

Simulação de desempenho termo energético da geometria complexa da arquitetura: construção de referenciais didáticos para o ensino de projeto
Simulation of thermo-energy performance of complex architectural geometry: construction of didactic references for teaching design

Brunna Pereira de Oliveira, Graduada em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

brunnappo26@gmail.com

Janice de Freitas Pires, Doutora em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

janicefpirez@gmail.com

Resumo

O presente trabalho investiga a geometria complexa da arquitetura e suas propriedades de desempenho sob os aspectos bioclimáticos, a partir do emprego de técnicas de modelagem paramétrica e simulação térmica sobre dois tipos de superfícies. Tais superfícies são empregadas em casos referências de arquitetura, principalmente por suas propriedades de desempenho estrutural. A premissa é de que ao se explicitar uma estrutura de saber integrada entre tais abordagens, contribui-se ao ensino de arquitetura, por meio de atividades que buscam ir além da representação em si e avançam para uma compreensão mais ampla do papel da geometria no projeto de arquitetura.

Palavras-chave: Geometria complexa; Simulação termo energética; Modelagem paramétrica; Ensino de Arquitetura.

Abstract

The present work investigates the complex geometry of the architecture and its performance properties from bioclimatic aspects, using parametric modeling and thermal simulation techniques on two types of surfaces. Such surfaces are used in architectural reference cases, mainly for their structural performance properties. The premise is that by explaining a structure of knowledge integrated between such approaches, it contributes to the teaching of architecture, through activities that seek to go beyond the representation itself and advance towards a broader understanding of the role of geometry in the project of architecture.

Keywords: *Complex geometry; Thermo-energetic simulation; Parametric modeling; Teaching architecture.*

1. Introdução

O presente trabalho está inserido no Projeto de Pesquisa AMPARA – Análise e Modelagem PARAMétrica da Geometria Complexas da Arquitetura, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, que possui como objetivo principal o estudo da geometria complexa da arquitetura e a construção de referenciais didáticos para o seu emprego.

Previamente a criação do projeto, reconheceu-se a ocorrência na arquitetura de geometrias complexas definidas por superfícies curvas e que estão relacionadas com estruturas da natureza devido as suas propriedades de otimização estrutural [1]. No início de desenvolvimento do Projeto de Pesquisa AMPARA, no ano de 2020, buscou-se identificar relações com outros temas abordados na formação em arquitetura, especialmente no ateliê de projeto, investigando os tipos de impactos que estas geometrias complexas teriam sobre o ambiente construído, avançando-se, em 2021 e 2022, para abordagens bioclimáticas, tal como destacado em [2].

Sob esse contexto, o projeto paramétrico, uma abordagem tecnológica que tem subsidiado a representação da arquitetura contemporânea ao gerar modelos associativos, permite a concepção de uma variedade de soluções projetuais, particularmente com geometrias complexas e que contemplam desempenhos térmico, estrutural e de conforto ambiental, permitindo executar análises dinâmicas e simulações termo energéticas em tempo real [3] [4] [5]. Tais simulações viabilizam aferições em diversos aspectos do projeto com cálculos complexos resolvidos em tempo real [6]. Assim, a modelagem paramétrica vinculada à simulação térmica configura-se como recurso potencial a concepção projetual [7].

Desse modo, a partir do propósito de abarcar uma estrutura integral do saber, conforme postula a Teoria Antropológica da Didática [8], busca-se reconhecer métodos de simulação para a avaliação de desempenho bioclimático de geometrias empregadas em arquitetura. Nesse contexto, por meio de um exercício comparativo com a avaliação dos resultados de simulações do tempo de incidência solar direta e da quantidade de radiação solar incidente sobre dois tipos de geometrias, tem-se como objetivo refletir acerca da influência da forma geométrica das superfícies em arquitetura nas questões de conforto térmico para, assim, avançar para a etapa de estruturação de atividades didáticas.

2. Metodologia

A revisão bibliográfica específica deste estudo tratou dos temas modelagem paramétrica e simulação térmica, sob os aspectos técnicos, teóricos e tecnológicos, sistematizado em [9]. Em tal estudo, reconheceu-se que o plugin de simulação termo energética Ladybug se integrava junto ao plugin de programação visual Grasshopper, oferecendo uma gama de tipos de avaliações com resultados obtidos em tempo real.

