



Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais

Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

RELAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO DAS MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA LUZ NATURAL E A SETORIZAÇÃO DA MALHA DE PONTOS DE SIMULAÇÃO¹

RIBEIRO, Pedro Vitor Sousa (1); CABÚS, Ricardo Carvalho (2)

(1) Universidade Federal de Alagoas, pedrovsribeiro@gmail.com

(2) Universidade Federal de Alagoas, r.cabus@ctec.ufal.br

RESUMO

O estudo do comportamento da iluminação natural no ambiente construído pode ser feito utilizando as métricas de desempenho da luz natural. Seu cálculo pressupõe a definição de parâmetros, como a malha de sensores no plano de trabalho, que é uniformemente distribuída no plano. Este artigo tem objetivo de identificar a relação entre a malha de pontos de cálculo da iluminação natural e as métricas de desempenho. As métricas estudadas foram: Iluminância média (E_m); Uniformidade (U); Autonomia da Luz Natural (ALN) e espacial (ALNe); Iluminância Útil de Luz Natural (IULN); e Exposição Solar Anual (ESA). Utilizando um ambiente com abertura lateral em fita, sem obstrução externa, o plano de trabalho foi dividido em nove setores de mesma área, em que foi variada a malha de 1x1 a 6x6 no setor. A simulação computacional foi realizada pelo TropLux 8, seguidas das análises exploratória e estatística. Observou-se que setores mais próximos a abertura necessitam de malhas com maior densidade de pontos para que as componentes da luz natural mantivessem valores estáveis. O estudo aponta que o processamento das malhas para as componentes da luz natural direta e refletida pode ser realizado em separado, com densidades diferentes de pontos por setor.

Palavras-chave: Iluminação natural. Malha de pontos. Índices de desempenho da luz natural.

ABSTRACT

The study of the daylighting behaviour in the built environment can be done using tools such as daylight performance metrics. Its calculation presupposes the definition of parameters, such as the sensors grid in the working plane, which is evenly distributed in the plane. This article aims to identify the relationship between the grid of points of natural lighting calculation and performance metrics. The metrics studied were: Average Illuminance (E_m); Uniformity (U); Daylight Autonomy (DA) and Spatial Daylight Autonomy (sDA); Useful Daylight Illumination (UDI); and Annual Solar Exposure (ASE). Using an environment with lateral opening, without external obstruction, the work plan was divided into nine sectors of the same area, in which the mesh was varied from 1x1 to 6x6 in the sector. The computational simulation was performed by TropLux, followed by exploratory and statistical analysis. It was observed that sectors closer to the opening need meshes with higher point density so that the components of natural light maintain stable values. The study points out that the mesh processing for the components of

¹ RIBEIRO, Pedro Vitor Sousa; CABÚS, Ricardo Carvalho. Relação entre o comportamento das métricas de avaliação do desempenho da luz natural e a setorização da malha de pontos de simulação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020.

direct and reflected natural light can be performed separately, with different densities of points per sector.

Keywords: Daylighting. Grid of points. Daylight metrics.

1 INTRODUÇÃO

O uso da luz natural no ambiente construído é uma importante estratégia para o desenvolvimento das edificações e os avanços tecnológicos permitem a melhoria na sua captação, seja por aberturas laterais ou zenitais (BAKER; STEEMERS, 2002). A definição de padrões de referência para a quantidade de luz natural dentro do ambiente construído sempre foi um desafio para aqueles que estudam a relação entre percepção e estímulos, como aponta Hopkinson (1963). Segundo Moon (1936) a quantidade de luz no ambiente não pode ser baseada exclusivamente em aspectos físicos, mas também no usuário do espaço, a tarefa que realiza, sua posição no ambiente, a posição do plano de trabalho, e outros fatores fisiológicos e psicológicos que a define.

As tentativas para criação de ferramentas que permitam avaliar de forma abrangente o desempenho luminoso das edificações têm se sucedido ao longo das últimas décadas e vêm se tornando cada vez mais sofisticadas. O desenvolvimento das métricas de avaliação do desempenho da luz natural foi um passo importante no estudo do ambiente construído. Seu cálculo implica na definição de alguns parâmetros, como a quantidade de pontos de medição, tipo de céu e horário.

