

INTEGRAÇÃO DA LUZ NATURAL EM EDIFICAÇÃO DE ENSINO SUPERIOR USANDO A INI-C

INTEGRATING NATURAL LIGHT IN A UNIVERSITY BUILDING THROUGH INI-C

Larissa Arêdes Monteiro¹

Ludmila Cardoso Fagundes Mendes²

Roberta Vieira Gonçalves de Souza³

Carolina Lemonge Amorim⁴

Giovanna Barreto de Souza Machado⁵

Resumo

As edificações de ensino têm na iluminação um dos principais usos finais no consumo de energia elétrica com potencial significativo para a integração dos sistemas de iluminação natural e artificial. A Instrução Normativa Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), publicada em setembro de 2022, avalia, entre outros itens, a eficiência energética do sistema de iluminação elétrica e sua integração com a iluminação natural. O presente estudo comparou o potencial de integração da luz natural pelos métodos simplificado e de simulação conforme metodologia proposta em uma edificação de ensino superior. Concluiu-se que, embora ambos gerem a mesma classificação para o sistema de iluminação, o método de simulação resulta em áreas maiores para as zonas primárias de iluminação natural. Como estas zonas podem incluir mais de uma fileira de luminárias a partir da abertura, sugere-se que esta zona seja dividida em linhas paralelas à abertura.

Palavras-chave: Eficiência energética, edificações de ensino, iluminação, INI-C, simulação

Abstract

Educational buildings have lighting as one of the main end uses in the consumption of electricity with significant potential for the integration of natural and artificial lighting systems. The Inmetro Normative Instruction for Energy Efficiency Classification of Commercial, Service and Public Buildings (INI-C), published in September 2022, evaluates, among other items, the energy efficiency of the electric lighting system and its integration with natural lighting. The present study compared the potential of integration of natural light by simplified and simulation methods according to the methodology proposed in a higher education building. It was concluded that, although both generate the same classification for the lighting system, the simulation method results in larger areas for the primary zones of natural lighting. As these zones may include more than one row of luminaires from the opening, it is suggested that this zone be divided into lines parallel to the opening.

Keywords: Energy efficiency, educational buildings, lighting, INI-C, simulation

Universidade Federal de Minas Gerais, <https://orcid.org/0000-0002-5196-3566>, lam2019@ufmg.br¹

Universidade Federal de Minas Gerais, <https://orcid.org/0000-0002-7751-2069>, ludmilamendes@ufmg.br²

Universidade Federal de Minas Gerais, <https://orcid.org/0000-0003-0036-961X>, robertavgs@ufmg.br³

Universidade Federal de Minas Gerais, <https://orcid.org/0009-0007-3388-1042>, carolinalemonge@gmail.com⁴

Universidade Federal de Minas Gerais, <https://orcid.org/0009-0001-8844-9181>, barreto.gsouza@gmail.com⁵

INTRODUÇÃO

No Brasil, foi publicada, em setembro de 2022, a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), que regulamenta a emissão da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) na avaliação de edifícios comerciais, de serviços e públicos. Dentre os sistemas de consumo de energia elétrica das edificações analisados pelo sistema estão o condicionamento de ar e a iluminação (1).

Conforme exposto no Manual para Etiquetagem de Edificações Públicas “a maior demanda de gasto energético nas edificações é para obtenção de conforto ambiental, principalmente para iluminação artificial (20% a 35%) e para condicionamento de ar (40% a 55%)”, elevando a importância das discussões de estratégias simultâneas da área de conforto e de eficiência energética (2).

Diante do cenário no qual a conservação e o uso racional de energia elétrica são cada vez mais discutidos, os estudos relativos à integração entre a luz natural e artificial passaram a ter maior relevância (3). Aproveitar a luz do dia pode ser uma estratégia primária em edifícios educacionais para reduzir o consumo de energia, melhorar a saúde e o desempenho de alunos e professores no ambiente de aprendizagem, mas para tal, a iluminação deve ser fornecida de forma uniforme e a avaliação de parâmetros de conforto visual, como uniformidade da iluminância e controle de ofuscamento, são de grande importância nestes espaços (4).

Além disso, de acordo com Reinhart e Wienold (5), um espaço que seja iluminado pela luz do dia deve também associar elevada satisfação dos ocupantes, considerando conforto visual e térmico com baixo consumo energético para iluminação artificial, aquecimento e resfriamento.

Ainda há poucos trabalhos na literatura técnica sobre a aplicação da metodologia de análise do sistema de iluminação natural integrada ao de iluminação artificial junto à INI-C em edificações existentes ou em projeto. Estes ou são artigos anteriores à publicação definitiva da INI-C, feita em fevereiro de 2021 (tendo sido uma versão atualizada publicada em setembro de 2022), ou não analisam o método de simulação de luz natural para integração da luz artificial (6, 7, 8).

O presente artigo então visa analisar os métodos simplificado e de simulação que determinam o potencial de integração entre o sistema de iluminação artificial e a luz natural da INI-C.

REVISÃO DE LITERATURA

O consumo energético de edificações exerce um papel fundamental nas necessidades globais de energia. Edifícios bem projetados, construídos e operados de forma adequada tendem a alcançar significativas economias de energia elétrica, o que leva a eficiência energética de edificações ser considerada de extrema importância para lidar com a escassez de recursos (9). Ao mesmo tempo, Ambientes internos adequados e saudáveis exigem condições ambientais que garantam o conforto térmico, acústico e visual aos usuários. A falta de um desses fatores pode afetar significativamente na saúde e no desempenho dos usuários (10).

Nas edificações de ensino universitário do Brasil o sistema de iluminação artificial é um dos principais consumidores de energia elétrica, especialmente em instituições públicas que, de forma geral, são condicionadas artificialmente ou em modo híbrido (11). Nestes espaços, tem-se ainda que as salas de aula, os laboratórios e os setores administrativos são os ambientes que tendem a apresentar consumo de energia elétrica para iluminação mais significativo (11, 12). Para reforçar esta afirmativa, Brandão (12), ao analisar o consumo de energia elétrica da Escola de Arquitetura da UFMG, encontrou um consumo de iluminação elétrica de 51% do consumo total da edificação, sendo o setor administrativo responsável por 41% deste consumo e as salas de aula e os laboratórios responsáveis por 36%.

O alto consumo de energia elétrica de sistemas de iluminação em salas de aula é objeto de estudo em diferentes países. Pesquisas realizadas em edificações de ensino associam o alto consumo de energia à instalação de lâmpadas com potências elevadas e à deficiência de iluminação natural nestes ambientes. A orientação e o dimensionamento das aberturas são temas comuns para a avaliação do aproveitamento da iluminação natural (3; 13; 14). Nesse sentido, a literatura indica que o potencial da luz natural, para a redução do uso do sistema de iluminação artificial, pode ser otimizado ao definir a implantação do edifício no terreno. Para tal propósito, devem ser consideradas tanto as condicionantes climáticas quanto a presença de obstruções no entorno (15).

França, Fonseca e Pereira (15) defendem ainda que a integração entre os sistemas de luz natural e artificial é fundamental para a eficiência energética do edifício. A disponibilidade de luz natural deve guiar a setorização do sistema de iluminação. A possibilidade de o usuário interferir nos sistemas de controle da iluminação, de acordo com a oferta de luz natural, pode gerar um significativo potencial de economia à energia elétrica.