No mesmo trabalho, a fim de avançar em estudos de simulação térmica, fez-se um experimento com dois tipos de superfícies, um cilindro que se caracteriza por uma geometria elementar, e um catenoide, uma geometria complexa caracterizada como superfície mínima inspirada pela natureza, mas que possui processo de geração simples, por rotação da curva catenária em torno de um eixo externo a curva [10]. Esta superfície foi anteriormente estudada em [11] sob o conceito de superfície mínima aplicada na arquitetura e, no contexto do projeto de Pesquisa AMPARA, por [12] em seus aspectos teóricos a partir de um referencial arquitetônico: o projeto Hypérions, do arquiteto Vincent Callebaut.

A análise do tempo de incidência solar demonstrou diferenças relevantes entre as superfícies, pela qual a superfície mínima do catenoide teve um desempenho mais otimizado. Em [13], avançou-se para avaliação sobre os níveis de radiação solar na envoltória das duas superfícies avaliadas no estudo anterior. Os resultados foram semelhantes, indicando que a superfície mínima do catenoide não tem um desempenho ótimo apenas em relação aos aspectos estruturais, mas também em relação aos aspectos bioclimáticos, com maior quantidade de energia incidente no solstício de inverno.

O presente trabalho busca estender o mesmo tipo de estudo para outras superfícies da arquitetura empregadas em projetos referenciais devido ao seu desempenho estrutural, como é o caso de composições de porções de paraboloides hiperbólicos recorrentes na arquitetura moderna do século XX, mais especificamente nas obras de Félix Candela.

O estudo de caso é a superfície que forma a cobertura do Restaurante Los Manantiales, estudado na primeira fase do projeto de pesquisa, por ser inspirada nas potencialidades da Biomimética e pela sua geometria curva complexa que se relaciona com os conceitos abordados nos estágios iniciais do curso de arquitetura. A fim de confrontar os resultados entre superfícies curvas elementares e superfícies complexas, foi também feito o mesmo experimento com uma geometria elementar, uma composição de porções de superfícies cilíndricas que formam uma cobertura semelhante a do restaurante de Felix Candela.

Os experimentos centraram-se em simular o tempo de incidência solar direta e a quantidade de radiação solar sobre tais superfícies, a partir da metodologia descrita em [14], [15], [16]. Para isso, foram definidas cinco etapas para a realização de tais simulações:

- 1) Seleção do objeto de estudo e sua modelagem;
- 2) Obtenção dos dados meteorológicos do local do objeto de estudo, neste caso do projeto de arquitetura Restaurante Los Manantiales (Cidade do México) 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;
- 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 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 e da quantidade de radiação solar incidente através do componente Incident Radiation;
- 5) Análise e discussão dos resultados obtidos nas simulações.

Após, com propósito didático, sistematizaram-se estruturas de saber que evoluem tais simulações, por meio da descrição do algoritmo da programação paramétrica de cada um dos experimentos.

3. Aplicações

Em um primeiro momento, fez-se a modelagem paramétrica substituindo a superfície original de dupla curvatura do Restaurante Los Manantiales (formada por porções de paraboloides hiperbólicos e anteriormente modelada no projeto), pela superfície formada por uma composição de seções cilíndricas (Figura 01).

