2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

# Análise de desempenho térmico de sistema de cobertura para aquecimento e resfriamento em zonas subtropicais[1]

**TRENTO, Daniel G. (1); TRENTO, Ticiana P. W. (2); GONZALEZ-CRUZ, Eduardo Manuel (3)**

**(1)** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, trento.daniel@gmail.com
**(2)** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, ticiana@alunos.utfpr.edu.br
**(3)** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, eduardocruz@utfpr.edu.br

## RESUMO

*Locais de clima temperado possuem grande amplitude térmica anual e edifícios nestas áreas precisam adotar estratégias para gerar conforto tanto no calor quanto no frio. Neste contexto, esta pesquisa objetiva apresentar a metodologia adotada para projetar parametricamente a geometria de um sistema de cobertura estático capaz de reduzir os ganhos solares no verão e melhor aproveitá-los no inverno na cidade de Curitiba, Paraná. Para tanto, utilizaram-se diferentes ferramentas de modelagem, iteração e simulação para radiação e CFD (computer fluid dynamics), quais sejam Rhinoceros, Grasshopper, Diva-for-Rhino, Colibri, Design Explorer 2 e Solidworks Flow. Os resultados demonstram que a geometria proposta alcançou desempenho satisfatório em ambos os solstícios.*

***Palavras-chave:*** *ganho solar; radiação solar; simulação computacional; computer fluid dynamics.*

## ABSTRACT

*Temperate places have high annual thermal amplitude. In those areas, buildings must provide thermal comfort during hot and cold seasons. This study explains the method to design the geometry of a static roof parametrically. The system should reduce heat gain in summer and increase it in winter in Curitiba, Paraná. Different tools were used to model, iterate and simulate radiation and CFD (computer fluid dynamics), namely Rhinoceros, Grasshopper, Diva-for-Rhino, Colibri, Design Explorer 2 and Solidworks Flow. The results show good performance of the proposed geometry both for winter and summer solstices.*

***Keywords****: solar heat gain; solar radiation; simulation; computer fluid dynamics.*

## 1 INTRODUÇÃO

Locais de clima subtropical ou temperado possuem grande amplitude térmica anual (LAMBERTS, *et al.*, 2012). Logo, edifícios nestas áreas precisam adotar estratégias para gerar conforto tanto no calor quanto no frio (DEKAY; BROWN, 2014). É o caso de Curitiba (25°30' S, 49° 20' O, 910 metros acima do nível do mar). Nesta latitude, superfícies verticais orientadas para o norte recebem 20% mais radiação

[1] TRENTO, Daniel G.; TRENTO, Ticiana P. W.; GONZALEZ CRUZ, Eduardo Manuel. Análise de desempenho térmico de sistema de cobertura para aquecimento e resfriamento em zonas subtropicais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

solar no solstício de inverno que superfícies horizontais. No verão, as horizontais recebem 15 vezes mais energia que as verticais (KRÜGER, *et al.*, 2013). No entanto, para edifícios com envelope dominado pela cobertura, esta incidência de radiação é oposta ao necessário em cada estação.

O desempenho térmico de coberturas é influenciado principalmente por sua geometria (DABAIEH *et al*., 2015; DEKAY; BROWN, 2014), pela cor de sua superfície externa, pela absortância da sua composição e pela existência de sombreamento (DEKAY; BROWN, 2014).

Runsheng, *et al.* (2003) exploraram diferentes ângulos para vãos abobadados, com orientações das aberturas dos vãos leste-oeste e norte-sul. Os autores provaram que, em geral, coberturas abobadadas possuem ganho solar maior que telhados planos, com exceção de ângulo do vão menor que 55° e orientação da abertura norte-sul. Este resultado foi confirmado pelas simulações de Dabaieh *et al.* (2015), com a adição de acabamento externo com alto albedo, em comparação com coberturas planas, abóbadas, vão abobadado ventilado e teto plano com cavidade de ar, com baixo ou alto albedo.

