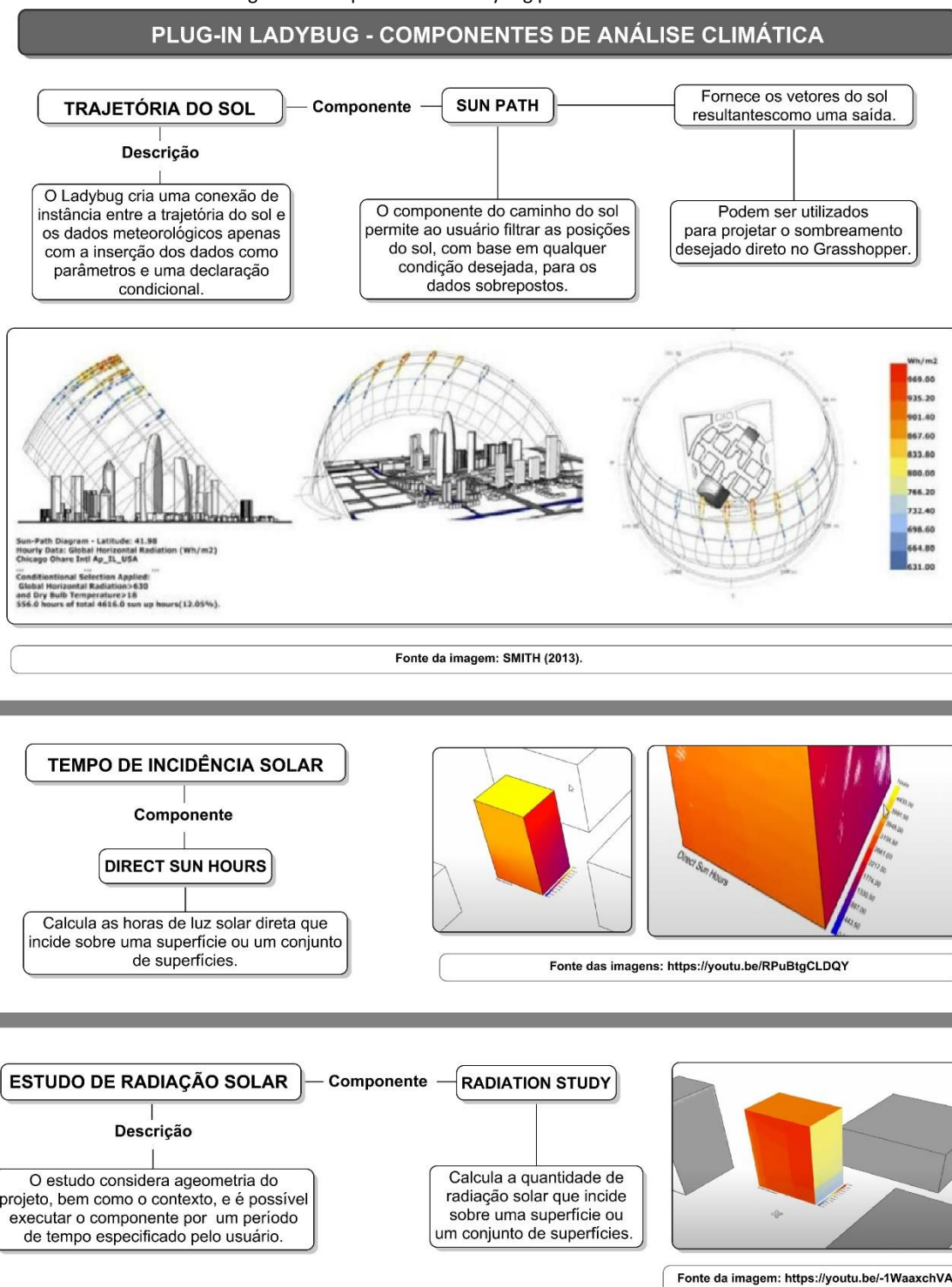
*só faz o diagrama da trajetória do sol
**é limitado a apenas uma Zona Climática

Fonte: elaboração própria com base em SMITH, 2013.

Desse modo, identificou-se que o plug-in Ladybug é o mais completo para dar aporte a toda a gama de análises ambientais em um único software de modelagem paramétrica. Nesse sentido, ele possibilita a criação de gráficos não apenas 2D, mas também 3D dinâmicos que