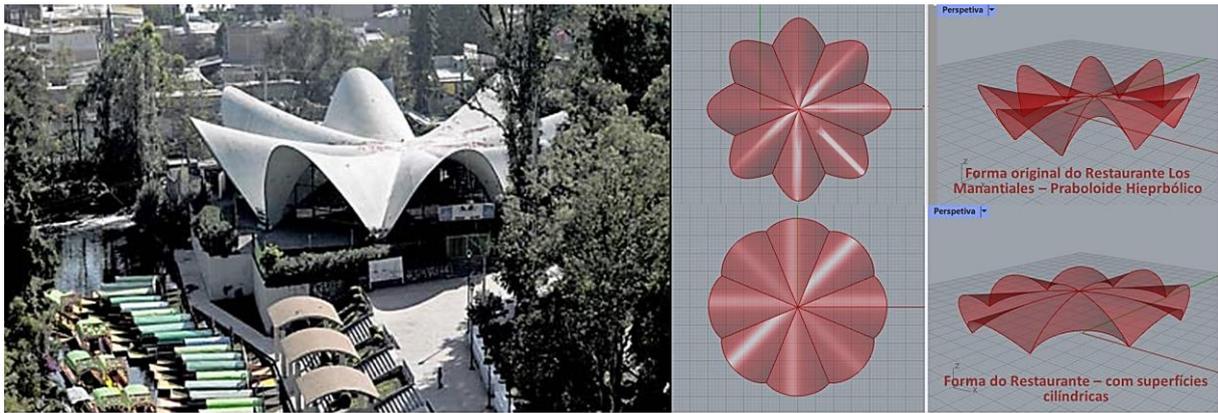


Figura 1: Vista do restaurante e resultado da modelagem paramétrica da superfície formada por geometria complexa e pela superfície formada por porções de cilindros. Fonte: [Restaurante Los Manantiales - Dados, Fotos e Planos - WikiArquitetura](#) e elaboração pelos autores.

3.1 Experimento 1: simulação do tempo de incidência solar

Nesta etapa, simulou-se o tempo de incidência solar sobre o modelo da superfície de dupla curvatura do Restaurante e o modelo da composição da cobertura feito com a superfície cilíndrica, para 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. Após isso, avançou-se para a programação e simulação do tempo de incidência solar sobre a modelagem das superfícies, com o uso de uma escala gráfica pré-definida, bem como a geração de um valor médio entre os resultados obtidos, conforme pode ser observado nas Figuras 2 a 5.

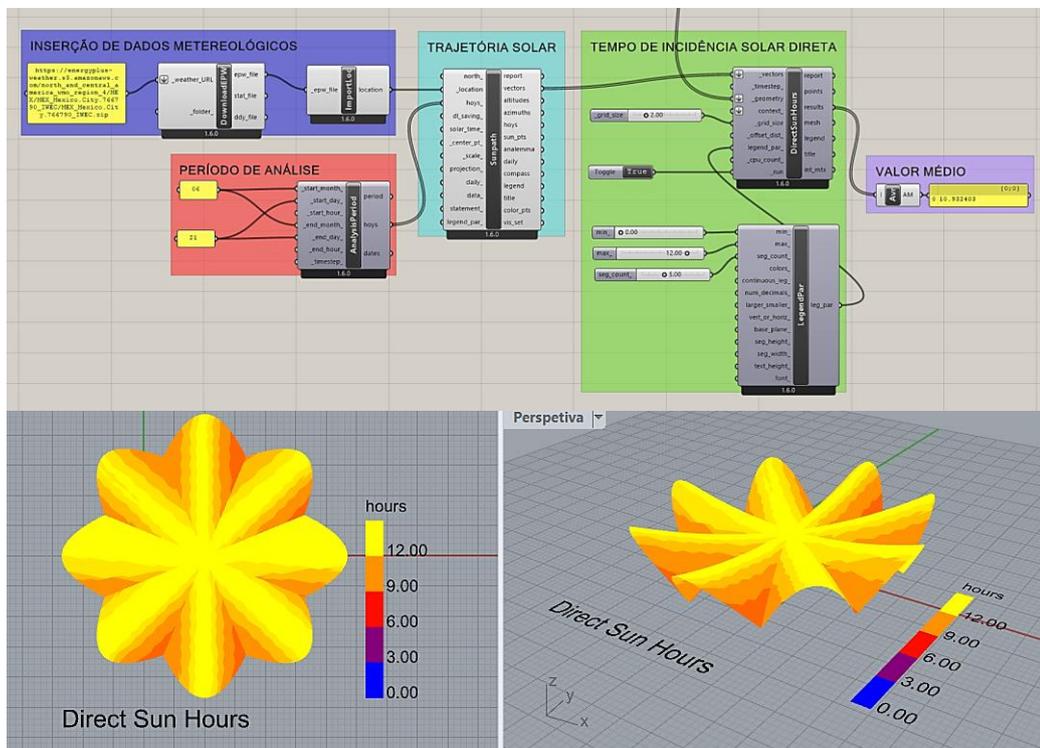


Figura 2: Programação e resultado da simulação do tempo de incidência solar direta na superfície de dupla curvatura do Restaurante Los Manantiales no dia 21/06 (solstício de verão). Fonte: elaborado pelos autores.