A malha de pontos é um fator importante no cálculo das métricas e os normativos geralmente a definem baseando-se nas dimensões do ambiente. A norma brasileira para iluminação natural (ABNT, 2005) prevê o cálculo da malha utilizando uma formulação que leva em conta as dimensões do ambiente e a posição do plano de trabalho. Outras normas utilizam a mesma formulação, como no caso da norma mexicana NOM-025-STPS-2008 (DGN, 2008), mas preveem uma maior densidade de pontos. A LM 83-12 (IES, 2012) descreve de forma objetiva os requisitos de horas e dias do ano para as métricas Exposição Solar anual (ESA) e a Autonomia de Luz Natural espacial (ALNe), apresentando uma formulação para o cálculo da malha, entretanto para outras métricas, como a Iluminância Útil de Luz Natural (IULN) não se encontram requisitos de quantidade de pontos. (NABIL E MARDALJEVIC, 2006).

Até então os pontos de cálculo são dispostos sempre em uma malha e distribuídos de forma uniforme pelo ambiente. Estudo recente (BREMBILLA; MARDALJEVIC; ANSELMO, 2015) aponta que outros tipos de distribuição podem promover maior precisão nos resultados e menor tempo de processamento. Os autores apontam ainda que a escolha de malhas com mais de um metro de distância entre os pontos podem trazer prejuízos para a precisão das métricas, e que os pontos mais próximos aos limites do plano de trabalhos são os mais sensíveis a tais alterações.

Diante dos poucos estudos sobre a possibilidade de distribuição dos pontos de forma não uniforme pelo plano de trabalho, e tendo como base estudos anteriores que apontam a eficácia de tal método, o artigo tem objetivo de estudar a influência da quantidade de pontos de simulação nas métricas de avaliação do desempenho da luz natural. O artigo apresenta resultados parciais da tese de doutorado do autor (1).

2 METODOLOGIA

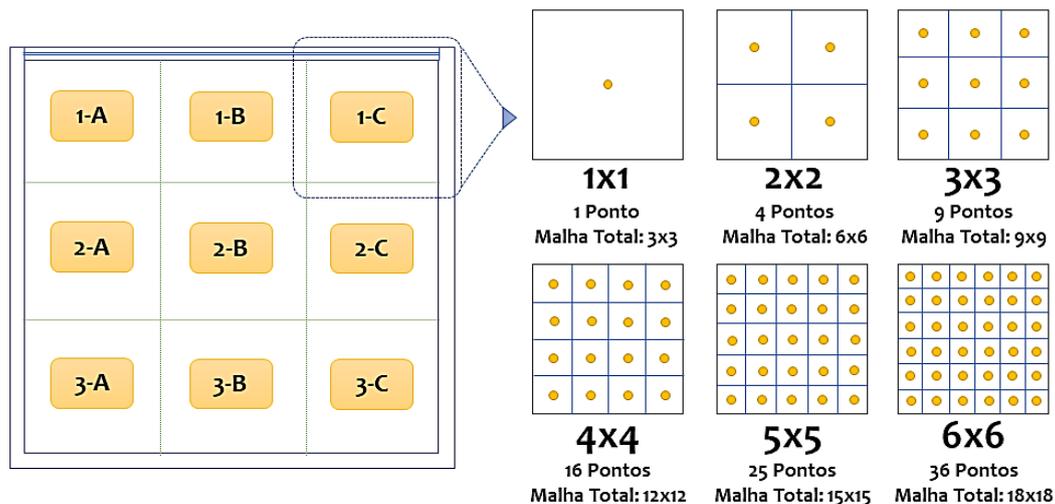
A definição do modelo teve como base trabalhos que avaliam a disponibilidade de luz natural no clima tropical (GUIDI et al., 2018; CARVALHO, 2018; DIAS et al., 2018). As dimensões adotadas foram de 6,00m x 6,00m, com pé direito de 3,00m. A janela é

lateral, em fita, com 1,00m de altura e 1,10m peitoril, sem obstruções externas. As refletâncias do piso, paredes e teto foram de 0,3; 0,7 e 0,8 respectivamente.

Para a definição dos parâmetros de processamento foi necessário definir as métricas de avaliação do desempenho luminoso utilizadas na análise dos resultados, são elas: Iluminância Média (Em) (ANBT, 2005, 2013a), Uniformidade (U) (ABNT, 2013b), Autonomia de Luz Natural espacial (ALNe) (IES, 2012), Iluminância Útil de Luz Natural (IULN) (Nabil e Mardaljevic, 2005) e a Exposição Solar Anual (ESA) (IES, 2012). A escolha das métricas baseia-se em trabalho anterior dos autores (RIBEIRO; CABUS, 2019), onde foi estudada a variação na quantidade de pontos, como sendo aquelas mais influenciadas pela variação da malha.

