ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE DA LUZ DO DIA EM SALA DE AULA POR DUTOS DE LUZ A PARTIR DE SIMULAÇÃO BASEADA NO CLIMA

Samantha Campos Paiva Barrozo (1); Virgílio Muniz de Magalhães (2); Ana Luiza Ferreira Bonutty (3); Roberta Vieira Gonçalves de Souza (4)
(1) graduanda em Arquitetura e Urbanismo, samanthac@ufmg.br, UFMG
(2) graduando em Arquitetura e Urbanismo, virgiliomuniz@ufmg.br, UFMG
(3) graduanda em Arquitetura e Urbanismo, analubonutty@hotmail.com, UFMG
(4) doutora em engenharia civil, robertavgs@ufmg.br, LABCON-EAUFMG - Rua Paraíba, 697, BH/MG.

RESUMO
Estudos têm buscado caracterizar a boa iluminação natural, pontuando que a combinação entre a qualidade e a distribuição desta luz influenciam na percepção de conforto. Neste sentido, o artigo tem por objetivo a investigação da disponibilidade da luz do dia em uma sala de aula, localizada na Escola de Arquitetura, da Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente, a distribuição da luz natural na sala de aula é limitada pelas condições do entorno. Como metodologia, recorreu-se à simulação dinâmica baseada no clima, com o auxílio do *plug-in ClimateStudio* e do *software Rhinoceros 3D*, realizada em duas etapas: 1ª. Para averiguar a condição atual; e 2ª proposta da instalação de dutos de luz. Adotou-se como parâmetros as métricas iluminância média ($E_{méd}$), autonomia espacial da luz do dia (*sDA*) e iluminância útil da luz do dia (*UDI*). Como resultados, a primeira simulação mostrou-se coerente a situação real vivenciada pelos ocupantes. Na segunda simulação, a inserção de dois dutos de luz permitiu o alcance de uma boa autonomia da luz do dia. Não obstante, devido às limitações para a instalação dos dutos de luz que devem ser feitas adjacentes à parede dos fundos, a adaptação da sala de aula para novos usos revelou-se como uma solução alternativa.

Palavras-chave: iluminação natural, duto de luz, simulação dinâmica, sala de aula

ABSTRACT
Studies have sought to characterize great daylight, pointing out that the combination of quality and distribution of this light influences the perception of comfort. Therefore, this paper aims to investigate the daylight availability metrics in a classroom located at the School of Architecture at the Federal University of Minas Gerais. Currently, the distribution of daylight is limited in the classroom due to the obstruction of the surrounding. The methodology used the Climate Based Daylight Modelling (CBDM), with the aid of the ClimateStudio plug-in and the Rhinoceros 3D software, carried out in two stages: 1. To ascertain the current daylighting condition of the space; and 2. proposal for the installation of tubular daylighting. The parameters adopted for the avaluation were the Average Illuminance (Eavg), the Spatial Daylight Autonomy (sDA), and the Useful Daylight Illuminance (UDI). Consequently, the first simulation proved to be consistent with the real situation experienced by the occupants. In the second simulation, the insertion of two tubular daylighting allowed the achievement of daylight autonomy. However, due to limitations for the installation of tubular daylighting, adapting the classroom to new uses proved to be an alternative solution.

Keywords: daylight, tubular daylighting, dynamic simulation, classroom

1. INTRODUÇÃO

A iluminação natural agrega valor para a arquitetura, seja ao promover a saúde e o bem-estar dos ocupantes, seja ao contribuir para a eficiência energéticas das edificações, impulsionando a concepção ou a adaptação de edifícios na perspectiva da baixa emissão de carbono. Assim, é esperado que a iluminação natural seja requerida em inúmeras certificações nacionais e internacionais, sobretudo quando se trata de garantir a qualidade dos ambientes de permanência prolongada, tais como os espaços educacionais.

Estudos interdisciplinares demonstram que os fatores ambientais podem promover a saúde e influenciar no comportamento das pessoas, ou somarem-se a outros fatores estressores, resultando em efeitos adversos. Segundo Mena-Barreto (2007), a adequada exposição à luz do dia, quando combinada ao sono noturno, auxilia na regulação do ciclo circadiano, responsável pela produção de hormônios, tais como a melatonina, a serotonina, a dopamina, o GH (hormônio do crescimento) e os corticoides. Estes hormônios influenciam no humor e nas atividades metabólicas, o que impacta na disposição física, mental e emocional de cada indivíduo. Contudo, a exposição prolongada a ambientes escuros, no período diurno, poderá impactar na qualidade do sono noturno, prejudicando o ciclo circadiano.

