

Simulação de abertura zenital para captação de luz natural: estudo de caso em região de clima quente e úmido

Zenithal opening simulation for capturing daylight: a case study in hot and humid climate region

Eixo temático: Arquitetura e Urbanismo

ARQ 5 – CONFORTO E QUALIDADE AMBIENTAL

MONTEIRO, Marcela Marçal Maciel¹; CABUS, Ricardo Carvalho².

¹marcela.monteiro@unifesspa.edu.br, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – UNIFESSPA, Brasil

²r.cabus@ctec.ufal.br, Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Brasil

Resumo: O desempenho da luz natural nos ambientes internos sofre influência de diversos elementos, como entorno edificado, verticalização, geometria das edificações, e ainda deve-se levar em consideração aspectos de cada localidade, como clima, relevo, localização, refletância das superfícies internas, entre outros. Com enfoque no clima quente-úmido, o estudo foi realizado na cidade de Belém, localizada no estado do Pará. A pesquisa objetivou estudar o comportamento da luz natural, através de estudo com simulação computacional para captação de luz pela cobertura, a fim de investigar vantagens e desvantagens entre as mesmas, para o clima quente e úmido. Para simulação computacional foi utilizado o software TropLux. A pesquisa busca estudar o comportamento da luz, com a utilização de elementos transparentes nas aberturas zenitais e laterais, para investigar o desempenho desses diferentes dispositivos de fechamento na arquitetura.

Palavras-chaves: iluminação natural; abertura zenital; simulação computacional; software TropLux; clima quente e úmido.

Abstract: *The daylighting performance in indoor environments is influenced by several elements, such as the built environment, verticalization, building geometry, and aspects of each location must also be taken into account, such as climate, relief, location, reflectance of internal surfaces, among others. Focusing on the hot-humid climate in the Amazon region, Belém located in the state of Pará, the research aimed to study the behavior of daylight, through a study with computer simulation for two forms of light capture by the toplighting, in order to investigate the advantages and disadvantages between them, for the hot and humid climate. For computational simulation, TropLux software was used. The research also seeks to study the behavior of light, using transparent elements and semi-transparent photovoltaic modules to investigate the behavior of these different closing devices in architecture.*

Keywords: *daylighting, computer simulation; toplighting; software TropLux; hot and humid climate.*

Resumen: *El desempeño de la luz natural en ambientes interiores está influenciado por varios elementos, como el ambiente construido, la verticalización, la geometría de los edificios, y*

aspectos propios de cada lugar, como el clima, el relieve, la ubicación, la reflectancia de las superficies internas, entre otros, deben ser evaluados, tomados en cuenta otros. Con foco en el clima cálido-húmedo, el estudio fue realizado en la ciudad de Belém, ubicada en el estado de Pará. El objetivo de la investigación fue estudiar el comportamiento de la luz natural, a través de un estudio con simulación por computadora para captar luz a través del techo, con el fin de investigar ventajas y desventajas entre ellas, para climas cálidos y húmedos. Se utilizó el software TropLux para la simulación por computadora. La investigación también busca estudiar el comportamiento de la luz, utilizando elementos transparentes y módulos fotovoltaicos semitransparentes para investigar el comportamiento de estos diferentes dispositivos de cierre en arquitectura.

Palabras clave: *iluminación natural; apertura cenital; simulación por ordenador; software TropLux; clima cálido y húmedo.*

1 Introdução

Aquecimento global, escassez de energia, fontes alternativas e renováveis, grandes catástrofes anunciadas por conta das mudanças climáticas estão na agenda do dia da comunidade mundial. Por sua vez, algumas técnicas e formas de utilização de energias renováveis, como a energia solar fotovoltaica, são conhecidas e disponíveis, porém, por motivos diversos, não são incorporadas às edificações atualmente. Nos últimos anos o Brasil e o Mundo experimentaram uma crescente disseminação da utilização de sistemas fotovoltaicos para a geração de energia elétrica, especialmente sob a forma de geração distribuída, ou seja, sistemas interligados às redes das distribuidoras de energia, predominantemente em meios urbanos, integrados ou adaptados às edificações. Tal disseminação tem provocado intensas discussões no meio técnico-científico e entre projetistas quanto ao melhor aproveitamento da energia solar para a produção de eletricidade, aliando tanto questões estritamente técnicas, inerentes ao sistema de geração de eletricidade, quanto, mais recentemente, à questões arquitetônicas, buscando a melhor integração possível dos elementos fotovoltaicos à envoltória da edificação.

Considerando a região Amazônica, como estudo de caso, sabe-se que a altura do sol nesta região é sempre elevada ao meio-dia, com menor altura acima de 60°, o que acarreta uma radiação solar global alta, seja como radiação direta em dias ensolarados, seja em forma de radiação difusa em dias nublados, sendo esta última uma componente significativa da radiação global, devido ao alto índice de nebulosidade durante todo o ano. Os valores mais elevados de radiação solar global ficaram em torno de 500 W/m² nos meses de agosto a outubro e os menores foram registrados nos meses de dezembro a maio, ficando abaixo de 460 W/m².

A região amazônica, em especial, apresenta alto índice de irradiação solar comparada a outras regiões do planeta, e outro aspecto importante para se considerar no projeto de arquitetura com foco nas questões de conforto ambiental é justamente a qualidade da luz natural incidente nos ambientes internos. Considerando regiões com baixas latitudes, o aproveitamento da iluminação natural, ocorre, principalmente através das aberturas de janelas, por razões que se justificam para evitar ganhos de calor no ambiente interno, promover acesso da iluminação refletida por outras superfícies ou ainda para favorecer a captação de ventilação natural em determinadas orientações.

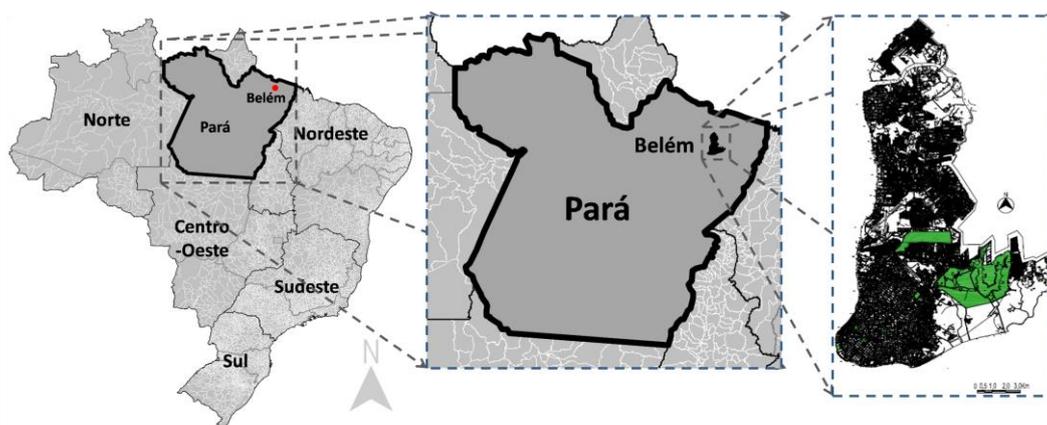
Contudo, outros dispositivos podem ser integrados à arquitetura, de maneira criteriosa e estudada, a fim de promover ambientes com maior grau de uniformidade na distribuição da iluminação natural, sem que gere comprometimento às questões de conforto térmico. Assim, o presente trabalho irá investigar o comportamento de dispositivos zenitais incorporados à