O material de acabamento externo da cobertura pode variar tanto em refletância quanto em emissividade (BRITO FILHO; SANTOS, 2014). Quando esta é alta, o calor é rejeitado em grande parte. A combinação destes dois fatores – alta refletância e alta emissividade – é chamada *cool roof* (GANGULY, *et al.*, 2016). Outro método de rejeição de ganhos solares é o telhado verde (GANGULY, *et al.*, 2016).

Os estudos citados acima tratam de estratégias para resfriamento. De Luis e Pérez-García (2004), por outro lado, investigaram também o desempenho da cobertura no inverno. Para substituir uma cobertura plana por uma em *shed* na Espanha, os autores compararam diferentes proporções dos volumes triangulares; a inexistência e dois comprimentos de sombreamento; bem como três latitudes diferentes. O resultado alcançou redução de 86% de ganho solar no verão em relação à cobertura plana original (de 7170 MJ/dia para 998 MJ/dia). No inverno, o ganho solar final foi 55% maior que no verão (1792 MJ/dia).

Para responder melhor às variações diárias e anuais, há ainda os sistemas de cobertura dinâmicos. Telhados termocrômicos empregam pigmentos que mudam a cor da cobertura em resposta à temperatura do ambiente (HU; YU, 2019). Estes autores demonstraram por simulação computacional que esta tecnologia é adaptável a diferentes temperaturas. Ainda assim, o bom desempenho alcançado foi inferior ao do *cool roof* no verão e do telhado com pintura escura no inverno.

Outra maneira buscar uma resposta térmica dinâmica da cobertura é possibilitando o controle de sua geometria. Givoni (1977) já havia proposto um modelo (*Roof Radiation Trap*), ao sugerir uma câmara de ar entre o forro e o telhado. No inverno, a radiação penetra pelo vidro que veda a face equatorial da câmara e aquece o forro. No verão, a ação conjunta da sombra do telhado e de um painel isolante, não permite que os raios solares entrem. A possibilidade de controle se dá por meio da localização e posição do painel em relação ao vidro. Entretanto, como é feito manualmente, o desempenho depende do entendimento e esforço do usuário.

Por fim, Loonen *et al.* (2013) revisaram pesquisas e projetos de *Climate Adaptive Building Shells* (CABS), envelopes que combinam os aspectos benéficos tanto de tecnologias passivas quanto ativas. Porém, este modelo de alta complexidade pode trazer riscos, como alta manutenção e custos maiores.

## 2 OBJETIVO

Diante do contexto exposto acima, o objetivo deste artigo é apresentar a metodologia adotada para projetar parametricamente a geometria de um sistema de cobertura estático capaz de reduzir os ganhos solares no verão e melhor aproveitá-los no inverno na cidade de Curitiba, Paraná.

## 3 MÉTODO

Simulações computacionais possibilitaram testar diferentes geometrias de aletas sobre uma cobertura genérica, com 6 metros de largura e 5 metros de comprimento. Uma zona térmica única foi estabelecida como ambiente interno, com a mesma largura e comprimento e com 3 metros de pé-direito, para permitir o cálculo de ganho solar pela laje.

A seção 3.1 explica o procedimento de simulação computacional. Apresenta as condições de análise na seção 3.3.1 (clima e propriedades dos materiais). Em seguida, a seção 3.3.2 explica como a radiação solar incidente na cobertura foi simulada para diferentes geometrias de aletas. A seção 3.3.3 mostra o modo de seleção da geometria com melhor desempenho em ambos os solstícios. Por fim, a seção 3.3.4 discorre sobre como o fluxo de calor foi testado na laje por meio de simulação CFD (*computer fluid dynamics*).

### 3.1 Procedimento de simulação computacional

O modelo geométrico foi desenvolvido no Grasshopper (MCNEEL, [s.d.]), um editor de algoritmos que funciona como *plugin* do software Rhinoceros 3D (MCNEEL, [s.d.]) (WAGDY et al., 2019). Outro *plugin*, DIVA-for-Rhino (SOLEMMA LLC, [s.d.]), permitiu simular radiação incidente. Para prever o ganho solar a partir da cobertura e sua modificação de acordo com a radiação solar, realizou-se uma análise do tipo MOO (*multi objective optimization*). Este tipo de análise permite a tomada de decisões a partir do cálculo simultâneo de mais de uma função matemática (CHANG, 2015). Com este propósito, os dados de saída do Diva-for-Rhino alimentaram múltiplas iterações do *plugin* Colibri. Por fim, a geometria com os melhores resultados nos solstícios de verão e no inverno foi selecionada por meio da ferramenta *online* Design Explorer 2 (CORE STUDIO, [s.d.]) para, então, possibilitar o cálculo de ganho solar no *software* SolidWorks (3DS, [s.d.]). A Figura 1 ilustra o processo.