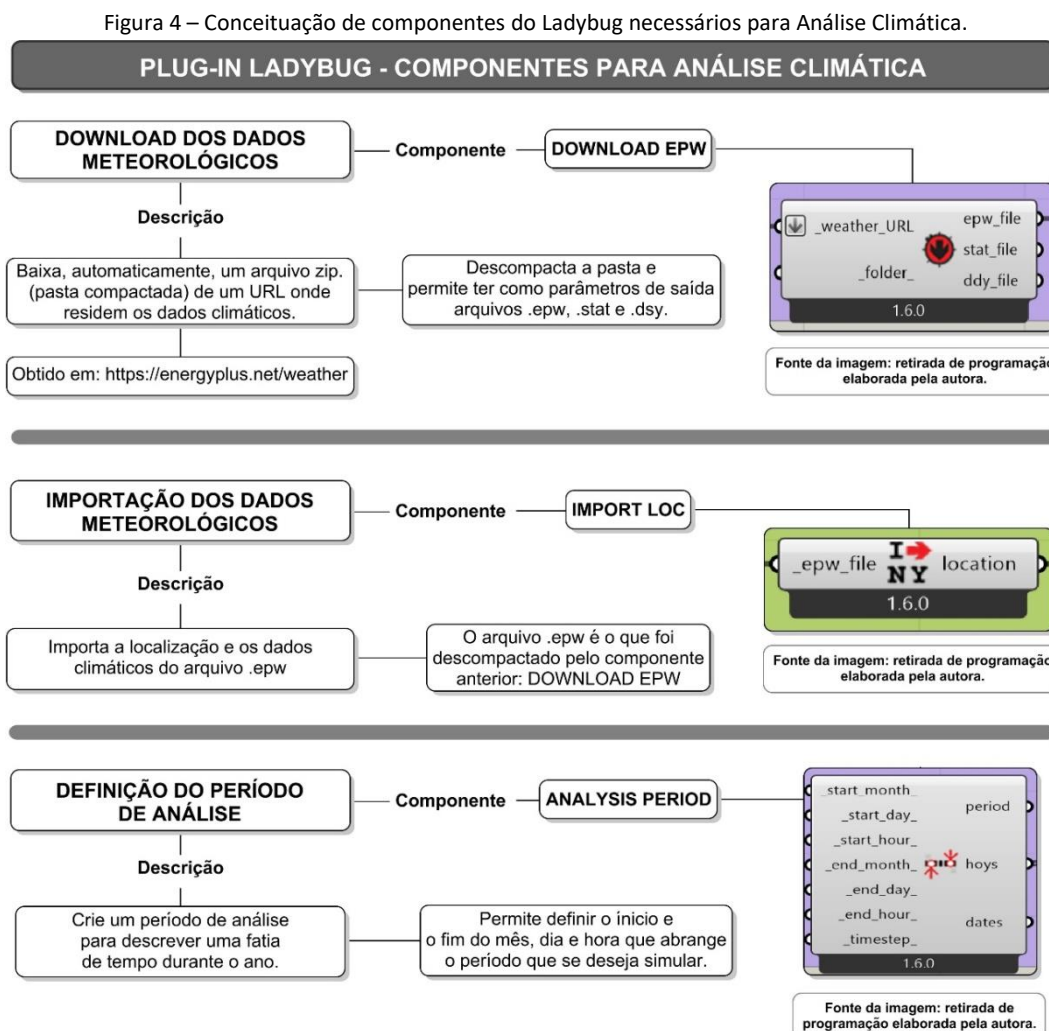
permitem a visualização de dados meteorológicos advindos do EnergyPlus e de que maneiras eles influenciam no ambiente construído. Assim, até o presente momento, pesquisou-se e sistematizaram-se três de seus principais componentes para o procedimento de análise climática – foco da pesquisa – conforme pode ser observado na Figura 03.

Figura 3: Componentes do Ladybug para Análise Climática.



Fonte: Elaboração própria a partir de SMITH (2013) e Ladybug Tools Academy.

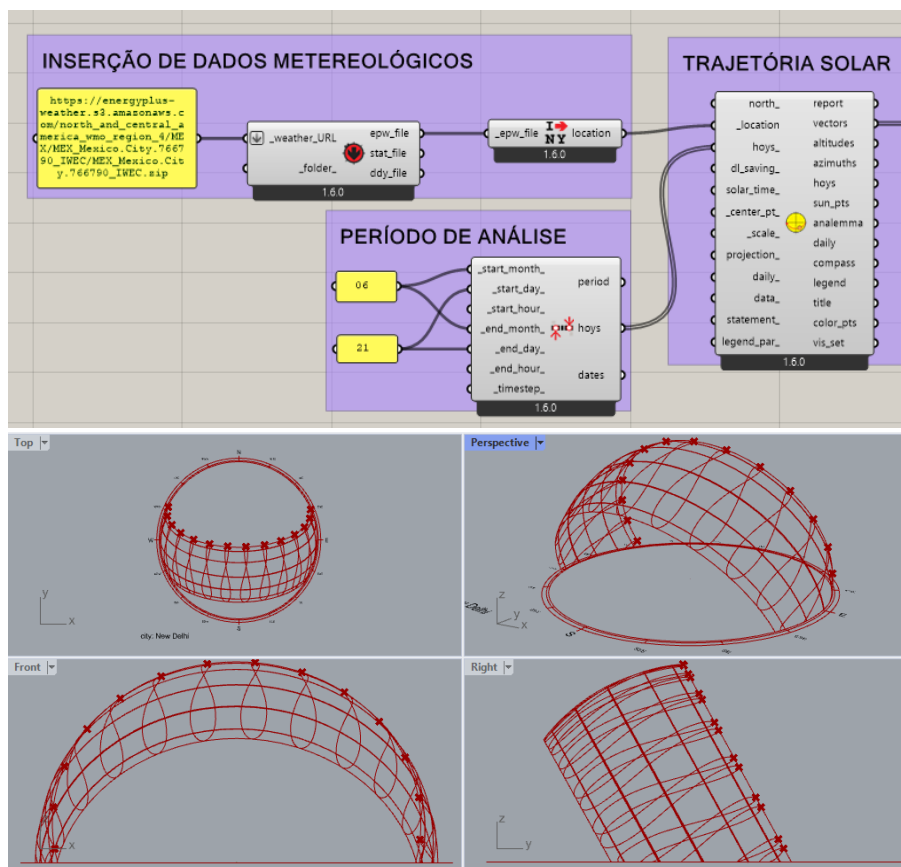
Ademais, notou-se a necessidade da estruturação das definições presentes em dois componentes de entrada e saída essenciais para qualquer tipo de simulação térmica realizada por tal plug-in: o modo de importar os dados meteorológicos e de selecionar os dias e/ou horários em que a simulação será feita. Na Figura 04 está ilustrada a estrutura de tais componentes.