Rodrigues *et al.* (7), em pesquisa anterior à publicação da INI-C, reconheceram a influência da obstrução do entorno para os valores de ALNE. Os resultados da pesquisa mostraram que a avaliação de um ambiente com base no levantamento de zonas primárias de iluminação, a partir das geometrias das janelas, superestimou os valores de ALNE. O resultado foi considerado superestimado quando comparado com os valores obtidos para o mesmo ambiente, por meio de simulação computacional, onde o entorno da edificação foi considerado.

Fatores inerentes à própria arquitetura e ao projeto luminotécnico também não devem ser negligenciados. A setorização do sistema de iluminação, segundo a disponibilidade de luz natural, permite ao usuário operar tal sistema em consonância com a oferta de luz natural, o que já representa um potencial de economia de energia (15).

Tal consideração foi comprovada por pesquisa realizada na Polônia, que investigou a disponibilidade de luz natural para uma sala de aula típica, para diferentes possibilidades de orientação do edifício. Foram considerados dois métodos de controle de iluminação, sendo que o primeiro, denominado “liga/desliga”, consistiu em ligar as luminárias quando a luz natural era inferior a um valor especificado e desligá-la quando a luz natural excedia esse valor. Já o segundo método utilizado, denominado “controle de escurecimento”, analisou as condições em que fileiras de luminárias poderiam ter sua intensidade reduzida ou aumentada, considerando o aproveitamento da luz

natural. Os resultados apontaram que haveria economia de energia elétrica para os dois métodos, sendo o segundo mais eficaz (14).

Cabe destacar que uma pesquisa desenvolvida no Brasil investigou os aspectos que caracterizam o processo de projeto luminotécnico aplicado à arquitetura. Esta pesquisa apontou que, muitas vezes, os projetos de iluminação são contratados quando o projeto arquitetônico já se encontra em fase avançada. Tal situação tende a limitar o projeto luminotécnico, o que gera prejuízo na adoção de soluções que aproveitem a luz natural e, consequentemente, compromete a eficiência energética do sistema de iluminação (16).

Na avaliação da luz natural nos espaços, as métricas de iluminação ponto-no-tempo giram em torno principalmente das iluminâncias horizontal e vertical, luminâncias e índices de brilho (17). Porém, essas métricas são capazes de analisar apenas um ponto, em um dado momento.

O avanço dos programas de simulação computacional contribuiu para dar agilidade e amplitude para os processos de análise do comportamento da luz natural. A luz do dia precisa ser considerada com as variações climáticas ao longo do dia e do ano e as métricas de avaliação da iluminação natural baseadas no clima surgiram para suprir a incapacidade das métricas ponto-no-tempo de avaliar o desempenho anual da luz natural nos espaços, considerando sua variabilidade ao longo das horas e dias do ano. As métricas dinâmicas constantes em normativa atualmente são a Autonomia Espacial da Luz Natural (sDA - Spatial Daylight Autonomy) e de Exposição Anual à Luz Solar Direta (ASE - Annual Sunlight Exposure). A Autonomia Espacial da Luz Natural Espacial (sDA – Spatial Daylight Autonomy) foi proposta na norma norte-americana LM-83-12 como uma medida da suficiência de iluminância da luz do dia para espaços internos, indicando a porcentagem da área do piso que excede um nível de iluminância para uma quantidade de horas anuais. A Exposição à Luz Solar foi tratada pela LM-83-12, com a métrica Exposição Anual à Luz Solar Direta (Annual Sunlight Exposure - ASE), que fornece uma dimensão da análise da luz do dia, olhando para uma fonte potencial de desconforto visual, a luz solar direta (18).

A simulação dinâmica da luz natural possibilitou maior controle das variáveis e simulações de um número grande de situações. Normas e recomendações têm surgido dessa metodologia (19).

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), responsável pela Etiqueta Nacional de Conservação de Energia no Brasil (ENCE), publicou em 2021 a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), que, no âmbito do sistema de iluminação, estabelece parâmetros para sua eficiência energética, com o aproveitamento da luz natural e uso mais racional da luz elétrica. A INI-C tem como uma de suas referências a LM-83-12. A Instrução Normativa dispõe sobre parâmetros para aproveitamento da luz natural, com estimativa da iluminação natural através de dois métodos: simplificado ou de simulação computacional baseada em métricas dinâmicas, e pré-requisitos para integração da luz natural à iluminação elétrica (1).

Como principal motivador da implementação da INI-C, destaca-se a melhoria dos indicadores de desempenho. Até então, a etiquetagem de edificações

classificava o desempenho energético das edificações utilizando indicadores que, apesar de permitir a sua classificação das edificações e seus sistemas de A a E, não fornecia uma ideia de grandeza relacionada ao consumo real da edificação. Esta limitação não permitia que a economia gerada por medidas de eficiência energética empregadas fosse quantificada (20).

Agora a metodologia da INI-C indica que a classificação do sistema de iluminação é dada pela comparação da potência instalada na edificação analisada com a de uma edificação de referência (1). Quando se obtém uma classificação nível A, devem-se ainda cumprir 4 pré-requisitos para pelo menos 90% da potência instalada. Como primeiro pré-requisito para a classificação A do sistema de iluminação, a INI-C exige a indicação do potencial de integração com a iluminação natural. Este pré-requisito não possui restrições quanto aos valores a serem atingidos, mas sua determinação é obrigatória. O potencial de integração pode ser obtido por dois métodos: o simplificado ou o de simulação. No primeiro caso, devem ser delimitadas as zonas primárias de iluminação (ZP), em planta-baixa. Estas resultam em áreas demarcadas, com base na posição e largura das aberturas e na altura da verga. A ZP obtida pelo método simplificado não deve ser considerada nos seguintes casos:

1. nos ambientes onde o fator da projeção de elementos horizontais (como marquises e brises) em relação ao somatório da altura da abertura com a altura da verga, seja superior a 1,5 ou a 1,0 na fachada sul;
2. em ambientes com área de esquadria inferior a 1,86 m²;
3. em ambientes destinados a atividade de varejo;
4. em ambientes cujo entorno seja pelo menos 2 vezes mais alto que o topo de suas aberturas.

Pelo método de simulação, deve ser verificada a Exposição Anual à Luz Solar Direta (EAS_{1000lx,250h}). Tal medida visa constatar os horários em que o uso de cortinas é necessário para evitar desconforto pela exposição direta à luz do sol, nos ambientes com computadores ou atividades de escrita ou leitura. De acordo com a INI-C, todas as janelas voltadas para o exterior, de ambientes com atividades visuais tais como ler, escrever e utilizar o computador, que exijam controle de ofuscamento, devem ser modeladas com persianas ou cortinas operadas de forma a bloquear a luz direta do sol. São exceções a este requisito janelas em que não há previsão de instalação de persianas e janelas para as quais a simulação da exposição anual à luz solar direta mostrar que o plano de análise associado a um determinado grupo de janelas atende aos critérios de exposição anual à luz solar direta máxima, conforme os critérios de operação de persianas da *IES LM-83*, em sua versão mais recente.