cobertura, como o *domus* e o *shed*, utilizando para isso, elementos de fechamentos transparentes. Através de simulação computacional, poderá ser feita uma análise da qualidade da luz natural que irá incidir no interior dos ambientes, investigando os níveis de iluminância e a geometria solar gerada pelos sistemas de captação de iluminação zenital. Para os arquitetos, o desafio está em como integrar adequadamente os materiais transparentes ou translúcidos às edificações, pensando nos ganhos ou perdas de calor, a fim de atingir conforto térmico e eficiência energética. Essa integração deve dar lugar a novos projetos, mais inovadores, mas isso não pode ser feito sem que se tenha um conhecimento adequado das implicações dos materiais das aberturas, tipologias e formas de esquadrias, tanto no seu papel como integradores entre o meio externo com o interno, assim como sua função como elementos de vedação externa. (CHIVELET E SOLLA, 2010).

2 Referencial teórico

Dentre as capitais da região amazônica a que apresenta menor irradiação solar, é Macapá com 1783 kWh/m². Ainda assim, é importante frisar que, este valor ainda é maior que o melhor local de irradiação na Alemanha, que é da ordem de 1200 kWh/m². Considerando a luz natural nesse contexto, da mesma forma, terá grande impacto nas condições de conforto interno, de forma a contribuir, muitas vezes para elevação nos ganhos de cargas térmicas ao mesmo tempo em que possibilita altos valores de iluminância, em função de a cidade estudada estar em região de baixa latitude. Com foco em Belém, cidade objeto de estudo, localizada na região amazônica, com clima quente e úmido, banhada pela Baía do Guajará, apresenta as seguintes coordenadas geográficas: 01° 27' 21" S de latitude e 48° 30' 36" W de longitude e altitude de 10m acima do nível do mar. (Figura 1).

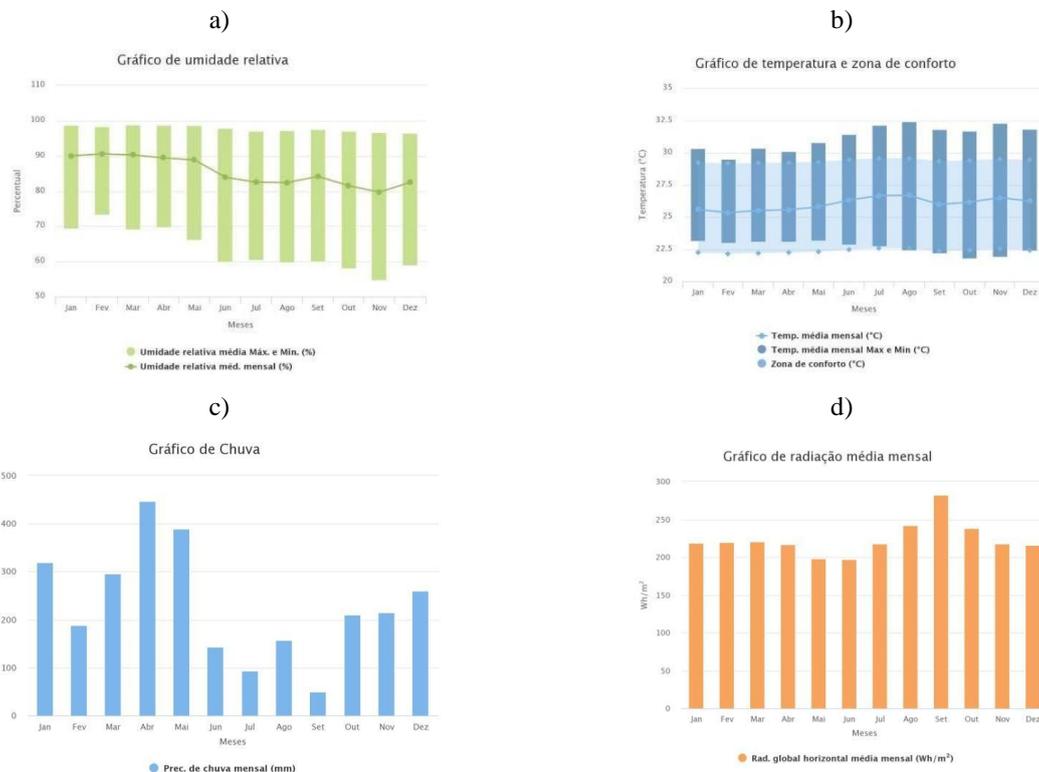
Figura 1 – Localização da cidade de Belém



Fonte: Autores (2022)

De acordo com a plataforma Prejeteee (2021), baseada nos dados do INMET (2021), a cidade possui um clima quente e úmido com temperatura média aproximadamente em torno de 27,94°C e a umidade relativa do ar média mensal máxima de 90,58% em fevereiro e mínima em 79,7%, precipitação de chuva mensal atinge valores máximos no mês de abril com 447mm e mínimos com 50mm registrados em setembro. Os níveis de radiação global horizontal média mensal corroboram com as informações do Solargis, com níveis máximos chegando em 281,89 Wh/m² no mês de setembro, que corresponde ao mês menos chuvoso e, mínimo de 197,04 Wh/m². (Figura 2).

Figura 2 - Dados climáticos – Belém: a) Umidade relativa; b) Temperatura e zona de conforto; c) Chuvas; d) Radiação global média



Fonte: Autores (2022), adaptada de Projeteer (2021)

A combinação destes valores com os das temperaturas do ar indica a dificuldade de obtenção de condições de conforto térmico na região (FONTENELE, 2006). Vale ressaltar que a predominância dos ventos em Belém vem de Leste e Nordeste. A cidade também apresenta alta luminosidade, podendo-se ter iluminação natural mesmo em aberturas protegidas da insolação.

Dito isto, para iniciar a análise de uma edificação em que se pretende captar luz natural, o projetista deve conhecer a localização geográfica da cidade (hemisfério, país, região, coordenadas geográficas) visando identificar a radiação solar global que ela recebe por dia, mês ou ano, além da zona bioclimática a qual se encontra (neste caso, a cidade se encontra na zona bioclimática 8 – NBR 15220-3/2005).

Para a cidade estudada, identificou-se precisamente os dados geográficos e solarimétricos, para a posterior análise e conclusão da orientação ideal, conforme a Tabela 1 a seguir. De posse desses dados, o projetista terá condições de avaliar o melhor posicionamento da envoltória da edificação no lote, e aproveitamento dos recursos naturais como sol, luz e vento.