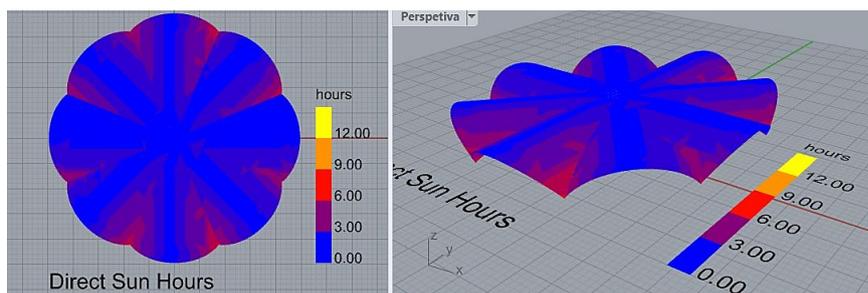


Figura 3: Resultado da simulação do tempo de incidência solar direta na superfície conformada por porções de cilindros no dia 21/06 (solstício de verão). Fonte: elaboração pelos autores.

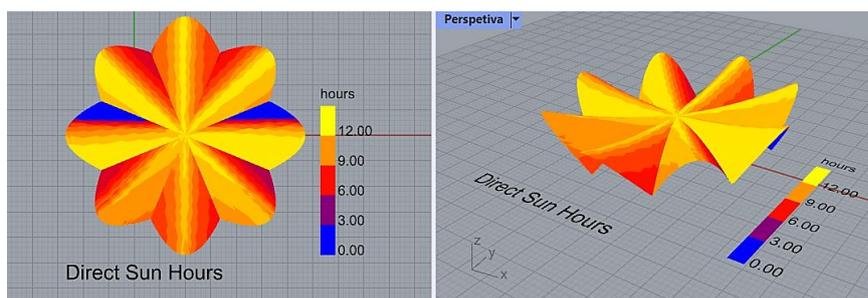


Figura 4: Resultado da simulação do tempo de incidência solar direta na superfície de dupla curvatura do Restaurante Los Manantiales no dia 21/12 (solstício de inverno). Fonte: elaboração pelos autores.

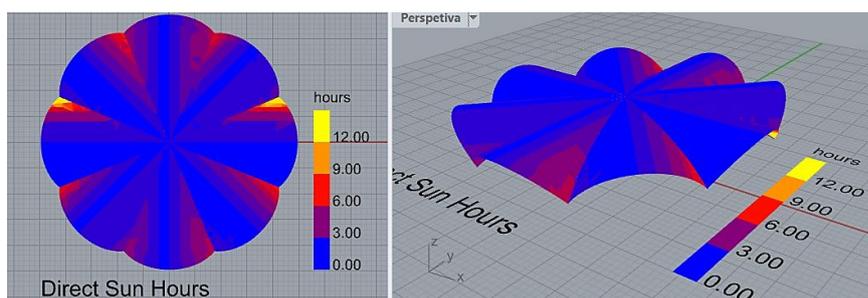


Figura 5: Resultado da simulação do tempo de incidência solar direta na superfície elementar conformada por cilindros no dia 21/12 (solstício de inverno). Fonte: elaboração pelos autores.

3.2 Experimento 2: simulação da quantidade de radiação solar

Após o primeiro experimento, avançou-se para a programação e simulação da quantidade de radiação incidente sobre a superfície do Restaurante conformada a partir de um cilindro e da superfície de dupla curvatura com a inserção dos dados meteorológicos, bem como o período de análise supracitado na programação, conforme as Figuras 6 a 9.