Após a determinação da EAS, o potencial de integração da iluminação natural com a iluminação artificial é obtido a partir da determinação das áreas com Autonomia da Luz Natural Espacial de no mínimo 300 lux em 50% das horas diurnas (ALNE_{300lx,50%}), devendo ser usadas persianas na simulação sempre que indicado pela avaliação anterior (1).

O pré-requisito seguinte a ser atendido é o da Contribuição de Luz Natural, onde luminárias mais próximas às aberturas devem possuir acionamento independente das demais luminárias do ambiente, garantindo o aproveitamento da luz natural. Em terceiro, está a análise do controle local, onde ambientes de até 250 m² devem possuir pelo menos um dispositivo de controle manual para ativação da iluminação de forma autônoma – cada dispositivo de controle deve controlar, em função do tamanho do ambiente, uma área de no máximo 250 m² ou de 1.000 m². Em quarto, está o

desligamento automático, onde sistemas de iluminação de ambientes maiores que 250 m² devem possuir um dispositivo de controle automático para o desligamento da iluminação (1).

A simulação dinâmica requer cuidados para o desenvolvimento de avaliações precisas que vão desde a modelagem dos espaços à correta entrada de dados. A modelagem deve representar a volumetria fiel da edificação, independentemente da quantidade de espaços analisados, a fim de caracterizar qualquer condição de auto obstrução. Deve ser modelada também, nas três dimensões, qualquer abertura que permita a incidência da luz natural no interior dos ambientes, seja de forma direta ou indireta. Detalhes de aberturas com dimensões mais significativas também devem ser modelados. A modelagem deve permitir uma boa leitura espacial geométrica da edificação e das propriedades dos materiais com suas características de reflexão, transmissão difusa e especular. Qualquer elemento de sombreamento e controle de luz solar, interno ou externo ao edifício, também deve ser representado no modelo (1; 21).

Segundo a INI-C o entorno pode ser modelado apenas com superfícies planas, sem detalhamentos. A modelagem de vegetação é opcional, devendo ser analisadas sua variabilidade e características. Caso seja modelada, pode ser feita com formas simplificadas, em tamanho apropriados e refletância de 20%. Obstruções externas devem ser desenhadas levando-se em consideração as edificações e topografia do entorno imediato. O afastamento e a largura das vias devem ser contabilizados (1).

Para a etapa da simulação, um dos principais requisitos é a informação da localidade, com o uso de um arquivo climático, que resume a zona climática em questão, trazendo para o programa condicionantes de projeto de uma localidade (21), o que permite a modelagem climática anual horária.

Segundo a Instrução Normativa (1), o arquivo climático utilizado deve, pelo menos, ter uma série temporal anual de 8.760 valores horários anuais; fornecer parâmetros mínimo como irradiação/iluminância horizontal global, irradiação/iluminância direta normal e irradiação/iluminância difusa horizontal; representar os dados climáticos do grupo climático onde o projeto estará locado; ter o formato INMET, publicado no website⁶ do PBE Edifica, ou no formato SWERA, TMY ou TRY⁷.

Outra exigência do programa de simulação é a informação do intervalo do período de análise para a simulação. A programação é usada pelas métricas de luz natural ao executar uma análise de disponibilidade de luz natural (21). A disponibilidade de luz do dia varia significativamente ao longo do dia, bem como as condições climáticas e de céu. Por isso, o período de análise pode alterar a disponibilidade anual da luz natural e, para fins de pesquisa, é necessário definir padrões amplamente compartilhados de desempenho (22).

Segundo a INI-C, para a tipologia educacional, na parte de desempenho térmico, deve-se considerar o funcionamento do edifício de 8 horas diárias, em 200 dias no ano, calculados com base na média de dias úteis por ano, excluindo-se os meses de férias, feriados nacionais e fins de semana (1).

⁶ No endereço: <<http://pbeedifica.com.br/arquivos-climaticos>>

⁷ SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment; TMY – Typical Meteorological Year; TRY – Test Reference Year (BRASIL, 2021).

OBJETIVO

Analisar o potencial de integração da iluminação natural e artificial tomando como estudo de caso uma edificação de ensino superior, através dos métodos simplificado e de simulação da INI-C.

MÉTODO

A pesquisa foi dividida em duas etapas. Inicialmente, foi feito levantamento da edificação de estudo. Depois, foi aplicada a metodologia da INI-C para análise do potencial de integração da luz natural, através dos métodos simplificado e de simulação, a fim de se comparar seus resultados. Para o cálculo de área iluminada desconsideraram-se espaços ocupados por elevadores, shafts e paredes.

Descrição do estudo de caso

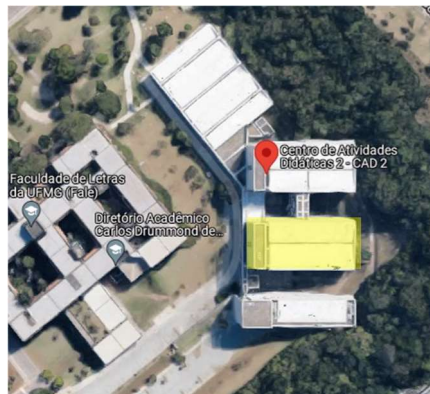
Para análise das metodologias de obtenção do potencial de integração da luz natural foi selecionado o CAD 2 da UFMG, edificação que é objeto de estudo do Projeto Oásis-UFMG. O Projeto Oásis é um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Institucional firmado em 2019, para a implementação de novas tecnologias conjugadas com produção científica, redução de custos e sustentabilidade energética do *campus* Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais (23). Seu escopo inclui a análise de eficiência energética de edificações, através dos requisitos do sistema de etiquetagem PBE Edifica.

O Centro de Atividades Didáticas de Ciências Humanas (CAD 2) da UFMG possui 4 blocos. Para o estudo de caso, foi selecionado o Bloco 2 (Figura 1), que é conectado por passarelas e blocos de circulação, à norte ao Bloco 1 e à sul ao Bloco 3. À oeste, existe uma área livre gramada e à leste uma área arborizada (Figura 2).

Figura 1: Vista do CAD 2 com o Bloco 2 demarcado



Figura 2: Bloco 2 do CAD 2 – vista e implantação



A edificação possui área de 4.100 m² distribuídos em 5 pavimentos. O 1º pavimento é composto por áreas de circulação vertical e pilotis. Os pavimentos de 2 a 5 concentram salas de aula, os laboratórios e as salas de apoio para professores, além de ambientes de permanência transitória. Possuem beiral em concreto nas fachadas norte e sul e *brises* metálicos nas aberturas norte.

As salas de aula, os laboratórios e as salas de apoio para professores possuem esquadrias de alumínio e vidro com peitoril de 1,2 m. Nos DML o peitoril é de 1,5 m. No hall de elevadores do pavimento 1, o peitoril é de 1,2 m e acima há uma pele de vidro contínua, até o 5º andar. Na área de circulação vertical dos três primeiros pavimentos há conexões de acesso ao bloco 1. Já nos pavimentos 4 e 5 a caixa de escada é fechada com vidro contínuo. No hall de circulação de todos os pavimentos há portas em vidro e alumínio. Foi identificado o uso de película nas janelas das salas de aula.

Após a construção da edificação foram instaladas películas nos vidros dos ambientes de permanência prolongada para controle de ofuscamento como pode ser visto nas figuras 3 e 4.

