

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ABERTURAS ZENITAIS QUANTO À RADIAÇÃO SOLAR E ILUMINAÇÃO NATURAL EM ESPAÇOS INTERNOS USANDO A MODELAGEM PARAMÉTRICA E A SIMULAÇÃO NUMÉRICA

ZENITAL OPENINGS PERFORMANCE EVALUATION REGARDING SOLAR RADIATION AND DAYLIGHT IN INDOOR SPACES USING PARAMETRIC MODELING AND NUMERICAL SIMULATION

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ABERTURAS CENITALES ANTE LA RADIACIÓN SOLAR E LA LUZ NATURAL EN ESPACIOS INTERNOS UTILIZANDO MODELACIÓN PARAMÉTRICA Y SIMULACIÓN NUMÉRICA

Flavio Schmidlin¹, Felipe Tavares da Silva²

RESUMO:

A iluminação zenital é um recurso de projeto que pode ser utilizado para reduzir o consumo de energia em edifícios. Contudo, há condições para que não ocorra desconforto visual e/ou térmicos por excesso de radiação solar incidente no interior da edificação, o que pode ser indesejável especialmente em regiões de clima quente. Este estudo avaliou os níveis de autonomia de iluminação natural zenital e a incidência de radiação solar em ambientes internos com quatro tipologias de aberturas zenitais, usando modelos paramétricos e simulações numéricas. Foi utilizada uma base de dados climática de uma região no Brasil com baixa latitude, caracterizada por um clima tropical quente e úmido. O desempenho das tipologias de aberturas à luz natural foi avaliado usando a medida das Iluminâncias Úteis da Luz do Dia e a radiação solar incidente, considerando resultados médios anuais, diários e horários. O estudo incluiu análises com as aberturas zenitais orientadas a Norte-Sul e Leste-Oeste, considerando malhas de sensores nas paredes e no piso. Os resultados das simulações numéricas mostraram que o processo de modelagem utilizado pode auxiliar o processo de projeto arquitetônico na sua dimensão de iluminância natural e incidência de radiação solar em ambientes internos, mostrando configurações otimizadas para as dimensões do ambiente e da abertura zenital além de evidenciar que em cada tipologia estudada há um formato e dimensões do ambiente que resultam em um desempenho ótimo dos níveis de autonomia de iluminação.

PALAVRAS-CHAVE: Desempenho da edificação; Iluminância; Luz natural; Radiação solar.

¹ Universidade Federal da Paraíba. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGAU-UFPB)

² Universidade Federal da Paraíba. Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU-UFPB)

Fonte de Financiamento:
Bolsa de Mestrado da CAPES.

Conflito de Interesse:
Declara não haver.

Ética em Pesquisa:
Declara não haver necessidade.

Submetido em: 18/06/2023
Aceito em: 05/02/2024

How to cite this article:

SCHMIDLIN, F.; SILVA, F. T. Avaliação do desempenho de aberturas zenitais quanto à radiação solar e iluminação natural em espaços internos usando a modelagem paramétrica e a simulação numérica. **Gestão & Tecnologia de Projetos**. São Carlos, v18, n3, 2023. <https://doi.org/10.11606/gtp.v18i3.213318>



ABSTRACT:

Using daylight from the zenith opening is a design feature that can reduce energy consumption in buildings. However, there are conditions so that visual and thermal discomfort does not occur due to excessive solar radiation inside the building, which may be undesirable in hot climate regions. This study used parametric models and numerical simulations to evaluate the autonomy levels of zenithal daylighting and the incidence of solar radiation in indoor environments with four types of zenithal openings. A climate database of a region in Brazil with low latitude, characterized by a hot and humid tropical climate, was used. The performance of daylight opening typologies was evaluated using the measurement of Useful Daylight Illuminance and incident solar radiation, considering annual, daily and hourly average results. The study dealt with analyses regarding the zenith openings, oriented North-South and East-West, considering sensors at the walls and the floor. The numerical simulation results showed that this parametric model could help the architectural design process regarding the daylight and incidence of solar radiation in indoor environments, providing optimized configurations for the room and the zenith opening dimensions. Additionally, the results exhibit that in each zenithal typology studied, the room has a shape and dimensions that result in optimal performance in lighting autonomy levels.

KEYWORDS: Building performance; Illuminance; Daylighting; Solar radiation.

RESUMEN:

La iluminación cenital es un recurso de diseño que se puede utilizar para reducir el consumo energético en los edificios. Sin embargo, existen condiciones para que no se produzcan molestias lumínicas y/o térmicas por exceso de radiación solar incidente en el interior del edificio, lo que puede resultar indeseable en regiones de clima cálido. Este estudio evaluó los niveles de autonomía de la iluminación cenital y la incidencia de la radiación solar en ambientes interiores con cuatro tipos de aberturas cenitales, utilizando modelos paramétricos y simulaciones numéricas. Se utilizó una base de datos climáticos de una región de Brasil de baja latitud, caracterizada por un clima tropical cálido y húmedo. Se evaluó el desempeño de las tipologías de apertura de luz diurna mediante la medición de la Iluminancia Útil de Luz Diurna y la radiación solar incidente, considerando resultados promedio anuales, diarios y horarios. El estudio incluyó análisis con las aberturas cenitales orientadas Norte-Sur y Este-Oeste, considerando las mallas sensorias en las paredes y el piso. Los resultados mostraron que el proceso de modelado utilizado puede ayudar al proceso de diseño arquitectónico en su dimensión de iluminancia natural e incidencia de la radiación solar en ambientes interiores, mostrando configuraciones optimizadas para las dimensiones del ambiente y la apertura cenital, además de mostrar que en cada tipología estudiada existe un formato y dimensiones del ambiente que resultan en un desempeño óptimo de los niveles de autonomía lumínica.

PALABRAS CLAVE: Desempeño del edificio; iluminancia; Iluminación natural; Radiación solar.

INTRODUÇÃO

Atualmente a sustentabilidade ambiental é uma discussão relevante e tem resultado em mudanças de paradigmas em diversas dimensões do projeto arquitetônico. Nesta ótica, alguns autores propõem prioridades para alcançar o atendimento de alguns aspectos de sustentabilidade, dentre os quais, a eficiência energética tem se destacado (AMORIM, 2016; ZHOU et al., 2023). A eficiência energética de edifícios vem sendo amplamente discutida uma vez que esse setor é responsável por uma parcela significativa do consumo de energia elétrica produzida no Brasil. A título de exemplo, as edificações comerciais podem representar até 17,1% do setor de edificações, destinada principalmente a gastos com climatização dos ambientes e iluminação artificial (DALBÓ; SOUZA; PAGEL, 2019).

Outros estudos apontam que a utilização de iluminação natural pode ser um meio significativo para aumentar a eficiência energética dos edifícios quando integrada ao clima onde estão inseridas (GUPTA; DEB, 2023; HAFEZ et al., 2023; RAMOS; GHISI, 2010). Contudo, nos diversos contextos climáticos, é importante compreender como se dá a interação entre a luz do dia em ambientes internos e as aberturas na envoltória do edifício que permitem a comunicação de seu interior com o ambiente externo. Pesquisas realizadas por Susorova et al. (2013) exploraram diferentes configurações na geometria do envelope da edificação, orientação ao norte e tamanho das aberturas. Os resultados indicaram que a combinação desses fatores exerceu uma influência significativa no desempenho energético, especialmente em climas quentes. Em soluções de projeto otimizadas, foi alcançada uma redução no consumo de energia elétrica de até 14%. Lamberts, Dutra e Pereira (2013) afirmam que para uma edificação ser considerada energeticamente eficiente é necessário que esta proporcione condições ambientais de conforto aos usuários e ao mesmo tempo minimizar o consumo de energia. Adicionalmente, outros autores (GABRIEL et al., 2019; QUEIRÓZ; WESTPHAL; PEREIRA, 2019) afirmam que o sistema de aberturas da envoltória da edificação tem grande influência no contato dos espaços internos com a radiação solar direta e a iluminação natural, interferindo no desempenho térmico, luminoso e energético. Além disso, a luz natural, quando adequadamente captada e distribuída no ambiente interno, pode criar condições propícias para o desempenho de atividades humanas, além de trazer benefícios biológicos para as pessoas (SANTOS, 2014). A disponibilidade de iluminação diurna em locais de longa permanência é uma situação benéfica e continua agindo como base no desempenho luminoso da edificação por poder auxiliar a redução do consumo energético e promover a qualidade ambiental da edificação (GARCIA; PEREIRA, 2019).

A radiação solar, que é fonte de luz e calor, tem como consequência a oferta de iluminação natural e aquecimento no interior de ambientes construídos. Maiores quantidades de incidência de radiação solar em ambientes internos podem resultar em mais luz diurna disponível, contudo, dependendo da situação, a radiação solar pode também ser fonte de carga térmica excessiva (HOFFMEISTER; SILVA, 2019). A exposição excessiva dos ambientes internos à incidência de radiação solar pode comprometer o conforto térmico e causar desconforto visual causado pelo ofuscamento. Nesse sentido, para uma maior eficiência lumínica e energética, o projeto das aberturas na envoltória do edifício pode ser direcionado a captar uma quantidade de luz diurna adequada e evitar má distribuição luminosa, ofuscamento e excessivos contrastes (SILVA et al., 2019).

Normalmente, as tipologias de iluminação natural zenital que utilizam aberturas horizontais tendem a gerar maior ganho térmico e maior probabilidade de desconforto visual devido ao ofuscamento, uma vez que permitem a incidência direta de radiação solar. Por outro lado, as tipologias zenitais Lanternim ou dente de serra/shed podem apresentar melhor desempenho no controle da luz natural e na diminuição do consumo energético em climas quentes (AMORIM, 2007). A utilização de iluminação natural zenital oferece uma distribuição mais uniforme da luz diurna no espaço do ambiente, comparando-se com aberturas laterais (janelas), uma vez que as aberturas zenitais são distribuídas de forma homogênea pela área de cobertura. A disponibilidade de luz advinda das aberturas zenitais é fortemente influenciada pela forma das aberturas zenitais e pela altura entre o plano de trabalho e a abertura zenital (KALAIMATHY et al., 2023; MOLteni et al., 2000; VIANNA; GONÇALVES, 2001).

Por meio de procedimentos de simulação computacional podem ser realizadas avaliações de diferentes soluções de projetos, relacionando-as aos níveis de iluminação diurna e de radiação solar incidente em uma edificação (MAIRINK et al., 2019). Para Nabil e Mardaljevic (2006) o método da iluminância útil de luz natural, conhecido também como UDI (*Useful Daylight Illuminance*), é um parâmetro para avaliação dos níveis de iluminância da luz do dia considerando o tempo em que o ambiente esteve dentro de uma faixa adequada. Este parâmetro de desempenho considera um intervalo de permanência no ambiente, baseado em dados meteorológicos horários, em um período de um ano. A métrica UDI não apenas fornece informações sobre os níveis mínimos adequados de iluminância proveniente da iluminação diurna, mas também indica a capacidade de lidar com níveis excessivos de luz diurna, os quais estão associados ao desconforto do usuário e ao ganho indesejado de calor.

Tradicionalmente, o processo de criação e desenvolvimento de um projeto de arquitetura tem um forte caráter aditivo e, atributos específicos de partes já concebidas são revisados e modificados várias vezes. Como alternativa, a modelagem paramétrica e generativa pode auxiliar o processo de projeto por meio de modelos que criam relações entre os elementos que compõem o projeto. Mitchell (1975) definiu o conceito de soluções potenciais (*potential solutions*), consistindo em um conjunto de soluções de projeto distintas obtidas por um modelo generativo CAAD (*Computer Aided Architectural Design*) a partir de combinações de parâmetros definidores de um determinado objeto arquitetônico. Krish (2011) usou o conceito de espaço de soluções (*design space*), sendo este um espaço formado por instanciações de um modelo generativo, não se distanciando essencialmente da abordagem de Mitchell (1975), propondo uma nomenclatura modificada e, adicionalmente, a obtenção de um subespaço de soluções restringido por critérios de desempenho. Posteriormente, outros estudos (BROWN; JUSIEGA; MUELLER, 2020; HENS; SOLNOSKY; BROWN, 2021; MUELLER; OCHSENDORF, 2015) usaram a exploração do espaço de soluções para processos de projeto de edificações em aspectos de otimização do desempenho da estrutura, do espaço arquitetônico e em termos da quantidade de carbono incorporado à construção.

Este artigo tem por objetivo investigar o desempenho à iluminação natural de quatro tipologias de aberturas zenitais por meio de modelagem paramétrica-generativa e simulação computacional da luz natural e radiação solar em ambientes internos. Este estudo é fruto de um trabalho de mestrado, numa versão estendida da dissertação final. Quatro tipologias foram estudadas: Lanternim; Claraboia; Dente de Serra/Shed e Domo de vidro. Foram consideradas variações das dimensões do ambiente interno e diferentes configurações geométricas das aberturas zenitais por meio de uma discretização de um espaço de soluções, verificando o desempenho luminoso através dos níveis de UDI no piso e nas paredes do ambiente.