Tabela 1 - Dados geográficos e solarimétricos das capitais em estudo.

CIDADES / UF	LATITUDE	LONGITUDE	IRRADIAÇÃO SOLAR NO PLANO HORIZONTAL (kWh/m ² .dia)
Belém / PA	01° 27' 21" S	48° 30' 16" W	5,05

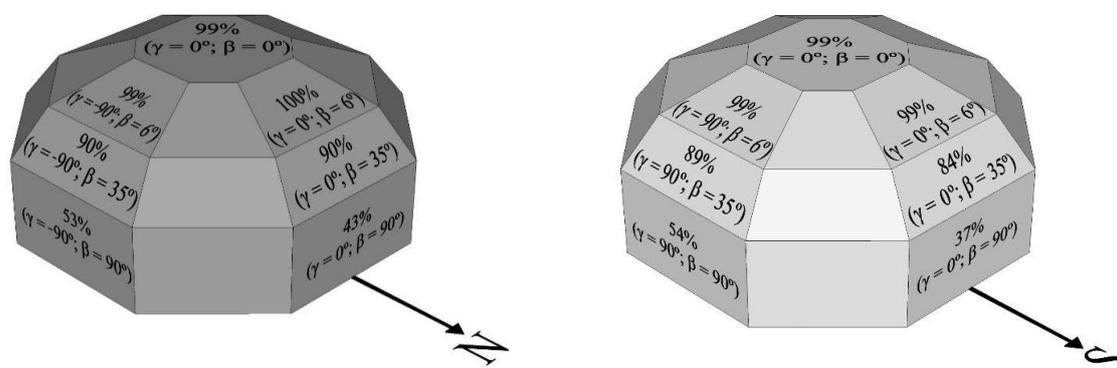
Fonte: Adaptado de METEONORM (2014)

Fazendo um paralelo da irradiação solar com o seu aproveitamento para geração de energia fotovoltaica (FV), as figuras abaixo demonstram, para cidades com baixa latitude, localizadas na região amazônica, em função do azimute solar (γ), que é a medida angular tomada a partir da orientação norte do observador e da inclinação das superfícies receptoras (β), os percentuais

de aproveitamento de irradiância em relação à situação de geração fotovoltaica (FV) ótima de 100%. Como exemplo na cidade de Belém mostrada no Quadro 1, se um painel for posicionado a leste ($\gamma = -90^\circ$) com inclinação totalmente na vertical ($\beta = 90^\circ$), o potencial de geração nesta condição fica aproximadamente igual a 53% do valor ótimo. O programa Meeonorm (2014) indica a inclinação de 6° como a ideal para a cidade de Belém, com $\gamma = 0^\circ$, com esta instalação apresentando irradiação global anual de 1.851 kWh/m^2 . Considerando este valor como ideal, responsável por 100% do aproveitamento do recurso, o Quadro 1 ilustra alguns tipos de instalações, com diferentes inclinações e orientações, com seus respectivos valores percentuais de potencial aproveitado, se comparados ao caso ideal. Nota-se, por exemplo, que a instalação de módulos na vertical ($\beta = 90^\circ$), orientados também ao norte, apresenta disponibilidade de somente 43% do recurso na posição ideal.

Quadro 1- Aproveitamento para inclinações e orientações de capitais do Norte do Brasil.

APROVEITAMENTO PARA ALGUMAS INCLINAÇÕES E ORIENTAÇÕES – BELÉM-PA



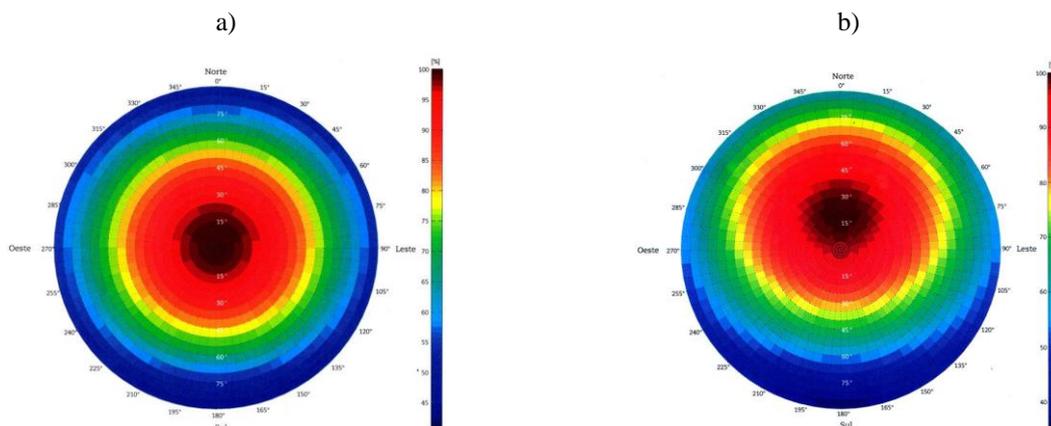
Fonte: Adaptado de FARIAS *et al.* (2014)

Outro estudo que auxilia na avaliação da correta posição e orientação dos sistemas fotovoltaicos são os ábacos solarimétricos, gerados a fim de identificar as situações que terão um melhor desempenho. A Figura 3 mostra, comparativamente, a radiação solar incidente em valores percentuais para Belém e Porto Alegre em função da inclinação e da orientação (ZILLES *et al.*, 2012).

Figura 3 - Disponibilidade de recurso solar em função de orientação e inclinação:

a) Belém-PA; b) Porto Alegre-RS

¹O posicionamento do leste como -90° (Sentido Anti-horário) é uma convenção da engenharia elétrica e áreas afins. Diferenciando-se da notação utilizada em outras áreas do conhecimento como a arquitetura onde o leste é tido como 90° (Sentido horário).



Fonte: Zilles *et al.* (2012)

Nota-se, que em Belém, para inclinações até aproximadamente 10° , o recurso solar incidente em geradores instalados em todas as orientações é praticamente equivalente. Por outro lado, a partir de inclinações de 15° existe uma maior disponibilidade na orientação norte, o que neste caso a caracteriza como a melhor escolha, conforme recomendação anteriormente apresentada. No caso de Porto Alegre, nota-se que a orientação preferencial é sempre norte, com melhores valores em inclinações entre 15 e 30° . Em todas as outras orientações, qualquer inclinação resulta em redução significativa do aproveitamento.