Figura 3: Fachada externa do Bloco 2 com película nas janelas das salas de aula



Figura 4: Interior de sala de aula, com película nas janelas



A Tabela 1 indica as propriedades óticas dos materiais para cada componente da edificação. Os vidros foram simulados com película para representar a situação existente no espaço. A INI-C coloca que, quando não houver informações sobre persianas ou cortinas, devem ser consideradas persianas hipotéticas com operação, modelagem e propriedades óticas de acordo com o protocolo da *IES LM-83*, em sua versão mais recente.

Tabela 1: propriedades óticas dos materiais

Material	Propriedade	Fonte
Paredes internas	Branco - Refletância = 84,2%	(24)
Paredes externas	Cinza claro - Refletância = 51,5%	(25)
Piso	Cinza médio - Refletância = 42,9%	(26)
Forro	Branco - Refletância = 84,2%	(24)
Vidro incolor 6 mm simples	Transmissividade luz visível (Tvis) = 85%	(27)
Vidro incolor 6mm com película Black 35	Branco - Refletância = 33,4%	(28)
Cortinas	Tvis de 15,4% ⁸	(29)

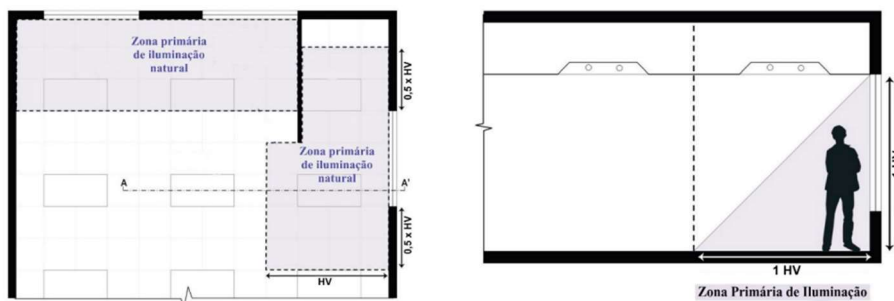
Análise da contribuição da luz do dia pelo método simplificado

No método simplificado, o projeto arquitetônico foi utilizado para a demarcação das zonas primárias de iluminação, para cada ambiente,

⁸ A cortina utilizada possui Tvis de 15,4%, pois é a maior transmissividade fornecida pelo *software* utilizado.

segundo o disposto no INI-C (ver Figura 5). Os valores encontrados foram registrados em uma planilha organizada de acordo com os pavimentos analisados.

Figura 5: Esquemas em planta e corte da definição zonas primárias de iluminação natural para as aberturas laterais. (1)



Análise da contribuição da luz do dia pelo método de simulação

Para a modelagem geométrica do edifício foi utilizado o *software* Sketchup 2019. Além do Bloco 2, foram modelados os demais blocos do conjunto e as ligações entre as edificações que compõem o entorno da edificação. Elementos de proteção solar também foram considerados. Posteriormente, a volumetria criada foi exportada para o *software* Rhinoceros 6.0, onde foram definidos os materiais no *plug-in* ClimateStudio com o qual foi avaliada a disponibilidade de iluminação natural.

O arquivo climático para a simulação deve conter uma série temporal anual de 8.760 valores horários. A simulação foi realizada com o arquivo climático de Belo Horizonte disponível na plataforma Climate One Building (30): "BRA_MG_Belo.Horizonte-Neves-Confins.Intl.AP.835870_TMYx.2004-2018".

Foram consideradas refletâncias e transmitâncias apresentadas na Tabela 1. Para os vidros das esquadrias foi considerado vidro incolor com Tvis de 81% e o vidro com película com Tvis de 31%. Além disso, foi aplicado um fator de depreciação de 5%. Para a determinação do EAS, persianas foram simuladas nos espaços com atividades de leitura, escrita e computadores, sendo essas salas de aula e apoio professores, apesar de o prédio não contar com previsão atual para instalação dessas.

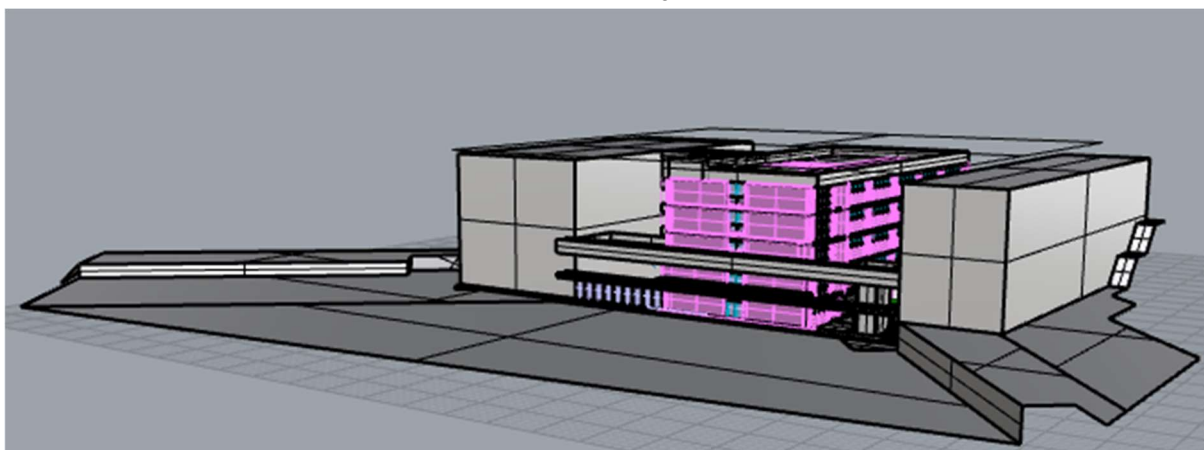
A configuração da malha de pontos seguiu as recomendações da INI-C: altura de 0,75m em relação ao piso; distância entre pontos de 0,50 m e espaçamento entre a malha e as paredes de 0,30 m (instalações sanitárias, DML e circulações estreitas) e 0,50 m (salas de aula, apoio professores, hall, pilotis). No ambiente de DML foi considerado o espaçamento entre pontos da malha de 0,20 m, para atender o mínimo de 25 pontos, recomendado pela INI-C. Para avaliação do espaço da escada, foi selecionado o patamar para criação de um plano único de referência, já que se encontra na altura média da escada, em cada pavimento. A partir deste, foi criada a malha de pontos a 0,75 m de altura, indicado pela INI-C.

Quanto aos parâmetros avançados do Radiance, utilizaram-se valores predefinidos pelo programa (*ambient bounces* = 6, *ambient division* = 1, *limit weight* = 0,01, *sample rays per person per pass* = 64, *max number of passes* = 100).

A partir dos resultados de Autonomia da Luz Natural Espacial, foi possível obter a área representativa de cada pavimento para posterior determinação do potencial de integração.

A Figura 6 apresenta o modelo desenvolvido com o entorno considerado para a simulação computacional.

Figura 6: Modelo tridimensional desenvolvido no Rhinoceros



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados para Exposição Anual à Luz Solar Direta ($EAS_{1000lx,250h}$). Por esta tabela, verifica-se que apenas as áreas de circulação apresentam áreas onde a exposição à luz solar incidente por mais de 250 horas anuais. Sendo áreas de circulação não há necessidade da instalação de persianas ou de cortinas para o controle do ofuscamento pois esses são ambientes de permanência transitória.