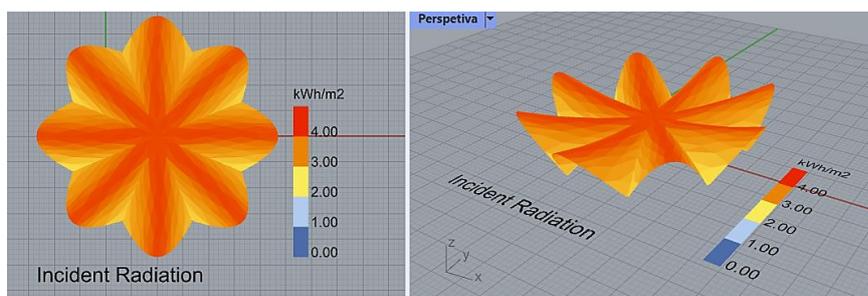


Figura 6: Resultado da simulação da quantidade de radiação solar incidente sobre a superfície de dupla curvatura do Restaurante Los Manantiales no dia no dia 21/06 (solstício de verão) Fonte: elaboração própria.

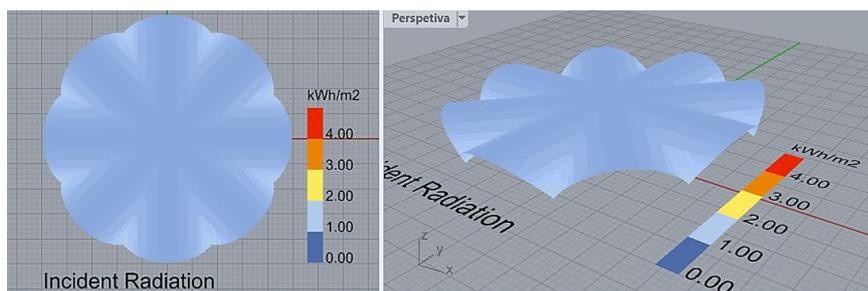


Figura 7: Resultado da simulação da quantidade de radiação solar incidente sobre a superfície elementar conformada por cilindros no dia 21/06 (solstício de verão). Fonte: elaboração própria.

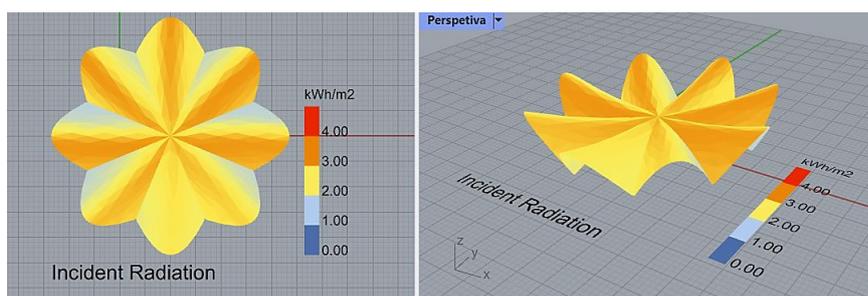


Figura 8: Resultado da simulação da quantidade de radiação solar incidente sobre a superfície de dupla curvatura do Restaurante Los Manantiales no dia 21/12 (solstício de inverno). Fonte: elaboração própria.

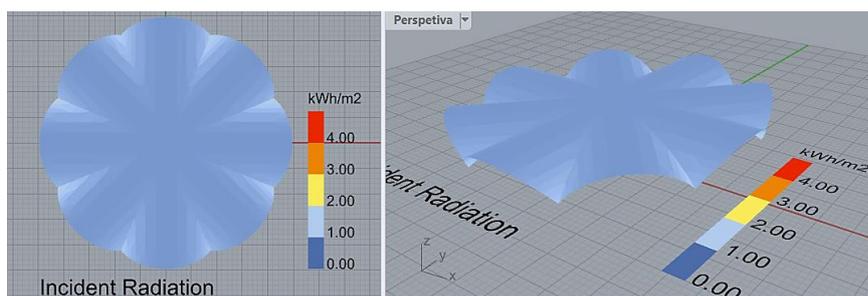


Figura 9: Resultado da simulação da quantidade de radiação solar incidente sobre a superfície elementar conformada por cilindros no dia 21/12 (solstício de inverno). Fonte: elaboração própria.

Posteriormente, com o propósito de sistematizar as bases conceituais que permeiam essas simulações, foi elaborada uma análise detalhada referente ao algoritmo utilizado na programação paramétrica de cada um dos experimentos, conforme as Figuras 10 e 11. Esta análise foi sistematizada em formato de mapas conceituais, que explicitam a estrutura de saber tecnológica das simulações.