Figura 1 – Progressão de ferramentas para simulação computacional




Fonte: os autores (2020).

#### 3.1.1 Condições analisadas

O estudo mira em zonas subtropicais, e por isso, utilizou o arquivo climático de Curitiba, compilado pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). As situações de céu partem de medições que formam um padrão de clima para cada período e evidenciam a trajetória diária e anual do sol.

A orientação do volume foi mantida fixa em norte-sul, com as aletas na cobertura posicionadas com o centro de sua concavidade para o sul. Os materiais tiveram suas características inalteradas ao longo das simulações (Tabela 1).

Clima, orientação e características dos materiais foram inseridos no Diva-for-Rhino e SolidWorks. As simulações foram limitadas aos dias 21 de junho e 21 de dezembro. No entanto, não foi considerado o sombreamento pelo entorno neste estudo.

Tabela 1 – Características dos materiais

| | | Propriedades térmicas | | |
|---|---|---|---|---|
| **Elemento** | **Material** | **Densidade (ρ) kg/m3** | **Condutividade térmica (λ) W/m.K** | **Calor específico (c) J/kg.K** |
| Aletas | Concreto celular autoclavado | 500 | 0,17 | 1000 |
| Laje da cobertura | Laje de concreto maciça (10cm) | 2400 | 1,75 | 1000 |
| Envoltória e platibanda | Argamassa | 2000 | 1,15 | 1000 |
| | Tijolo 1 vez | 1600 | 0,90 | 920 |
| | Argamassa | 2000 | 1,15 | 1000 |

| | Propriedades térmicas | | | Propriedades óticas | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Emissividade** | **Absortância** | ***Boundary condition*** | **Acabamento** | **Refletância** |
| Aletas | 0,9 | 0,5 | - | Pintura cinza | 50% |
| Laje da cobertura | 0,9 | 0,97 | - | Pintura preta | 4% |
| Envoltória e platibanda | Superfície interna 0,9 | - | Superfície externa adiabática | - | - |

Fonte: os autores (2020).

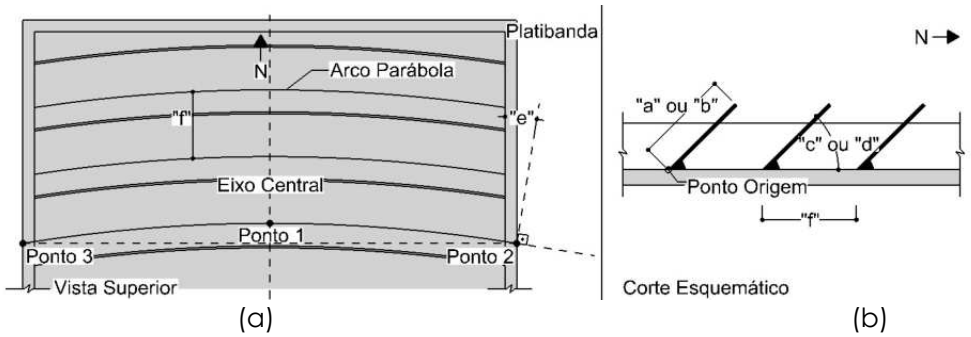
### 3.1.2 Simulação de radiação solar

Para análise deste estudo, a modulação da malha posicionada sobre a laje de cobertura foi de 0,08m para que as diferenças de sombreamento fossem satisfatórias. Os dados de entrada para simular a radiação solar foram elencados na seção 3.1.1. Como dados de saída, o Diva-for-Rhino fornece a radiação horária incidente na laje em kW/m², nas datas pré-determinadas.