Fonte: Elaboração própria.

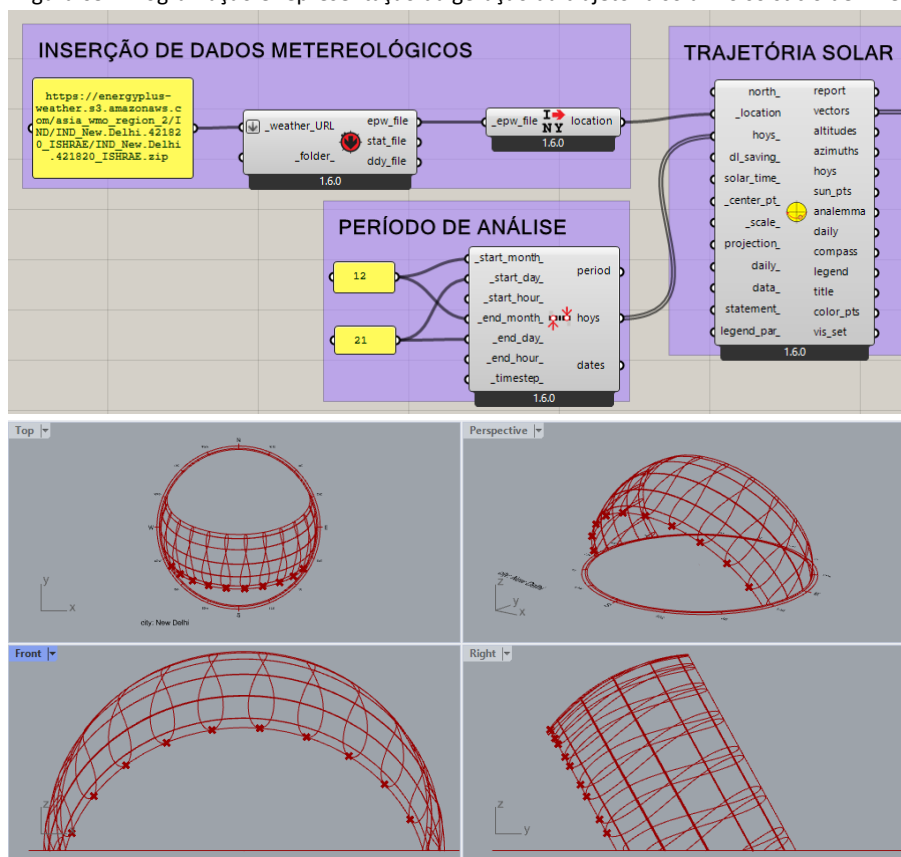
Assim, a partir do reconhecimento e sistematização das técnicas a serem empregadas, compreendendo seus aspectos teóricos e tecnológicos, avançou-se para a etapa de estudos preliminares em que foi simulado o tempo de incidência solar sobre dois tipos de superfícies previamente modeladas: a superfície de um cilindro, aqui caracterizada como uma geometria elementar; e a superfície do edifício Hyperions, do escritório Vicent Callebaut, que se configura por um catenoide, que possui propriedade de equilíbrio em relação aos esforços atuantes na superfície. A simulação desenvolvida considerou os dias de solstício de verão (21/06) e de inverno (21/12). Primeiramente, realizou-se a inserção dos dados meteorológicos, bem como o período de análise supracitado na programação, para geração das trajetórias solares, conforme as Figuras 05 e 06. Observa-se a trajetória indicada pelos pontos gerados no diagrama (em 'x')

Figura 05 - Programação e representação da geração da trajetória solar no solstício de verão (21/06).



Fonte: elaboração própria.