Tanto a arquitetura escolar, que tem importante papel no desenvolvimento pessoal e cognitivo de estudantes e educadores, quanto a arquitetura hospitalar, que impacta na regeneração dos pacientes, têm revelado importantes contribuições para o aprimoramento da ciência da iluminação natural. Leslie et al. (2010) destacam a importância da boa distribuição da luz do dia nas salas de aula, para além da questão do provimento da quantidade de luz mínima. Sendo assim, não se trata apenas de resolver uma demanda, mas potencializar o uso da luz. Schmid (2005) compartilha desta abordagem positiva do conforto ambiental, compreendendo que a arquitetura é capaz de influenciar no bem-estar das pessoas. O autor é inspirado na visão holística das enfermeiras Nightingale (1863), Katherine Kolcaba e Linda Wilson (2002, apud Schimidt, 2005), que investigaram o comportamento de seus pacientes considerando a interdependência de aspectos fisiológicos, psicológicos, sociais e ambientais.

Todavia, o caráter imprevisível da luz do dia é apontado como um desafio para a sua ampla adesão em projetos. Neste sentido, Mardaljevick e Nabil (2006), Wymmelenberg e Mahic (2016), e Costanzo et al. (2018) apontam as simulações computacionais como ferramentas auxiliares na tomada de decisões, sendo estas recomendadas ou exigidas por normativas, certificações, diretrizes e programas de financiamento diversos. Estas simulações podem ser estáticas, do tipo ponto-no-tempo ou dinâmicas, baseadas no clima.

Devido a relativa facilidade de aplicação, as métricas estáticas são comumente adotadas pelas normas de desempenho, como é o caso da ABNT NBR 15215-3, a qual emprega o Fator de Luz Diurna (FLD), calculado a partir de um modelo fixo de céu intermediário. De maneira similar, no estudo *Application of Climate Based Daylight Modelling to the Refurbishment of a School Building in Sicily*, acerca da investigação da luz do dia em salas de aula, Costanzo et al. (2018) relatam a adoção do FLD pela legislação italiana. No entanto, as métricas empregadas nas simulações estáticas são limitadas no que tange a distribuição da luz nos ambientes ao longo do ano (COSTANZO et al., 2018). Ademais, diferenças acentuadas de contrastes nos ambientes podem gerar desconforto, levando ao acionamento de dispositivos de sombreamento e o consequente uso da iluminação artificial (LAMBERTS et al., 2014).

Por outro lado, as simulações dinâmicas empregam bases climáticas correspondentes ao período de um ano completo, o que agrega maior realismo na reprodução das condições de céu (NABIL; MARDALJEVICK, 2006). O avanço dos *plugins* para simulações baseadas no clima, como o *ClimateStudio,* facilitaram os estudos da disponibilidade da luz do dia, bem como a análise conjunta de outras importantes variáveis para o conforto ambiental, tais como o acesso à vistas externas, a identificação do potencial de ofuscamento e o dimensionamento da carga energética.

Por agruparem informações complexas de forma rápida e visual, as simulações dinâmicas foram apresentadas na LM-83 (IESNA, 2012), evidenciando a tendência da incorporação das métricas para a avaliação da autonomia da luz do dia nos textos regulamentadores. Assim, para a determinação dos níveis sDA (*Spatial Daylight Autonomy*) e ASE (*Annual Sunlight Exposure*), a IES realizou pesquisas de campo baseadas na avaliação de fatores humanos, valendo-se de tipologias diversas, inclusive escolas, localizadas em zonas climáticas diferentes (WYMEELENBERG; MAHIC, 2016). No mesmo ano, após a constatação da baixa eficiência energética nas escolas primárias britânicas, a *Education Funding Agency* (EFA), determinou a substituição do FLD pelas métricas UDI (*Useful Daylight Illuminance*) e sDA (EFA, 2013).

A EFA publicou o guia *The Facilities Output Specification, Baseline Design Lighting Strategy and Daylight Design Guide* para auxiliar os projetistas na adesão das simulações dinâmicas e na compreensão dos níveis pretendidos, além de recomendações e estratégias para o aproveitamento da luz do dia (prateleiras de luz, dispositivos de iluminação zenitais, forros falsos reflexivos, entre outras). O guia almeja a autonomia da

luz natural em 80% das horas anuais de funcionamento dos espaços de aprendizagem (UDI_a=80%), e no mínimo a iluminância de 300lux, por metade da área ocupada, em pelo menos 50% do tempo (sDAmín=50%). Ademais, deve-se priorizar o fornecimento da luz natural proveniente de duas ou mais direções (EFA, 2013).