As simulações ocorreram das 8h às 18h, em hora legal, no meio do intervalo horário, todos os dias do ano, totalizando 3.650 horas, como previsto pela IES LM-83 (IES, 2012). Foi utilizado o Céu com Distribuição Dinâmica de Luminâncias (CDDL) para a cidade de Maceió. O CDDL escolhe um dos tipos de céu CIE (2002), de acordo com sua probabilidade, no dia e na hora calculados, usando os estudos de Cabús (2002) e de Manhas (2016). Para a definição dos pontos de processamento o plano de trabalho foi dividido em nove setores de igual área, conforme apresentado na Figura 1, dentro dos quais foi variada a quantidade de pontos de análise. A malha dentro dos setores variou de 1x1 a 6x6 pontos, que corresponde a uma variação em todo o plano de trabalho de 3x3 a 18x18 pontos.

Figura 1 – Disposição dos setores em planta e malha por setor para o modelo utilizado nas simulações.



O processamento foi feito em duas orientações de janela, sul e leste, tendo em vista a trajetória solar aparente para a cidade de Maceió-AL, utilizada para a simulação. Para a simulação computacional foi utilizado o software TropLux 8.

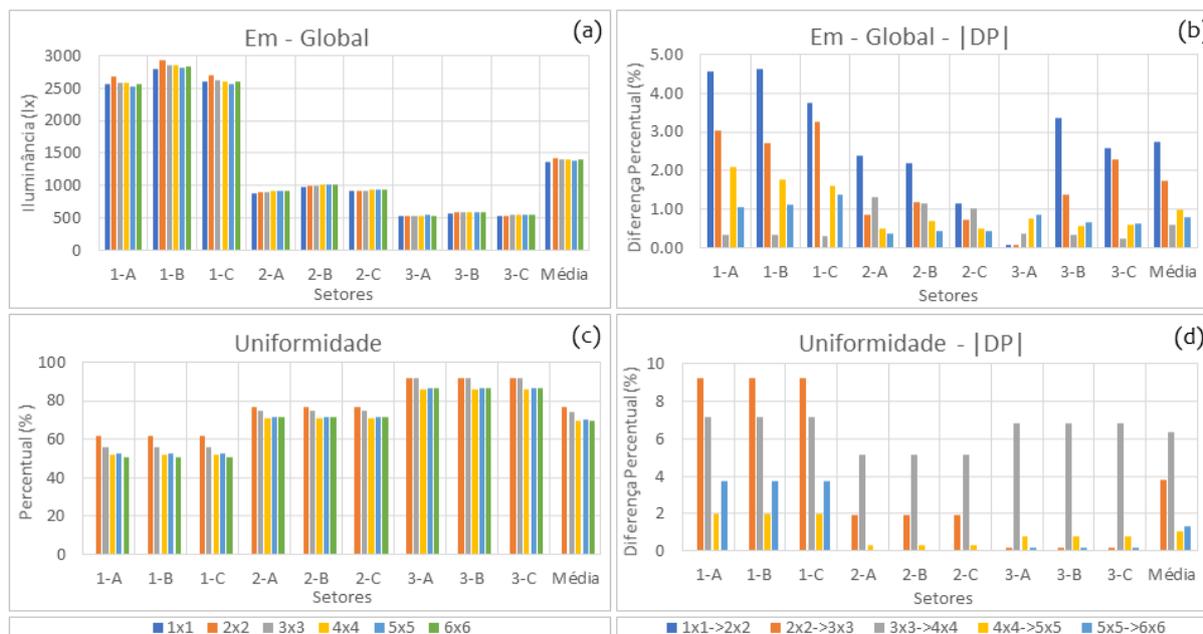
A análise dos resultados foi realizada em duas etapas: exploratória e estatística. Na primeira os resultados foram avaliados de forma descritiva, sendo calculada a diferença percentual (DP) entre a média do modelo analisado e do de malha imediatamente inferior. Para a análise estatística foi avaliada apenas a iluminância, e suas componentes estudadas separadamente, sendo elas: sol direto (SD), sol refletido (SR), céu direto (CD) e céu refletido (CR), conforme Cabús (2005). Inicialmente foi adotada a análise de variância (One way ANOVA), utilizada para a comparação de múltiplas médias (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). Para verificar as diferenças significantes entre as médias, como forma de determinar a partir de qual