MATERIAIS E MÉTODOS

As modelagens paramétricas geométricas foram realizadas por meio da ferramenta digital *Rhinoceros3D* (RH) com o auxílio da interface algorítmica, generativa e paramétrica do *plugin Grasshopper* (GH), formando um conjunto ferramental que funciona sob paradigma CAD (*Computer Aided Design*). As simulações numéricas de iluminância da luz do dia foram realizadas com os *add-on Ladybug-Honeybee*, sendo estes uma interface programada em *python script* para usar o motor de cálculo da ferramenta digital *Radiance* no ambiente do GH. Por sua vez, o *Radiance* usa o método do *raytracing* para simular o comportamento da luz a partir da fonte solar simulada pelo posicionamento horário do sol (*sun-path*) obtido pela coordenada geográfica do local em análise. Com o intuito de aumentar a velocidade de processamento das simulações, foi também usado o *Acelerad, plugin* do *Radiance* para realizar cálculos de *raytracing*, aumentando a capacidade de processamento por usar a placa de vídeo do computador (GPU) para realizar os processamentos.

O processamento das modelagens e simulações de radiação solar e iluminância foram realizadas em um computador com processador Intel I7-8750H (8ª geração) com 6 núcleos (12 *threads*) a uma velocidade base de 2,2 GHz, com 32 GB de memória RAM e uma unidade armazenamento de dados SSD (*solid state drive*).

As análises de desempenho de um espaço interno foram conduzidas utilizando um modelo de ambiente chamado de modelo de "caixa de sapatos" (*shoebox model*) (REINHART; JAKUBIEC; IBARRA, 2013). Trata-se de um modelo de um ambiente em formato cuboide e, neste artigo, no fechamento superior dessa geometria foram modelados parametricamente aberturas zenitais do tipo lanternim, claraboia, dente de serra/shed e domo de vidro. Na representação geométrica deste ambiente, foram empregadas, para as suas três dimensões, domínios que compreendem as sugestões providas pela literatura, utilizadas em estudos semelhantes (FONSECA; PEREIRA; CLARO, 2010; GABRIEL et al., 2019; GARCIA; PEREIRA, 2019; QUEIRÓZ; WESTPHAL; PEREIRA, 2019; SILVA et al., 2019). Para as dimensões que definem as aberturas zenitais foram considerados domínios discretizados e, em conjunto com as dimensões do ambiente e orientação ao norte, formaram as dimensões do espaço de soluções a serem explorados com o objetivo de obter configurações com melhor desempenho.

O modelo paramétrico e as faixas de valores para as dimensões dos ambientes e para as dimensões dos elementos de abertura zenital geraram espaços de soluções, contendo os valores de desempenho por meio do UDI e do nível de radiação solar incidente no interior para cada instância do modelo paramétrico. O conceito de espaço de soluções é relatado na literatura como um método para observar as relações entre as dimensões de um objeto e seu respectivo desempenho (BROWN; JUSIEGA; MUELLER, 2020; HENS; SOLNOSKY; BROWN, 2021; KRISH, 2011; MITCHELL, 1975; MUELLER; OCHSENDORF, 2015). Com este processo, objetiva-se desvendar quais são as dimensões do ambiente e do elemento de abertura zenital que oferecem melhor desempenho para a localidade considerada, tendo em si este processo como uma alternativa ou um recurso adicional para o processo de projeto de iluminância natural de ambientes internos.

MODELO GEOMÉTRICO PARAMÉTRICO

A modelagem deste ambiente arquitetônico interno, para realizar a simulação de radiação solar e iluminância no *Ladybug-Honeybee*, demanda alguns requisitos: ser uma geometria em *BRep* fechado (*Closed Boundary Representation*) contendo as normais de suas faces voltada para o interior e, a abertura onde haverá entrada de radiação solar e iluminação natural ser concebida com um outro *BRep* fechado que intersecta o modelo do ambiente. Estes foram construídos pela topologia, a partir das definições dos pontos, seguido de linhas e superfícies, contendo apenas o suficiente e o necessário para definir o domínio geométrico para efetuar as simulações. A geometria do ambiente modelado foi definida pelos seguintes parâmetros: Largura do ambiente (Larg); Profundidade do ambiente (Prof); Altura do ambiente (Altura). Os modelos de aberturas zenitais, por sua vez, tiveram tipos e números de parâmetros distintos devido às suas características particulares. Adicionalmente às definições dos parâmetros geométricos, foram consideradas duas orientações do ambiente, orientando a face da Largura ou da Profundidade do ambiente para o norte, obtendo relações diferentes das aberturas zenitais em relação ao caminho do sol.

A Figura 1 exibe desenhos esquemáticos das quatro tipologias estudadas, localizando os parâmetros que definem as dimensões do ambiente e das aberturas zenitais.

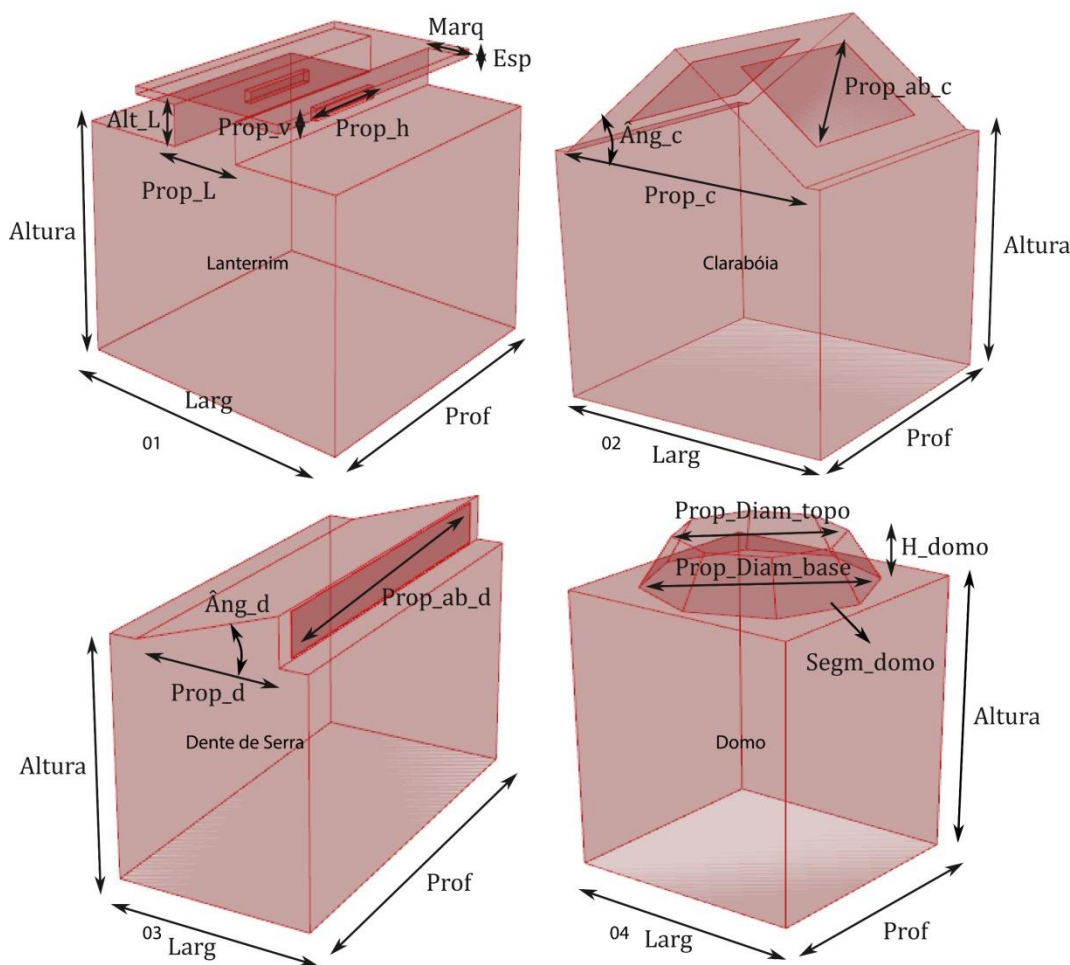


Figura 1. Esquemas dos modelos geométricos das tipologias estudadas e seus parâmetros definidores

Fonte: Os autores

As dimensões geométricas da tipologia Lanternim foram modeladas parametricamente por meio de seis parâmetros distintos. Estes são: Altura do Lanternim (Alt_L); Proporção da largura do Lanternim em relação à largura do ambiente (Prop_L); Proporção horizontal da abertura de entrada de luz em relação a profundidade do ambiente (Prop_h); Proporção vertical da abertura de entrada de luz em relação à altura do Lanternim (Prop_v); Extensão da marquise de proteção (Marq); e a Espessura da laje da marquise (Esp).

Na modelagem da tipologia claraboia foram considerados três parâmetros geométricos específicos que a caracterizam: Largura da claraboia em relação à menor dimensão da planta do ambiente (Prop_c); Proporção de sua abertura de entrada de luz em relação à superfície do Lanternim (Prop_ab_c); e o Ângulo da claraboia (Âng_c).

O dente de serra/shed possui quatro parâmetros definidores específicos: Largura da região inclinada em relação à largura do ambiente (Prop_d); Proporção da abertura do dente de serra/shed em relação à superfície vertical do elemento (Prop_ab_d); Ângulo do dente de serra/shed (Âng_d); e Orientação da abertura voltada para um dos lados da profundidade do ambiente.

O domo de vidro possui quatro parâmetros específicos: Altura do domo de vidro (H_domo); Proporção do diâmetro da base do domo de vidro em relação à menor dimensão da planta do ambiente (Prop_Diam_base); Proporção do diâmetro do topo do domo de vidro em relação ao diâmetro da base (Prop_Diam_topo); e o Número de faces envidraçadas laterais do domo de vidro (Segm_domo), sendo o topo do domo de vidro totalmente opaco.

A geração dos espaços de soluções foi realizada pela combinação dos domínios discretizados de parâmetros de cada tipologia, apresentando um número de instanciações diferentes por terem quantidades diferentes de parâmetros definidores. A combinação dos parâmetros do Lanternim gerou 45.927 configurações de instâncias do modelo paramétrico, da claraboia 2.430 configurações, do dente de serra/shed 4.859, e do domo de vidro 13.500 configurações.

A Tabela 1 apresenta os domínios discretizados dos espaços de soluções dos modelos geométricos estudados, onde para todos os casos, cada uma das três dimensões do ambiente foram discretizadas com 3,0 m, 6,0 m e 9,0 m.

Tipologia	Parâmetro	Domínios discretizados
Lanternim	Alt_L	0,5m; 0,75m; 1,0m; 1,25m; 1,5m; 1,75m; 2,0m
	Prop_L	25%; 50%; 75%
	Prop_h	30%; 60%; 90%
	Prop_v	30%; 60%; 90%
	Marq	0,5m; 1,0m; 1,5m
	Esp	0,1m; 0,2m; 0,5m
	Orientação das aberturas	Norte e sul / leste e oeste
Claraboia	Prop_c	18%; 36%; 54%; 72%; 90%
	Prop_ab_c	30%; 60%; 90%
	Âng_c	15°; 25°; 35°; 45°; 55°; 65°
	Orientação das aberturas	Norte e sul / leste e oeste
Dente de serra/shed	Prop_d	18%; 36%; 54%; 72%; 90%
	Prop_ab_d	30%; 60%; 90%
	Âng_d	15°; 25°; 35°; 45°; 55°; 65°
	Orientação das aberturas	Norte ou Leste (0) / Sul ou Oeste (1)
Domo de vidro	H_domo	0,5m; 1,0m; 1,5m; 2,0m; 2,5m
	Prop_Diam_base	18%; 36%; 54%; 72%; 90%
	Prop_Diam_topo	18%; 36%; 54%; 72%; 90%
	Número de segmentos	4; 6; 8; 20

Tabela 1. Domínios das dimensões dos modelos geométricos das aberturas zenitais estudadas

Fonte: Os autores.

Foram consideradas geometrias simplificadas na concepção da modelagem das tipologias estudadas (Figura 1), considerando a proteção solar apenas no Lanternim, uma vez que o elemento da marquise é geometricamente natural de se conceber, diferentemente dos demais casos, que demandariam um detalhe adicional para conceber um anteparo solar.

SIMULAÇÕES DE RADIAÇÃO SOLAR E ILUMINÂNCIA NATURAL

No presente estudo, o método numérico utilizado para calcular a radiação solar e a iluminância foi o *raytracing* (AYOUB, 2019; POGERE, 2001). Nesse método, o sol é considerado como fonte de luz e são empregados foto sensores, os quais são modelados por uma malha de pontos. Essa malha possui equidistância ortogonal de 0,5 m entre os pontos, conforme apresenta a Figura 2. A distribuição dos pontos foi realizada no piso em uma situação e nas paredes do ambiente modelado em outra situação.

A simulação da propagação da luz/radiação solar por meio do *raytracing*, os raios de luz representados por vetores, refletem ao entrar em contato com as superfícies do ambiente e da tipologia, levando em consideração as propriedades de cor e rugosidade dessas superfícies. Para esse propósito, foram adotadas propriedades de refletância constantes, padronizadas de acordo com a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C, 2021). Nas modelagens realizadas neste estudo, os índices de refletância utilizados foram de 70% para o teto, 50% para as paredes internas e 20% para o piso. Além disso, devido ao fato de que o vidro das aberturas também influencia na penetração da radiação solar e iluminação no ambiente, foi considerada uma transmissão luminosa de 84%.