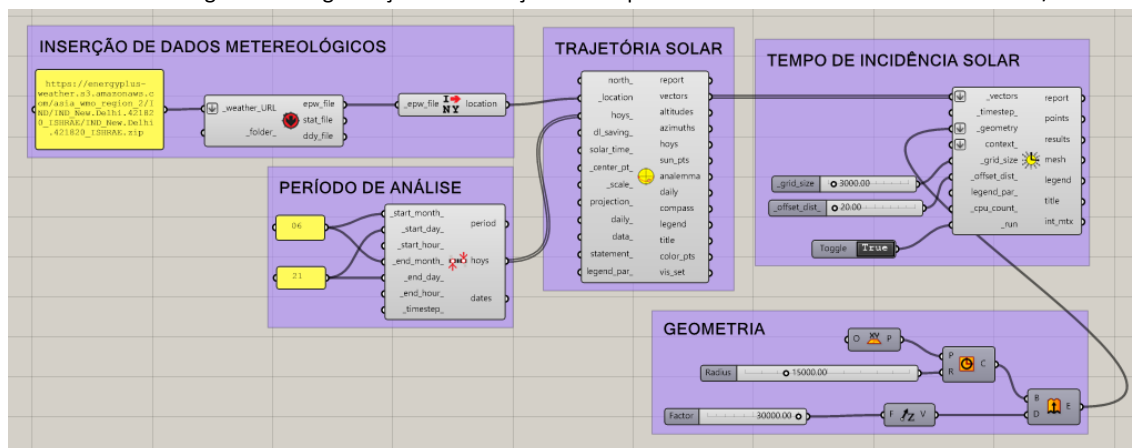
Figura 06 – Figura 05 - Programação e representação da geração da trajetória solar no solstício de inverno (21/12)



Fonte: elaboração própria.

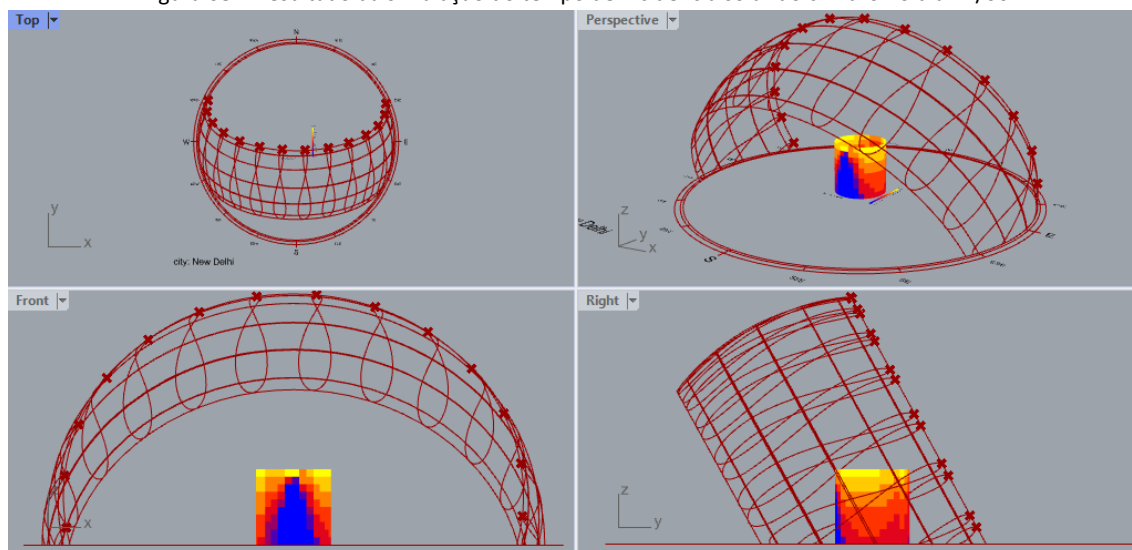
Tais gráficos demonstram que o posicionamento do sol no solstício de verão da cidade de New Delhi, na Índia, é mais alto que no de inverno, e permitem avançar para a programação e simulação do tempo de incidência solar sobre a modelagem das superfícies, a cilíndrica e o catenoide que conforma o projeto Hyperions (Figuras 07 a 14).

Figura 7 – Programação da simulação do tempo de incidência solar do cilindro no dia 21/06