malha as médias dos índices são estatisticamente iguais, foi utilizado o teste de Tukey, que verifica quais as diferenças estatisticamente significantes entre as médias (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Os cálculos foram feitos no software MINITAB® versão 19.01. Para o cálculo da ANOVA e do teste de Tukey a planilha de dados utilizada compreendeu os resultados obtidos dia a dia, hora a hora, para cada uma das componentes da luz natural.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados será dividida em duas etapas: exploratória e estatística. Tendo em vista o grande volume de resultados nessa primeira serão apresentados os dados da janela orientada a sul. A diferença entre os resultados para as duas orientações é que aqueles observados nos setores mais próximos à janela no modelo orientado a sul avançam para setores mais distantes da janela no modelo com janela orientada a leste. Os resultados da iluminância média global e da uniformidade, bem como a diferença percentual entre os modelos são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Resultados de Iluminância Global e Uniformidade por setor, e a DP entre os valores para a janela orientada a sul.



A uniformidade para a malha de 1x1 não apresenta valores no gráfico já que há apenas um ponto no plano de trabalho. Observa-se que nos setores próximos à janela o comportamento muda ao passo que a quantidade de pontos aumenta, o que acontece de forma menos evidente nos setores mais distantes. Para a janela orientada a leste o comportamento avança para a linha 2, tendo em vista a maior penetração da luz natural. O comportamento da uniformidade já apresenta mudança em todos os setores quando da alteração na malha de pontos, entretanto aqueles próximos à janela possuem DP maior que os demais.

Essa maior sensibilidade à mudança na quantidade de pontos dentro dos setores mais próximos à janela pode ser observada também em todas as componentes da luz natural. Importante ressaltar que em todas elas há variação do valor médio do setor com a alteração da malha. A componente de sol direto apresentou comportamento distinto das demais, pois apenas os setores da linha 1, para a

orientação sul, e das linhas 1 e 2 para a leste, apresentaram incidência solar direta, significando que aqueles setores mais distantes da janela, para tal componente, não foi relevante a alteração de malha, já que não há incidência solar. As métricas de avaliação do desempenho da luz natural apresentam comportamento semelhante ao observado para a iluminância e suas componentes, entretanto em duas foi possível identificar algumas particularidades, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Resultados das métricas ALN, ALNe, IULN e ESA por setor, e a DP entre os valores para a janela orientada a sul.

