

Investigation of indoor daylight performance of the two-sided roof monitor system solution space

Flavio Schmidlin¹, Felipe Tavares¹

¹ Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brazil
flavio.schmidlin@yahoo.com.br
felipe.tavares@academico.ufpb.br

Abstract. The present study evaluated levels of zenith daylight and the incidence of solar radiation in an indoor environment with two-sided roof monitor system opening using a parametric geometric model, numerical simulations and machine learning techniques. It was used a climatic database from a locality with a hot and humid tropical climate, at low latitude in Brazil. The daylight performance was analyzed using the Useful Daylight Illuminances and the incident solar radiation with annual and daily maximum results. The study included analyzes with the zenith openings oriented to North-South and East-West, considering the photosensitive sensor meshes on the walls and floor. The results presented that the modeling process used can help the architectural design process in its dimension of natural illuminance and incidence of solar radiation in internal environments, showing optimized configurations for the room size and for the zenithal opening geometry.

Keywords: Predictive Modeling, Parametric Modeling, Radiation, Zenithal Daylight, Indoor Environment.

1 Introdução

A entrada demasiada de radiação solar em ambientes arquitetônicos internos, quando não controlada, pode prejudicar o conforto térmico dos usuários e pode gerar desconforto visual através do ofuscamento. Além do excesso de iluminância ou calor, pode haver também a falta de luminosidade natural, influenciando o consumo energético. Nesse sentido, o dimensionamento e distribuição das aberturas dos ambientes internos para o ambiente exterior devem ser bem planejadas, de modo a captar quantidade de luz diurna adequada para atividades (SILVA et al. 2019). Em geral, os sistemas de iluminação natural zenitais com superfícies transparentes horizontais apresentam maiores ganhos térmicos e maior possibilidade de ofuscamento por reflexão, principalmente em localidades de baixa latitude.

O método da Iluminância útil de luz natural, conhecido também como *UDI* (*Useful Daylight Illuminance*), é usado para avaliar o tempo em que os níveis de iluminância da luz do dia estiveram dentro de uma faixa de iluminância especificada, em um intervalo de permanência estipulado (Nabil e Mardaljevic, 2006). Esta avaliação realiza análises que empregam um modelo de céu realista e variável com o tempo para prever níveis horários de iluminância absoluta da luz do dia. A parâmetro de desempenho *UDI* não informa apenas sobre os níveis úteis de iluminância da luz diurna, mas também sobre os níveis excessivos de luz do dia que estão ligados ao desconforto visual do usuário e o ganho térmico indesejado.

Neste artigo é apresentado um estudo de iluminação natural em um ambiente arquitetônico composto por uma sala de planta quadrilateral e uma dupla abertura zenital. A tipologia de abertura utilizada nesse estudo foi o lanternim, modelado parametricamente para que fosse obtido o espaço de soluções desta tipologia e, identificar as melhores configuração dos parâmetros geométricos que definem a sua forma, dada uma localidade geográfica. Nesta investigação foi considerada uma base de dados climática de uma localidade de clima quente e úmido, de baixa latitude de modo a verificar se há situações que possam ser obtidos bom nível de iluminação natural zenital sem causar superaquecimento no ambiente devido ao excesso de radiação solar.

2 Materiais e métodos

As investigações de desempenho do ambiente interno foram realizadas considerando o modelo conhecido como modelo de “caixa de sapatos” (*shoebox model*) (REINHART et al., 2013). Este modelo consiste em um ambiente em formato cuboide com o fechamento superior que, neste caso, possui uma abertura zenital do tipo lanternim.

2.1 Modelo geométrico paramétrico

O modelo geométrico paramétrico foi concebido no ambiente CAD (*Computer Aided Design*) *Rhinoceros* v.7 em conjunto com a interface de programação visual *Grasshopper*. Na Figura 1 podem ser observados os parâmetros definidores do modelo geométrico do ambiente com o acoplamento do lanternim, definido por 9 parâmetros: Largura do ambiente (Larg); Profundidade do ambiente (Prof); Altura do ambiente (Altura); 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). Também podem ser observadas no canto inferior esquerdo da Figura 1 as duas orientações deste ambiente em relação ao Norte, consideradas nas análises realizadas: Norte 1, onde as aberturas de entrada de luz são voltadas para o Norte-Sul; e Norte 2, onde as aberturas de entrada de luz são voltadas para o Leste-Oeste.