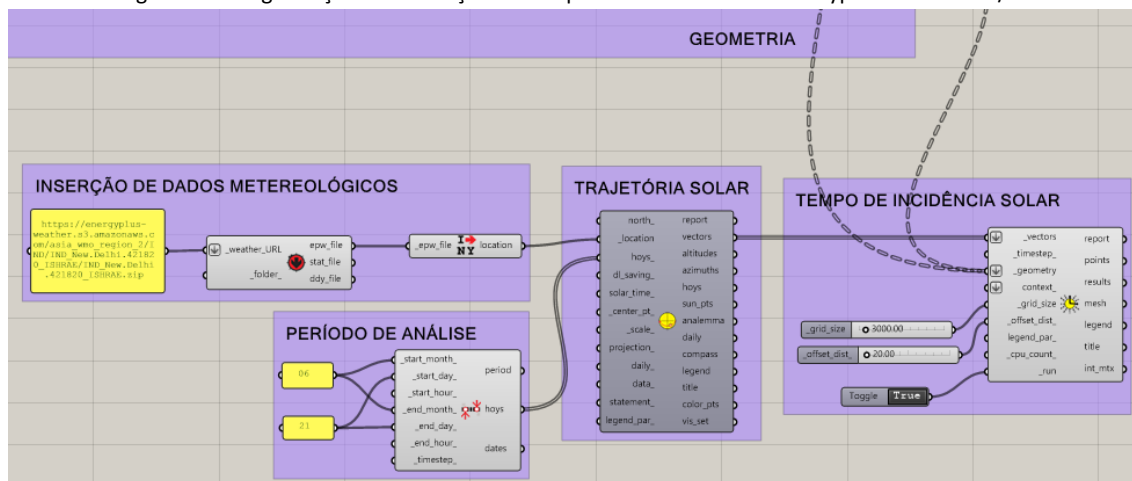
Fonte: elaboração própria.

Figura 08 – Resultado da simulação do tempo de incidência solar do cilindro no dia 21/06



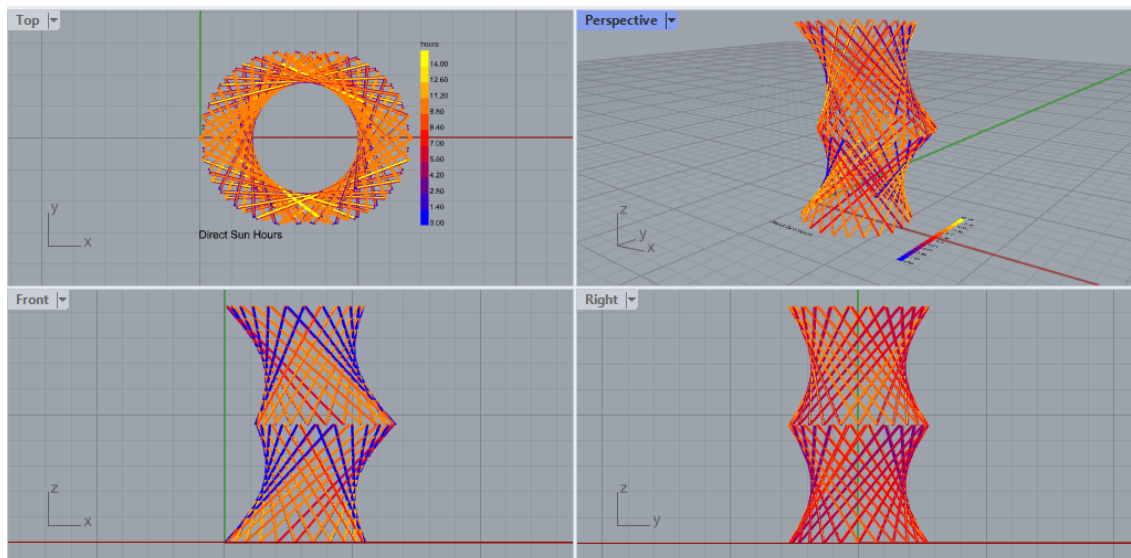
Fonte: elaboração própria.

Figura 09 - Programação da simulação do tempo de incidência solar do Hyperion no dia 21/06



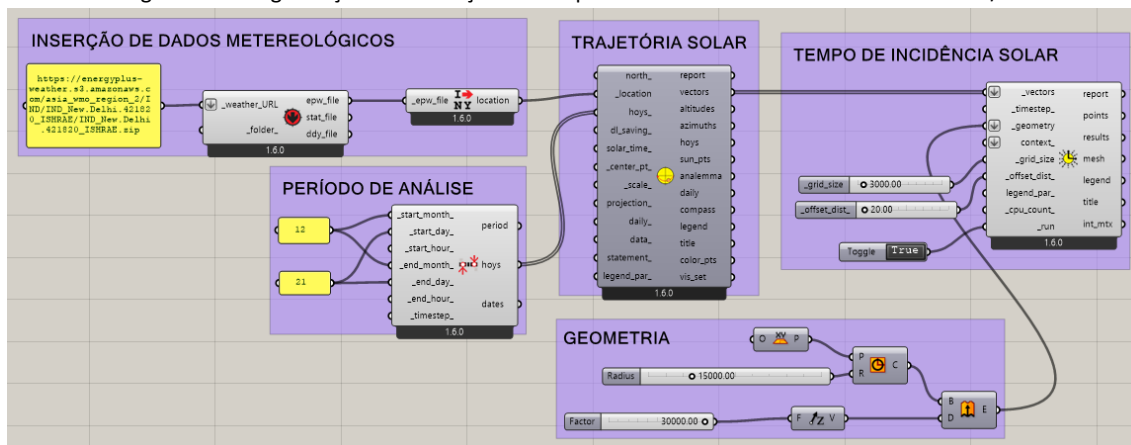
Fonte: elaboração própria.