2.1 Iluminação Natural

No tocante às necessidades de iluminação natural, segundo Labaki e Bueno-Bartholomei (2001), se relacionam com percepção visual adequada, e isto pode ser conseguido havendo luz em quantidade e qualidades suficientes. Segundo os autores, estudos nacionais demonstram que a iluminação deve-se adequar com relação à “orientação espacial, a manutenção da segurança física, manutenção do território espacial e o reconhecimento das atividades que dependem da percepção da ordem do campo visual”. Acrescenta ainda, que outro fator de grande importância na questão da iluminação natural é o contato com os elementos da natureza e orientação temporal, para ajuste do relógio biológico. De acordo com os autores para a correta adequação das condições da qualidade luminosa deve-se levar em conta os seguintes aspectos, “qualidade de luz natural e artificial suplementar, o uso de cores nos ambientes internos, para controlar altos níveis de contraste, além do controle de superfícies do entorno da edificação, que interferem na reflexão da radiação solar”. O controle da insolação, também é um ponto importante, com relação a ganho de calor.

2.1.1 Iluminação zenital

Nos diversos estudos sobre iluminação natural e elementos zenitais, observam-se aspectos que os diferenciam dos sistemas laterais, como uma condição de proporcionar melhor distribuição e uniformidade nos níveis de iluminação no ambiente interno, além de em alguns casos, representar maior quantidade de luz natural por área de abertura (ZEILMANN, 1999), porém pelo fato de ter possibilidade de ter visão de grande parcela do céu, tem chances de ocorrer problemas com relação a ofuscamento e ganho de carga térmica interna pela entrada de radiação solar direta. Robbins (1986) sugere, em suas pesquisas, que para avaliações sistemáticas de iluminâncias é necessário avaliar inicialmente as características do ambiente, como o pé direito, geometria, dimensões, formas e posições das aberturas e ainda, o local e as condições de céu.

As aberturas podem ser totalmente ou parcialmente voltadas para o zênite, e em cada caso ocorrem diferenças nos níveis de iluminação e distribuição da luz, a depender de sua geometria, orientação solar, localidade, latitude, época do ano, tipologia do vidro, etc.

De uma maneira geral, as aberturas voltadas diretamente para o zênite, utilizando um vidro difusor, proporcionam maior iluminância, principalmente ao meio-dia. Contudo, fazendo uma avaliação para uma edificação localizada no hemisfério sul, os níveis diminuem no início e final do dia, em comparação com outra abertura parcialmente orientada ao zênite e ao norte, adotando, no fechamento, um vidro claro. (LAM, 1986) Para captação de iluminação zenital são apresentadas duas classificações: abertura diretamente voltada para o zênite e abertura parcialmente voltada para o zênite (LAM, 1986). Em ambos os casos, apresentam vantagens e desvantagens na sua utilização e, sua escolha irá depender, entre outros aspectos, da iluminância desejada. A questão climática deve ser sempre levada em consideração, pois uma escolha equivocada na tipologia de sistema zenital a ser utilizado poderá acarretar aumento nos ganhos de carga térmica interna, que em regiões de climas quentes poderá proporcionar desconforto pelo calor.

3 Metodologia

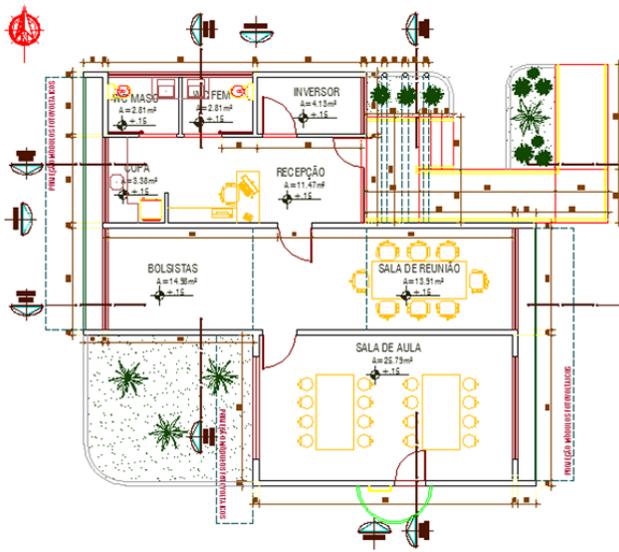
Com a pesquisa embasada teoricamente será proposto um modelo em 3D de uma edificação hipotética, conforme Figura 4 (MONTEIRO *et al.*, 2016), a fim de analisar condições para adequação e possibilidade de captação máxima de luz, a partir da instalação de dispositivos zenitais definidos no modelo, através do emprego do software TropLux onde serão definidos critérios de dimensão e forma para o estudo.

Como resultado foi gerado modelo representativo de uma edificação com volumetria diversificada, que será avaliada de acordo com a realidade local, considerando sua condição climática.

Figura 4 - a) planta baixa modelo (destaque área central com iluminação zenital); b) maquete eletrônica – vista aérea; c) vista externa do elemento zenital; d) vista interna do ambiente avaliado.

a)

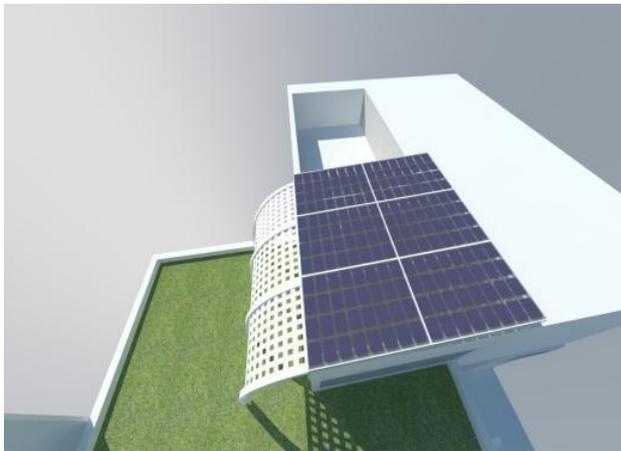
b)



c)



d)



Fonte: Monteiro *et al.* (2016)

Para análise de dados, será estruturada da seguinte maneira:

- Definição dos cenários: para o estudo será proposto um cenário para a análise. Que representa um modelo com o emprego de lanternim em sua cobertura, onde serão estudados os parâmetros de iluminação natural e as maiores limitações à sua instalação, a fim de demonstrar, o quanto é possível aplicar elementos transparentes e sistemas FV semitransparentes sob determinadas condições climáticas e de céu;
- Materiais: para o estudo serão propostos materiais de revestimento interno no modelo, de maneira que potencializem ao máximo a captação e reflexão da luz natural ao interior do ambiente;
- Tratamento de dados: será determinado conforme as características do estudo e da utilização de softwares computacionais;
- Análise dos resultados: serão elaborados relatórios com resultados obtidos na coleta dados das simulações computacionais a fim de caracterizar as diferentes situações avaliadas e seus resultados.

3.1 Modelo avaliado

O modelo adotado no estudo se refere a um ambiente proposto para o projeto de um laboratório de Conforto Ambiental, pensado para adotar soluções projetuais inovadoras aliadas a novas tecnologias e conceitos de sustentabilidade e bioclimatologia, priorizando o uso de sistemas passivos, como a ventilação e iluminação natural, sombreamento com a utilização de elementos de proteção externa e vegetação no entorno.