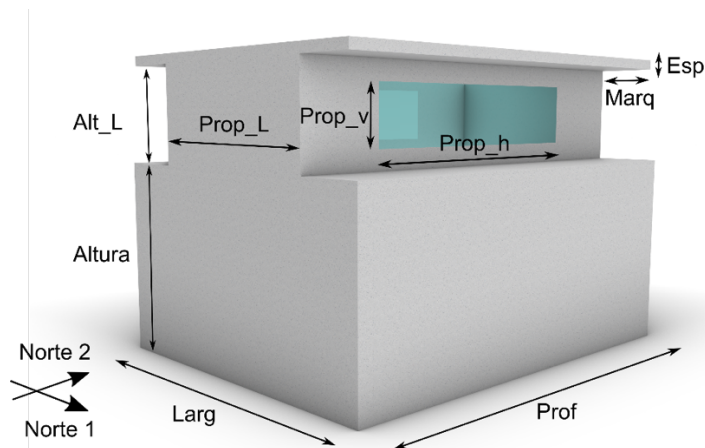


Figura 1. Modelo geométrico e seus parâmetros definidores. Fonte: Autores, 2022

2.2 Simulações de radiação solar e iluminância natural

As simulações de radiação e iluminância foram realizadas no *Grasshopper* através da biblioteca *Honeybee*, proveniente do pacote *Ladybug tools*, que por sua vez, consiste em uma interface programada em *python script* que administra o software *Radiance* que contém o motor de cálculo para esta simulação. O método numérico de cálculo de radiações e iluminância que esta ferramenta usa é o *raytracing* (AYOUB, 2019), considerando como fonte de luz o sol e, captadores sensíveis a essa luz modelados por um *grid* de pontos localizados onde se pretende avaliar o desempenho. Foi considerado um *grid* de pontos com espaçamento entre si de 0,5 m, sendo ilustrado na Figura 2 a distribuição destes no piso e nas paredes do ambiente modelado. Adicionalmente, foi considerado o pacote *Acelerad*, que permite que o *Radiance* realize cálculos de *raytracing* usando o processador da GPU (*Graphical Processing Unit*) para realizar os cálculos, diminuindo substancialmente o tempo de processamento da simulação de radiação e iluminância de cada instância do modelo paramétrico.

Na simulação da propagação da luz/radiação pelo *raytracing*, os vetores que representam os raios de luz irão se refletir ao entrar em contato com as superfícies das paredes, teto e piso do ambiente, sendo influenciados pelas propriedades de cor e rugosidade que essas superfícies possuem. Para isso,

foram consideradas propriedades fixas padronizadas segundo a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C, 2021), onde os índices de refletâncias utilizados foram de 70% para o teto, 50% para as paredes internas e 20% para o piso. O vidro das aberturas também é um ponto de influência de como a radiação e iluminação penetra no ambiente, sendo considerada a propriedade física para as simulações de 84% de transmitância para o vidro simples.

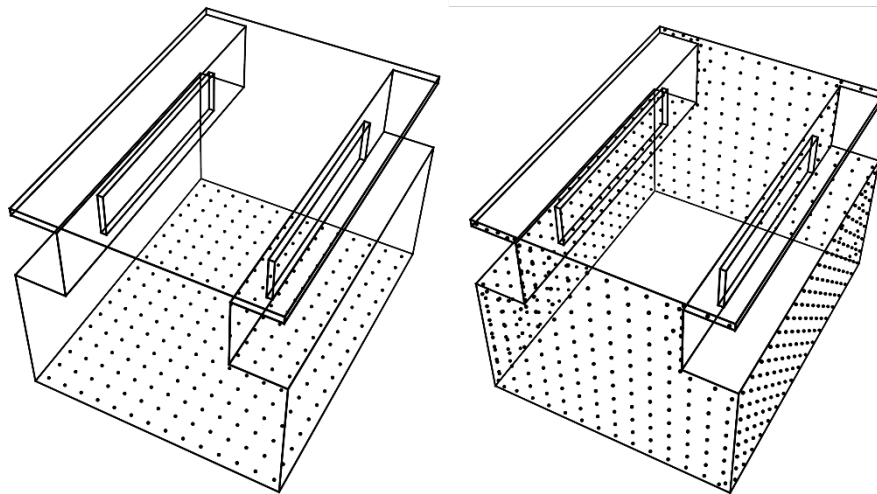


Figura 2. Posicionamento dos sensores de captação de radiação e iluminância: esquerda: sensores no piso; direita: sensores nas paredes. Fonte: Autores, 2022