### 3.1.3 Iterações e seleção de resultados parciais

Os resultados horários de radiação e o intervalo de valores que determinam a geometria das aletas servem de dados de entrada para gerar as iterações do Colibri. A Figura 2 mostra as variáveis referentes ao dimensionamento das aletas.

Figura 2 – Variáveis paramétricas das aletas: vista de topo (a) e corte esquemático (b).




Fonte: os autores (2020).

Um eixo central foi determinado e, transversalmente a ele, foi gerado um arco parábola a partir de 3 pontos (pontos 1, 2 e 3), resultando no ângulo "e" entre o eixo central e a normal da curvatura do arco-parábola na interseção com o perímetro da cobertura. Na origem (ponto 1), posicionou-se a seção 1 com comprimento "a" e ângulo da aleta "c". Na interseção do arco-parábola com o perímetro (ponto 2 e 3), posicionou-se a seção 2 com comprimento "b" e ângulo "d". A volumetria é gerada

com a extrusão das seções, tomando o arco-parábola como trilho. As aletas possuem espaçamento "f" entre si. A Tabela 2 lista as medidas variáveis e aquelas que permaneceram fixas nas iterações.

Tabela 2 – Medidas variáveis e fixas das aletas

| **Medidas variáveis** | | **Medidas fixas** | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Símbolo** | | **Símbolo** | **Medida** |
| Comprimento da aleta no centro | a | Distância entre aletas | "f" | 0.6m |
| Comprimento da aleta no perímetro | b | Espessura das aletas | | 0,02m |
| Ângulo da aleta no centro | c | | | |
| Ângulo da aleta no perímetro | d | | | |
| Ângulo entre normal da aleta e perímetrc | e | | | |

Fonte: os autores (2020).

Na seção 2, os valores de "b" e "d", bem como o ângulo "e", são distintos das medidas da seção 1. Esta variação permite que os raios solares incidam sobre as aletas com maior aproveitamento no começo e final da tarde também.

As medidas da Tabela 2 receberam valores mínimos e máximos, com número de variações definidas entre eles (Quadro 1). O número de iterações para gerar a matriz de soluções resulta da multiplicação das variações (3.675 no total). Deste modo, o uso do Design Explorer 2 permitiu definir as dimensões e ângulos com menos radiação na laje no verão e mais radiação no inverno, simultaneamente.

Quadro 1 – Valores mínimos e máximos, quantidades de variações dentro de cada intervalo de medidas e número de iterações resultantes.

| | **a (cm)** | | **b (cm)** | | **c (ângulo)** | | **d (ângulo)** | | **e (ângulo)** | | **N° Iterações** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Dimensões** | **Máx** | **Mín** | **Máx** | **Mín** | **Máx** | **Mín** | **Máx** | **Mín** | **Máx** | **Mín** | |
| | 0,6 | 0,75 | 0,6 | 0,75 | 32° | 44° | 32° | 44° | 13° | 15° | |
| **Variações** | *5* | | *5* | | *7* | | *7* | | *5* | | 3.675 |

Fonte: os autores (2020).

### 3.1.4 Simulação de fluxo de calor

Definida a geometria com melhor desempenho em ambos os solstícios, o *software* Solidworks Flow calculou os ganhos solares na laje da cobertura a partir da fração de radiação incidente. A simulação desenvolvida foi CFD com solução baseada em métodos finitos. O *software* permite calcular transferências de calor simultâneas em meios sólidos e fluidos, levando em consideração trocas de calor por radiação entre corpos. Caso o sólido seja composto, ocorrem trocas por condução baseada na resistência térmica entre as diferentes camadas. A troca de energia entre um meio sólido e fluido é calculado pelo fluxo de calor na direção normal da interface sólido-fluido, tomando em consideração a temperatura superficial do sólido e a característica da camada limite do fluido, caso necessário(SOLIDWORKS, 2012).