Para a cobertura foi proposto dois sistemas, para o bloco mais alto adotou-se laje aparente com pintura branca e no bloco mais baixo cobertura verde. Na área de intersecção entre os dois blocos foi proposta uma abertura zenital, com uso de elementos semitransparentes, podendo ser em módulos fotovoltaicos ou vidro fosco.

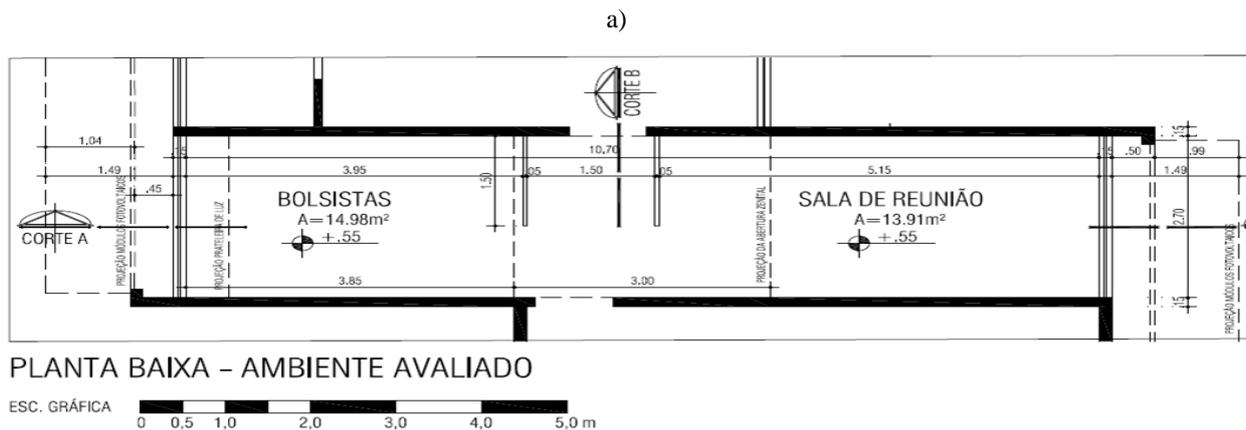
Este ambiente apresenta pé direito duplo e é uma área de passagem, ou seja, de permanência transitória, além de possuir condições de trocas de ar, por efeito chaminé pelas aberturas instaladas nas diferenças entre os níveis da cobertura, favorecendo as trocas de calor com o meio externo. (ver Figura 5). Dessa forma, foi utilizada uma sala de aula de bolsistas e de reuniões para o estudo de caso, onde a boa qualidade de iluminação é de extrema importância.

Assim o ambiente possui as seguintes características: 10,70 m x 2,70 m e pé-direito variado com três alturas, sendo 5,00 m na parte central, 3,40 m na sala dos bolsistas (orientado a oeste) e 3,20 m na sala de reunião (orientado a leste), com azimute de 270° e 90°, respectivamente, em relação à normal da fachada.

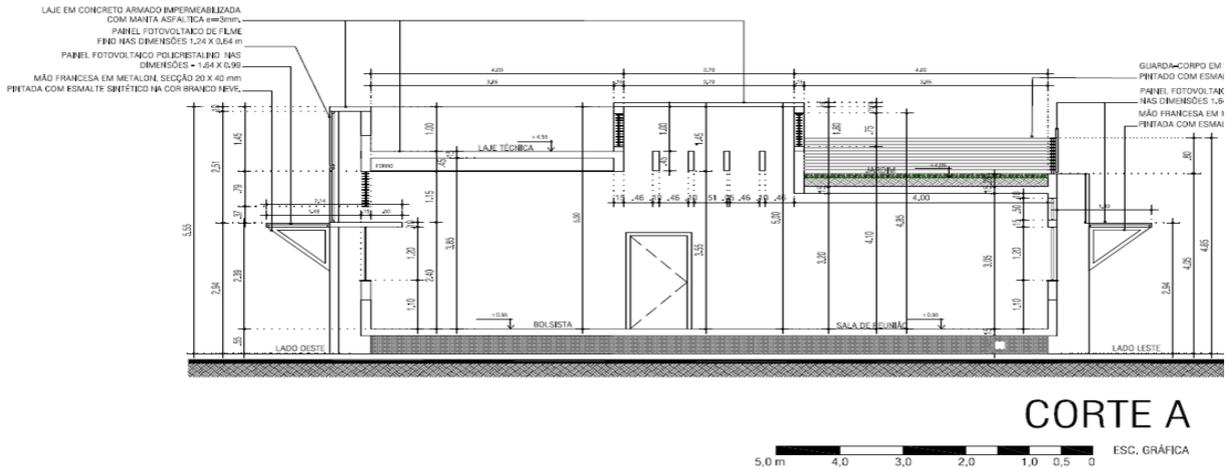
Em relação às aberturas, apresenta duas em paredes opostas, em altura de janelas, no sentido Leste-Oeste, para potencializar o acesso da ventilação predominante, do quadrante Nordeste-Leste, na maior parte do ano, com dimensões de 2,70 m x 1,20 m. Possui no centro, aberturas no lanternim com 2,70 m x 0,75 m.

Para o sombreamento das aberturas foram utilizadas proteções solares horizontais com módulos fotovoltaicos. Como características do ambiente foram adotados os valores de refletância de 0,70 para a tinta branca no teto, paredes e para o piso foi o valor de refletância em 0,20. Para o plano de trabalho foi adotado 0,75m de altura para o cálculo de iluminâncias (CABÚS, 2005).

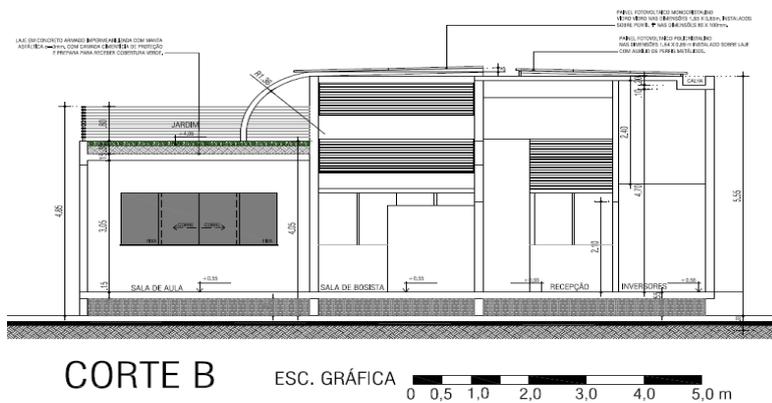
Figura 5 – Ambiente avaliado: a) Planta baixa; b) Corte A; c) Corte B



b)



c)



Fonte: Autor (2021)

3.2 Software TropLux

Com os avanços das tecnologias e desenvolvimentos de softwares específicos, os trabalhos de pesquisa científica ganharam um importante aliado com relação à agilidade e tempo para avaliação de diversos parâmetros em todas as áreas do conhecimento. Notadamente para o estudo do desempenho luminoso, a simulação computacional, vem sendo muito utilizada atualmente, podendo ou não estar associada com avaliação experimental. O programa TropLux, é um exemplo de um software que está em franca utilização no país, por diversos pesquisadores. Já na sua versão 8.0.68 (2021), apresenta método de raio traçado com abordagem de Monte Carlo e conceito de coeficientes de luz natural (CABÚS, 2005). O software possibilita simular as características da iluminação natural no ambiente interno, levando em consideração a configuração de céu (CIE, 2004), criando condições de maior variabilidade de dias e horas.