A avaliação do desempenho lumínico diurno foi realizada com os valores de *UDI* (*Useful Daylight Illuminance*), que consiste em um percentual de tempo que o valor da iluminância esteve dentro da faixa especificada, considerando uma janela temporal de acordo com a ocupação (*schedule*). Neste estudo, foi considerada uma janela de tempo diária entre 8:00h às 16:00h e a faixa de iluminância entre 150 lux e 2000 lux. Esta faixa de iluminância em lux está dentro da faixa sugerida pela literatura (NABIL, MARDALJEVIC, 2006; CHI et al., 2018), onde este limite superior em lux viria a prevenir o superaquecimento do ambiente e a eventual ocorrência de desconforto por ofuscamento pela luz excessiva.

Os índices de desempenho que foram considerados neste presente estudo foi o valor da radiação máxima e de *UDI* mínimo apresentados pelo sensor de cada instância analisada. Para estas análises foi considerada a localidade da cidade de João Pessoa (Lat.: 7,1° Sul; Long.: 34,9 Oeste), usando a base de dados meteorológica pelo arquivo *.epw com dados coletados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), disponível no site climate.onebuilding.org.

Foi usado para esse processamento um computador exclusivamente dedicado a estes processamentos com configuração de processador de 6 núcleos e 12 *threads*, 32 GB RAM e GPU GTX1060.

2.3 Espaço de soluções e Meta-modelo

Na modelagem geométrica deste ambiente, foram adotadas para as três dimensões do ambiente um domínio que compreende sugestões providas pela literatura (ACOSTA et al., 2013; GARCIA e PEREIRA, 2019; SILVA et al., 2019; TABADKANIAN et al., 2019). A geração do espaço de soluções discretizado foi realizada considerando subdivisões dos domínios dos parâmetros definidores da geometria, apresentado na Tabela 1. Foram consideradas duas orientações ao Norte, paralelos às duas dimensões da planta do ambiente em estudo (Figura 1). Este espaço de soluções, para cada situação de posicionamento dos sensores (piso e paredes) e, para cada uma das duas orientações ao Norte, corresponderam a 45.927 instâncias em cada um desses quatro casos estudados (duas orientações ao Norte, sensores no piso e nas paredes), totalizando 183.708 instâncias geradas com avaliações advindas de simulações numéricas. As saídas simuladas numericamente com resultados de radiação e iluminância captados pelos sensores corresponderam a valores anuais, alimentando uma tabela de dados que corresponde ao espaço de soluções simulado.

Tabela 1. Domínios dos espaços de solução do modelo geométrico

Dimensões	Domínio discretizado simulado	Domínio discretizado meta-modelo
Larg / Prof / Altura	3,0 m; 6,0 m; 9,0 m	3,0 m; 4,0 m; 5,0 m; 6,0 m; 7,0 m; 8,0 m; 9,0 m
Alt_L	0,50 m; 0,75 m; 1,00 m; 1,25 m; 1,50 m; 1,75 m; 2,00 m	0,50 m; 0,75 m; 1,00 m; 1,25 m; 1,50 m; 1,75 m; 2,00 m
Prop_L	25%; 50%; 75%	25%; 35%; 45%; 55%; 65%; 75%
Prop_v / Prop_h	30%; 60%; 90%	30%; 40%; 50%; 60%; 70%; 80%; 90%
Marq	0,5 m; 1,0 m; 1,5 m	0,5 m; 0,6 m; 0,7 m; 0,8 m; 0,9; 1,0 m; 1,1 m; 1,2 m; 1,3 m; 1,4 m; 1,5 m
Esp	0,1 m; 0,2 m; 0,5 m	0,1 m; 0,2 m; 0,3 m; 0,4 m; 0,5 m

Fonte: Autores, 2022.

A tabela de dados gerada que representa o espaço de soluções deste sistema foi usada para treinar uma rede neural para obter um modelo

generalizado a partir de uma regressão. Os dados de entrada desta regressão são os valores de configuração da geometria e, os dados de saída, os valores de radiação máxima e *UDI* mínimo. Com a disponibilidade de um meta-modelo (*meta-model*), também conhecido como modelo substituto (*surrogate model*), valores de desempenho de instâncias foram obtidos com tempo de processamento menor e com configurações intermediárias não simuladas numericamente.