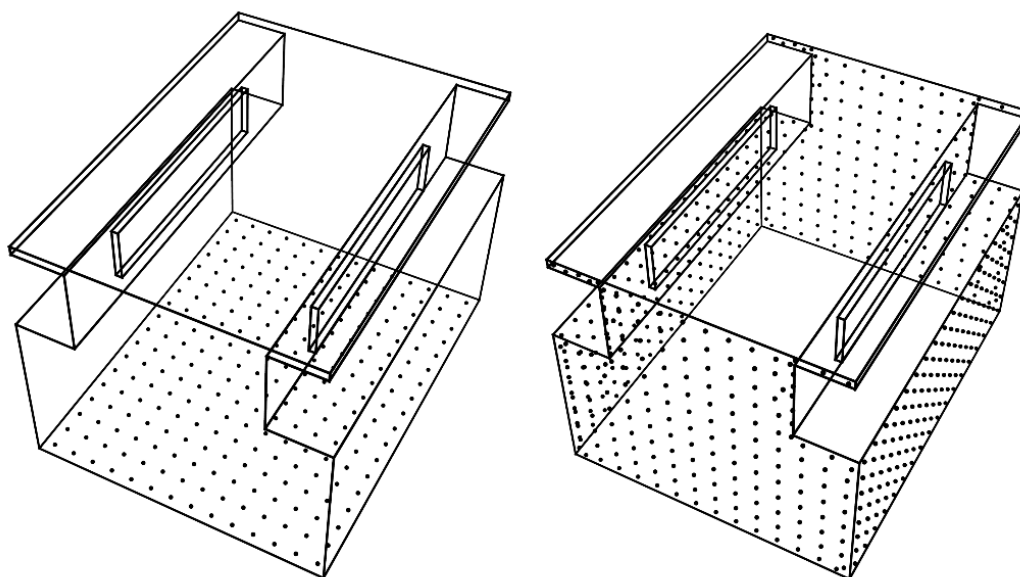


Figura 2. Local dos sensores de captação de radiação e iluminância: esquerda: sensores no piso; direita: sensores nas paredes

Fonte: Os autores

Para realizar os cálculos de radiação solar e iluminância da luz do dia foram usados os componentes *HB-Annual Radiation Results*, e *HB-Annual Daylight*, respectivamente, pertencentes à biblioteca do *Honeybee*. Estas funções fornecem dados de saída anuais. A avaliação do desempenho da iluminação natural foi realizada utilizando os valores de UDI, que representa a porcentagem de tempo em que a iluminância se manteve dentro da faixa especificada, levando em consideração uma janela temporal de ocupação do ambiente entre 8:00h e 16:00h. A Figura 3 ilustra o código do GH com os componentes do *Honeybee* que consistem na implementação da simulação da entrada de iluminação e de radiação solar no interior do ambiente através das aberturas zenitais.

Para estas simulações foi considerada a localidade da cidade de João Pessoa (Latitude: 7,1° Sul; Longitude: 34,9° Oeste), por meio da base de dados meteorológica em arquivo na extensão epw (*EnergyPlus Weather file*) com dados coletados através do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), disponível no endereço virtual climate.onebuilding.org. Este arquivo climático possui dados horários de radiação solar considerando anos meteorológicos típicos (*TMY-Typical Meteorological Years*), com valores típicos médios correspondentes a vários anos de medições de campo. Os resultados da simulação são valores relativos a cada ponto do grid de sensores (Figura 2) e foram gravados os valores máximos, mínimos e médios de cada modelo instanciado no espaço de soluções.

A métrica do UDI foi proposta inicialmente pelos autores Nabil e Mardaljevic (2005) para prever a condição de iluminância em lux ao longo de um ano, considerando uma faixa de iluminância entre 100 lux e 2000 lux. Este limite inferior de iluminância corresponde ao limiar de utilidade da iluminação natural, demandando iluminação elétrica e, o limite superior corresponde à produção de desconforto visual por ofuscamento e/ou a insolação indesejada do ambiente.

Diversas proposições de valores diferentes sobre estes limites inferiores e superiores para o UDI foram apresentadas em publicações posteriores. Mardaljevic et al. (2012) afirmam que a faixa entre 300 lux e 3000 lux está relacionada a uma improvável situação de uso de luz elétrica, contudo afirmam também que há considerável incerteza sobre a necessidade de uso de luz artificial na situação de iluminância na faixa entre 100 lux e 300 lux. Por outro lado, Brzezicki, Regucki e Kasperski (2021) reúnem informações que o nível de iluminância superior a 2000 lux já estaria associado a um ofuscamento visual perceptível. Neste estudo, foi considerada um intervalo de iluminância entre 150 lux e 2000 lux por ser uma combinação das indicações mais recente da literatura, e uma janela de tempo de análise da iluminância diária entre 8:00h e 16:00h. Para a análise do nível insolação indesejada do ambiente através do nível de radiação solar direta incidente no interior do ambiente, foi considerado o limite de 50 W/m² proposto por vários autores (Garcia e Pereira, 2009; Garcia e Pereira, 2020; Reinhart, 2004; Van den Wymeleberg, 2012).

Avaliação do desempenho de aberturas zenitais quanto à radiação SOLAR e iluminação natural em espaços internos usando a modelagem paramétrica e a simulação numérica

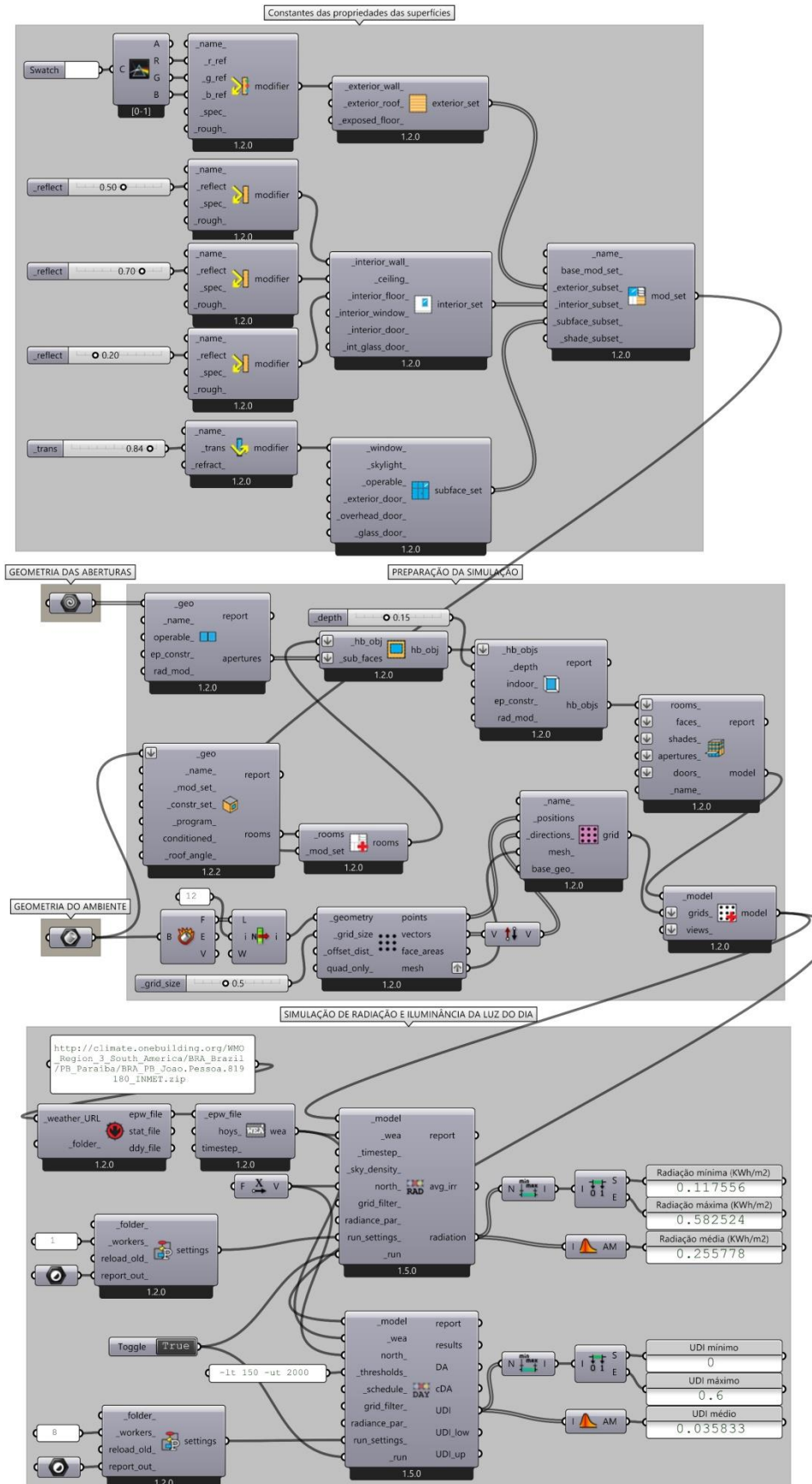


Figura 3. Código algorítmico do GH com os componentes do *Honeybee* com as configurações, preparação e simulação de radiação e iluminância da luz do dia

Fonte: Os autores

PÓS-PROCESSAMENTO DOS RESULTADOS

Ao processar as simulações de cada caso (quatro tipologias de abertura zenital, duas orientações ao norte, sensores nas paredes ou no piso), foram gerados arquivos CSV (*comma separated value*) tabelando tanto os dados de entrada com os parâmetros definidores da geometria dos modelos, quanto os resultados de radiação e UDI. Estas tabelas em CSV consistem no espaço de soluções discretizado pelo modelo paramétrico generativo, contendo os parâmetros definidores do ambiente e das aberturas zenitais e, os valores mínimos, médios e máximos de radiação e UDI no interior dos ambientes. Estes espaços de soluções em forma de tabela foram processados por meio do *python script*, utilizando as bibliotecas *pandas* e *numpy*.

Foram filtradas as instâncias do espaço de soluções que apresentaram melhores valores médios de UDI no período anual, observando os valores de radiação anual acumulada resultante para estes casos, considerando os dois casos de orientação ao norte e posição dos sensores (piso ou parede). Foram visualizadas as distribuições dos valores de UDI e radiação gerados por gráficos de falsa cor para os melhores casos, a partir dos valores dos sensores distribuídos nas paredes e nos pisos dos ambientes. Posteriormente, para os melhores casos dentre as tipologias estudadas, foram extraídos os históricos horários da média de radiação captadas pelos sensores do ambiente, bem como a média de UDI considerando janelas temporais diárias. Com estes resultados, as configurações geométricas dos ambientes e das aberturas zenitais foram avaliadas e verificadas as características que resultaram em um melhor desempenho luminoso e se houve ocorrência de insolação indesejada (acima de $50W/m^2$) do ambiente por excesso de incidência solar no interior.

Nos resultados apresentados, buscou-se encontrar no espaço de soluções as instâncias com maiores valores de UDI para piso e parede e menor radiação no interior do ambiente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 4 são exibidos gráficos *Hexbin*, que consistem em mostrar o acúmulo de incidências do espaço de soluções no que concerne aos valores médios anuais de UDI para o piso e para as paredes simultaneamente, dentre as tipologias estudadas e para as duas orientações ao Norte consideradas. Quanto mais escura as regiões hexagonais do gráfico, significa que houve mais instâncias no espaço de soluções com aqueles valores de UDI de parede e piso simultaneamente. Observa-se que em todas as tipologias estudadas e para as duas orientações ao norte, houve mais incidências de valores médios simultaneamente para piso e parede muito altos (>80%) e muito baixos (~10%). Este resultado aponta que quando o valor se apresentou alto para o piso, também foi para as paredes na mesma instância do espaço de soluções. Considera-se aqui que um valor médio de UDI é alto quando acima de 80%, considerando-se este como bom, representando o percentual do tempo de ocupação ao longo do ano dentro da faixa de iluminância estipulada. Valores de UDI acima de 90% foram considerados como um desempenho muito bom ou excelente.

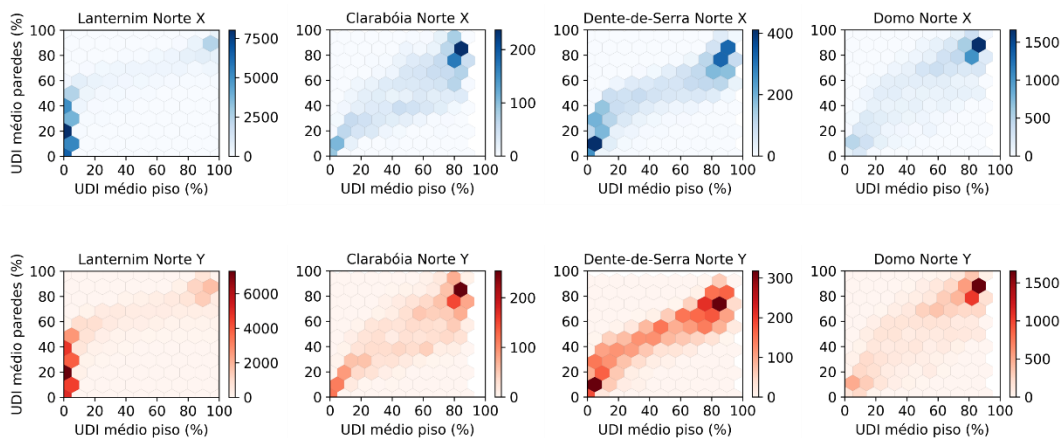


Figura 4. Gráfico *Hexbin* das instâncias do espaço de soluções amostrado com os valores de UDI médio anual para piso e parede para as duas orientações ao Norte.