O programa permite localizar as aberturas, considerando diferentes dimensões e orientações, incluindo os dispositivos externos para proteção solar. E de posse de todos os parâmetros indicados para o estudo é possível realizar os cálculos de iluminância em um ou mais pontos no ambiente interno. Realiza, ainda, a simulação a partir de um tipo de céu previamente determinado, podendo ser escolhido de céu encoberto a claro.

3.3 Indicadores e parâmetros de análise

As simulações foram feitas considerando os seguintes parâmetros: quatro orientações (N, S, L, O); hora solar, 10 medições no intervalo das 7h às 17h (hora solar); todos os dias no ano; malha

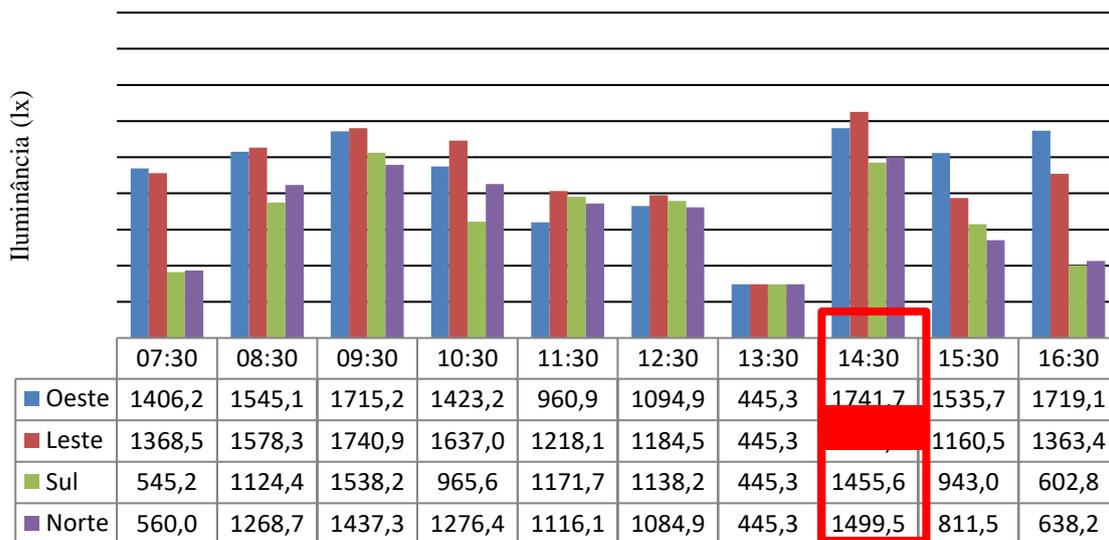
de pontos 3 x 3, quatro tipos de céu CIE, 1, 10, 14 e 16, sendo este último o céu com Distribuição Dinâmica de Luminâncias (DDL) para a cidade de Belém-PA, que foi utilizado nos gráficos a seguir, pelo fato de ter a propriedade de escolher um dos tipos de céu CIE, por probabilidade no dia e hora calculado, de acordo com Cabús (2002).

No presente trabalho, para a avaliação quantitativa da iluminação natural no ambiente interno foi utilizado o parâmetro da Iluminância (E) e Iluminância Média Anual (EMA). No trabalho a iluminância média do plano de trabalho foi utilizada de forma a simplificar a análise comparativa.

4 Resultados e Discussões

Os resultados de iluminância apresentados a seguir ilustram o comportamento da iluminação, considerando apenas o céu DDL, para a componente global, nas quatro datas que coincidem com as mudanças de estações do ano, nos quatro azimutes que correspondem às orientações Norte, Sul, Leste e Oeste e em todos os horários calculados no programa. Deve-se considerar que o modelo desenvolvido para simulação apresenta aberturas em fita em altura de janela e lanternim nas quatro faces. No gráfico 1 observa-se a iluminância para o dia 22.03 (Equinócio de Outono), com registro dos maiores valores às 14h30min, em todas as orientações, sendo que a Leste apresenta os maiores níveis com 1.876,8 lx.

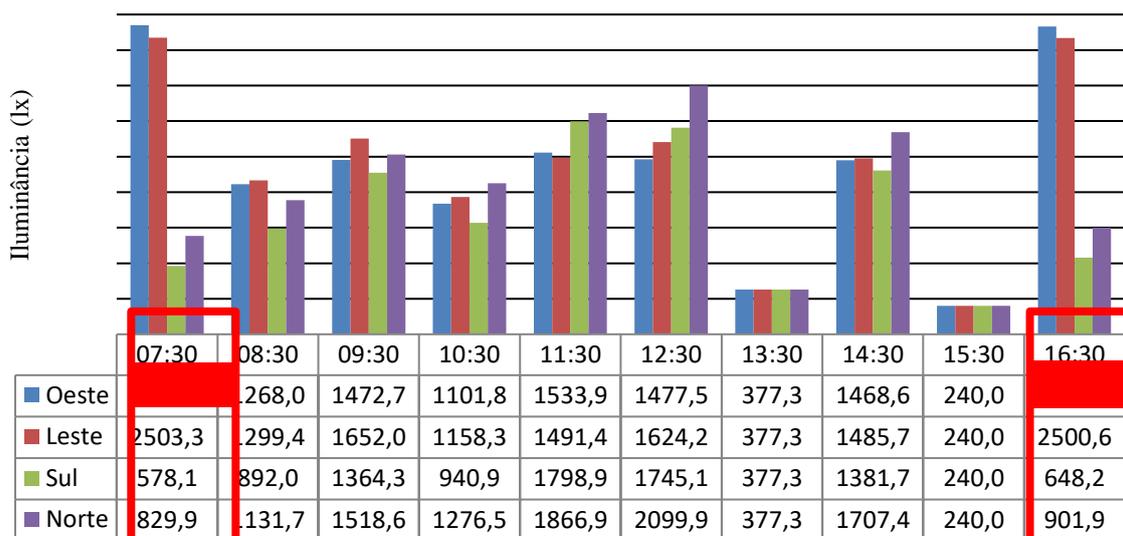
Gráfico 1 - Iluminância Global – Equinócio de Outono (22.03)



Fonte: Autores (2022)

Observando o comportamento do gráfico 2, para o dia 22.06 (Solstício de Inverno) nota-se que os horários com maiores iluminância estão bem destacados no início e final do dia, mais especificamente às 7h30min e às 16h30min, principalmente nas orientações em que o sol está incidindo perpendicularmente às aberturas Leste e Oeste, com valores máximos chegando a 2.610 lux às 7h30min.