A configuração desta rede neural para obter este meta-modelo considerou uma função de ativação do tipo *ReLU* com número de camadas intermediárias e quantidade de neurônios a ser definida inicialmente a partir de um processo de otimização de modo a minimizar o erro quadrático médio da etapa de treinamento e teste. A construção dessa rede neural foi realizada com as bibliotecas *Tensorflow-Keras* que possui métodos de aprendizado de máquina (*Machine Learning*) e, para o processo de otimização da configuração desta rede neural foi usada a biblioteca de algoritmos genéticos *PyGAD*, ambas disponíveis na linguagem de programação *python script*.

O conjunto de dados de treinamento e de teste da rede neural foi gerado a partir de uma seleção aleatória usando a função *sample* da biblioteca *Pandas*, aplicando uma normalização deste conjunto de dados para melhor desempenho no treinamento da rede neural. A taxa de separação do conjunto de dados foi de 80% para o subconjunto de treinamento e 20% para o conjunto de teste. A quantidade de épocas foi obtida por um controle automático provido pela biblioteca *Keras*, considerando os valores de perdas (*loss*).

Um novo espaço de soluções discretizado foi gerado a partir do modelo generalizado pelo meta-modelo, considerando uma discretização mais refinada do que a tabela de dados inicialmente gerada por simulações. Ao invés de 45.927 instâncias, este novo espaço de soluções contém 38.824.170 instâncias, considerando maiores subdivisões dos domínios definidos pela Tabela 1.

O espaço de soluções foi analisado graficamente através da plotagem de pontos em *plots* bidimensionais que relacionam as dimensões do ambiente e do lanternim entre si e valores de radiação máximo e *UDI* mínimo. A visualização gráfica do espaço de soluções em instanciações com valores elevados de *UDI* mínimo tem o objetivo de apresentar quais as combinações de dimensões de ambiente e configuração geométrica do lanternim que demonstraram melhor desempenho.

Devido à dificuldade que multidimensionalidade do problema acarreta à análise, foi considerada a técnica do algoritmo *k-means* para separar os melhores quatro grupos de instância que apresentaram melhor desempenho. Esta implementação do algoritmo *k-means*, técnica de aprendizado de máquina não supervisionado que separa grupos de pontos de dados com características mais próximas, foi realizada usando a biblioteca *Scikit-learn* na linguagem de programação *python script*.

3 Resultados e Análises

A rede neural otimizada consistiu em três camadas com 128 neurônios. O processo de treinamento das redes neurais para a geração da regressão que consistem nos meta-modelos para cada caso de orientação ao norte, apresentaram na fase de teste valores de erro absoluto e quadráticos médios considerados baixos. Estes valores estão em torno de 1,0 relativo ao erro absoluto médio e 9,0 para o erro quadrático médio para as medidas de *UDI* mínimo; em torno de 0,5 relativo ao erro absoluto médio e 4,0 para o erro quadrático médio para as medidas de radiação máxima.

3.1 Visualização do espaço de soluções a partir do meta-modelo

Para visualizar o espaço de soluções gerado pelo meta-modelo foi considerada uma separação deste em quatro grupos através do algoritmo *k-means* e plotados em gráficos bidimensionais de pontos que representam as instâncias, contornados por curvas tracejadas, gerando regiões que contém cada agrupamento de pontos. Nas Figuras 3 a 6, são apresentados esses gráficos que relacionam o desempenho deste sistema relacionando o *UDI* mínimo anual com as dimensões do ambiente e a relações entre as medidas do lanternim.