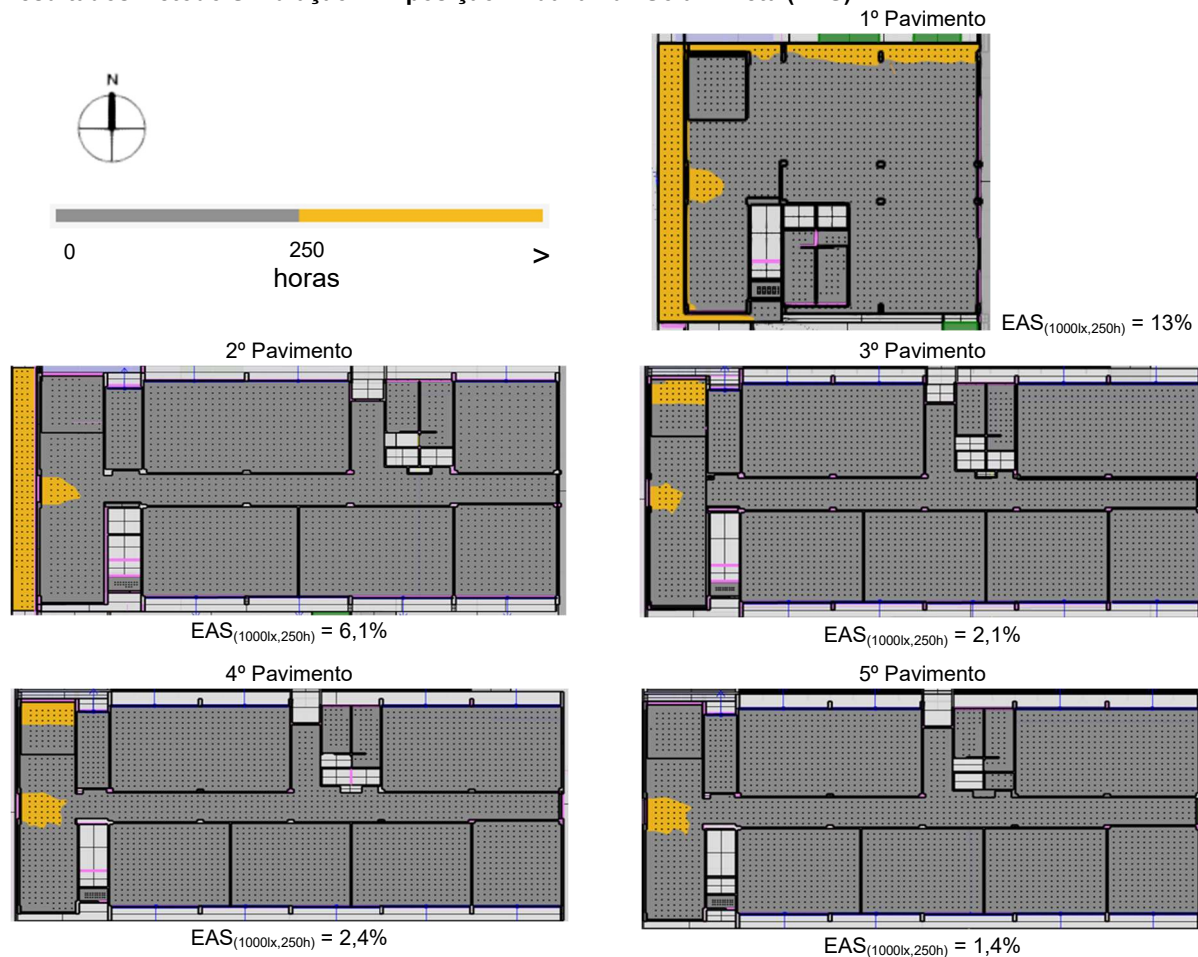
Já a Tabela 3 mostra os resultados da área de contribuição de luz natural através dos métodos simplificado e de simulação. Com relação ao pré-requisito de aproveitamento da luz natural, grande diferença entre os resultados nos dois métodos foi encontrada, com 857 m² ou 24% a mais de área iluminada naturalmente na simulação, o que pode ser percebido nas áreas demarcadas em planta-baixa. Na análise por pavimento, nota-se a contabilização de mais áreas iluminadas, com aumento de áreas de zona primária de 16,2% (pavimento 2) a 35,5% (pavimento 5).

Detectou-se que os ambientes de DML (exceto no 1º pavimento), circulação voltada para norte (pavimentos 2, 3, 4 e 5) e instalações sanitárias recebem luz natural em quantidades expressivas. Estas áreas não foram contabilizadas no método simplificado, uma vez que o DML possui esquadria com área menor que 1,86m² e os demais ambientes possuem elementos horizontais externos com fator de projeção acima de 1,5 para norte. Além disso, os ambientes de pilotis, escadas, hall, hall de elevadores, apoio professores, salas de aula 1 e 2 (voltadas para norte) dos pavimentos 4 e 5,

e salas de aula 3, 4, 5 e 6 (voltadas para sul) dos pavimentos 2, 3, 4 e 5, recebem luz natural em seus espaços internos em áreas significativamente maiores, quando comparadas ao método simplificado.

Tabela 2: Resultados da Simulação para EAS

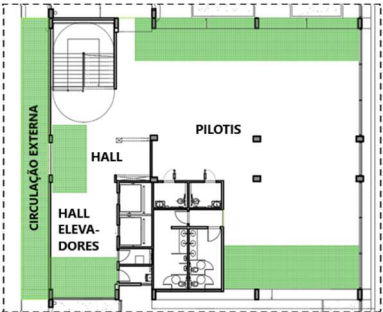
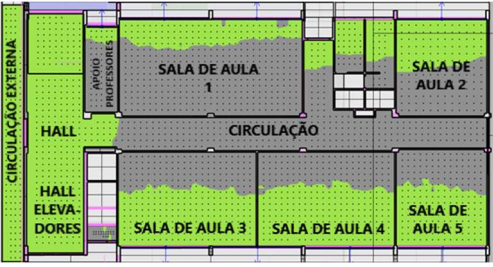
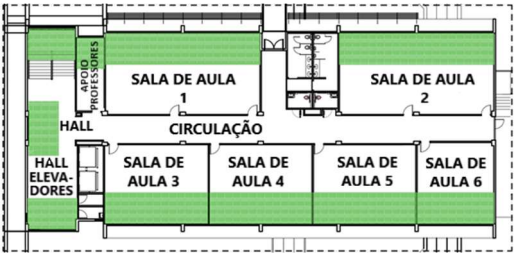
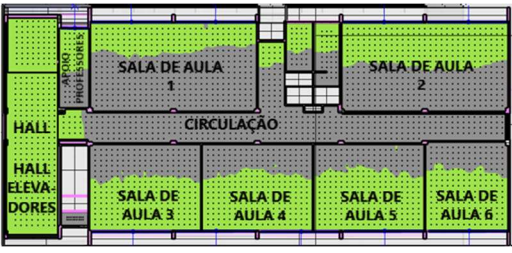
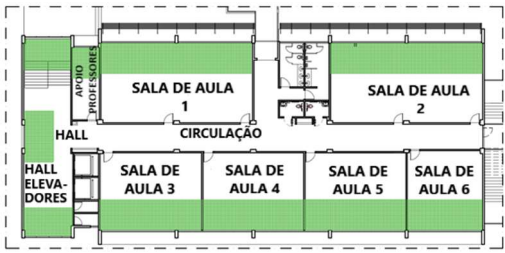
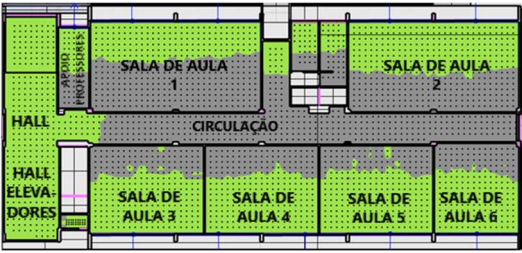
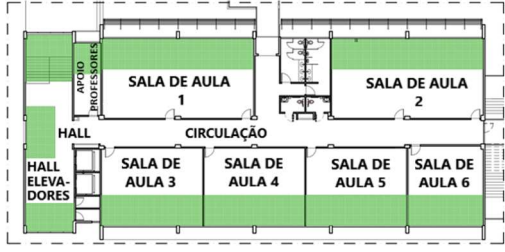
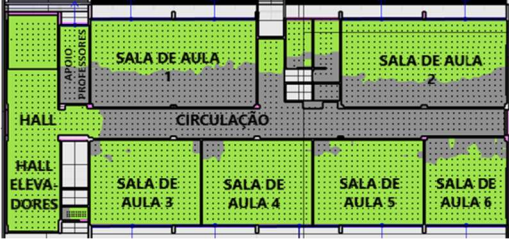
Resultados Método Simulação – Exposição Anual à Luz Solar Direta (EAS)