Simultaneamente, estão sendo produzidos materiais didáticos para cada simulação, para que se constituam em atividades didáticas a serem desenvolvidas nas disciplinas da graduação.

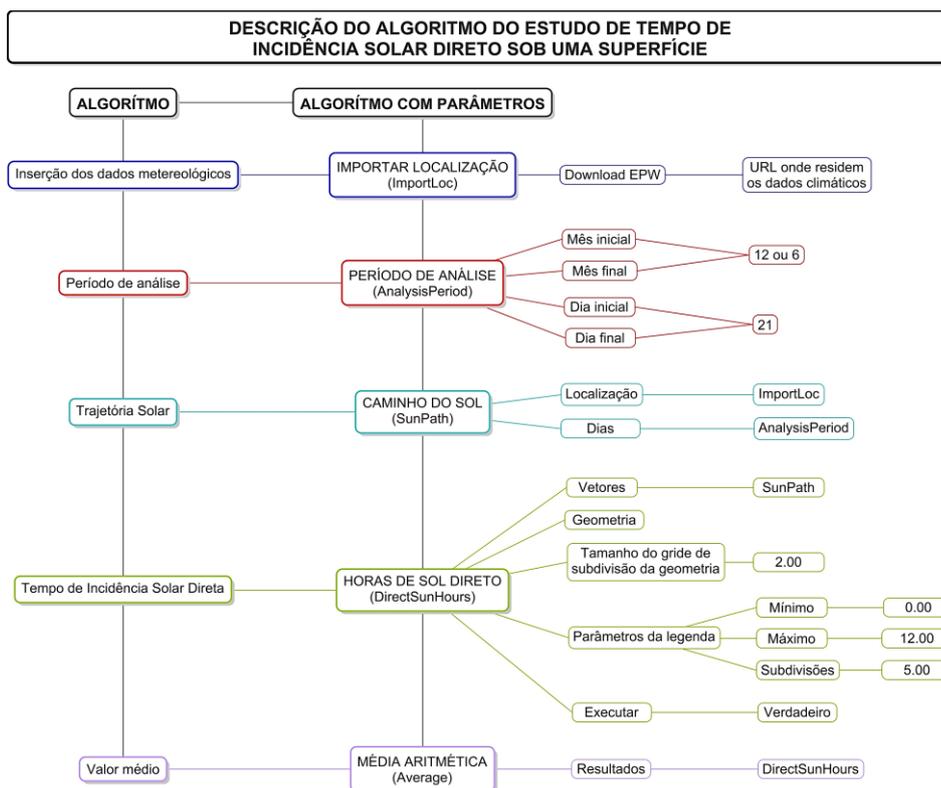


Figura 10: Descrição do algoritmo da modelagem paramétrica da simulação do tempo de incidência solar direta sob as superfícies, Fonte: elaboração pelos autores.