Fonte: Os autores

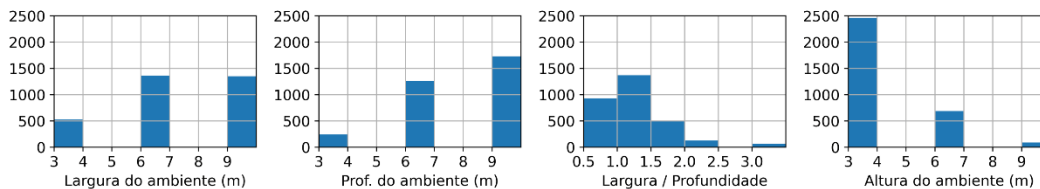
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos, separados em subseções com cada tipologia estudada, com os resultados anuais de radiação e de UDI nas paredes e pisos das melhores instâncias e históricos horários médios de radiação e diários médios de UDI. Os melhores resultados são aqueles que apresentam maior índice de UDI e menor incidência direta de radiação. São mostrados quatro casos selecionados do espaço de soluções gerados para as tipologias estudadas, sendo dois referentes a sensores na parede e dois referentes ao piso, cada par de resultados com uma orientação ao norte distinta, considerando também valores horários para estes casos selecionados. Estes resultados separados por tipologias mostram que as dimensões do ambiente convergiram para algumas dimensões e formatos específicos. Nas subseções seguintes serão também mostrados histogramas extraídos do espaço de soluções gerado pela modelagem e simulação paramétricas contendo apenas os casos de desempenho simultâneo de UDI acima de 80% nas paredes e piso, evidenciando a maior incidência de dimensões do ambiente e dimensões das aberturas zenitais para as tipologias estudadas e para as duas orientações ao Norte consideradas.

LANTERNIM

Na Figura 5 são apresentados os histogramas do espaço de soluções filtrado com as instâncias de ambientes com Lanternim que apresentaram simultaneamente valores de UDI de piso e parede acima de 80%. Observa-se nesta figura que os ambientes com Lanternim tiveram maior incidência com dimensões maiores (9 m), proporção entre Largura e Profundidade em planta igual a 1,0 e altura do ambiente mais baixo (3 m), para as duas orientações ao Norte.

De forma análoga à Figura 5, na Figura 6 são apresentados os histogramas com as incidências de melhor desempenho simultâneo de piso e parede, evidenciando as dimensões da abertura zenital do tipo Lanternim.

Lanternim Norte X



Lanternim Norte Y

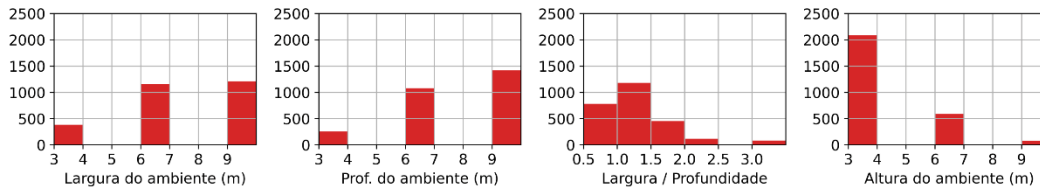


Figura 5. Histograma com as incidências das dimensões dos ambientes com Lanternim que apresentaram UDI acima de 80% simultaneamente para piso e parede.

Fonte: Os autores

Lanternim Norte X

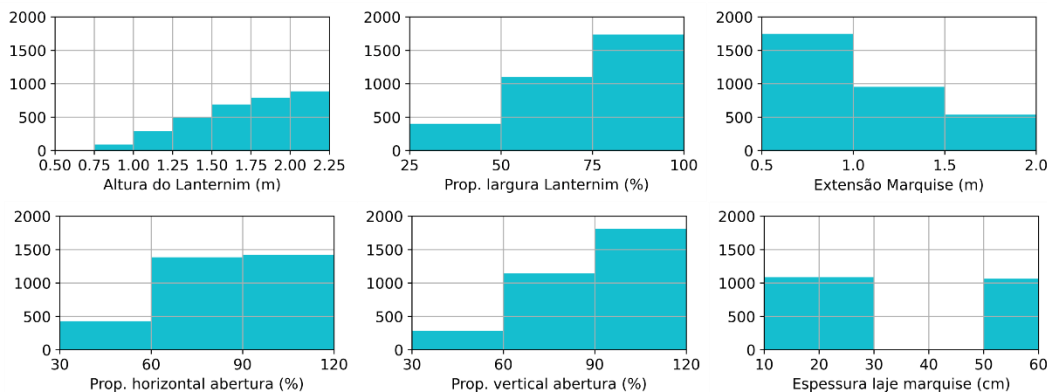
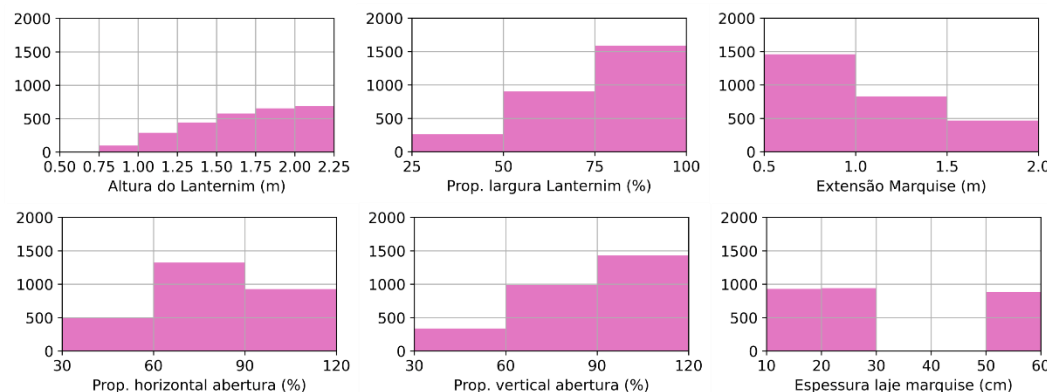


Figura 6. Histograma com as incidências das dimensões da abertura do Lanternim que apresentaram UDI acima de 80% simultaneamente para piso e parede.

Fonte: Os autores

Lanternim Norte Y



Os histogramas das Figuras 5 e 6 mostram que a frequência de instâncias do espaço de soluções do caso Lanternim não apresentou substancial diferença quando se compara as orientações desta abertura zenital em relação ao Norte. Na Figura 5 se observa que houve maior incidência de ambientes com planta quadrada ou com mais profundidade do que largura aliada a uma maior incidência de ambientes com dimensões de 9 m e 6 m, respectivamente. Por outro lado, a altura do ambiente teve incidência maior de 3 m. Isto evidencia que o ambiente com a abertura Lanternim apresenta desempenho de UDI acima de 80% para piso e paredes com ambientes de baixa altura e planta de maiores dimensões. Na Figura 6 se observa que as dimensões do Lanternim apresentaram maior incidência com altura de 2.0 m; proporção da largura do Lanternim em relação a largura do ambiente acima de 75%; marquises com a

extensão mínima de 50 cm; proporção vertical da abertura transparente a 90% e horizontal em 60%; e indiferença quanto à espessura da laje da marquise.

A Figura 7 exhibe os resultados anuais de radiação e UDI no período anual, mostrando em falso-color a distribuição dos valores destes dois índices de desempenho, enumerando a instância selecionada, e as dimensões do ambiente e da abertura zenital.

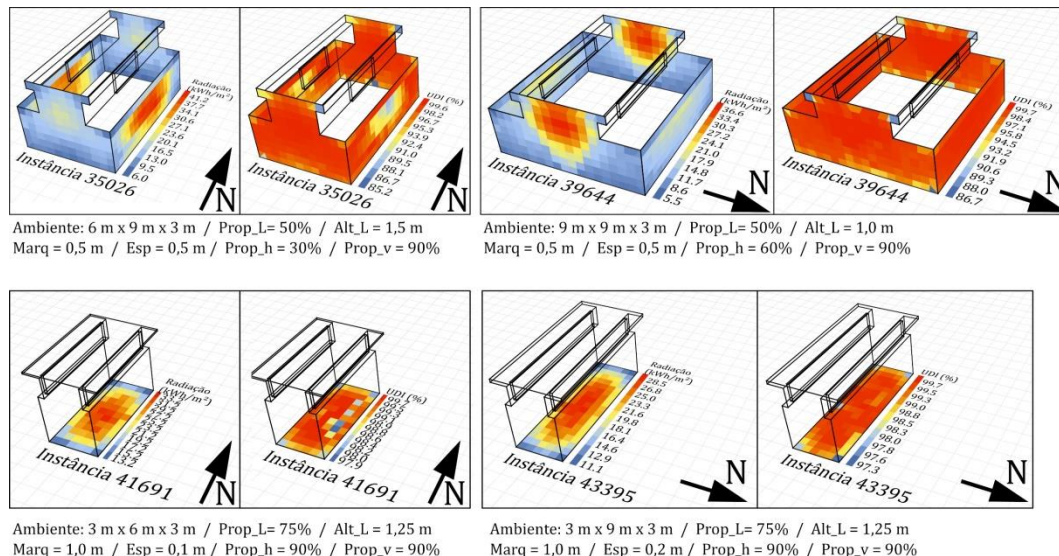


Figura 7. Resultados anuais máximos de radiação solar acumulada e UDI em paredes e pisos para as instancias do lanternim com melhor desempenho

Fonte: Os autores

Em todos estes quatro casos selecionados do Lanternim (Figura 7), os valores de UDI no período de um ano estiveram entre 80% no mínimo e no máximo 99,7%. Os níveis de radiação máxima acumulada no ano observados nestas instâncias selecionadas são similares, contudo, menores valores são observados nas paredes inclusive com maior frequência na área total. No caso da instância 39644, com um ambiente maior planta (9 m x 9m) e as aberturas do Lanternim apontadas para as direções norte e sul, verifica-se que o desempenho das paredes quanto ao UDI foi bem uniforme, apresentando também maior concentração de radiação apenas nas partes superiores do Lanternim. Não se verificou na instância 39644 uma diminuição dos níveis de UDI nas regiões de maior intensidade e concentração de radiação. No piso (instancias 41691 e 43395), as duas orientações das aberturas em relação ao norte não diferenciaram muito os níveis de radiação nem a uniformidade de valores de UDI.

Quanto à forma do ambiente, todas estas quatro instâncias apresentaram uma altura de 3,0 m, contudo o desempenho das paredes associado a uma planta do ambiente com forma mais quadrada, enquanto o desempenho dos pisos em uma planta mais retangular. A configuração do Lanternim para o desempenho na parede esteve associada a marquises mais curtas (0,5 m) e largura da abertura variada. Para o desempenho da parede a marquise apresentou um comprimento mais longo (1,0 m) com as aberturas no máximo dentro o domínio definido.

A Figura 8 apresenta a variação sazonal das médias de radiação e UDI nestas instâncias de Lanternim selecionadas dos espaços de soluções gerado. Observa-se que para os quatro casos selecionados, a média dos valores de radiação nos sensores em cada hora apresentaram um máximo estável em 10 W/m² (linhas em cinza), abaixo do limite superior estabelecido de 50 W/m² (linha em vermelho). Assim, por mais que tenha apresentado concentrações de incidência de radiação em alguns pontos de algumas paredes e no centro do ambiente, o nível de radiação incidente não demonstrou ser muito alto no geral. A instância 39644 apresentou um máximo de radiação incidente horária um pouco abaixo do que as demais instancias selecionadas, podendo indicar que para as paredes, a melhor orientação das aberturas do Lanternim seja na direção norte-sul.