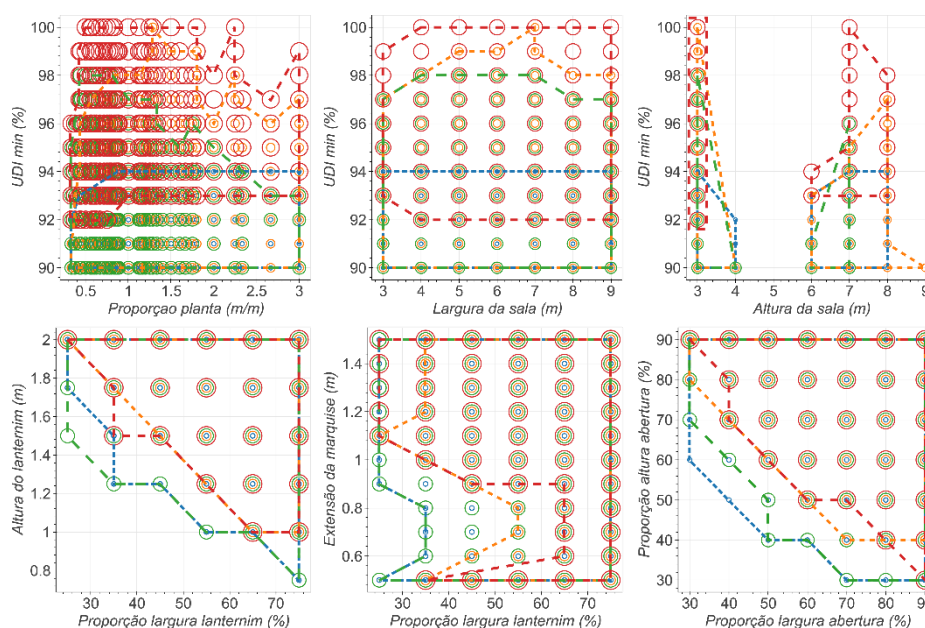


Figura 3. Relação entre dimensões do ambiente e do lanternim com os valores de *UDI* mínimo para o piso: aberturas voltadas para o Norte-Sul. Fonte: Autores, 2022

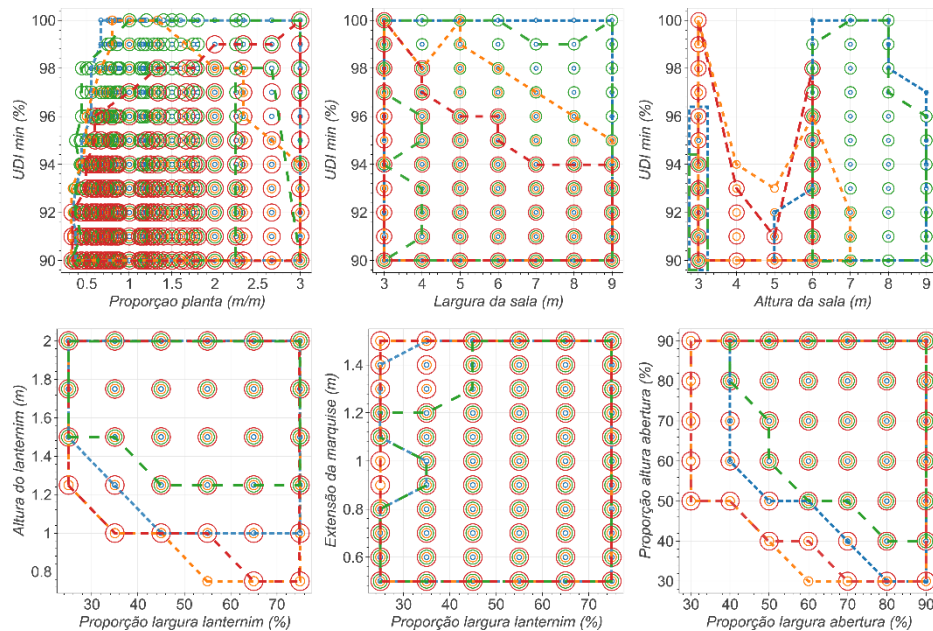


Figura 4. Relação entre dimensões do ambiente e do lanternim com os valores de UDI mínimo para o piso: aberturas voltadas para o Leste-Oeste. Fonte: Autores, 2022