Figura 10 – Resultado da simulação do tempo de incidência solar do Hyperion no dia 21/06



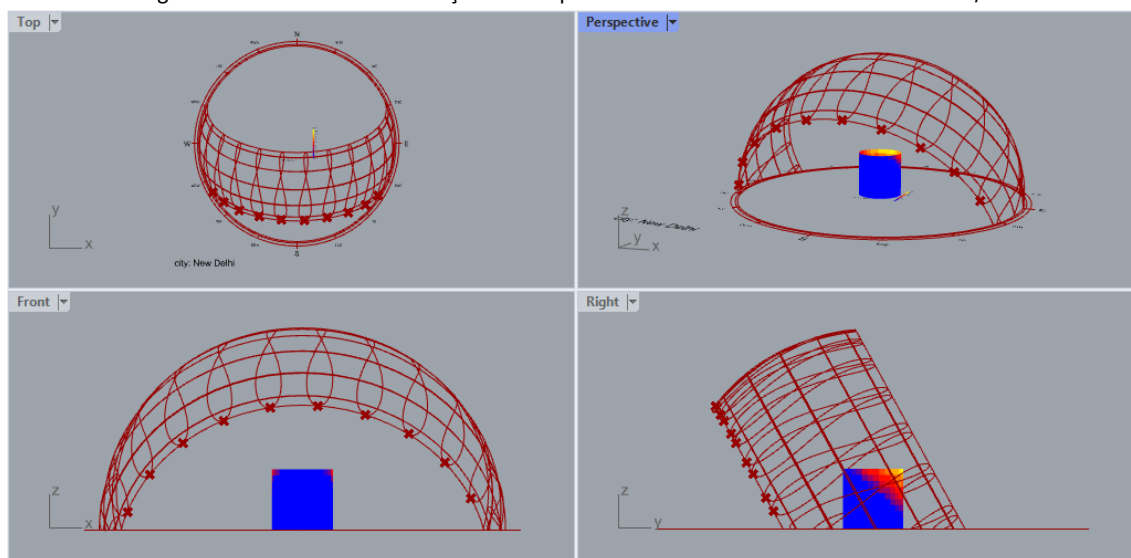
Fonte: elaboração própria.

Figura 11 – Programação da simulação do tempo de incidência solar do cilindro no dia 21/12



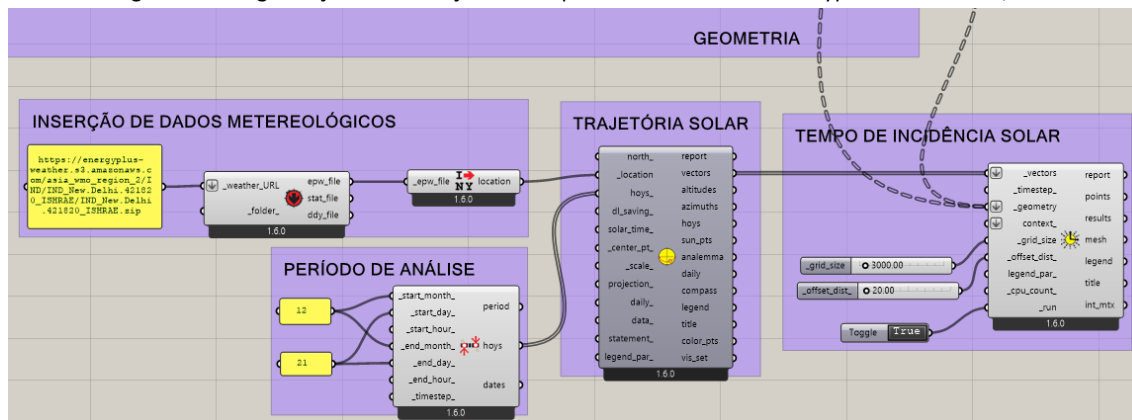
Fonte: elaboração própria.

Figura 12 – Resultado da simulação do tempo de incidência solar do cilindro no dia 21/12