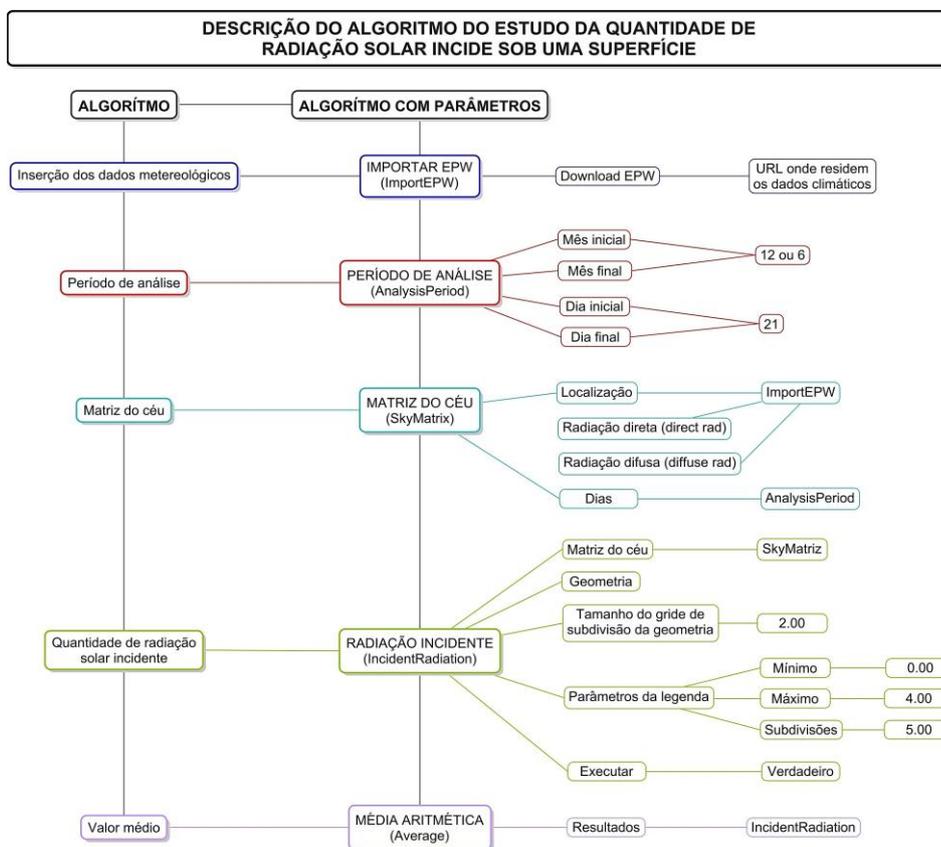


Figura 11: Descrição do algoritmo da modelagem paramétrica da simulação da quantidade de radiação solar incidente sob as superfícies. Fonte: elaboração pelos autores.

4. Análise dos Resultados

A partir de tais simulações constata-se que a superfície de dupla curvatura inspirada na natureza do Restaurante Los Manantiales, durante o inverno, possui grande vantagem em relação ao cilindro no que se refere a conforto térmico dos usuários. Isso porque, tal superfície recebe não apenas mais tempo de incidência solar direta, como também uma maior quantidade de radiação solar incidente em comparação com a superfície conformada por cilindros, conforme o Quadro 01. Para interpretação dos resultados da simulação, analisou-se graficamente a legenda de horas de incidência solar direta e de radiação solar incidente sobre a superfície durante o dia simulado, em que cada tempo e quantidade são representados por uma cor.

Por outro lado, verifica-se que, no verão, tal superfície complexa também recebe horas e quantidades a mais que a geometria elementar, gerando menos conforto térmico. Assim, é possível refletir que o emprego de tal superfície pode ser ideal para locais em que se faz frio o ano todo. Além disso, abarcando temas de sustentabilidade e utilização da energia solar, a geometria complexa do Restaurante se demonstra com grande potencial para aplicação de painéis solares e uso de energia renovável.

Quadro 01: Análise dos resultados da simulação.

INFO	TEMPO DE INCIDÊNCIA SOLAR		QUANTIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR		
	Análise gráfica	Imagem	Análise gráfica	Imagem	
SOLSTÍCIO DE VERÃO - 21/06	Parabololide hiperbólico	Nota-se, a partir da legenda gráfica ao lado, que no verão o tempo de incidência solar direta sobre a superfície varia entre 9 e 12 horas. MÉDIA = 11 horas		Nota-se, a partir da legenda gráfica ao lado, que no verão a radiação incidente sobre a superfície varia entre 2,00 e 4,00 kWh/m². MÉDIA = 3,07 kWh/m²	
	Superfície cônica	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 3 horas. MÉDIA = 1 hora		Nota-se, a partir da legenda gráfica ao lado, que no verão a radiação incidente sobre a superfície varia entre 0 e 1,00 kWh/m². MÉDIA = 0,71 kWh/m²	
SOLSTÍCIO DE INVERNO - 21/12	Parabololide hiperbólico	Nota-se, a partir da legenda gráfica ao lado, que no inverno o tempo de incidência solar direta sobre a superfície varia entre 6 e 12 horas. MÉDIA = 8h e 23 min		Nota-se, a partir da legenda gráfica ao lado, que no inverno a radiação incidente sobre a superfície varia entre 2,00 e 3,00 kWh/m². MÉDIA = 2,13 kWh/m²	
	Superfície cônica	Nota-se, a partir da legenda gráfica ao lado, que no inverno o tempo de incidência solar direta sobre a superfície varia entre 0 e 3 horas. MÉDIA = 1h e 17 min		Nota-se, a partir da legenda gráfica ao lado, que no inverno a radiação incidente sobre a superfície varia entre 0 e 1,00 kWh/m². MÉDIA = 0,57 kWh/m²	

Fonte: elaboração pelos autores.