Foram utilizados dados do arquivo climático para temperatura de bulbo seco, radiação solar e pressão atmosférica, no modo *time-dependent*. Os objetivos para convergência da solução resultante foram a taxa de radiação média solar incidente na laje (*net radiant flux* – solar); a taxa de radiação térmica na laje (*net radiant flux* – thermal), fluxo de calor da laje para o ambiente (*heat transfer flux*) e temperatura dos elementos sólidos da zona térmica (*solid temperature*).

Para simulações em CFD que consideram a influência dos ventos, é necessário um

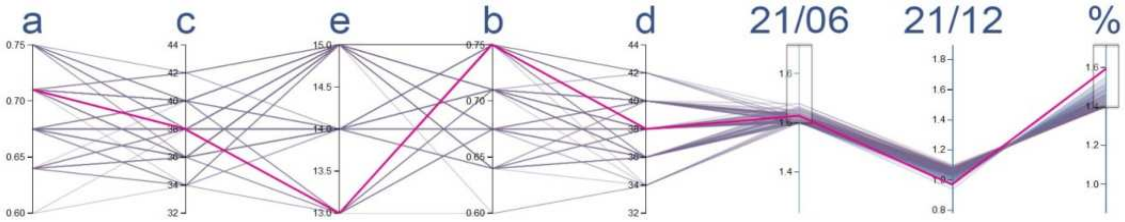
contexto ao redor da edificação, pois alteram as características originais de magnitude e direção. Como a edificação proposta é genérica, não há geometria de entorno e, por isso, não foram considerados os dados de ventos do arquivo climático, excluindo-se a variável. A movimentação de ar ocorreu somente pela convecção produzida pela diferença nas densidades do ar quente e frio.

A simulação CFD limitou-se ao período entre 7h e 19h. Para um sistema em equilíbrio inicial, as temperaturas T0 dos sólidos e do ar começam em equilíbrio com a temperatura externa. O *time-step* adotado foi 0,2s.

## 4 RESULTADOS

A Figura 3 mostra o resultado das iterações no Design Explorer 2. O retângulo na coluna que corresponde à radiação no dia 21/06 representa o limite mínimo buscado pelo estudo (1,5 kWh/m²). O outro critério, também evidenciado por um retângulo, foi a proporção entre a radiação em 21/06 e em 21/12 – quanto maior a proporção, maior a diferenciação entre a radiação incidente na laje nos dois dias de referência. A partir destas duas premissas, a ferramenta determinou as opções que atendessem aos menores níveis de radiação no solstício de verão.

Figura 3 – Resultado das iterações no Design Explorer 2. A linha em rosa corresponde à geometria com melhor proporção entre a radiação de inverno e verão.