Analogamente, no contexto nacional, Leder, Quirino e Pereira (2016) ressaltam a importância da caracterização dos espaços escolares, a fim de promover melhorias espaciais. Os pesquisadoreses perceberam que o traçado típico das salas de aula (sala-corredor ou sala-corredor-sala) nem sempre favorecem as questões de conforto ambiental; devido a orientação das salas de aula, o emprego das janelas unilaterais é recorrente, o que limita a iluminação e a ventilação natural. Já Bernardes, Vergara e Martins (2020), no viés da psicologia ambiental (PA), notaram que a qualidade da iluminação e as vistas externas fizeram parte da lista de desejos de estudantes do ensino fundamental.

Nem sempre os dispositivos de iluminação natural tradicional são o sistema ideal para a iluminação dos espaços internos. O desafio, portanto, é desenvolver meios de utilizar a luz natural direta e difusa nos edifícios, mantendo e melhorando o conforto visual dos ocupantes, particularmente a maiores distâncias das paredes externas. Os dispositivos tubulares de luz do dia (*tubular daylight devices* - TDDs) são, então, meios simples de direcionar a luz do dia (luz difusa e direta) para espaços interiores e espaços subterrâneos. (SHUXIAO, JIANPING e LIXIONG, 2015).

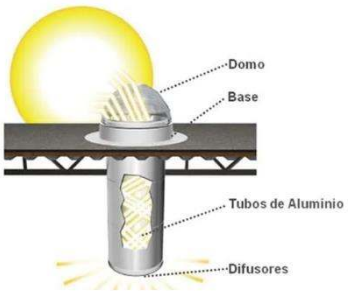


Figura 1 – Esquema do duto de luz.
Fonte: https://www.aecweb.com.br/

Os TDDs são dispositivos lineares que canalizam a luz do dia para o centro de um espaço interno e são construídos de três componentes: uma cúpula ou domo, um tubo e um difusor (ver Figura 1). A cúpula é tipicamente um hemisfério feito de plástico transparente, que permite a entrada de luz do dia no tubo, protegendo o duto das intempéries. O tubo ou duto é um cilindro liso com uma superfície interna altamente reflexiva, geralmente de metal polido. O tubo passa por uma ou mais zonas de transição, canalizando a luz do dia da cúpula para o difusor através de múltiplas reflexões. O difusor é tipicamente uma tampa de plástico prismática ou fosca que distribui uniformemente a luz natural para o espaço interno (SHUXIAO; JIANPING; LIXIONG, 2015).

Fernandes e Regnier (2023) afirmam que estes sistemas requerem aberturas muito menores do que as claraboias convencionais e, devido ao seu tubo altamente reflexivo, podem fornecer luz do dia mais longe do envelope do edifício. Apesar de alta refletividade dos dutos, os autores relatam ainda que, em medições realizadas por eles em diversos tipos de sistema de entrada e de saída de luz, não ocorreu desconforto por ofuscamento em nenhum dos sistemas testados pelos autores.

Diante do exposto, considerando-se que a luz do dia pode auxiliar na qualidade de vida de estudantes e de educadores, bem como na sustentabilidade do edifício escolar, o artigo tem por objetivo a investigação da disponibilidade da luz do dia em uma sala de aula da Escola de Arquitetura, da Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente, a sala de aula fica constantemente com o sistema de iluminação artificial acionado, uma vez que a iluminação natural não é considerada suficiente para o desempenho das atividades cotidianas com conforto. Para tal, empregou-se a simulação dinâmica, com o auxílio do *plug-in ClimateStudio* e do software *Rhinoceros 3D.* As métricas avaliadas foram a $E_{méd}$ (iluminância média), a sDA e a UDI.

2. OBJETIVO

O artigo tem por objetivo a investigação da disponibilidade da luz do dia na sala de aula 123, empregando-se como critério de avaliação os níveis de $E_{méd}$, a sDA e a UDI, buscando-se por melhorias no provimento e na distribuição da luz por meio da iluminação zenital através do uso de dutos de luz.