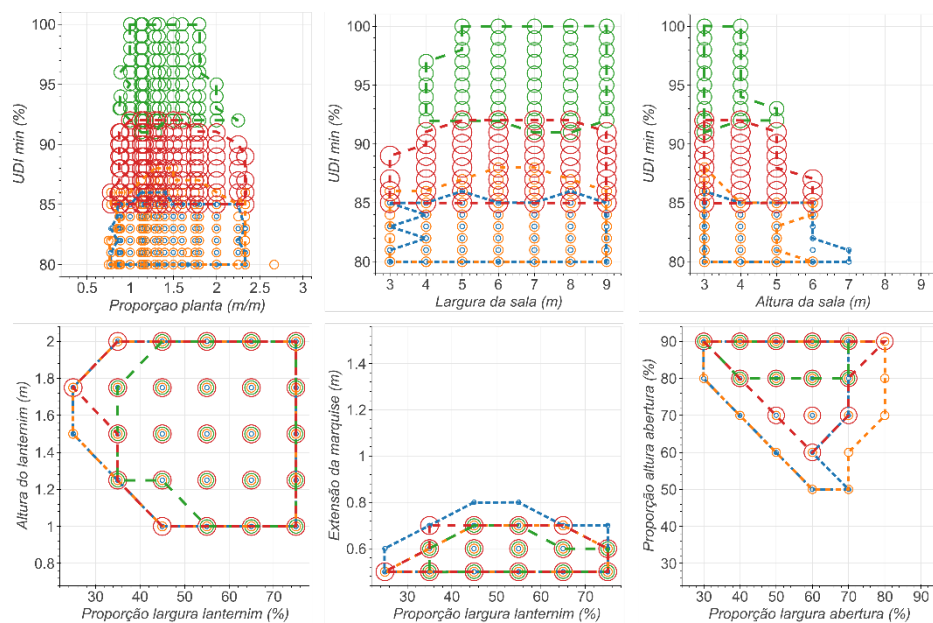


Figura 5. Relação entre dimensões do ambiente e do lanternim com os valores de UDI mínimo para paredes: aberturas voltadas para o Norte-Sul. Fonte: Autores, 2022

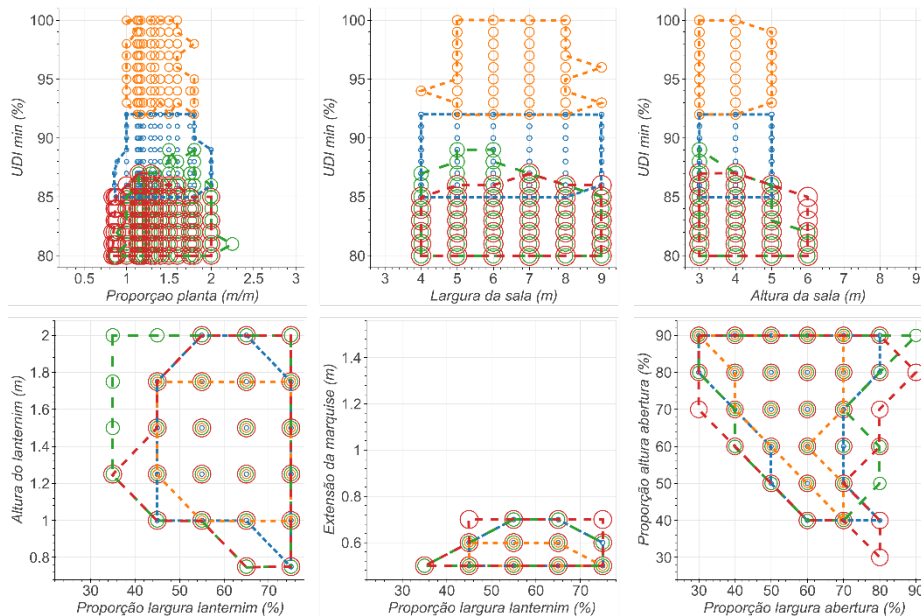


Figura 6. Relação entre dimensões do ambiente e do lanternim com os valores de UDI mínimo para paredes: aberturas voltadas para o Leste-Oeste. Fonte: Autores, 2022

Os pontos que representam as instâncias do espaço de soluções foram ilustrados por círculos (Figs. 3 a 6) para melhor visualizar as sobreposições em grupos diferentes, diferenciando-os por cor e diâmetro desses círculos. O algoritmo *k-means* separou o espaço de soluções em quatro grupos com cores diferentes, o que auxiliou a identificar quais configurações do lanternim estão associadas a um índice de UDI mínimo anual mais elevado: grupo vermelho na Figura 3; grupos verde e azul na Figura 4; grupo verde na Figura 5 e grupo laranja na Figura 6.

Estes resultados mostram que o desempenho de iluminância na localidade analisada depende da configuração do tamanho e proporção da sala, das dimensões da abertura de entrada de luz e da relação destes parâmetros com a extensão da marquise. Nestas figuras, observa-se que o desempenho do piso foi superior em relação às paredes, apresentando opções mais abrangentes da configuração das dimensões da sala e do lanternim e sem grandes limitações da altura da sala frente ao desempenho.