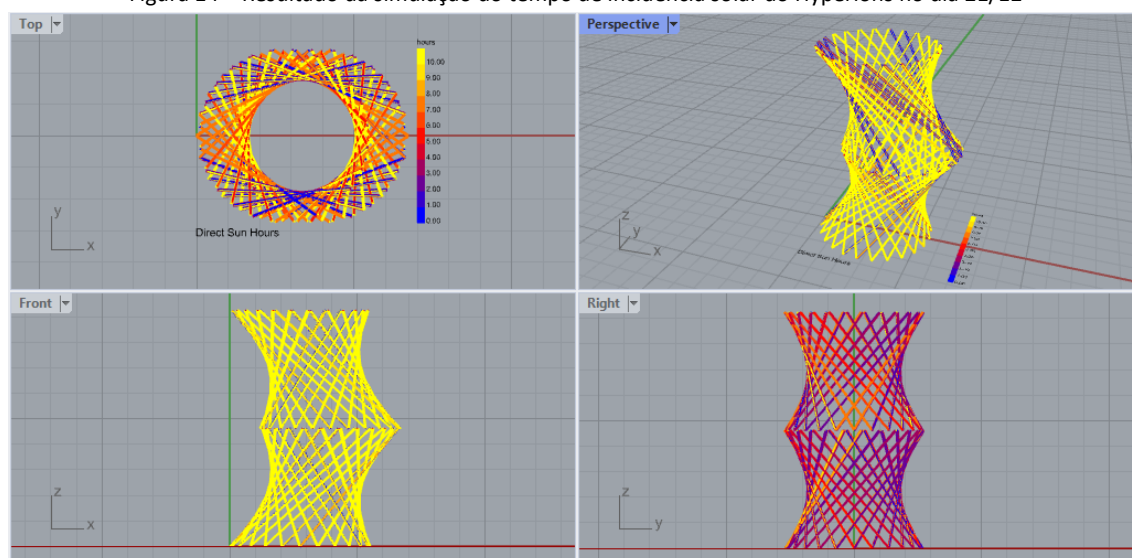
Fonte: elaboração própria.

Figura 13 - Programação da simulação do tempo de incidência solar do Hyperions no dia 21/12



Fonte: elaboração própria.

Figura 14 – Resultado da simulação do tempo de incidência solar do Hyperions no dia 21/12



Fonte: elaboração própria.

A partir de tais simulações constata-se que a superfície mínima do catenoide do edifício Hyperions, durante o verão, permite uma maior variabilidade de incidência solar sobre uma determinada área da superfície, não tendo uma grande região com baixa incidência e outra com grande, como acontece na superfície elementar do cilindro. Ademais, verifica-se que no inverno, o edifício Hyperions possui grande vantagem em relação ao cilindro no que se refere a conforto térmico dos usuários. Isto porque ele recebe mais tempo de incidência solar durante o inverno, conforme as imagens do Quadro 2. No entanto, se identifica a necessidade de investigar a situação caracterizada no verão, em relação à quantidade de energia incidente na superfície, já que esta superfície possui um número grande de horas de exposição luminosa, o que pode impactar o conforto térmico dos usuários neste período do ano.

Para interpretação dos resultados da simulação, analisou-se graficamente a legenda de horas de incidência solar direta sobre a superfície durante o dia simulado, em que cada tempo é representado por uma cor. Tal legenda vai da cor azul, em que se tem zero horas de incidência direta, ao amarelo, que abrange um intervalo entre 7 e 14 horas de incidência. Esta amplitude de horas para a cor amarela se dá em função da caracterização da data da simulação, se para o solstício de verão ou de inverno.

Quadro 2- Resultados da simulação

Informações	Análise gráfica	Imagem
<p>Superfície: Hyperions</p> <p>Solstício de verão – dia 21 de junho</p>	<p>A partir da legenda gráfica ao lado, identifica-se que no verão o tempo de incidência solar direta sobre a superfície é, predominante, de 9 horas (cor laranja no gráfico).</p>	
<p>Superfície: Hyperions</p> <p>Solstício de inverno – dia 21 de dezembro</p>	<p>Nota-se, a partir da legenda gráfica ao lado, que no inverno o tempo de incidência solar direta sobre a superfície é, predominantemente de 10 horas (cor amarela).</p>	
<p>Superfície: Cilindro</p> <p>Solstício de verão – dia 21 de junho</p>	<p>Nota-se, a partir da legenda gráfica ao lado, que no verão o tempo de incidência solar direta sobre a superfície varia entre 0 e o valor máximo de horas. Identifica-se que a maior parte da superfície recebe uma variação de horas de insolação entre 3 e 7 horas (cores entre vermelho e amarelo).</p>	
<p>Superfície: Cilindro</p> <p>Solstício de inverno – dia 21 de dezembro</p>	<p>Nota-se, a partir da legenda gráfica ao lado, que no inverno o tempo de incidência solar direta sobre a superfície é, predominantemente, nulo. Existe uma pequena região que recebe entre 3 e 10 horas de insolação e uma grande região com zero horas de insolação (cor azul).</p>	

Fonte: Elaboração própria.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho reconheceu e sistematizou o saber envolvido nas técnicas empregadas em simulações térmicas realizadas no *software* de modelagem tridimensional *Rhinoceros* com o *plugg-in* de modelagem paramétrica por programação visual *Grasshopper* vinculado ao *plugg-in* de simulação termo energética *Ladybug*, compreendendo seus aspectos

teóricos e tecnológicos. Tal sistematização atingiu os objetivos previstos no projeto de pesquisa AMPARA, por ter contribuído com novas estruturas de saber que podem servir de suporte à ação projetual de estudantes de Arquitetura e Urbanismo no sentido de despertar para soluções que se alinham com a diminuição do impacto ambiental provocado pelo ambiente construído. Particularmente analisou-se o comportamento de superfícies complexas quanto às questões de conforto ambiental, frente às superfícies elementares que são tradicionalmente adotadas no processo de projeto.