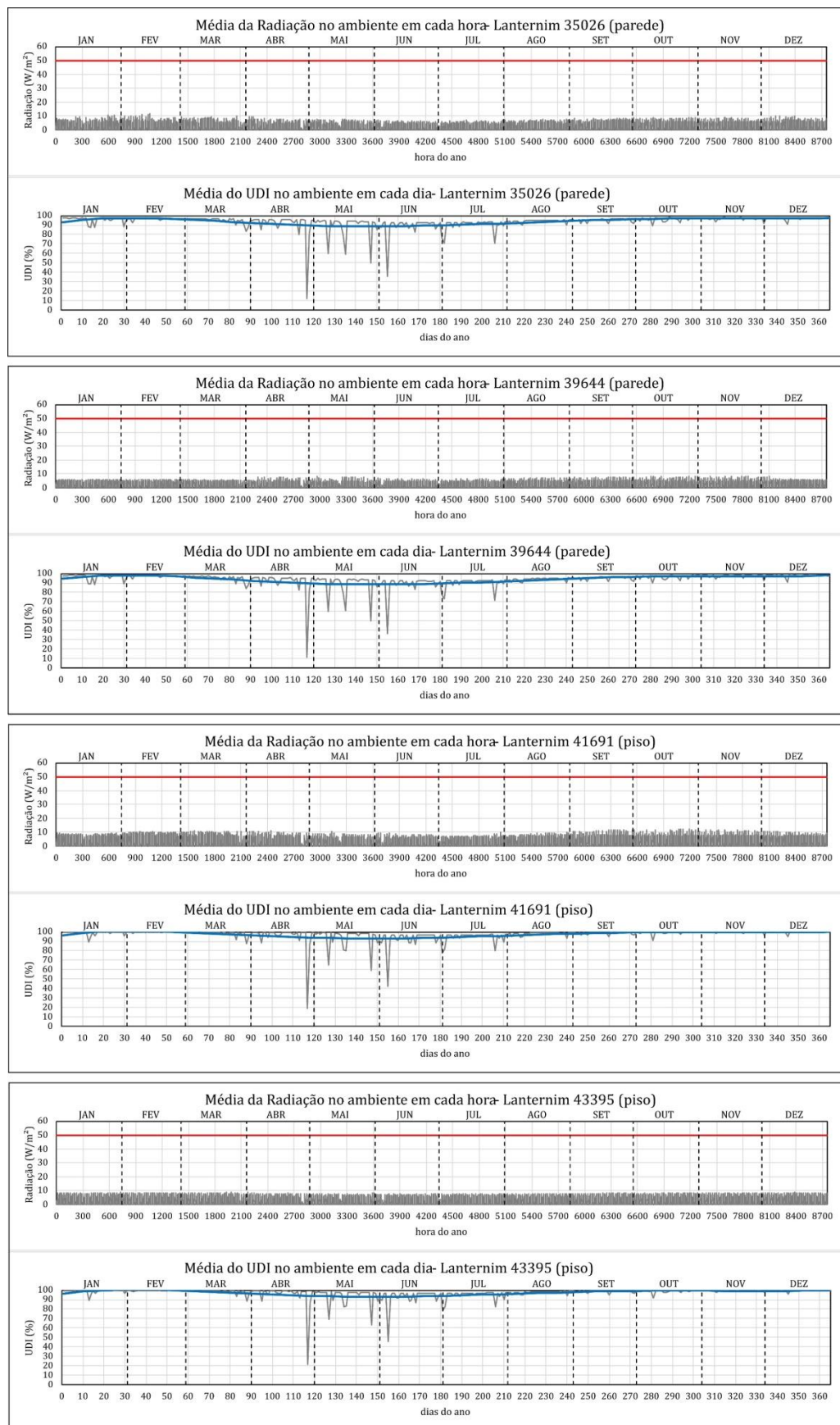


Figura 8. Resultados da média da radiação no ambiente em cada hora e média de UDI no ambiente a cada dia para as instancias do lanternim com melhor desempenho anual

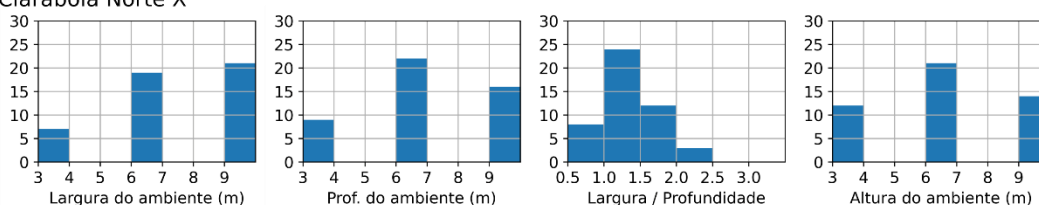
Fonte: Os autores

Quanto ao valor médio de UDI em cada dia, todas as instancias selecionadas apresentaram na maior parte dos meses do ano um valor médio muito próximo a 100% (linhas em cinza), com valores médios (linha em azul) de no mínimo de 90% entre os meses de março e agosto. Contudo, são observados vales pontuais entre o final de abril e o final de julho. Estes períodos de decréscimo dos valores médios diários de UDI podem estar associados à uma menor incidência de radiação solar na região geográfica analisada.

CLARABOIA

Observa-se na Figura 9 que os ambientes com a Claraboia com o Norte alinhado com o eixo X tiveram maior incidência com dimensões maiores de planta (6m e 9 m), proporção entre Largura e Profundidade em planta igual a 1,0 e altura do ambiente em altura em 6 m. Observa-se um padrão de incidências semelhante quando a orientação do norte está alinhada ao eixo Y, diferenciando-se na proporção da planta, com menor largura e maior profundidade.

Claraboia Norte X



Claraboia Norte Y

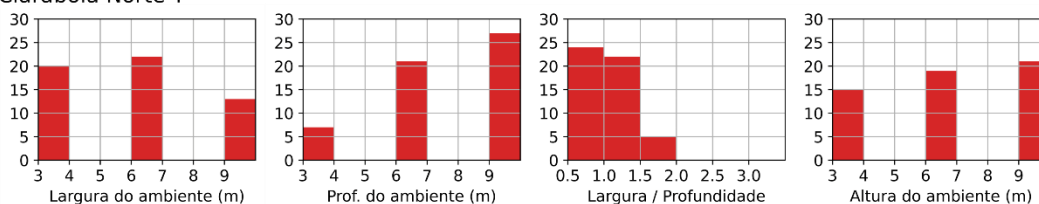
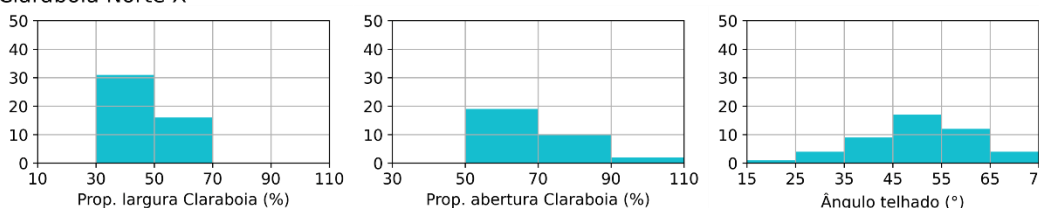


Figura 9. Histograma com as incidências das dimensões dos ambientes com Claraboia que apresentaram UDI acima de 80% simultaneamente para piso e parede.

Fonte: Os autores

Quanto às instancias no espaço de soluções da Claraboia com desempenho simultâneo de UDI de piso e parede acima de 80%, a Figura 10 exhibe as dimensões deste tipo de abertura zenital com maiores incidências.

Claraboia Norte X



Claraboia Norte Y

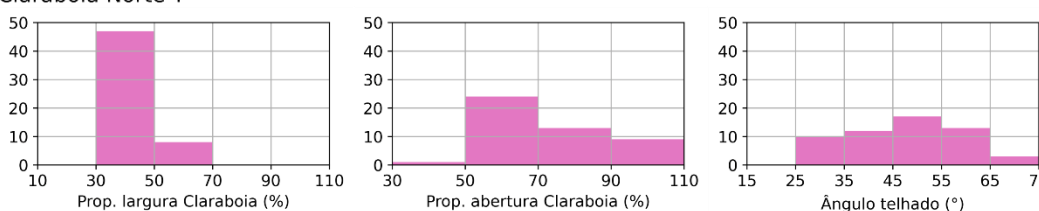


Figura 10. Histograma com as incidências das dimensões da abertura da Claraboia que apresentaram UDI acima de 80% simultaneamente para piso e parede.

Fonte: Os autores

Observa-se na Figura 10 que a proporção entre a largura do ambiente e a Claraboia; a proporção da abertura da Claraboia e o ângulo do telhado se mostraram com distribuição de incidências de valores semelhante para as duas orientações ao Norte, respectivamente 30% da largura, 50% de abertura e inclinação em 45°.

A Figura 11 ilustra os resultados anuais de radiação e UDI para duas instâncias selecionadas como as com melhor média de UDI ao longo do ano: a 1053 para os resultados de parede para as duas orientações das aberturas em relação ao norte e, a 2187 para os resultados no piso para as duas orientações. Nestas duas instâncias as dimensões do ambiente foram as mesmas: 3 m x 3 m x 3 m. A ocorrência das mesmas instâncias em relação ao norte, indicam que a claraboia pode não ter influência direta da orientação de suas aberturas, contudo, observa-se que tanto nos casos de parede quanto de piso que a uniformidade de radiação e UDI se mostraram diferentes. Tanto na parede quanto no piso quanto, os valores de radiação sobretudo, foram mais concentrados em pontos específicos quanto a orientação das aberturas esteve na direção norte-sul.

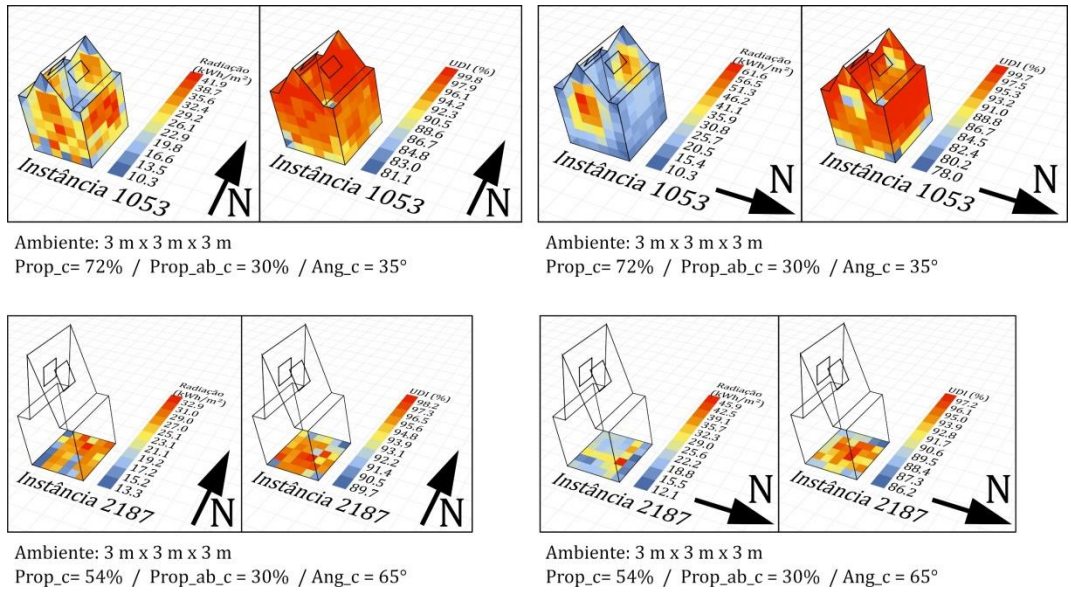


Figura 11. Resultados anuais máximos de radiação solar acumulada e UDI em paredes e pisos para as instancias da claraboia com melhor desempenho

Fonte: Os autores

Em todas as instancias de claraboia selecionadas os valores de UDI para todo o ano variou entre 78% e 99,8%, indicando um bom desempenho luminoso. O desempenho das paredes em termos de iluminância foi bom, com pontos de menor valor de UDI nos cantos inferiores das paredes nas duas orientações das aberturas e, no caso da orientação Norte-Sul, apresentou concentrações de valores menores de UDI e maiores de radiação na parte superior das paredes sem aberturas. Esta coincidência de menor valor de UDI e valores mais elevados de radiação podem estar relacionadas com o limite superior de 2000 lux e pode estar associada a um superaquecimento. Para as instâncias com melhor desempenho no piso, a orientação das aberturas na direção Norte-Sul apresentou uma menor frequência de pontos com radiação mais elevada.

A Figura 12 ilustra os resultados horários de radiação e diários de UDI para estas duas instâncias de claraboia apresentadas na Figura 6. Observa-se que os picos dos valores médios de radiação horária no ambiente para o caso das paredes esteve em torno de 10 W/m² e 20 W/m² para as duas orientações as aberturas e relação ao norte.