Pelos resultados apresentados na Tabela 3, em três ambientes a simulação apresentou área iluminada menor que no método simplificado. É o caso do apoio professores (pavimento 1) e das salas de aula 1 do 1º e 2º pavimentos. Tal fato se deve à obstrução causada pelo Bloco 1, localizado à sul do Bloco 2. O DML do 1º pavimento (ao lado do hall de elevadores) não recebeu iluminação superior a 300 lux ao longo do ano devido à obstrução do bloco de escada de 2 pavimentos, localizado à norte do Bloco 2.

Na análise do pré-requisito de contribuição da luz natural, detectou-se que o acionamento independente para luminárias em áreas iluminadas naturalmente não atende ao requisito nas salas de aula e no hall de elevadores quando o método simplificado é considerado. No entanto, a divisão de circuitos atual permite o atendimento ao pré-requisito nas salas de aula 3, 4 e 5 do 5º pavimento, e nos halls de elevadores de todos os pavimentos pelo método de simulação, devido ao fato desses ambientes apresentarem atendimento ao requisito de ALNE $_{300lux, 50\%}$ na quase totalidade de suas áreas (ver Tabela 3).

Tabela 3: Resultados da incidência da luz natural

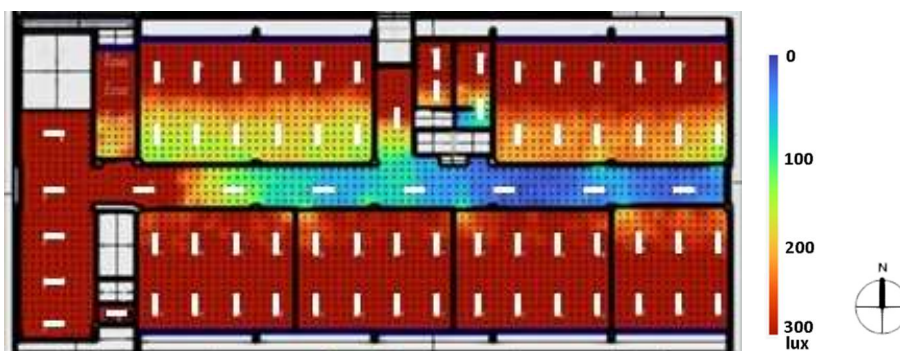
Resultados Método Simplificado	Resultados Método Simulação
1º Pavto.: ZP = 267,35 m² = 60,8% 	1º Pavto.: ALNE_{300lx,50%} = 89,2% = 391,90 m² 
2º Pavto.: ZP = 244,20 m² = 36% 	2º Pavto.: ALNE_{300lx,50%} = 52,2% = 353,70 m² 
3º Pavto.: ZP = 252,90 m² = 32,7% 	3º Pavto.: ALNE_{300lx,50%} = 52,5% = 405,50 m² 
4º Pavto.: ZP = 250,80 m² = 32,5% 	4º Pavto.: ALNE_{300lx,50%} = 57,9% = 447,30 m² 
5º Pavto.: ZP = 264,40 m² = 34,2% 	5º Pavto.: ALNE_{300lx,50%} = 69,7% = 538,40 m² 
Σ Zona Primária = 1.279,65 m²	Σ Zona com autonomia de luz natural = 2.136,8 m²
Área iluminada naturalmente da edificação = 3.495,74 m²	
Potencial de integração = 37%	Potencial de integração = 61%

Conforme posto pela INI-C, as áreas de circulação não possuem obrigatoriedade de acionamento independente do conjunto de luminárias mais próximo das aberturas, sendo esse pré-requisito considerado como atendido nesses ambientes, nos dois métodos. A área de pilotis foi incluída nessa categoria, por possuir esta função no prédio em estudo.

Ademais, através do método simplificado, o pré-requisito de contribuição de luz natural é atendido nos espaços de apoio professores (pavimentos 3, 4 e 5). Considera-se que os DML e as instalações sanitárias atendem ao pré-requisito visto que, pelo método simplificado, esses não recebem luz natural suficiente. Já pelo método de simulação, o pré-requisito é atendido na instalação sanitária feminina do pavimento 1.

Ainda sobre a contribuição da luz natural, analisou-se a posição das luminárias sobrepondo-as aos gráficos de iluminâncias média anual gerados pelo *plug-in* de simulação, onde foi possível visualizar o decaimento dos níveis de iluminância, conforme a luz natural vai adentrando os espaços internos. A Figura 7 ilustra essa situação no pavimento 5, claramente percebida nas salas de aula 1 e 2 (canto superior esquerdo) e na circulação. Salienta-se que tal situação foi encontrada em todos os pavimentos. Quando é analisada uma escala que tem como limite máximo o nível de 300 lux, no entanto, as salas voltadas para norte indicam uma maior uniformidade na presença desses níveis, não indicando a necessidade de divisão entre a primeira e a segunda fileira de luminárias, como é indicado pelo método simplificado.