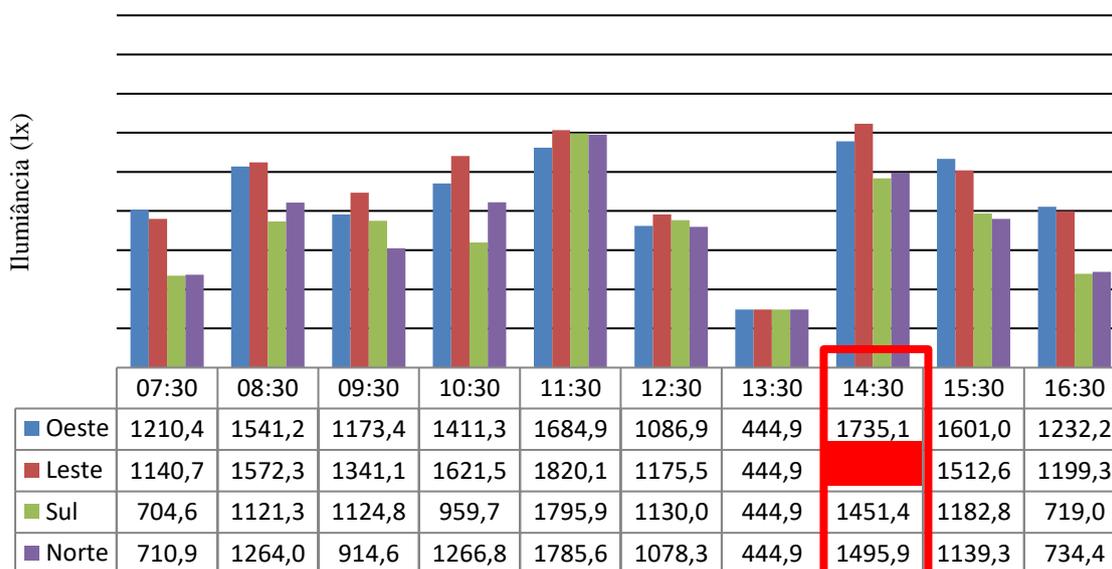
Gráfico 2 - Iluminância Global – Solstício de Inverno (22.06)



Fonte: Autores (2022)

Para a simulação realizada no dia 22.09 (Equinócio de Primavera), demonstrada no gráfico 3, os maiores registros de iluminância ficaram equivalentes ao período do Equinócio de Outono, igualmente às 14h30mn, com valores de iluminância em torno de 1.869,8 lx, na orientação Leste.

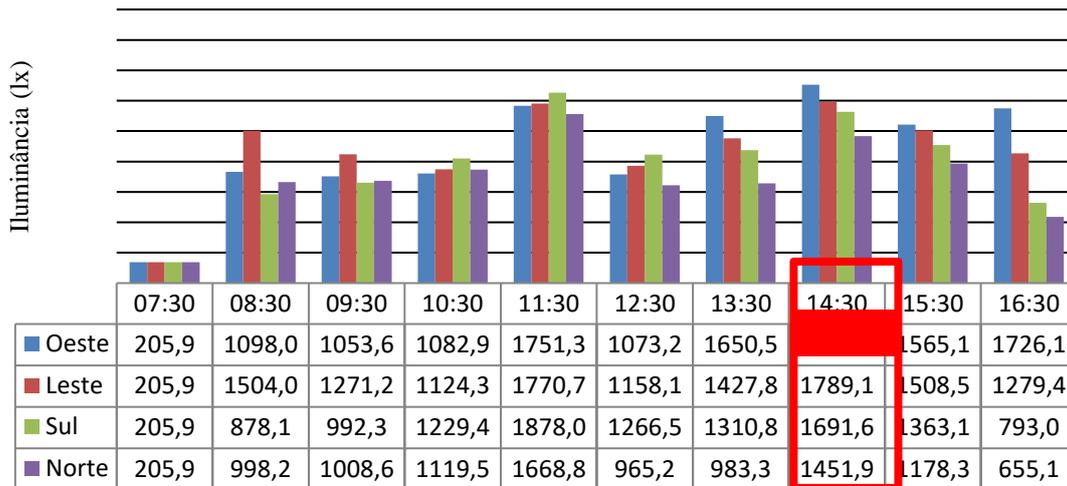
Gráfico 3 - Iluminância Global – Equinócio de Primavera (22.09)



Fonte: Autores (2022)

Da mesma forma, na data de 22.12 (Solstício de Verão), conforme indicado no gráfico 4, os valores mais elevados se mantêm no horário das 14h30min, com registros máximos para a orientação Oeste com 1.957,3 lx. Tal ocorrência pode ser justificada pelo fato do lanternim apresentar aberturas nas quatro faces e as janelas estarem posicionadas na orientação Leste-Oeste.

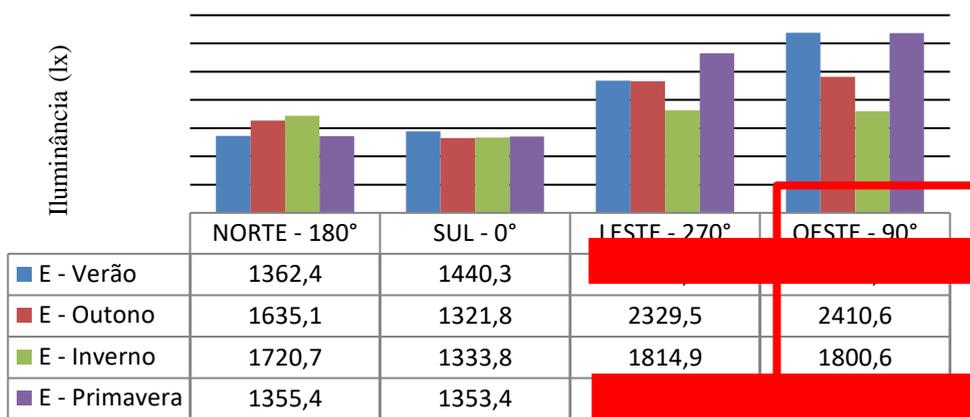
Gráfico 4 - Iluminância Global – Solstício de Verão (22.12)



Fonte: Autores (2022)

Outra simulação foi realizada modificando a malha de pontos, passando para 3 x 3, considerando 9 pontos avaliados, para todos os horários e todos os dias no ano, mantendo a componente global e céu DDL. Dessa forma, optou-se por avaliar pela **métrica de Iluminância Média Anual**, a fim de sintetizar os dados obtidos pelas estações do ano. Observa-se que é grande a disponibilidade de luz natural ao longo do ano, o que atende às normas da ISO CIE 8.995-1 (ABNT, 2013) quanto à iluminação mínima em ambientes de trabalho. Observa-se ainda que as aberturas voltadas a Leste e Oeste apresentam maiores iluminâncias médias, com destaque para o período da primavera em ambas as orientações e especialmente no verão para o azimute 90°, que corresponde a Oeste, pelo fato de apresentar a maior média anual registrada de 3.190,2 lx. Comportamento esperado, considerando a posição das janelas e aberturas zenitais em relação à trajetória aparente do sol (Gráfico 5).