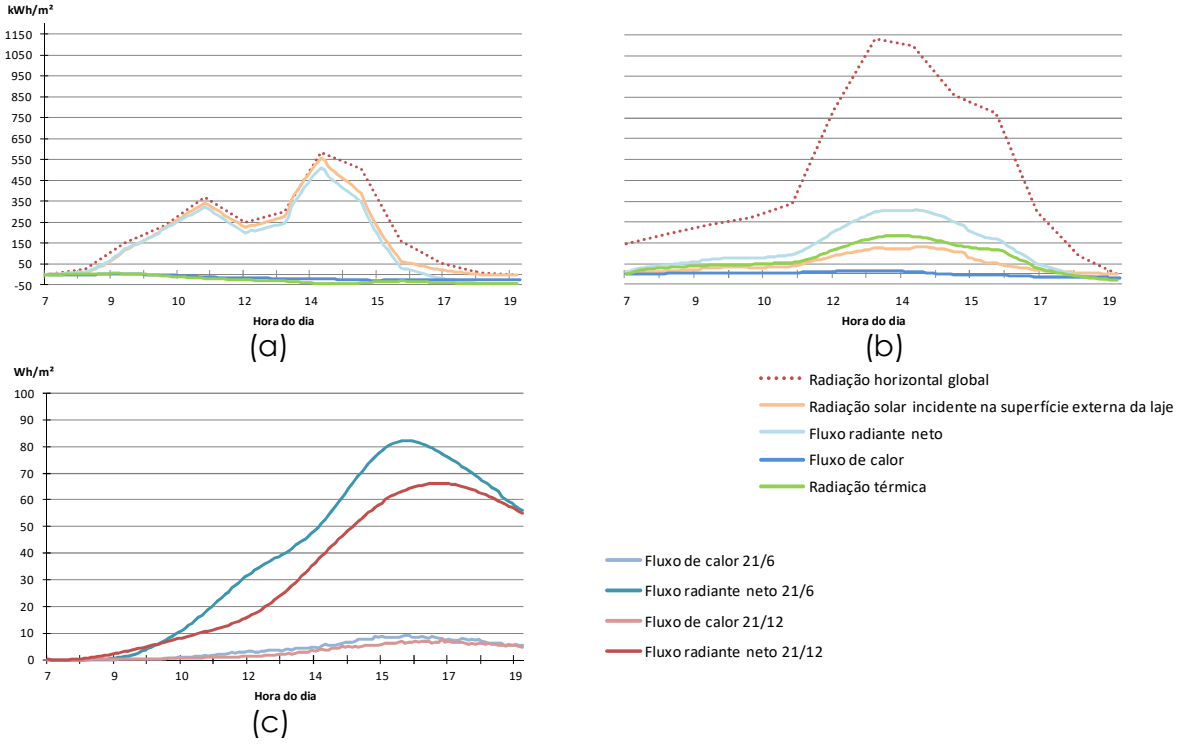

Fonte: os autores (2020).

119 simulações atenderam aos critérios, mas a simulação com a melhor proporção entre radiação de inverno e verão (1.59) tinha "a" igual a 71 cm, "b" igual a 75 cm, "c" e "d" com ângulo 38° e "e" com 5°. Para esta geometria, a radiação incidente na laje foi de 1.51 kWh/m² no inverno – 57% da radiação acumulada do dia (2.648 kWh/m²). No solstício de verão, a laje recebeu 0.94 Kwh/m² – apenas 15% da radiação do dia (6,225 kWh/m²). Esta, portanto, foi a geometria escolhida para os testes posteriores de ganho solar e está destacada em rosa na Figura 3.

O resultado da simulação de CFD demonstra que, no solstício de inverno, a geometria das aletas permite um alto índice de ganho solar, próximo da radiação horizontal global (Figura 4(a)). Neste dia, o fluxo de calor e a radiação térmica têm contribuição negativa no ganho total de temperatura devido à baixa temperatura do ar e das aletas. No solstício de verão, o sombreamento consegue barrar grande parte da incidência solar (Figura 4(b)). Logo, o maior ganho de radiação ocorre pela radiação térmica das aletas e pela radiação refletida. O fluxo de calor ar-laje é positivo, pois a temperatura do ar próximo supera a temperatura média da laje. A proporção do fluxo radiante neto da laje de cobertura no inverno é de 87.1% do pico de radiação horizontal global (às 14h). No verão, é de 26% (às 13h).

A maior contribuição para o aquecimento do ambiente interno é devido ao calor radiante da laje (Figura 4(c)). No verão, existe menor transmissão de calor para o ambiente devido ao menor ΔT entre a laje e as superfícies do ambiente, apesar da temperatura média da laje ser maior.

Figura 4 – Resultado das simulações de CFD: (a) superfícies externas no solstício de inverno; (b) superfícies externas no solstício de verão; e (c) superfícies internas no solstício de inverno e verão.




Fonte: os autores (2020).

Quanto à distribuição do calor pelos elementos construtivos, é possível observar que, às 19h, a laje de cobertura obteve a maior taxa de armazenamento de calor, seguida da envoltória, e da laje do piso (Tabela 3).

Tabela 3 – temperaturas finais às 19h.

| | Estratificação do ar | | Laje de cobertura | | Envoltória | | Laje de piso | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Altura (m) | TBS (°C) | Temp. média (°C) | Energia armazenada (kWh) | Temp. média (°C) | Energia armazenada (kWh) | Temp. média (°C) | Energia armazenada (kWh) |
| **21/06** | 0,2 | 17,14 | 27,68 | 28,96 | 14,88 | 9,34 | 15,83 | 6,31 |
| | 1,5 | 18,29 | | | | | | |
| | 2,8 | 20,50 | | | | | | |
| **21/12** | 0,2 | 20,94 | 31,17 | 28,06 | 18,83 | 9,40 | 19,50 | 5,66 |
| | 1,5 | 22,20 | | | | | | |
| | 2,8 | 24,11 | | | | | | |

Fonte: os autores (2020).