3. MÉTODO

Tendo em vista as métricas iluminância média, sDA e UDI, assim como a utilização dos dispositivos de iluminação zenital, optou-se pelo *plug-in ClimateStudio* para a simulação da disponibilidade da luz natural. Posteriormente, realizou-se o levantamento dos dados de entrada e a modelagem digital para avaliação da iluminação natural. Por fim, as simulações foram realizadas em dois momentos: 1º Para a análise da disponibilidade da luz do dia nas condições atuais de iluminação da sala de aula; 2º Para a análise da disponibilidade da luz do dia após o acréscimo dos dutos de iluminação. As etapas são detalhadas nos subitens a seguir.

3.1 As métricas para a análise da autonomia de luz natural

As métricas para a avaliação da autonomia de luz do dia, calculadas pelo *ClimateStudio,* são a autonomia espacial da luz do dia (*Spatial Daylight Autonomy – sDA*), a exposição solar anual (*Annual Sunlight Exposure – ASE*), a iluminância útil da luz do dia (*Useful Daylight Illuminance – UDI*). Pode-se avaliar ainda a iluminância média ao longo do ano. As faixas de iluminância e suas respectivas correlações com os níveis preferíveis foram sintetizadas na Tabela-1, adaptada dos autores Nabil e Mardeljevick (2006), Wymelenberg e Mahic (2016).

A *Spatial Daylight Autonomy – sDA*, é calculada a partir de grades de iluminância horária no plano de trabalho padrão. Assim, a métrica avalia se a quantidade de luz natural incidente em uma área pode ser considerada satisfatória pelos ocupantes (WYMELENBERG; MAHIC, 2016). A sDA varia de 0 a 100%. Segundo Wymelenberg e Mahic (2016), a sDA desejável é de a 300lux em pelo menos 75% da área da sala de aula, por pelo menos 50% do horário de funcionamento padrão.

Tabela 1 - Correlação entre as métricas para a avaliação da autonomia de luz do dia e os níveis preferíveis.
Fonte: Adaptado de Wymelenberg e Mahic, 2016 e Nabil e Mardeljevic, 2006.

Autonomia Espacial da Luz Natural (Daylight Autonomy – sDA)	
sDA = 55%	nível mínimo
55% ≤ das ≤ 74%	aceitável
sDA ≥ 75%	preferível
Exposição solar anual (Annual Sunlight Exposure – ASE)	
ASE ≥ 10%	Desconforto visual
Iluminância Útil da luz do dia (Useful Daylight Illuminance – UDI)	
E < 100 lux = UDI-n	UDI não alcançado
100 < E < 300 lux = UDI-s	Suplementar com a luz artificial
300 < E < 3000 lux = UDI-a	A luz natural é suficiente, desejável ou tolerável
E > 3000 lux = UDI-x	Averiguar a necessidade de dispositivos de sombreamento e condicionamento ativo

A *Annual Sunlight Exposure (ASE)*, equivalente a exposição solar anual (ESA), complementa a métrica sDA, uma vez que indica a possibilidade de excesso da luz do dia nos ambientes. A ASE é calculada a partir de malhas de iluminação horizontal avaliadas no intervalo horário, estipula que o valor de 1.000 lux, em um determinado ponto, não deverá ser superior a 250 horas anuais. É desejável que os valores de ASE sejam inferiores a 10% da área do ambiente, visto que, a partir deste valor, corre-se o risco dos ocupantes relatarem desconforto térmico e visual (WYMELENBERG; MAHIC, 2016). Esta métrica não será analisada neste artigo, pois a sala de aula estudada não atingiu faixas de iluminâncias consideradas excessivas.

A *Useful Daylight Illuminance (UDI)* avalia os níveis úteis da luz do dia e a propensão para níveis excessivos. A métrica é calculada com base na iluminância média para todos os valores horários de um conjunto de dados climáticos anuais. A faixa considerada preferível pelos ocupantes varia de 300 a 3.000 lux (UDI_a), possibilitando o desempenho das atividades cotidianas sem desconforto visual. Na faixa entre 100 e 300 lux (UDI_s) é necessário complementar os níveis de iluminação natural com o sistema de iluminação artificial. As faixas de iluminância abaixo de 100lux (UDI_n ou UDI_f) revelam que a iluminação natural é insuficiente, enquanto as faixas de iluminância acima de 3.000 lux (UDI_x ou UDI_e) indicam potenciais reclamações de desconforto visual e térmico pelos ocupantes (WYMELENBERG; MAHIC, 2016).