Figura 7: Gráfico de iluminâncias com luminárias para o 5º pavimento

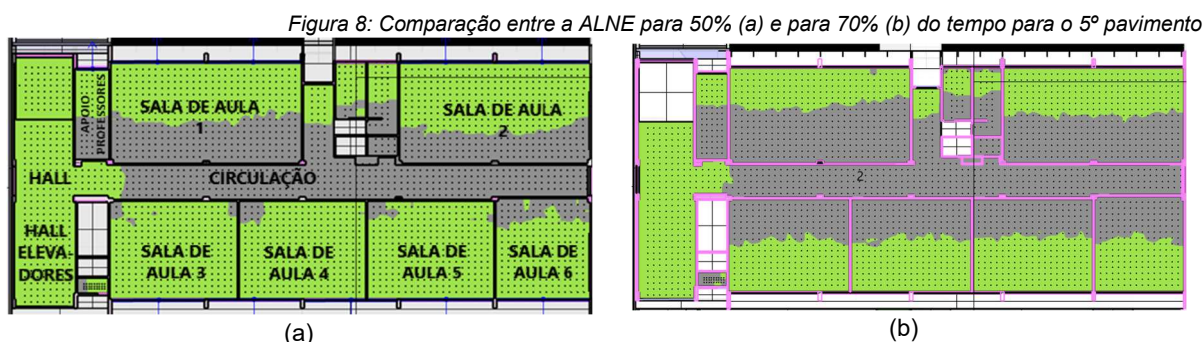


Apesar de pelo método de simulação computacional esses ambientes não necessitarem da divisão de circuitos entre a 1ª a 2ª fileiras a partir da abertura (ver tabela 3, 5º pavimento), é recomendado que estas sejam divididas, pois apresentam diferentes potenciais de aproveitamento da luz natural. Nesse caso, considera-se o método simplificado mais adequado para a análise.

Com o objetivo de buscar uma simulação que espelhasse melhor o comportamento das salas voltadas para sul, foi proposta uma análise aumentando o percentual de tempo de aproveitamento da luz natural para 70% avaliando, então, uma $ALNE_{300lux,70\%}$, cujo resultado é apresentado na Figura 8, que traz a comparação entre a ALNE para 50% e para 70% do tempo.

Essa avaliação mostrou que as salas de aula voltadas a sul apresentam potencial diferente de aproveitamento da luz natural entre a 1ª e a 2ª fileiras de luminárias, indicando, novamente, que essas tenham seu acionamento

separado. Nota-se ainda, pela Figura 8, que houve pequena diferença para as salas voltadas a norte quando o percentual de 70% do tempo foi considerado, ainda assim indicando a necessidade de separação da 1ª fileira de luminárias como anteriormente.



Pela análise do projeto de iluminação artificial, constatou-se que todos os ambientes apresentam ao menos um dispositivo para o acionamento local manual da iluminação, atendendo ao terceiro pré-requisito. A edificação em estudo não apresenta ambientes com área superior a 250 m², razão pela qual o quarto pré-requisito, que dispõe sobre a instalação de dispositivo de controle automático para o desligamento da iluminação artificial, foi considerado como atendido em todos os espaços. A Tabela 4 mostra os resultados de atendimento aos requisitos de contribuição da luz natural pelos dois métodos, considerando a análise para 50% do tempo, conforme indica a INI-C. A Potência Instalada Total de iluminação (PIT) na edificação é de 24.956,80 W.

Tabela 4: Potência instalada em iluminação que atende aos pré-requisitos

Pavto	Ambientes que atendem - Método Simplificado	Potência Instalada (W) - Método Simplificado	Ambientes que atendem - Método de Simulação	Potência Instalada (W) - Método de Simulação
1º	Todos, exceto Hall Elevadores	2.076,80	Todos, exceto I.S.M.	2.147,20
2º	Todos, exceto Hall de Elevadores, Apoio Professores, Salas de Aula e Laboratórios	1.408,00	Todos, exceto Hall de Elevadores, Apoio Professores, Salas de Aula, Laboratórios e I.S.	1.337,60
3º	Todos, exceto Salas de Aula e Hall de Elevadores	1.548,80	Todos, exceto Salas de Aula e IS	1.478,40
4º	Todos, exceto Salas de Aula e Hall de Elevadores	1.548,80	Todos, exceto Salas de Aula e I.S.	1.478,40
5º	Todos, exceto Salas de Aula e Hall de Elevadores	1.548,80	Todos, exceto Salas de Aula voltadas para norte, Sala de Aula 4 voltada para sul, I.S.	3.027,20
Total	Atendimento total	8.131,20 = 33%		9.468,80 = 38%

Na análise das Tabelas 3 e 4, percebe-se que a diferença de percentual de atendimento ao pré-requisito de contribuição de luz natural, entre os dois

métodos, deve-se à inclusão das salas de aula 1, 2 e 3 voltadas para sul, do 5º pavimento (onde há atendimento do $ALNE_{300lux}$, 50% na maior parte do ambiente), dos halls de elevadores de todos os pavimentos e na instalação sanitária feminina do 1º pavimento (que indica atendimento do $ALNE_{300lux}$, 50% na totalidade desses ambientes), no método de simulação. Essa diferença também pode ser atribuída pelo fato de que, no método de simulação, as demais instalações sanitárias deveriam ter divisão de circuitos, pelo diagnóstico de que recebem luz natural.

Verifica-se que o percentual máximo de atendimento aos pré-requisitos é de 38% da potência instalada e que este percentual é significativamente inferior aos 90% requeridos para classificação nível A. Com os resultados percentuais de atendimento aos pré-requisitos, a classificação máxima para o sistema de iluminação do edifício seria B, uma vez que parte significativa dos ambientes e, em especial, as salas de aula, não possuem separação de circuitos para integração com a luz natural. Considera-se baixo o percentual de integração e este estudo foi remetido à Universidade para consideração da separação de circuitos.

CONCLUSÕES

Analisando apenas o atendimento aos pré-requisitos para aproveitamento da luz natural, concluiu-se que a classificação máxima para o sistema de iluminação do edifício seria B, tanto pelo método simplificado quanto pelo método de simulação. No entanto, verificou-se que o método de simulação aumenta significativamente a área considerada como iluminada naturalmente, com 24% de acréscimo de área considerada como sendo de Zona Primária, e que tal fato altera a disposição de circuitos a serem separados para o atendimento.

Como limitação do método simplificado, constatou-se insuficiência ao analisar a interferência do entorno construído na iluminação natural dos ambientes internos. Foi possível observar também, insuficiência ao mensurar a interferência de elementos externos do próprio edifício, como identificado nos espaços em que a contabilização da luz natural foi inviabilizada pelos cálculos de fator de projeção e de área de esquadrias, mas para os quais a simulação demonstrou expressiva incidência de luz do dia.

Verificou-se que ainda que o potencial de integração da luz natural tenha caráter apenas informativo para a ENCE, entende-se que a eficiência energética do edifício pode ser melhorada, não só em termos quantitativos para classificação do prédio, mas também na atitude projetual de dividir circuitos de acendimento da luz artificial de forma mais condizente com a iluminação natural dos espaços internos, contribuindo para maior eficiência do prédio quando em uso.

Entendeu-se que a divisão de circuitos poderia ser feita baseada não somente na área delimitada como recebedora de luz natural, mas mantendo a necessidade de separações de acendimento entre as fileiras paralelas às janelas, levando-se em conta que a disponibilidade de luz natural decai rapidamente conforme aprofunda nos espaços iluminados lateralmente. Tal modificação poderia contribuir para melhor aproveitamento da luz natural, considerando sua dinâmica ao longo do dia nos espaços.

Com o estudo, percebeu-se ainda que estimular o uso do método de simulação pode ser intencional na INI-C. A possibilidade de realizar simulações computacionais da dinâmica da luz do dia, com a visualização de resultados gráficos e numéricos, amplia a percepção do uso da iluminação natural e permite a busca por melhores soluções para os projetistas de arquitetura. No entanto, barreiras da metodologia estão no fato de o uso dos *softwares* de simulação demandarem mão de obra qualificada e a compra de licenças de programas específicos.