Gráfico 5 - Iluminância Média Anual – EMA



Fonte: Autores (2022)

5 Conclusões

O estudo investigou comparativamente a iluminância ao longo do ano, mais especificamente seu comportamento nas quatro estações, para a cidade de Belém-PA. Para a pesquisa foi utilizado o software TropLux, versão 8.0.68 (2021). Utilizou-se como base de cálculo os índices de iluminância e iluminância média anual.

Os resultados obtidos indicam que as orientações em que a incidência solar é normal à fachada, ou seja, Leste e Oeste correspondem aos maiores valores de iluminância, independente da estação do ano, sabendo-se que o ambiente simulado apresenta aberturas na altura de janelas, justamente nestas orientações e aberturas no lanternim nas quatro faces.

Quando considerado o estudo feito pela iluminância média anual, percebeu-se que a orientação Oeste, em três épocas do ano, apresentou alta iluminância, mesmo quando comparada com a orientação Leste que, apesar de ter registrado valores elevados, ainda ficou abaixo da fachada Oeste, com exceção do período de inverno que teve um discreto aumento na sua iluminância.

No entanto, quando se observa separadamente a influência das estações do ano, percebe-se que na maioria dos casos os maiores valores de iluminância são registrados no período do verão, pois apenas na orientação Norte os maiores níveis foram registrados no inverno.

Apesar de o estudo ter apresentado poucas variações quantitativas, mostrou-se importante do ponto de vista teórico, pelo fato de ter demonstrado cenário possível de ser simulado para avaliação de conforto luminoso em ambiente com aberturas zenitais em clima quente e úmido.

Para prosseguimento da pesquisa, prevê-se o seu aprofundamento através de investigação da interferência que o aumento da malha de pontos e seu afastamento poderão resultar, assim como avaliar o ambiente e suas aberturas através de outras métricas a fim de contribuir com a tomada de decisões de projeto para permitir níveis de iluminância adequados, contudo evitar grandes exposições solares, principalmente através das aberturas zenitais.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO/CIE 8995-1**: Iluminação de ambientes internos de trabalho. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

CABÚS, Ricardo C.; RIBEIRO, Pedro V. S.; BASTOS, Orestes M. K.; SILVA, Luís F. **TropLux 8**. Titulares: Universidade Federal de Alagoas, Instituto Lumeeiro. BR512020002087-9. Criação: 10 set. 2019. Registro: 06 out. 2020.

CABÚS, Ricardo C. **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil**. 2002. 288 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura, University Of Sheffield, Sheffield - South Yorkshire.

CABÚS, R. C. TropLux: um sotaque tropical na simulação da luz natural em edificações. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO, 4. ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., Maceió, 2005. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2005a.

CABÚS, Ricardo. Validação do programa TropLux. In: VII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e IV Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, n. 7, 2005, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: ENCAC, 2005b. p. 1-10.

CERQUEIRA, J. L. R. P. **Estudo radiometeorológico da Região Amazônica**. 2006. 261 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica da Puc-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=8934@1&msg=28#>. Acesso em: 26 out. 2020.

CHIVELET, N. M; SOLLA, I. F., **Técnicas de Vedação Fotovoltaica na Arquitetura**. Tradução Alexandre Salvaterra. Porto Alegre: Bookman, 2010. 194 p.

CIE - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **ISO 15469:2004(E) /CIE S 011/E:2003**. Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky. Vienna: Commission Internationale de L'Eclairage, 2004.

FARIAS, R. T. *et al.* **BIPV E BAPV**: avaliações a partir de conceitos teóricos, de aspectos positivos e negativos e de estimativas de desempenho energético para regiões de baixa latitude. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar. Recife, 2014.

FONTENELE, Helane B. **Uso e adequação de Tensoestruturas à Região Amazônica** – Estudo de caso: Feira do Ver-O-Peso em Belém-Pa / Helane Barbosa Fontenele. – Belém, PARÁ: [s.n], 2006. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/1879/4/Dissertacao_UsoAdequacaoClimatica.pdf. Acesso em: 27 mai. 2018.

HAGEMANN, I. B., 2002. **Building Integrated Photovoltaic**: Architectural Integration of Photovoltaics in the Building Envelope (emalemão). Müller Rudolf.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO BRASIL**. 2020. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 22 nov. 2020.

LABAKI, L. C.; BUENO-BARTHOLOMEI, C. L. **Avaliação do conforto térmico e luminoso de prédios escolares da rede pública, Campinas-SP**. In: VI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. São Pedro/SP: Novembro/2001.

LAM, William M.C. **Sunlighting**: as formgiver for architecture. New York : Van Nostrand Reinhold, 1986.

LUZ, Luziane Mesquita da et al. **Atlas Geográfico Escolar do Estado do Pará**. Belém: GAPTA/UFPA, 2013. 64 p. ISBN: 978-85-63117-11-3. Disponível em: <https://bityli.com/PXrds>. Acesso em: 26 out. 2020.

METEONORM. Disponível em: <http://meteonorm.com>. Acesso em: 15 jan. 2014.

MONTEIRO, Marcela Marçal Maciel et al. Projeto de laboratório de arquitetura sustentável com aplicações de conceitos de sistemas fotovoltaicos e de eficiência energética. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 6., 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Cbens, 2016. p. 1-8.

PARÁ. Semas. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (Semas). **CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DO PARÁ**: (método de Köppen). 2020. Disponível em: <https://bityli.com/zlu4P>. Acesso em: 26 out. 2020.

PINHO, João Tavares e GALDINO, Marco Antonio (Org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

PROJETEEE, Projetando Edificações Energeticamente Eficientes. **ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS**. 2020. Desenvolvido pela Universidade Federal de Santa Catarina, em parceria com: LabEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Disponível em: <http://projeteee.mma.gov.br/>. Acesso em: 18 dez. 2020.

REBÊLO, Marcelle Maria Pais Silva; CARVALHO, Marlise Lila Silva; CABÚS, Ricardo Carvalho. Análise do desempenho de abertura zenital para a iluminação natural de circulação em edifício administrativo. XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais [...]** ENCAC, ELACAC. 2015.

ROBBINS, Claude L. **Daylighting**: design and analysis. New York : Van Nostrand Reinhold, 1986.

ZEILMANN, Solange Maria Leder. **ILUMINAÇÃO NATURAL POR ABERTURAS ZENITAIS COM ELEMENTOS DE CONTROLE**. 1999. 137f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC.

ZILLES, R. et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.