3.3 Levantamento dos dados de entrada

A sala de aula em análise encontra-se na Escola de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal de Minas Gerais, localizada em Belo Horizonte, na latitude 19,8S, com aberturas unilaterais orientadas a 120°SE (ver Figuras 2 e 3). A sala de aula comporta 40 alunos e o horário de funcionamento padrão corresponde ao período de 7h30 às 18h. De acordo com a NBR 15.220 (ABNT, 2005), uma vez que o município está inserido na zona bioclimática 3, as recomendações para a sala de aula são aberturas com áreas equivalentes a 15% e 25% da área do piso. A insolação no inverno e a ventilação cruzada no verão são desejáveis.

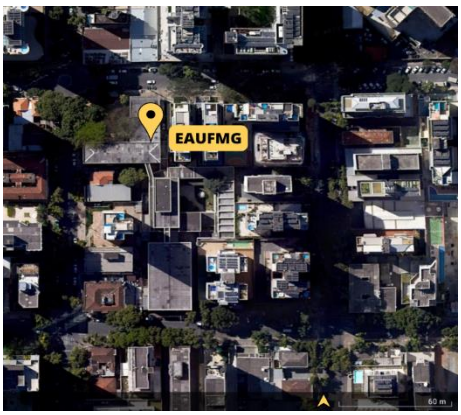


Figura 2 - Localização da Escola de Arquitetura, da Universidade Federal de Minas Gerais Fonte: Google Earth adaptado pelos autores, 2022

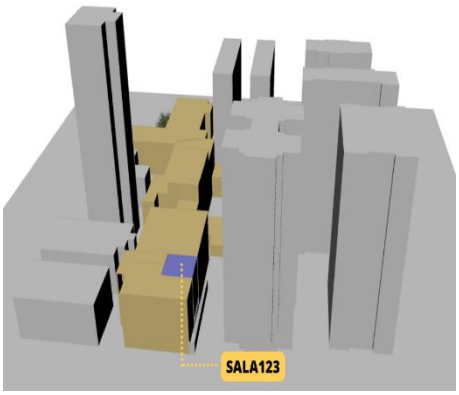


Figura 3 - Modelo desenvolvido no *software Rhinoceros* e localização da sala de aula 123.

Contudo, as condições atuais de iluminação natural e ventilação não são favorecidas pelo entorno, evidenciando uma série de limitações. Dentre elas, destacam-se a planta corredor-sala-corredor e as aberturas unilaterais, com janelas do tipo báscula, instaladas a 1,88m do piso (ver Figuras de 4 a 6 e Tabela 2). Embora as janelas favoreçam a iluminação natural, a altura limita a visão para o exterior. Além disso, a sala 123 está localizada no primeiro pavimento, de um bloco de 4 andares, em nível abaixo da rua, estando sujeita às obstruções do entorno. Os pavimentos superiores são ocupados por salas de aula, com áreas superiores a área da sala 123, favorecendo a passagem dos dutos de luz (ver Tabela 3).

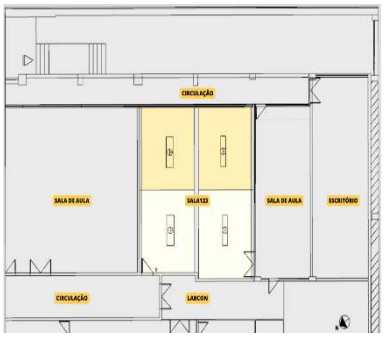


Figura 4 - Planta esquemática da sala 123, tipo corredor-sala de aula-corredor, com marcação dos circuitos de iluminação artificial independentes.

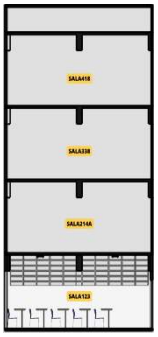


Figura 5 - Corte esquemático do bloco da sala 123, localizada no térreo.