5. Considerações Finais

As atividades desenvolvidas até o momento permitiram reconhecer e sistematizar o saber envolvido relacionado ao desempenho térmico das superfícies complexas empregadas na arquitetura a partir das técnicas de simulações térmicas realizadas no software de modelagem tridimensional Rhinoceros com o plug-in de modelagem paramétrica por programação visual Grasshopper, vinculado ao plug-in de simulação termo energética Ladybug, compreendendo seus aspectos teóricos e tecnológicos. Desse modo, a partir deste estudo, considera-se possível avançar para a etapa de estruturação de atividades didáticas, prevista no projeto.

Esta pesquisa representa um estudo de relevância científica no campo do ensino de arquitetura, pois não só aborda os aspectos de desempenho da arquitetura e sua influência na sustentabilidade do ambiente construído, mas também explicita uma estrutura de saber relacionada à representação gráfica por intermédio do estudo da geometria. Esta dimensão, frequentemente não tão aprofundada nos estudos da área, oferece suporte às atividades projetuais dos estudantes de Arquitetura e Urbanismo. Além disso, a pesquisa avança para aproximar os estudantes a uma perspectiva tecnológica, utilizando simulações e modelagem paramétrica.

Agradecimentos

Agradecemos a FAPERGS – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - pelo apoio financeiro ao projeto AMPARA ainda vigente a partir do edital recém doutor ano 2021 e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelas bolsas de iniciação científica (2022-24), as quais oportunizaram desenvolver este estudo.

Referências

- [1] PIRES, J. de F.; PEREIRA, A. C. A estruturação do saber relacionado a geometria complexa e a modelagem paramétrica de estruturas regenerativas na arquitetura. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 14, p. 90-110, 2019.
- [2] 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.
- [3] ELTAWHEEL, A.; SU, Y. **Parametric design and daylighting: A literature review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 72, p. 10861103, 2017.
- [4] 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.
- [5] HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. **Building Performance Simulation for Design and Operation**. New York, USA: Spon Press, 2011.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] CHEVALLARD, Y. El Análisis de las Prácticas Docentes en la Teoría Antropológica de Lo Didáctico. **Recherches en Didactique de Mathématiques**, Grenoble, Vol. 19, nº 2, pp. 221-266, 1999. (Traducción de Ricardo Barroso, Universidad de Sevilla).
- [9] OLIVEIRA, B. P. de; PIRES, J. de F. Integração entre modelagem paramétrica, simulação térmica e geometria complexa para a otimização do desempenho das edificações. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, v. 11, p. 32-47, 2023.
- [10] CARMO, M. P. **Superfícies Mínimas**. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA, 1987
- [11] PIRES, J. de F. A Constituição de uma rede de conceitos da geometria complexa da arquitetura contemporânea: das teorias a modelagem paramétrica das superfícies. **Tese (Curso de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - PósArq)** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2018.
- [12] OLIVEIRA, B. P.; PIRES, J. de F. ANÁLISE DE DESEMPENHO BIOCLIMÁTICO DA GEOMETRIA COMPLEXA DA NATUREZA EMPREGADA NA ARQUITETURA. *In: XXXII Congresso de Iniciação Científica da UFPel*, 2023, Pelotas. 9ª Semana Integrada UFPel 2023 - SIIPE 2023. **Anais [...]**. Pelotas: Editora da UFPel, 2023. v. 01. p. 1-4.
- [13] PAIXÃO, L. P; PIRES, J. de F. A Geometria Complexa da Arquitetura em uma Abordagem Regenerativa. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, v. 10, n. 27, 2022.
- [14] AUGENBROE, G. Trends in building simulation. *In: (Ed.). Advanced Building Simulation*. New York, NY, USA: Spon Press, 2004. cap. 1, p.424.
- [15] 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
- [16] 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.