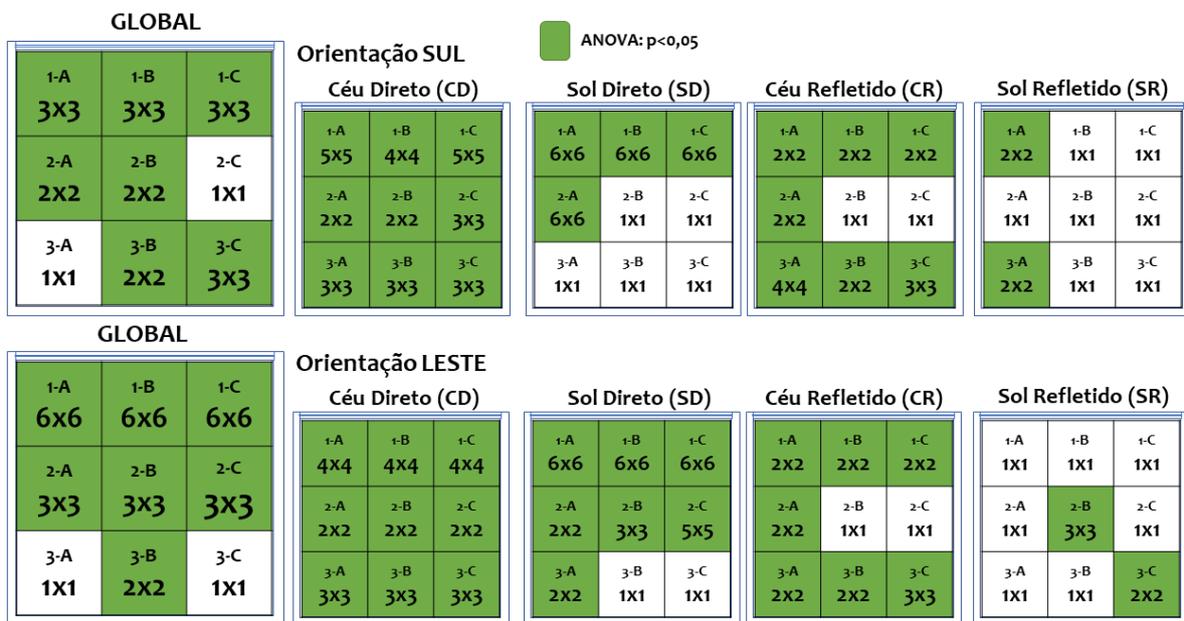


Os gráficos de DP que não apresentam valores são aqueles onde a variação de malha não alterou o valor da métrica, fazendo com que a DP fosse zero. Os comportamentos da ALN e da IULN são possuem pouca variação frente aumento na quantidade de pontos, apenas para os setores próximos à janela que se observa alguma mudança, mas sempre com DP inferior a 5%. O comportamento da ALNe nos setores próximos à janela, da linha 1, onde há maior incidência solar, é o mesmo independente da quantidade de pontos por setor, já nas regiões mais distantes o comportamento é diferente. Na linha de setores 2 observa-se a variação da ALNe ao passo que a quantidade de pontos no setor aumenta, entretanto, as diferenças percentuais ainda são altas. Já nos setores da linha 3, mais distantes da abertura, não é observada ALNe, em vista da pouca quantidade de luz natural disponível nessa região. Para a ESA acontece algo diferente das demais métricas, apenas para malhas acima de 4x4 pontos por setor é que são computados valores, e apenas nos

setores próximos à janela. Os resultados até então apresentados apontam para o fato de que os comportamentos em cada setor diferem entre si, e que a distância à abertura é um importante fator definidor de tal comportamento.

Para a análise estatística serão apresentados os resultados para as duas orientações estudadas. Para o teste de ANOVA, cujos resultados são apresentados de forma esquemática na Figura 4, os setores marcados em verde são aqueles que possuem médias estatisticamente diferentes com a variação da malha. Para a janela orientada a sul, em apenas dois setores, 2-C e 3-A as médias são estatisticamente iguais, entretanto para os demais há diferença entre as médias para o conjunto analisado. Apenas a componente de céu direto, como já observado na análise exploratória, obteve em todos os setores médias diferentes com a variação na densidade de pontos por setor. Os setores mais próximos à janela obtiveram médias estatisticamente distintas, o que reforça as conclusões da análise exploratória. Para as componentes de luz refletida tanto setores mais próximos da janela, como aqueles mais ao fundo, obtiveram valores que indicam médias estatisticamente diferentes. O comportamento é semelhante ao da outra orientação estudada, mas vale notar que a componente de sol direto obteve resultados diferentes. Para o modelo nessa orientação, a penetração de luz solar nas áreas mais distantes da janela é maior, o que foi verificado também na análise exploratória anterior, fazendo com que na ANOVA fosse observado que além dos setores mais próximos da janela (1-A, 1-B e 1-C), aqueles na linha central (2-A, 2-B e 2-C) também obtiveram médias estatisticamente diferentes.

Figura 4 – Resultado do teste de ANOVA e Tukey para a iluminância e suas componentes. A cor verde indica que o setor apresenta diferença significativa entre médias, com a malha de pontos em que, a partir dela, os resultados são estatisticamente iguais.



Os resultados do agrupamento de Tukey também são apresentados na Figura 4. Ao verificar os resultados obtidos para a componente direta observa-se que os setores 1-A, 1-B e 1-C obtiveram estabilidade nas médias somente a partir da malha de 6x6 no setor, esse mesmo resultado pode ser verificado na componente de sol direto. Tal comportamento reafirma aquele observado na análise exploratória. As

componentes refletidas, seja de céu ou de sol, apresentaram pouca variação de média, comportamento que se reflete em médias estáveis já nas malhas de 4x4 para o céu e 2x2 para o sol.

Nos resultados obtidos no teste de Tukey para a janela orientada a leste nota-se que para iluminância global os pontos mais próximos à janela só vão obter médias estáveis a partir da malha de 6x6 pontos por setor, enquanto aqueles mais distantes da janela a malha de 3x3 pontos já obtém resultados estatisticamente semelhantes entre si. A quantidade de pontos necessários para a estabilização dos resultados tende a diminuir com o aumento da distância à abertura, o que evidencia uma relação entre os dois parâmetros.

Nos casos em que o teste de Tukey aponta como média estável a malha de 6x6 pontos dentro do setor vale destacar que, para as situações estudadas, esta não necessariamente é a ideal. A ocorrência de outliers nas séries de médias pode fazer com que, em alguns casos, o teste de Tukey aponte malhas com mais pontos como ideal. Para a verificação de tal comportamento seria necessário realizar processamentos com mais pontos.