Além disso, demonstrou, por meio de simulações preliminares que edificações que possuem superfícies inspiradas na natureza – neste caso, o catenoide – contribuem para um tempo de incidência solar na envoltória das edificações maior e mais distribuído, o que, conseqüentemente, demonstra um desempenho térmico otimizado em relação ao das superfícies com geometrias mais elementares da geometria euclidiana, como as poliédricas, cônicas e cilíndricas (geometrias que podem ser estudadas matematicamente em espaços planos). Desse modo, a partir deste trabalho, será possível avançar para uma avaliação da diferença de radiação solar na envoltória de tais superfícies para confrontar os cenários e compreender de que maneira a forma geométrica influencia concretamente nas questões de conforto térmico para, assim, avançar para a etapa de estruturação de atividades didáticas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio da Fundação de Amparo a Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS), pelo apoio dado ao projeto, a partir do edital recém-doutor de 2021 e da bolsa de iniciação científica, período 2022-23.

REFERÊNCIAS

AUGENBROE, G. Trends in building simulation. In: (Ed.). **Advanced Building Simulation**. New York, NY, USA: Spon Press, 2004. cap. 1, p.424.

CAICEDO, E. P.; *et al.* TRAYECTORIA SOLAR GUÍA PRÁCTICA PARA EL MANEJO DE LA CARTA SOLAR Y EL HELIODON. **AMBIENTALMENTE**, Columbia, v. 1, n. 1, 2015. Disponível em:
http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/9664/Car_Ambientalmente1.pdf?sequence=1

DA SILVA, F.; SILVA, C.; T. GÓES. O uso do Grasshopper na simulação termoenergética de edifícios: uma revisão sistemática. In: Congresso de Construção Civil, 2020, Brasília-DF. **Anais [...]**. Brasília: UnB, 2020. p.1008-1015.

DUARTE, D. O clima urbano e o ambiente construído. In: GONÇALVES, J. C. S; BODE, K. **Edifício ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

ELTAWHEEL, A.; SU, Y. **Parametric design and daylighting: A literature review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 72, p. 10861103, 2017.

FONSECA, R. W. da; PEREIRA, F. O. R.; CLARO, A. Iluminação natural: a contribuição de suas reflexões no interior do ambiente construído. **Pós. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**, v. 17, p. 198-217, 2010.

GONÇALVES, J. C.; DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, 14 dez. 2006. Ambiente Construído, p. 51-81. Disponível em:
<https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3720/2071>. Acesso em: 15 abr. 2022.

GONÇALVES, J. C. S.; MOURA, N. C. S.; KUNIOCHI, E. M. U. Avaliação de desempenho, simulação computacional e o projeto arquitetônico. In: GONÇALVES, J. C. S; BODE, K. **Edifício ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. New York, USA: Spon Press, 2011.

HERNANDEZ, C. R. B. Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. **Design Studies**. v. 27, n. 3, p. 309-324, 2006.

LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL. **Bloco 2 - Iluminação. Aula 2 - Iluminação Natural**. Santa Catarina, 2009.

LADYBUG TOOLS ACADEMY. Disponível em: <https://docs.ladybug.tools/ladybug-tools-academy/>

LEONE, C.; FLORIO, W. Análise paramétrica de iluminação natural e de proteção solar de edifícios torcidos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 247-270, out./dez. 2021.

LYNCH, P. How energy modeling will impact the design process. **Archdaily**, 8 de dezembro de 2015.

OLIVEIRA, B. P; PIRES, J. F. BIOMIMÉTICA, GEOMETRIA COMPLEXA E MODELAGEM PARAMÉTRICA: UMA ESTRUTURA DE SABER PARA ARQUITETURA. **MIX SUSTENTÁVEL (PRINT)**, v. 8, p. 63-73, 2022.

OLIVEIRA, B. P; PIRES, J. F. BIOMIMÉTICA E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA: ABORDAGEM INTEGRADA AO PROCESSO PROJETUAL EM ARQUITETURA. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 10, p. 180-192, 2021.

PAIXÃO, L. P.; PIRES, J. F. A Geometria Complexa da Arquitetura em uma Abordagem Regenerativa. **PERIÓDICO TÉCNICO E CIENTÍFICO CIDADES VERDES**, v. 10, p. 129-142, 2022.

SANCHES, T. B.; AMORIM, A. L. Avaliação do uso da simulação computacional em projetos de iluminação artificial. In: IBEROAMERICAN CONGRESS OF DIGITAL GRAPHICS, 5., Chile, 2001. **Proceeding [...]** Chile: BioBio, 2001.

SMITH, A.; et al. LADYBUG: A PARAMETRIC ENVIRONMENTAL PLUGIN FOR GRASSHOPPER TO HELP DESIGNERS CREATE AN ENVIRONMENTALLY-CONSCIOUS DESIGN. In: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, France, 2013. **Proceeding [...]** France, 2013.

WOODBURY, R. **Elements of Parametric Design**. London: Routledge, 2010