Como proposta para um entendimento mais otimizado do texto da INI-C em uma eventual revisão futura, propõe-se que o item B.III.3.3 “Potencial de integração entre o sistema de iluminação e a luz natural disponível” seja levado para dentro do item 7.2.1 “Contribuição da luz natural” já que esta avaliação é necessária para avaliação de elegibilidade para a classificação A em iluminação. Estando no Anexo B, esta avaliação fica apenas com caráter informativo, e que não possui restrições quanto aos valores máximos ou mínimos a serem atingidos, tornando o item deslocado dentro do método simplificado.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao CNPq por fomento à bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e por bolsa de Iniciação Científica. Agradecem ainda à Universidade Federal de Minas Gerais por bolsa de pesquisa junto ao Projeto Oásis.

REFERÊNCIAS

1. BRASIL. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA-INMETRO. Instrução Normativa para a classificação de eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas. *Portaria Nº 42, de 24 de fevereiro de 2021*. Brasília, 2021, 133 p.
2. ELETROBRAS/PROCEL; INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial; CB3E -Centro Brasileiro de eficiência energética em edificações. *Manual para etiquetagem de edificações públicas: gestor público*. Florianópolis, 2014.
3. DOULOS, L., T.; KONTADAKIS, A; MADIAS, E. N; SINOUE, M; TSANGRASSOULIS, A. Minimizing energy consumption for artificial lighting in a typical classroom of Hellenic public school aiming for near Zero Energy Building using LED DC luminaires and daylight harvesting systems. *Energy and Buildings*, v. 194, p. 201-217, 2019.
4. ZAKY H. U. A., DEWI, O. C., WIDYARKO; SULISTIANI, C. Dian, Daylight and Artificial Lighting Integration in Achieving Lighting Uniformity in Educational Building. *Journal of Architectural Research and Design Studies*, v5, 2023 DOI: 10.20885/jars.vol7.iss1.art5
5. REINHART, C. F.; WIENOLD, J. The daylight dashboard – a simulation-based design analysis for daylight Spaces. *Building and Environment*, v46, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001>
6. FONSECA, R. W. da; PEREIRA, F. O. R., Sequência metodológica para a estimativa da iluminação natural e suas implicações em sistemas de avaliação de desempenho de edificações. *Ambiente Construído*. Porto Alegre, v. 17, n.1, p. 55-68, 2017.
7. RODRIGUES, G. M.; GUIDI, C. R.; MEDEIROS, H. G. ; ANDRADE FILHO, C. R. ; VELOSO, A. C. de O. ; SOUZA, R. V. G. Inserção da iluminação natural na

- avaliação de desempenho energético de edificações comerciais, de serviços e públicas. In: XXIII Arquisur - 2019, 2019, Belo Horizonte. *Anais....* Belo Horizonte: EAUFMG, 2019.
8. ANDRADE, H. J. C. *Análise da Eficiência Energética em Edificações Usando os Métodos RTQ-C e INI-C*, dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSCar, 2022.
 9. CAO, X.; DAI, X.; LIU, J. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, v. 128, p. 198-213, 2016.
 10. BURGOS, E. G.; GRIGOLETTI, G. C.; PAIXÃO, D. X. *Otimização do conforto ambiental no espaço escolar: uma visão sustentável*. Cinergis, v. 16 (1), p. 66-70, 2015.
 11. GARCIA, M. S. *Consumo de energia e conforto térmico em campus universitário: uma proposta de benchmarking*. Tese (Doutorado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2022.
 12. BRANDÃO, G. C., *Estudo de caso do sistema de iluminação da EAUFMG: análise do uso de energia e de medidas de conscientização*. 2015. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
 13. GALAL, K. S. The impact of classroom orientation on daylight and heat-gain performance in the Lebanese Coastal zone. *Alexandria Engineering Journal*, v. 58, n. 3, p. 827-839, 2019.
 14. KAMINSKA, A. Impact of building orientation on daylight availability and energy savings potential in an academic classroom. *Energies*, v. 13, 4916, p. 1-17, 2020.
 15. FRANÇA, S. S.; FONSECA, R. W.; PEREIRA, F. O. R. Método simplificado baseado na disponibilidade de luz difusa para estimar o potencial energético do aproveitamento da luz natural em edificações. *Rev. Programa Pós-Grad. Arquit. Urban.* FAUUSP: São Paulo, v. 27, n. 51, 2020, p. 3.
 16. BANDEIRA, F. B.; SCARAZZATO, P. S. Iluminação artificial aplicada à arquitetura: processo de projeto. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v. 13, n. 2, 2018, p. 67-80, p. 75.
 17. WYMELENBERG, Kevyn; INANICI, Mehlika. A Critical Investigation of Common Lighting Design Metrics for Predicting Human Visual Comfort in Offices with Daylight. *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, London, v. 10, n. 3, p. 145-164, jan. 2014.
 18. IESNA - Illuminating Engineering Society of North America. *LM-83-12: Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*. New York, 2012.
 19. ALAQTUM, T. M. *A methodology to assess and mitigate daylight discomfort glare and provide views in daylight learning environments*. Cap. 2, 3 and 4. (Dissertation of Master of Science Architecture Design & Energy Conservation) - University of Arizona, 2020. p. 21-41.
 20. PBE Edifica, Nova INI-C. Disponível em: <https://pbeedifica.com.br/nova-ini>. Acesso em: 21 de mai. 2023.
 21. SOLEMA LLC. *Climate Studio*. Minneapolis, 2022. Available at: <https://www.lemma.com/climatestudio>. Access in: 20 mar. 2022.
 22. MONTEIRO L. A. *Iluminação natural em salas de aula - análise por novos parâmetros normativos*. 2023. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) - Universidade Federal de Minas Gerais
 23. UFMG, *Projeto Oasis*. Disponível em: <https://www.ufmg.br/sustentabilidade/projetos/oasis/>. Acesso em: 23 de mai. 2023.
 24. DORNELLES, K. A. *Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex, acrílica e PVA*. 2008. 160p.

Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

25. LABCCB - Laboratório Centro Cerâmico do Brasil. *Tabelas Comparativo de Desempenho*. Santa Gertrudes, 2021. Disponível em: <https://www.ccb.org.br/pt/laboratorios>. Acesso em: 15 fev. 2022.
26. PEREIRA, A.; HIRASHIMA, S.; OLIVEIRA, R. Utilização do espectrômetro Alta II para obtenção da absorvância solar de superfícies opacas. *Tecnologia e Sociedade*, v. 17, n. 46, p.216-228, jan./mar., 2021
27. LAMBERTS, Roberto. *Apostila Desempenho Térmico de Edificações*. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LabEEE, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.
28. POLIBRAKO Produtos Ltda. *Insuglass*, Filme de Arquitetura – Especificações Técnicas. Curitiba, 2022. Disponível em: <http://www.polibrako.com.br/peliculas-de-arquitetura.php>. Acesso em 1 fev. 2022.
29. SOLEMMA. *Climate Studio*. 2016
30. CLIMATE ONE BUILDING. *WMO Region 3 - South America*: BRA-Brazil. 2021. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org/>. Acesso em 10 dez. 2021