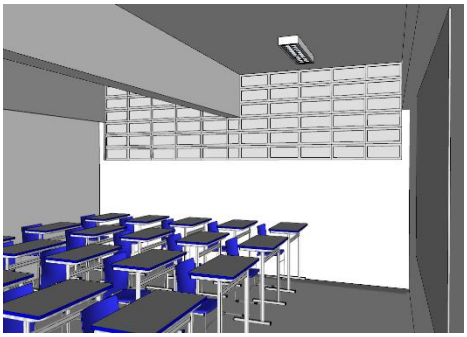
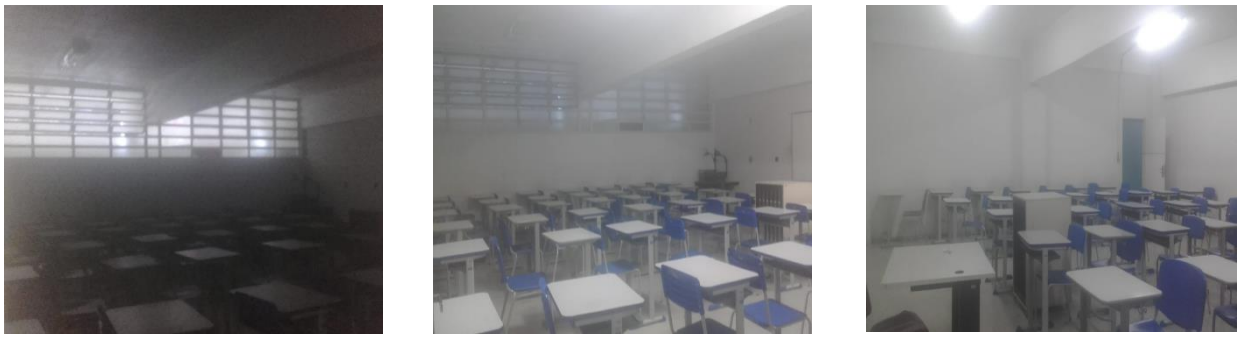


Figura 6 - Perspectiva esquemática da sala 123.

Quanto a percepção dos ocupantes, cita-se a distribuição não uniforme da luz, uma vez que a iluminância sobre as mesas decai no sentido oposto às janelas, resultando no contraste entre as áreas mais iluminadas e menos iluminadas (Figura 7). Portanto, a sala depende do sistema de iluminação artificial para o pleno funcionamento das atividades de ensino. Para a economia de energia, a iluminação artificial é planejada de forma a complementar a iluminação natural. Assim, o circuito das luminárias adjacentes às janelas é acionado de maneira independente.



(a) (b) (c)

Figura 7 – a) Sala 123 apenas com o provimento da iluminação natural, no período de inverno, durante a tarde. b) sala com o acionamento da fileira de luminárias opostas às janelas, e c) sala com as duas fileiras de luminárias acionadas.

A relação entre os materiais existentes e os coeficientes de refletância/transmitância definidos para as simulações, foram sintetizados na tabela 4.

Tabela 2 - Relação de áreas das esquadrias

Esquadrias	Tipo	Dimensões (m)	Área (m²)
2 x J1	Báscula móvel	3,845x1,344x1,88	5,17
2 x J2	Báscula vidro fixo	0,301x0,672x1,88	0,20
A área total das aberturas é menor do que a área recomendada pela NBR 15575 (10, 74m² < 11,316m² ~18,805m²)			

Tabela 3 - Localização e relação de áreas das salas de aula

Salas de aula	Pavimento	Dimensões (m)	Áreas (m²)
123	1°	9,20x8,20	75,4ª
214A	2°	10,97x19,39	212,71
338	3°	11,0x8,15	89,65
418	4°	11,0x8,15	89,65

Tabela 3 - Propriedades ópticas dos materiais utilizados nas simulações

Estrutura	Material	Refletância/Transmitância
Piso	Cerâmica branco	0,68
Paredes	Pintura cor branco	0,83
Teto	Pintura em concreto branco	0,82
Janelas	Montante em ferro com pintura branca e vidro transparente simples	0,67 (alumínio) e 0,82
Rampa/muro	Concreto	0,25
Entorno urbano	Diverso	0,69

3.4 Seleção dos dutos de iluminação

Por definição, os dutos de luz são dispositivos que captam a luz do dia através de um coletor instalado na cobertura, e a transferem ao longo de um duto altamente reflexivo. Assim, a luz natural é direcionada para um difusor, acoplado ao teto do ambiente a ser iluminado. O plugin *ClimateStudio* permite a seleção e modelagem destes elementos usando dados medidos pelo fabricante para cada produto. Para tal possibilita a seleção de dutos de luz de fabricante americano, havendo três linhas de dutos que podem ser selecionadas. Através do *plugin* pode-se dimensionar o comprimento do duto e o fator de perda de luz. Quando um duto é selecionado, ele pode ser inserido no modelo 3D e posicionado tanto na entrada quanto na saída de luz.