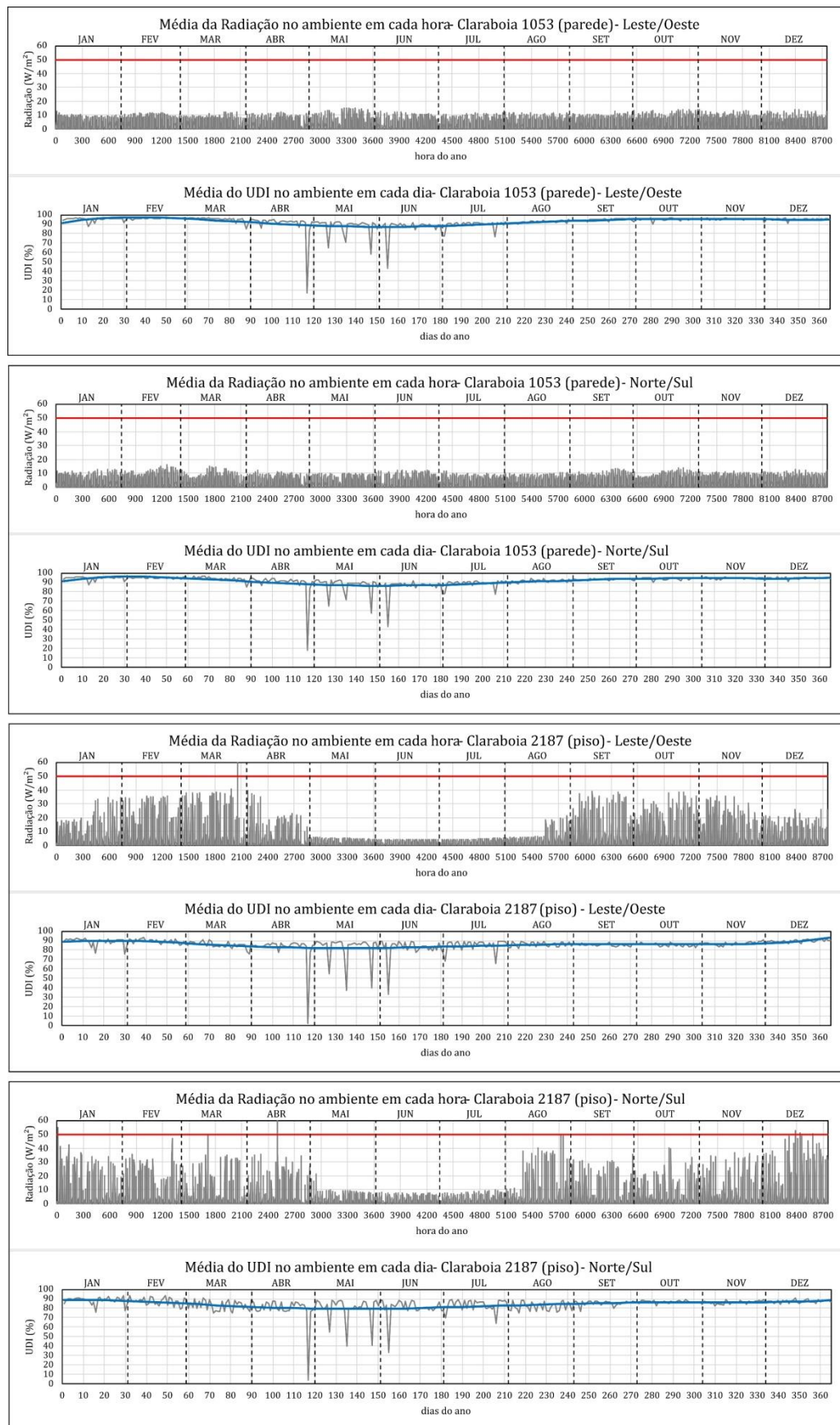


Figura 12. Resultados da média da radiação no ambiente em cada hora e média de UDI no ambiente a cada dia para as instancias da claraboia com melhor desempenho anual

Fonte: Os autores

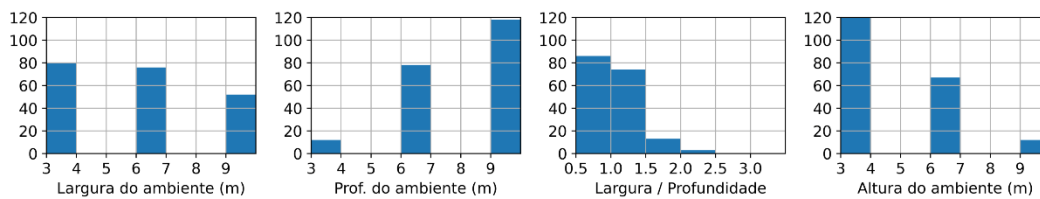
Observa-se que variações da linha média (azul) dos valores médios de UDI, observa-se que esteve entre 90% e 100% para as paredes e entre 80% e 90% para o piso, indicando bons valores relativos à iluminância nestas instâncias.

Em relação ao desempenho das instâncias de claraboia com melhor desempenho no piso, observa-se na Figura 12 que entre janeiro e abril, e entre os agosto e dezembro, os valores médios de radiação direta apresentaram picos bem superiores ao patamar de 10 W/m^2 observados durante o período entre os meses de maio e julho, ultrapassando em alguns dias o limite de 50 W/m^2 . Este resultado indica que a claraboia está mais suscetível a uma insolação indesejada do ambiente devido a uma incidência de radiação direta através da abertura zenital no contexto da localidade de baixa latitude.

DENTE DE SERRA/SHED

A Figura 13 exibe as incidências das instâncias dos ambientes com aberturas do tipo dente de serra/shed com desempenho de UDI acima de 80% simultaneamente para piso e parede, dentro do espaço amostral de soluções. Este resultado mostra que para as duas orientações ao Norte o padrão de maiores incidências é semelhante, apesar de ter um número maior de instancias para os casos de orientação com o Norte alinhado com o eixo X.

Dente-de-serra Norte X



Dente-de-serra Norte Y

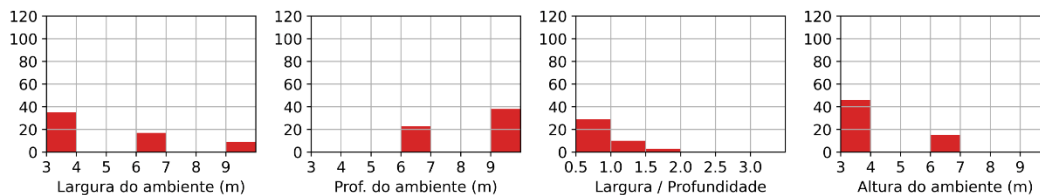


Figura 13. Histograma com as incidências das dimensões dos ambientes com Dente de Serra que apresentaram UDI acima de 80% simultaneamente para piso e parede.

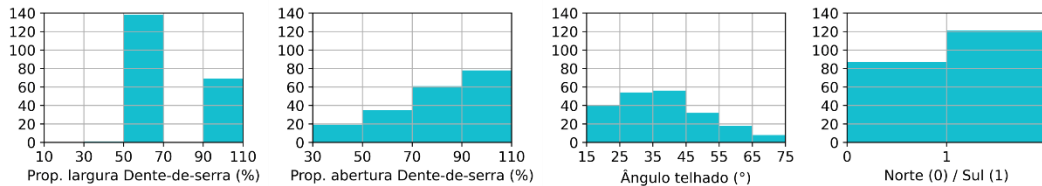
Fonte: Os autores

Neste padrão de dimensões do ambiente com a abertura zenital do tipo dente de serra/shed, observa-se na Figura 13 que houve uma distribuição praticamente uniforme nas incidências da largura do ambiente; uma predominância de ambientes com profundidade maior (9 m) e ambientes de planta quadrada ou com maior profundidade do que largura. Quanto à altura do ambiente, houve uma clara predominância de ambientes com menor altura (3 m). Este padrão é observado tanto nas orientações do Norte alinhado ao X ou Y, contudo, com mais instâncias com UDI simultaneamente superior a 80% para piso e paredes quando o alinhamento do norte é em relação ao eixo X.

Quanto às dimensões do dente de serra/shed, a Figura 14 exibe evidências de que há uma semelhante no número de incidências das dimensões preponderantes a depender da orientação ao Norte, exceto quando relativo à orientação da abertura Norte/Sul ou Leste/Oeste, com maior incidência quando a abertura é voltado para o Sul quando o Norte está a X e a Leste quando o Norte está voltado para o eixo Y. Observa-se na Figura 14 que a proporção da largura do ambiente e do dente de serra/shed apresentou maior incidência na proporção de 50%; Abertura acima de 90%; e ângulo da superfície do telhado em torno de 30%.

Avaliação do desempenho de aberturas zenitais quanto à radiação SOLAR e iluminação natural em espaços internos usando a modelagem paramétrica e a simulação numérica

Dente-de-serra Norte X



Dente-de-serra Norte Y

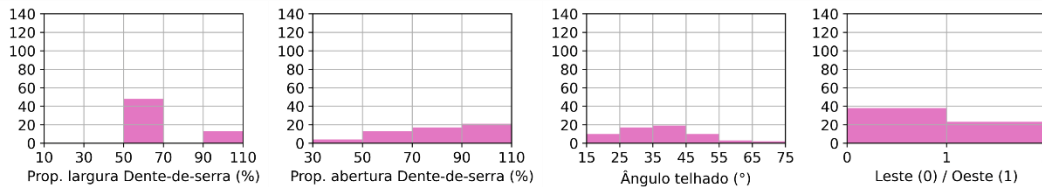
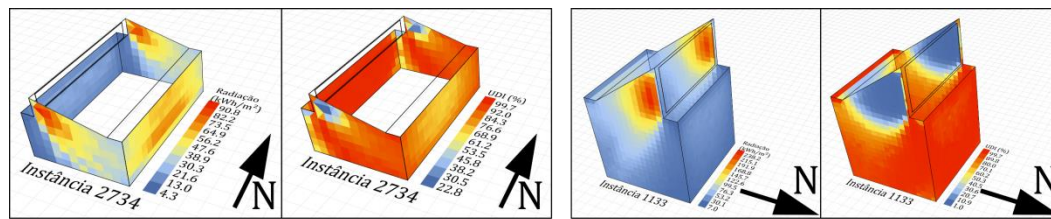


Figura 14. Histograma com as incidências das dimensões da abertura do Dente de Serra que apresentaram UDI acima de 80% simultaneamente para piso e parede.

Fonte: Os autores

Na Figura 15 são ilustradas as quatro instâncias da tipologia dente de serra/shed que apresentaram melhor desempenho, extraídas do espaço de soluções gerado parametricamente, resultando em instâncias distintas das dimensões do ambiente e da abertura zenital, como também para as configurações de sensores nas paredes e no piso do ambiente.

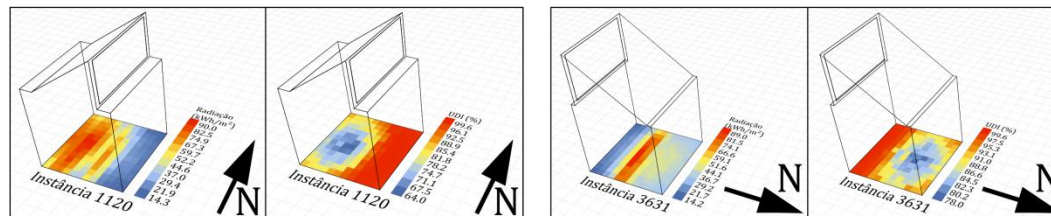


Ambiente: 6 m x 9 m x 3 m
Prop_d= 72% / Prop_ab_d = 90% / Ang_d = 15°

Ambiente: 9 m x 9 m x 9 m
Prop_d= 72% / Prop_ab_d = 90% / Ang_d = 35°

Figura 15. Resultados anuais máximos de radiação solar acumulada e UDI em paredes e pisos para as instancias do dente de serra com melhor desempenho

Fonte: Os autores



Ambiente: 6 m x 6 m x 6 m
Prop_d= 72% / Prop_ab_d = 90% / Ang_d = 35°

Ambiente: 6 m x 6 m x 6 m
Prop_d= 90% / Prop_ab_d = 90% / Ang_d = 35°

No desempenho das paredes, os valores de UDI variaram bastante, apresentando um valor mínimo de 22,8 % para a instância 2734 (abertura a oeste) e 1% para a instância 1133 (abertura ao norte). Nestes dois casos, observa-se na Figura 8 que as regiões de valores mais baixos de UDI coincidem com as regiões de valores moderados e altos de radiação, o que indica que os valores limites de 2000 lux foram ultrapassados e, possivelmente se configurando em casos de superaquecimento do ambiente. Observa-se que a instância com ambiente de maiores dimensões (1133) obteve um excelente resultado de UDI elevado e uniforme por quase toda a extensão da parede, exceto nas partes superiores próximas à abertura zenital. Em relação ao desempenho das instâncias com sensores nos pisos, em ambos os casos os valores mínimos de UDI tiveram área considerável relacionada e, localizada no lado oposto ao da abertura.