## 4 CONCLUSÕES

O estudo utilizou diferentes métodos de simulação computacional – mapas de radiação, iterações e CFD – para propor um modelo de sombreamento de cobertura apropriado à amplitude térmica anual em zonas subtropicais. Para tanto, diferentes geometrias de aletas sobre a laje foram testadas.

A geometria com melhor desempenho apontado pela análise mostra que é possível alcançar solução satisfatória para períodos de calor e de frio.

Ressalta-se que o modelo utilizado é simplificado e considerou somente o ganho solar na laje. Assim, não considera sombreamento pelo entorno, a geração interna de calor por possíveis ocupantes e equipamentos, bem como o ganho solar por superfícies verticais. Sugere-se a inclusão destes fatores em estudos futuros. Por fim, também se sugere um estudo com foco no conforto térmico do usuário, levando em conta a assimetria térmica no ambiente, principalmente no período do verão, quando a temperatura da laje é alta.

## REFERÊNCIAS


3DS. **SolidWorks**. Disponível em: <https://www.solidworks.com/>. Acesso em: 1 maio. 2020.

BRITO FILHO, J. P.; SANTOS, T. V. O. Thermal analysis of roofs with thermal insulation layer and reflective coatings in subtropical and equatorial climate regions in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 84, p. 466–474, 2014.

CORE STUDIO. **Design Explorer 2**. Disponível em: <https://tt-acm.github.io/DesignExplorer/>. Acesso em: 1 maio. 2020.

DABAIEH, M.; WANAS, O.; HEGAZY, M. A.; JOHANSSON, E. Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 89, p. 142–152, 2015.

DE LUIS, F. J.; PÉREZ-GARCÍA, M. Parametric study of solar gains in saw-tooth roofs facing the equator. **Renewable Energy**, v. 29, n. 8, p. 1223–1241, 2004.

DEKAY, M.; BROWN, G. Z. **Sun, Wind, and Light: Architectural Design Strategies**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2014.

GANGULY, A.; CHOWDHURY, D.; NEOGI, S. Performance of Building Roofs on Energy Efficiency - A Review. **Energy Procedia**, v. 90, n. December 2015, p. 200–208, 2016.

GIVONI, B. Solar heating and night radiation cooling by a Roof Radiation Trap. **Energy and Buildings**, v. 1, n. 2, p. 141–145, 1977.

HU, J.; YU, X. B. Adaptive thermochromic roof system: Assessment of performance under different climates. **Energy and Buildings**, v. 192, p. 1–14, 2019.

KRÜGER, E.; SUZUKI, E.; MATOSKI, A. Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 364–372, 2013.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. [s.l.] Eletrobrás, 2012.

LOONEN, R. C. G. M.; TREKA, M.; CÓSTOLA, D.; HENSEN, J.L.M. Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 483–493, 2013.

MCNEEL, R. **Grasshopper 3D**. Disponível em: <https://www.grasshopper3d.com/>. Acesso em: 1 maio. 2020a.

MCNEEL, R. **Rhinoceros**. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/>. Acesso em: 1 maio. 2020b.

RUNSHENG, T.; MEIR, I. A.; ETZION, Y. An analysis of absorbed radiation by domed and vaulted roofs as compared with flat roofs. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 6, p. 539–548, 2003.

SOLEMMA LLC. **DIVA**. Disponível em: <https://solemma.com/Diva.html>. Acesso em: 1 maio. 2020.

SOLIDWORKS. **Solidworks Flow simulation 2012 Technical Reference**. [s.l: s.n.].

WAGDY, A.; GARCÍA-HANSEN, V.; ISOARDI, G.; PHAM, K. A parametric method for remapping and calibrating fisheye images for glare analysis. **Buildings**, v. 9, n. 10, p. 1–24, 2019.