Os dispositivos tubulares de iluminação natural foram escolhidos e selecionados através do subfluxo de trabalho *Tubular Daylight Devices* (TDDs) do *plugin ClimateStudio.* A simulação com os dutos de luz emprega o algoritmo BSDFs *(bidirectional scattering distribution function)* para divisão de superfícies. As perdas de luz são calculadas em função do fator de sujidade (fixado em 0,92), do comprimento adicional do duto, e da quantidade de desvios de 90°. Quanto aos desvios, para as distâncias entre o coletor e o difusor inferiores a 6 pés (aproximadamente 1,83m), o duto será considerado reto. Para distâncias superiores, serão considerados dois desvios de 90° (SOLEMMA, 2020).

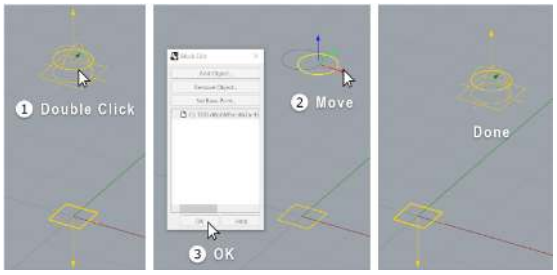


Figura 8 – Inserção de dutos no *ClimateStudio. Fonte: SOLEMMA, 2023*

Sendo assim, por meio da consulta ao guia de produtos, através do próprio subfluxo de trabalho, selecionaram-se os modelos recomendados para as salas de aula, projetados para teto fechado (*closed ceiling*). O modelo selecionado pertence a linha 750 DS-C. O diâmetro dos difusores equivale a 530mm, e o comprimento máximo admissível é de 15 metros. A distância entre o coletor e o difusor do duto de luz selecionado foi de 10,80 m. Sua colocação foi feita, conforme indicação do programa (ver figura 8) em elementos paralelos à parede do fundo em relação à abertura para luz natural.

Os elementos são retos e cortam as lajes dos andares superiores, também rente às paredes do fundo das salas dos andares superiores. No *plugin* são fornecidas as informações da localização da entrada e da saída de luz destes elementos, não sendo os mesmos "desenhados" no modelo 3D.

3.5 Interface e simulação no ClimateStudio

No *plug-in ClimateStudio* recorreu-se ao fluxo de trabalho *Daylight Availability* (Disponibilidade da Luz Natural). O fluxo de trabalho permite a análise da disponibilidade da luz do dia para recortes temporais específicos ou para o período de um ano completo, esta última recomendada para as modelagens baseadas no clima. O *ClimateStudio*, emprega uma versão de rastreamento de caminho progressivo dos níveis de radiância para simular as distribuições de iluminâncias (SOLEMMAN, 2020).

As métricas simuladas variam conforme os critérios do sistema de credenciamento selecionado pelo projetista. Os sistemas de credenciamento pré-configurados no *ClimateStudio* são o LEED, mantido pelo *US Green Building Council* (USGBC); o BREEAM UK e o BREEAM International, mantidos pelo *Building Research Establishment Group* (BRE); e o EN 17037 mantido pelo Comitê Europeu de Padronização (CEN 17037:2018).

Para as simulações da sala de aula, selecionou-se o subfluxo de trabalho "disponibilidade da luz do dia personalizado", uma vez que a análise da luz do dia não objetivou uma certificação específica. Nesta modalidade, é fornecido um amplo conjunto de estatísticas anuais da luz do dia, como a Udas a sDA, a ASE e a iluminância média, mencionadas anteriormente. Os dados de entrada foram informados conforme a sequência do subfluxo de trabalho: 1. Em *localização*, definiu-se a orientação da edificação e realizou-se o upload da base climática, em formato TMYx, para Belo Horizonte-Carlos Prates; 2. Em *materiais*, foram selecionados os materiais para paredes, teto, piso, esquadrias (vidro e montante), bem como para o entorno.
As propriedades ópticas de transmitância e refletância dos materiais são pré-determinadas pelo banco de dados dos materiais; 3. Em *persianas*, são realizadas as configurações dos dispositivos de sombreamento. Neste caso, inexistentes; 4. Em *áreas ocupadas*, a malha de pontos é configurada. Definiu-se a malha de pontos a 0,75m do plano de trabalho, atribuindo-se espaçamento entre os sensores de 0,5m e espaçamento de 0,3m das paredes; e 5. Em *dispositivos tubulares de iluminação natural*, selecionou-se os dutos de luz para a segunda etapa das simulações.