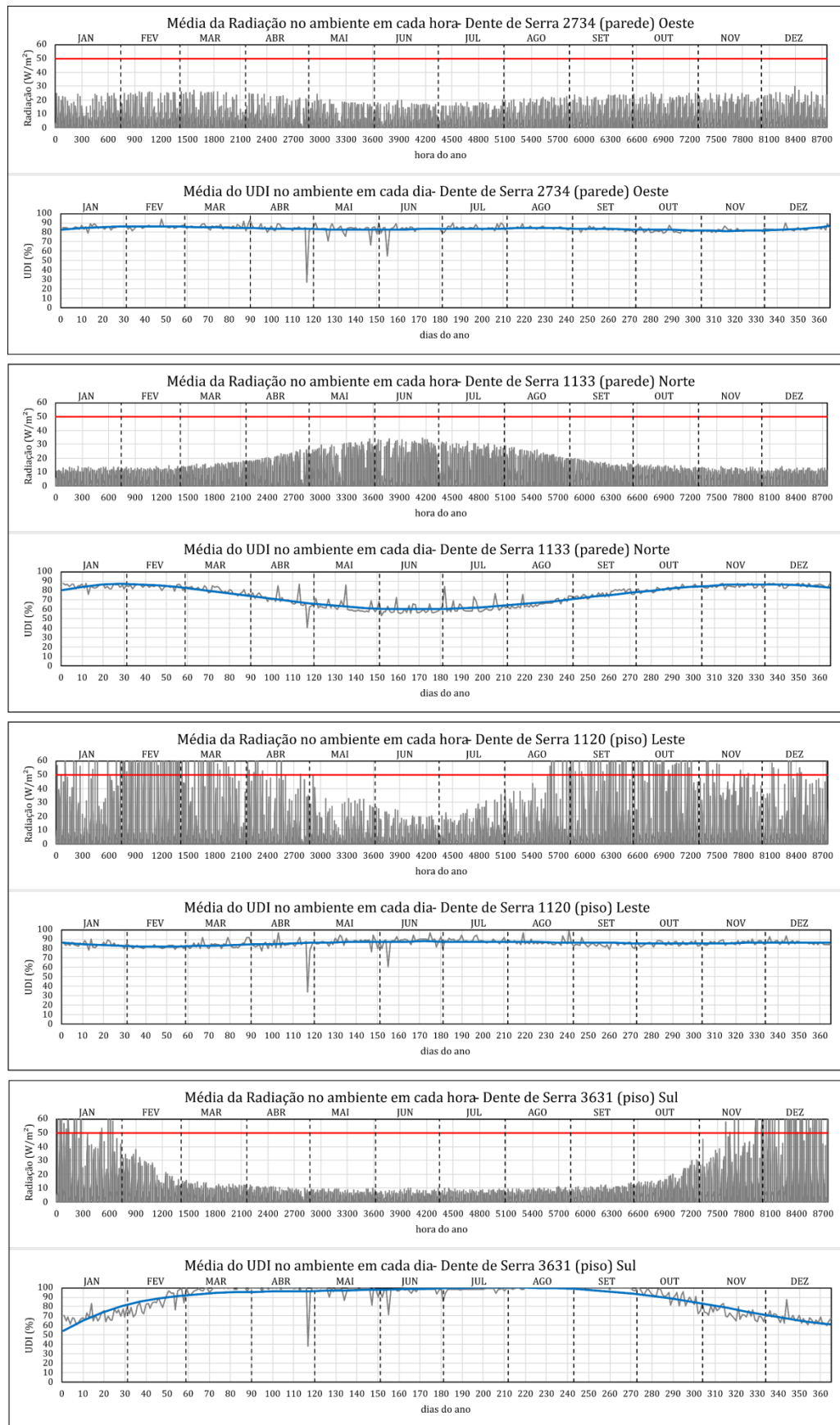


Figura 16. Resultados da média da radiação no ambiente em cada hora e média de UDI no ambiente a cada dia para as instancias do dente de serra com melhor desempenho anual

Fonte: Os autores

Contudo, essas regiões de menores valores de UDI estiveram associadas a valores maiores de radiação na instância com a abertura zenital voltada para o leste (1120) do que a que esteve voltada para o lado sul (3631). Na Figura 16 estão ilustrados os gráficos temporais de radiação horária e UDI diário para estas quatro instâncias selecionadas no espaço de soluções.

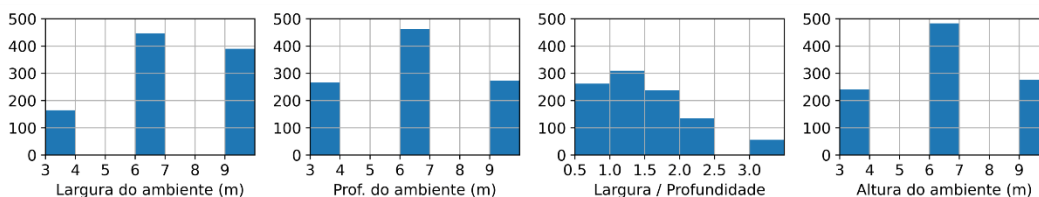
Observa-se na Figura 16 que o resultado na parede na instância com menor altura do ambiente (2734) apresentou um UDI médio do ambiente acima de 80% durante todo o ano, excetuando-se alguns dias. Adicionalmente, esta instância apresentou valores máximos de radiação com padrão uniforme ao longo do ano, com valores em oscilando entre 20 W/m² e 30 W/m². Apesar do resultado da parede no ambiente com ambiente com maior dimensão de planta e com mais altura (1133) ter apresentado um resultado uniforme por quase toda a parede (Figura 8), o resultado temporal de UDI mostrou importante decréscimo entre os meses de março e setembro e, coincidentemente apresentou um aumento de radiação nesses meses.

No desempenho temporal do dente de serra/shed com os sensores no piso (Figura 16), principalmente a instância com a abertura zenital voltada para o leste (1120), em praticamente todo o ano a radiação horária média no ambiente ultrapassou o limite de 50 W/m². Em contrapartida, a instância com a abertura voltada para o sul apresentou valores de radiação média no ambiente superior nos meses de janeiro, novembro e dezembro. Nesses meses, o valor médio de UDI diário no ambiente, foi bem mais baixo: em torno de 60% em alguns dias.

DOMO DE VIDRO

Por fim, de forma análoga, a Figura 17 exhibe os resultados das incidências das dimensões do ambiente que tinham como abertura zenital o domo de vidro, dentro da filtragem do subdomínio do espaço de soluções onde o UDI para piso e parede apresentaram valores superiores a 80% simultaneamente.

Domo Norte X



Domo Norte Y

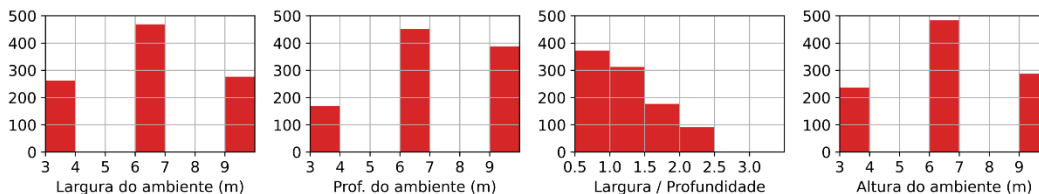


Figura 17. Histograma com as incidências das dimensões dos ambientes com o Domo que apresentaram UDI acima de 80% simultaneamente para piso e parede.

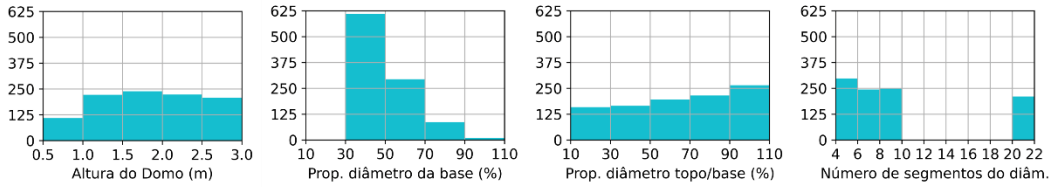
Fonte: Os autores

Na Figura 17 pode-se observar que o padrão de incidências relativas às dimensões do ambiente com a abertura zenital do tipo domo de vidro mostrou padrões similares nas duas orientações ao Norte, exceto para a relação entre largura e profundidade da planta, onde no Norte ao X apresenta um fator de 1,0 (ambiente de planta quadrada) e no Norte ao Y apresenta um fator de 0,5 (Maior profundidade do que largura do ambiente). Neste caso, houve maior incidência de ambientes com largura, profundidade e altura com 6 m.

Na Figura 18 são exibidos os histogramas com as incidências das dimensões do domo de vidro que apresentaram simultaneamente valores de UDI acima de 80% para piso e parede. Observa-se que o padrão para as duas orientações ao Norte é similar, apresentando uma distribuição uniforme de altura do domo de vidro entre 1,0 m e 2,5 m; maior incidência da proporção do

diâmetro da base em relação à planta do ambiente em 30%; proporção entre os diâmetros do topo e da base acima de 90%; e uma uniformidade no número de segmentos do domo de vidro entre 4 e 10.

Domo Norte X



Domo Norte Y

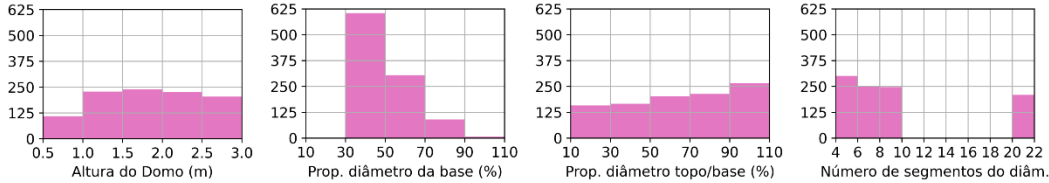
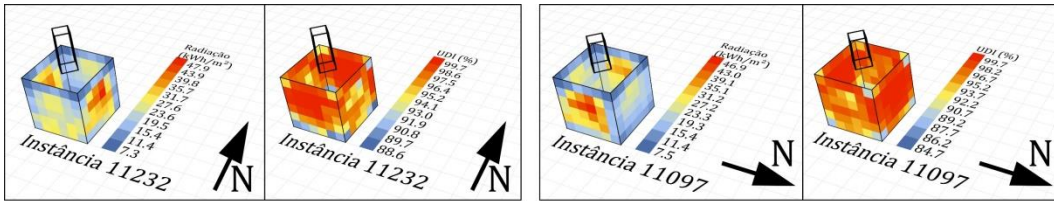


Figura 18. Histograma com as incidências das dimensões da abertura do Domo que apresentaram UDI acima de 80% simultaneamente para piso e parede.

Fonte: Os autores

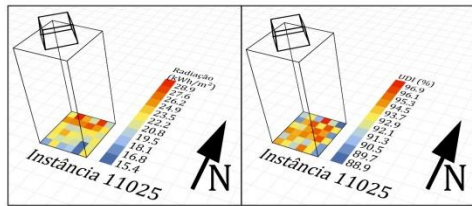
A Figura 19 ilustra os resultados de duas instâncias distintas com os sensores na parede (11232 e 11097) e, a mesma instância com os sensores no piso (11025). Nestas quatro melhores instâncias selecionadas, os valores mínimos de UDI ao longo do ano foram de no mínimo 84,7%, associados a regiões pontuais no interior do ambiente no caso das paredes, e com distribuição heterogênea para o caso dos sensores localizados no piso.



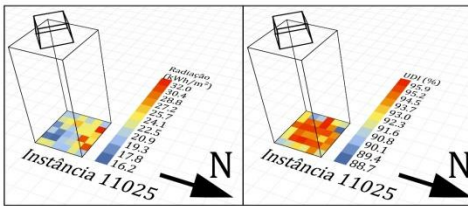
Ambiente: 3 m x 3 m x 3 m / Prop_Diam_base= 36%
Prop_Diam_topo = 90% / H_domo = 2,0 m / Segm_domo = 4

Ambiente: 3 m x 3 m x 3 m / Prop_Diam_base= 36%
Prop_Diam_topo = 90% / H_domo = 1,5 m / Segm_domo = 4

Figura 19. Resultados anuais máximos de radiação solar acumulada e UDI em paredes e pisos para as instancias do domo com melhor desempenho



Ambiente: 3 m x 3 m x 6 m / Prop_Diam_base= 72%
Prop_Diam_topo = 90% / H_domo = 1,0 m / Segm_domo = 4



Ambiente: 3 m x 3 m x 6 m / Prop_Diam_base= 72%
Prop_Diam_topo = 90% / H_domo = 1,0 m / Segm_domo = 4

Fonte: Os autores

Estas instâncias com abertura zenital do tipo domo de vidro apresentaram dimensões da planta do ambiente de 3 m x 3 m e, altura de 3 m para as instâncias com sensores nas paredes e 9 m para os sensores localizados no piso. Apesar da pequena abertura horizontal do domo de vidro no caso das paredes (36% * 3 m = 1.08 m), esta já foi suficiente para gerar valores altos de UDI por todas as paredes, excetuando-se nas regiões dos cantos inferiores. Os valores de radiação mais elevados nas paredes se localizaram naquelas voltadas para o leste e oeste, sem apresentar valores muito baixos de UDI nestas mesmas regiões. No caso dos resultados no piso, houve uma certa heterogeneidade nos valores de UDI, entretanto sem grande variação dos valores (entre 88.7% e 96.9%), e com valores máximos de radiação em regiões pontuais.

A Figura 20 apresenta os resultados temporais de radiação e UDI referentes ao domo de vidro.