A orientação das aberturas ao Norte-Sul aparentaram ter menor desempenho em relação à Leste-Oeste, sobretudo no decréscimo de desempenho do piso em salas com altura entre 4 m e 6 m, e das paredes em salas com altura maior do que 4 m. A orientação Norte-Sul apresentou um desempenho melhor quando associada a proporções menores de larguras do lanternim em relação à largura da sala e, a maiores extensões da marquise, demonstrando uma necessidade maior de proteção do interior.

3.2 Investigação detalhada de uma instância com bom desempenho

Para exemplificar uma situação de projeto, foi escolhida a partir dos gráficos do espaço de soluções (Figuras 3 a 6) uma instância com configuração de ambiente e de lanternim com as aberturas orientadas Norte-Sul.

Na Figura 7 são apresentados em falsa-cor os resultados anuais deste ambiente, que tem as dimensões da sala com 5 m x 5 m x 3 m, e as dimensões do lanternim com 60% da largura do ambiente, altura de 1,2 m, 0,75 m de extensão da marquise, e com proporções de abertura horizontal e vertical, respectivamente a 50% do comprimento do ambiente e 90% da altura do lanternim. O espaço de soluções indicou que esta configuração do ambiente e do lanternim representou um desempenho anual de UDI mínimo de acima de 80% para o piso (Figura 3) e para as paredes (Figura 5), confirmado pelo resultado simulado (Figura 7).

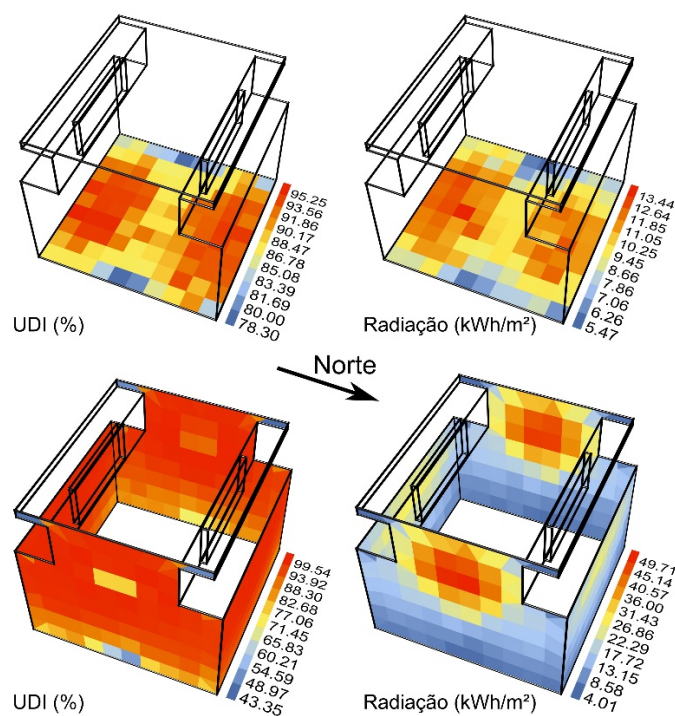


Figura 7. Resultado de valores anuais de *UDI* e Radiação acumulada em piso e paredes com aberturas do lanternim voltadas para o Norte-Sul. Fonte: Autores, 2022

Pode-se observar na Figura 7 uma relação entre a situação dos valores mais baixos de *UDI* tanto com regiões de excesso quanto com falta de radiação. No piso, os menores valores de *UDI* estão associados a uma menor radiação enquanto que, nas paredes, os menores valores de *UDI* estão na base das paredes Leste-Oeste por baixa radiação e, no topo destas paredes

por excesso de radiação. No entanto, estes resultados mostram que tanto para o piso quanto para as paredes os valores de *UDI* anual mínimo absoluto foi de aproximadamente 80% para o piso e também para a maior parte das regiões das paredes.

A Figura 8 (inferior) ilustra o valor máximo de irradiância horária da instância selecionada, traçando um gráfico ao longo do ano, podendo-se comparar a flutuação desse desempenho com o valor máximo de 50 W/m^2 , recomendado por Garcia e Pereira (2019). Ainda, foram extraídos os valores de *UDI* mínimo, obtendo assim a variação desse desempenho ao longo do ano (Figura 8, superior). Observa-se que um decréscimo de desempenho no período do meio do ano, em uma época de menor incidência de radiação na região analisada. Apesar disso, este decréscimo de *UDI* ocorreu por excesso de radiação.