4 CONCLUSÕES

Foi possível verificar que quando analisado setor a setor os resultados e os comportamentos de cada um são diferentes quanto à iluminância e suas métricas. Setores mais distantes da janela tendem a ter comportamento mais estável frente à variação na densidade de pontos, enquanto naqueles mais próximos à janela, que possuem conseqüente maior visão de céu, a grande variação na iluminância implica em malhas mais refinadas. A generalização do comportamento nos setores próximos à janela visa indicar um comportamento que atende às métricas estudadas, já que para a ALNe a quantidade de pontos nos setores próximos à janela não influenciou no resultado desta métrica.

Importante destacar que o comportamento das componentes direta e refletida é distinto, e se relacionam com questões diferentes do espaço. Enquanto a componente direta está relacionada com a visão de céu e a possibilidade de insolação, a componente refletida relaciona-se diretamente com a distância à abertura. Observa-se que os índices de luz solar refletida, principalmente em orientações onde há maior entrada de luz natural, precisam ser avaliados separadamente, pois sua variação nos modelos estudados foi expressiva. É possível, ainda, observar que se pode utilizar malhas de diferentes densidades por setor para cada componente da luz natural, definindo malhas mais densas para a componente direta e menos densas para a componente difusa. Os resultados apontam ainda que a utilização de malhas diferentes no cálculo da iluminância, com mais pontos para a luz direta e menos para a luz difusa, pode ser estratégia importante na redução da demanda computacional, mantendo a precisão nos resultados.

O artigo não se propõe a definir a densidade de pontos por setorização, mas aponta que tal metodologia de definição dos pontos de processamento pode implicar na melhor quantificação das métricas de avaliação do desempenho da luz natural.

AGRADECIMENTOS

À Capes pela bolsa de pesquisa e ao Grupo de Pesquisa em Iluminação (GRILU) da Universidade Federal de Alagoas

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15215-4: **Iluminação Natural** Parte 4 – verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – método de medição. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. ISO/CIE 8995-1: **Iluminação de Ambientes de Trabalho** – Parte 1 - Interior. Rio de Janeiro, 2013a.
- _____. NBR 15575-1: **Edificações Habitacionais – Desempenho** – Parte 1 – Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013b.
- BAKER, N.; STEEMERS, K. **Daylight Design of Buildings**. 1. ed. Londres: James, v. 1, 2002.
- BREMBILLA, E.; MARDALJEVIC, J.; ANSELMO, F. The effect of the analysis grid on daylight simulations with climate-based daylight modelling. In: The 28th session of the International Commission on Illumination: CIE 2015, 28., Manchester, 2015. **Anais[...]** Manchester: CIE, 2015, p. 125 - 135.
- CABÚS, R. C. **Tropical Daylighting: predicting sky types and interior illuminance in North-east Brazil**. 2002. 288p. Tese (Doutorado em Arquitetura) - University of Sheffield. Sheffield, England, 2002
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 2003. 255p
- CARVALHO, M. L. S. **Eficiência da luz solar refletida e desempenho de dispositivos de sombreamento: estudo para salas de aula na cidade de Maceió**. 2018. 196 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.
- CIE - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. (2002) **Spatial distribution of daylight** - CIE standard general sky. Viena: CIE. (CIE DS 011.2/E:2002).
- DGN - DIRECCIÓN GENERAL DE NORMAS. **NOM-025-STPS-2008**: Condiciones de Iluminacion en los centros de trabajo. 1 ed. Mexico: DGN, 2008
- DIAS, A. R. D. *et al.* Influência de métricas dinâmicas na avaliação do aproveitamento da luz natural em clima tropical. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p.29-47, set. 2018.
- GUIDI, C. R. *et al.* Influência dos parâmetros urbanísticos e da topografia na admissão da luz natural em edifícios residenciais. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 49-66, jul./set. 2018.
- HOPKINSON, R. G. **Architectural Physics: Lighting**. Londres: Her Majesty's Stationery Office, 1963. 372 p.
- IES – ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **The Lighting Handbook: Reference & Applications**. New York: Illuminating Engineering Society of North America. 9 ed. 2000.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 14. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 490 p.
- MOON, P. **The Scientific Basis of Illuminating Engineering**. Londres: McGraw-Hill, 1936. 620 p.
- NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful Daylight Illuminances: a replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, Londres, v. 38, n. 7, p. 905-913, jul. 2005
- RIBEIRO, P. V. S.; CABÚS, R. C. Análise da influência da malha de pontos em índices de avaliação de desempenho da luz natural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 317-333, out./dez. 2019.