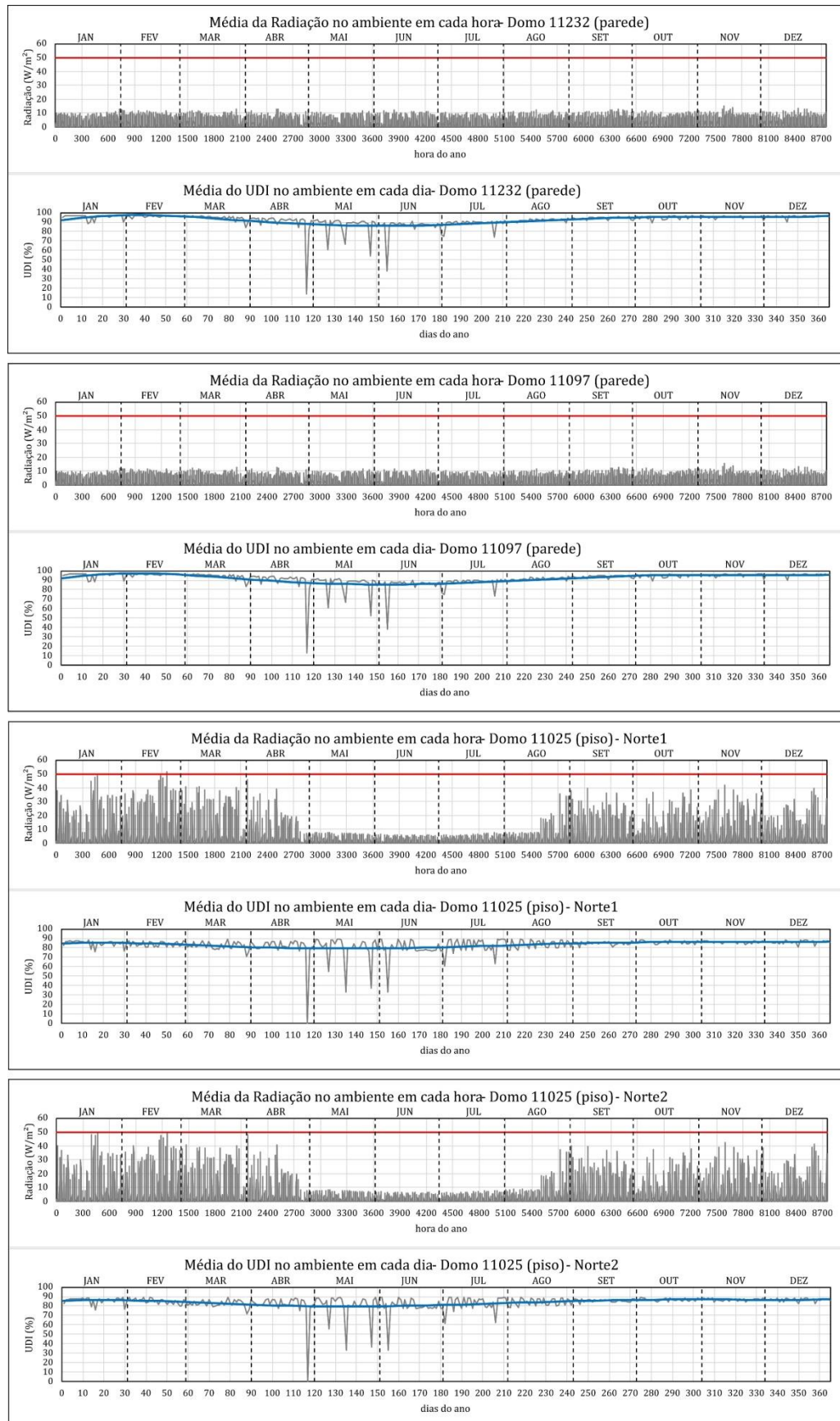


Figura 20. Resultados da média da radiação no ambiente em cada hora e média de UDI no ambiente a cada dia para as instancias do domo com melhor desempenho anual

Fonte: Os autores

Os resultados temporais de radiação horária e UDI diários para as instâncias selecionadas com os sensores nas paredes apresentaram bons resultados: valores de radiação média em torno de 10 W/m^2 e UDI médio acima de 80% em todo o ano. Em contrapartida, a instância com sensores nos pisos que apresentou o melhor resultado apresentou valores de radiação média muito próximos do limite de 50 W/m^2 em várias ocasiões nos períodos de janeiro a abril e agosto e dezembro.

CONCLUSÕES

Esta pesquisa trouxe evidências sobre o bom desempenho de aberturas zenitais para a iluminação da luz do dia em climas quentes, considerando uma localidade de baixa latitude. Contudo, este bom desempenho na autonomia de iluminação natural sem insolação indesejada do ambiente só foi observado em algumas configurações das dimensões do ambiente e da tipologia de abertura zenital, localização da malha de sensores, orientação de fachada e das aberturas e altura do elemento de iluminação natural.

Todas as tipologias apresentaram um bom desempenho de UDI simultaneamente para piso e paredes (Figura 4). Ao fazer a comparação do desempenho das melhores instâncias selecionadas nos espaços de soluções das quatro tipologias estudadas, observa-se que as tipologias que demonstraram um desempenho superior, tanto com os sensores nas paredes quanto no piso foram (Figuras 8, 12, 16 e 20), nessa ordem: Lanternim; domo de vidro, claraboia e dente de serra/shed. As tipologias domo de vidro e claraboia apresentaram desempenho de UDI e radiação semelhantes para a localidade selecionada.

No que concerne às dimensões do ambiente, dentre estas instâncias selecionadas, o Lanternim esteve associado à maiores dimensões de planta com altura de 3m, com formatos mais retangulares ou quadrados. As tipologias do domo de vidro e claraboia apresentaram em geral ambientes com dimensões de planta menores, 3m x 3m na maioria dos casos, variando mais na dimensão da altura das paredes. Quanto à tipologia dente de serra/shed, as dimensões de planta foram também superiores, com no mínimo 6m em todos os casos, e dimensões da altura das paredes distintas.

Em relação às dimensões definidoras das tipologias de aberturas zenitais, estas apresentaram a proporção máxima de abertura nos casos do dente de serra/shed (90% em todos os casos) e do Lanternim (90% na vertical em todos os casos e variado na horizontal). No caso da claraboia, a proporção do tamanho deste elemento em relação à largura do ambiente esteve em torno de 30%, sendo a proporção mínima considerada na geração do espaço de soluções. No caso do domo de vidro a proporção da abertura variou de 36% para o caso das paredes e 72% para o caso do piso, sendo estas configurações médias, dentre as estipuladas na geração do espaço de soluções.

O Lanternim, dentre as tipologias de aberturas zenitais estudadas, foi a única com um elemento de proteção à insolação direta no ambiente interior, sendo este o aspecto que provavelmente tenha favorecido o seu melhor desempenho na localidade considerada (Lat.: $7,1^\circ$ Sul; Long.: $34,9^\circ$ Oeste). Ao aplicar o método proposto por este artigo, pode-se configurar as tipologias de aberturas zenitais de formas distintas e/ou aplicados a localidades diferentes, gerando resultados distintos dos obtidos. Confirma-se que a orientação das aberturas para o Lanternim é importante, pois quando voltadas ao Norte puderam ter amplas aberturas com níveis de radiação reduzidos e filtrados quando devidamente protegidas por abas horizontais.

Foi observado que o uso da GPU no processamento das simulações por meio do uso do *Acelerad* diminuiu muito o tempo de processamento de cada instância, viabilizando a geração de milhares de resultados de desempenho das instanciações nas tipologias estudadas.

Em trabalhos futuros, pretende-se explorar o espaço de soluções de situações específicas de acordo com o tipo de uso do ambiente (residências, escritórios, escolas, etc.), análise térmica (temperatura operativa do ambiente e nível de umidade) combinadas com as simulações de radiação e iluminância com avaliação pelo UDI e, verificação de possíveis correlações entre as dimensões de aberturas zenitais e de janelas, eventualmente combinadas.

Agradecimentos

Os autores do artigo agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de Mestrado para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

AMORIM, C. N. D. Diagrama morfológico Parte I: instrumento de análise e projeto ambiental com uso de luz natural. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, Brasília, n. 3, 2007. <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n3.2007.12111>

AMORIM, C.N.D. **Iluminação natural e eficiência energética**: critérios para intervenção em edifícios não residenciais modernos no Plano Piloto de Brasília. Projeto de Pesquisa. FAP-DF, Brasília, 2016.

AYOUB, M. 100 Years of daylighting: A chronological review of daylight prediction and calculation methods. **Solar Energy**, 194, p. 360-390, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.072>

BROWN, N. C.; JUSIEGA, V.; MUELLER, C. T. Implementing data-driven parametric building design with a flexible toolbox. **Automation in Construction**, v. 118, p. 103252, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103252>

BRZEZICKI, M.; REGUCKI, P.; KASPERSKI, J. Optimization of Useful Daylight Illuminance for Vertical Shading Fins Covered by Photovoltaic Panels for a Case Study of an Office Room in the City of Wroclaw, Poland. **Buildings**, v. 11, p. 1-19, 2021. <https://doi.org/10.3390/buildings11120637>

DALBÓ, N.; SOUZA, A. D. S.; PAGEL, E. C. Análise da evolução tipológica de edifícios comerciais construídos entre 1950 a 2016 quanto à eficiência energética da envoltória, em vitória/ES. *In*: Anais do XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias, 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2019. p. 2093-2101.

FONSECA, R. W.; PEREIRA, F. O. R.; CLARO, A. Iluminação natural: a contribuição de suas reflexões no interior do ambiente construído. **Revista do Programa de Pós-graduação em Artes da Escola de Belas Artes da UFMG**, v. 17, p. 198-217, 2010.

GABRIEL, E.; DOMINGOS, R. M. A.; MELLER, G.; GUARDA, L. A.; LAURINI, D.; GRIGOLETTI, G. C. Influência da área de abertura e transmitância térmica no consumo de energia elétrica em Cuiabá-MT. *In*: Anais do XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias, 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2019. p. 2372-2380.

GARCIA D. L. R.; PEREIRA, F. O. R. Análise anual da exposição à incidência solar direta, ao ofuscamento e aos níveis de iluminação natural em ambiente com proteções solares internas. *In*: Anais do XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias, 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2019. p. 2574-2583.

GARCIA D. L. R.; PEREIRA, F. O. R. Análise da exposição ao ofuscamento e à insolação em ambiente de uso prolongado. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 11, p. e020004, 2020. ISSN 1980-6809. DOI:<http://dx.doi.org/10.20396/parc.v11i0.8654565>

HENS, I.; SOLNOSKY, R.; BROWN, N. C. Design space exploration for comparing embodied carbon in tall timber structural systems. **Energy & Buildings**, v. 244, p. 110983, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110983>

HOFFMEISTER, T. O.; SILVA, H. C. Modelo para investigação de radiação incidente em pátios. *In*: Anais do XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias, 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2019. p. 2401-2406.

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Instrução Normativa INMETRO para a Classe de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (INI-C)**. São Paulo, 2021.

KRISH, S. A practical generative design method. **Computer-Aided Design**, v. 43, p. 88-100, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.09.009>

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3a ed. São Paulo: ProLivros, 2013. 382 p.

MAIRINK, A. J. M.; VILELA, J. A.; GARCIA, M. S.; VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G. Simulação paramétrica de brise-soleil em fachada oeste para redução de consumo energético em edificação comercial. *In*: Anais do XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias, 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2019. p. 2494-2503.

MARDALJEVIC, J.; ANDERSEN, M.; ROY, N.; CHRISTOFFERSEN, J. Daylighting, Artificial Lighting and Non-Visual Effects Study for a Residential Building. 2012. <https://infoscience.epfl.ch/record/181055>. Acessado em 17/04/2023.

MITCHELL, W. J. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. **Environment and Planning B**, v. 2, p. 127-150, 1975. <https://doi.org/10.1068/b020127>

MUELLER, C. T.; OCHSENDORF, J. A. Combining structural performance and designer preferences in evolutionary design space exploration. **Automation in Construction**, v. 52, p. 70-82, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.011>

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. **Lighting Research & Technology**, v. 37, p. 41-59, 2005.

<https://doi.org/10.1191/1365782805li128oa>

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**. v.38, p. 905-913, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.013>

POGERE, A. **Estudo de átrios como elementos condutores de iluminação natural**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

QUEIRÓZ, N.; WESTPHAL, F. S.; PEREIRA, F. O. R. A influência dos elementos de sombreamento e vidros no consumo de energia em climatização e iluminação em edifícios de escritórios. *In*: Anais do XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; XI Encontro Latino-Americano de

Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias, 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2019. p. 2075-2084).

RAMOS, G.; GHISI, E. Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 157-169, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000200011>

REINHART, C. F. Lightswitch-2002: A model for manual and automated control of electric lighting and blinds. **Solar Energy**, v. 77, n. 1, p. 15–28, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.003>

REINHART, C. F., JAKUBIEC, J. A., & IBARRA, D. Definition Of A Reference Office For Standardized Evaluations Of Dynamic Façade And Lighting Technologies. *In: Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, 2013, Chambéry, France.* **Anais [...]**. Chambéry: University of Savoie, 2013. p. 3645–3652.

SANTOS, A. J. **A iluminação nos Edifícios**: Uma perspectiva no âmbito do conforto ambiental e da eficiência energética. 1a ed. Lisboa: LNEC, 2014.

SILVA, J. T.; MEDEIROS, R. C. B.; LIMA, R. C.; SANTOS, J. P. L. A influência das orientações das aberturas e condições de céu nos níveis de iluminação natural em um ambiente hospitalar. *In: Anais do XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias, 2019, João Pessoa.* **Anais [...]**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2019. p. 2554-2563).

SUSOROVA, I.; TABIBZADEH, M.; RAHMAN, A.; CLACK, H. L.; ELNIMEIRI, M. The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings. **Energy and Buildings**, v. 57, p. 6-13, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.035>

VAN DEN WYMELENBERG, K. G. Visual comfort, discomfort glare, and occupant fenestration control: Developing a research agenda. **LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America**, v. 10, n. 4, p. 207–221, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/15502724.2014.939004>

VIANNA, N. S; GONÇALVES, J. C. **Iluminação e Arquitetura**. São Paulo: Geros, 2001.

Flavio Schmidlin

fla.schmidlin@gmail.com

Felipe Tavares da Silva

felipe.tavares@academico.ufpb.br