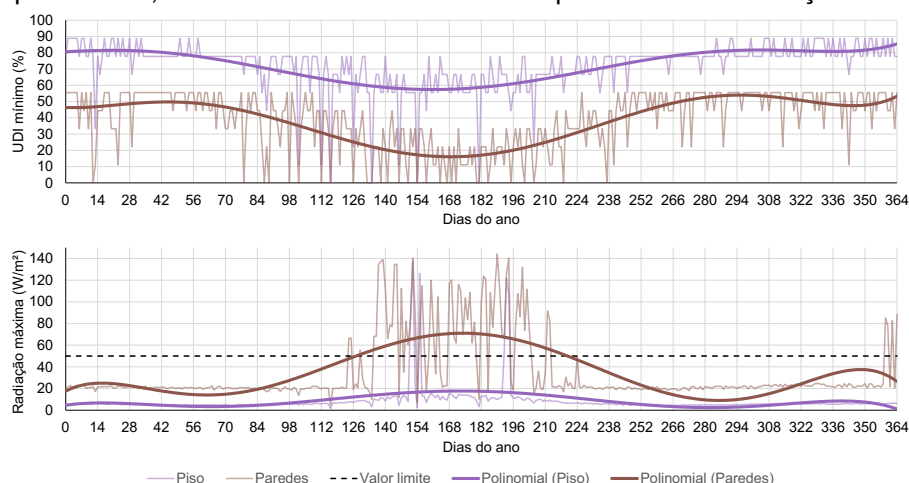


Figura 8. Variação ao longo do ano de *UDI* mínimo diário e radiação máxima horária.
Fonte: Autores, 2022

Nestes gráficos da Figura 8 foram consideradas curvas de tendências polinomiais para suavizar a variação desse desempenho. É evidente que a instância selecionada (Figura 7) apresenta um desempenho do piso superior ao das paredes ao longo do ano ao verificar a sua variação ao longo do ano.

4 Discussões e Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo mostram que o uso de meta-modelo para refinar a discretização de um espaço de soluções com respostas de radiação solar e nível de iluminância se demonstrou viável e útil na avaliação da tipologia de lanternim. Os gráficos das Figuras 3 a 6 indicam dimensões do lanternim e do ambiente com maior desempenho a *UDI* e evidenciando alguns aspectos de dependência destes parâmetros entre si. As figuras 7 e 8 mostram

uma avaliação mais específica de uma instância selecionada a partir do modelo generalizado por rede neural, apresentando graficamente a distribuição do desempenho de radiação e iluminância deste ambiente, além de mostrar a variação deste desempenho ao longo do ano com valores máximos de radiação e de UDI mínimo.

Este modelo generalizado dá subsídios para se ter respostas rápidas do desempenho deste sistema frente à grande variabilidade de configurações possíveis da sala e do lanternim. Esta rápida resposta sobre o desempenho lumínico facilita a busca da otimização multiobjetivo do desempenho em projeto de arquitetura, contribuindo para o desenvolvimento sobre o conhecimento sobre tecnologias que podem ser aplicadas ao processo de projeto.

Referencias

- Acosta, I., Navarro, J., & Sendra, J. J. (2013). Daylighting design with lightscoop skylights: Towards an optimization of shape under overcast sky conditions. *Energy and Buildings*, 60, (pp. 232-238). doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.006
- Ayoub, M. (2019). 100 Years of daylighting: A chronological review of daylight prediction and calculation methods. *Solar Energy*, 194, (pp 360–390). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.072>
- Chi, D.A., Moreno, D., & Navarro, J. (2018). Correlating daylight availability metric with lighting, heating and cooling energy consumptions, *Building and Environment*. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.01.048.
- Garcia D. L. R., & Pereira, F. O. R. (2019). 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 e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído* (pp. 2574-2583).
- 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.
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*. v.38, (pp.905-913). London: Elsevier.
- Reinhart, C. F., Jakubiec, J. A., & Ibarra, D. (2013). Definition Of A Reference Office For Standardized Evaluations Of Dynamic Façade And Lighting Technologies. 13th Conference of IBPSA, (pp. 3645–3652).
- Silva, J. T., Medeiros, R. C. B., Lima, R. C., & Santos, J. P. L. (2019). 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 e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído* (pp. 2554-2563).
- Tabadkani, A., Shoubib, M. V., Soflaeic, F., & Banihashemid, S. (2019). Integrated parametric design of adaptive facades for user's visual comfort. *Automation in Construction*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102857>.