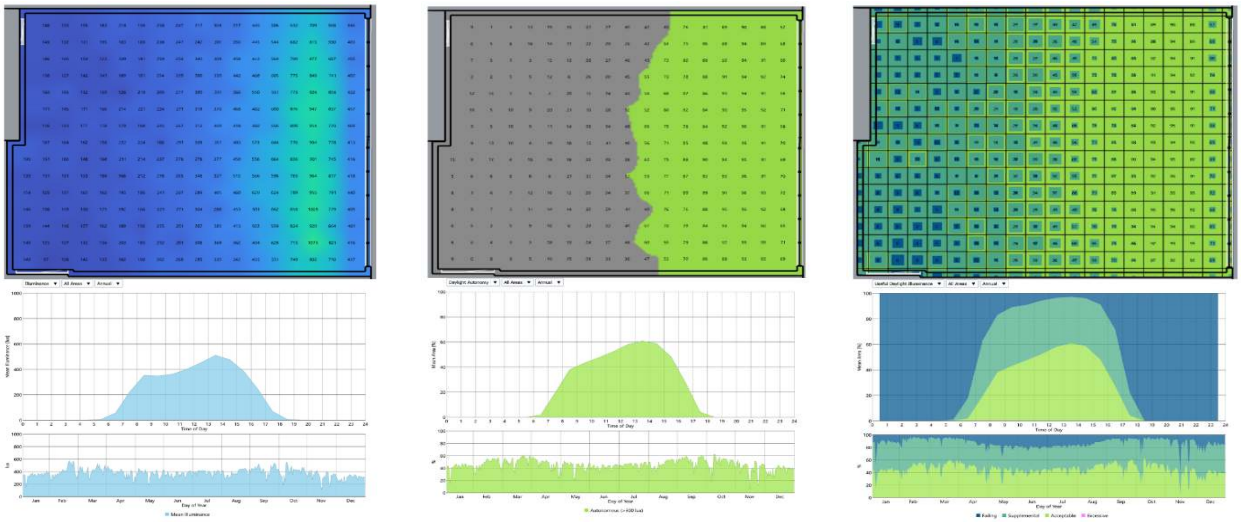
4. RESULTADOS

A seguir apresentam-se os resultados obtidos tanto para a situação original da sala em estudo quanto pela inserção de dutos de luz no espaço. São avaliadas em cada caso a iluminância média anual, a autonomia espacial da luz do dia e a iluminância útil da luz do dia.

4.1 Simulação da sala de aula nas condições atuais

Considerando-se a sala de aula na condição atual, conforme a sequência dos resultados apresentados na Figura 8, nota-se, na Figura 8a que as faixas de iluminância média inferiores a 300 lux (em azul escuro) correspondem a mais de 50% da área, concentrando-se na zona secundária de iluminação artificial. A zona adjacente às aberturas laterais atinge apresenta iluminâncias médias entre 300 e 1075 lux. Sendo assim, percebeu-se que os resultados são coerentes à percepção dos ocupantes, visto que a luz não se distribui de forma equilibrada em toda a área da sala de aula, devido à limitação do alcance da luz através das aberturas unilaterais. No período entre 11h30 e 15h foram registradas faixas de iluminância acima de 400lux. As faixas de iluminância abaixo de 300lux são predominantes no início da manhã, entre 6h e 8h, bem como no final da tarde, a partir das 16h30. Os picos de iluminância média foram registrados nos meses de fevereiro, março, setembro e outubro.

A autonomia espacial mínima da luz do dia (Figura 8b) não foi alcançada (sDA=47%), o que representa a necessidade constante de acendimento do sistemas de iluminação artificial. A iluminância horária decai a partir do centro da sala, registrando-se pontos que variam entre 1% e 47% do tempo de atendimento a 300lux. As áreas com pelo menos 300lux na metade do tempo de ocupação encontram-se sob a zona primária de iluminação das janelas, onde predominam pontos de autonomia de luz superiores a 74% do tempo. Ainda, a autonomia espacial da luz do dia é maior na primavera e no verão (atendendo a cerca de 40% a 60% das áreas), podendo alcançar sDA=60% nos meses de março, abril, setembro e outubro. Há oscilações de sDA entre os meses de dezembro e janeiro, o que poderia ser associado ao aumento da nebulosidade. O decréscimo das áreas entre abril e agosto corresponde ao período de outono e inverno, quando a disponibilidade de horas da luz do dia é menor.



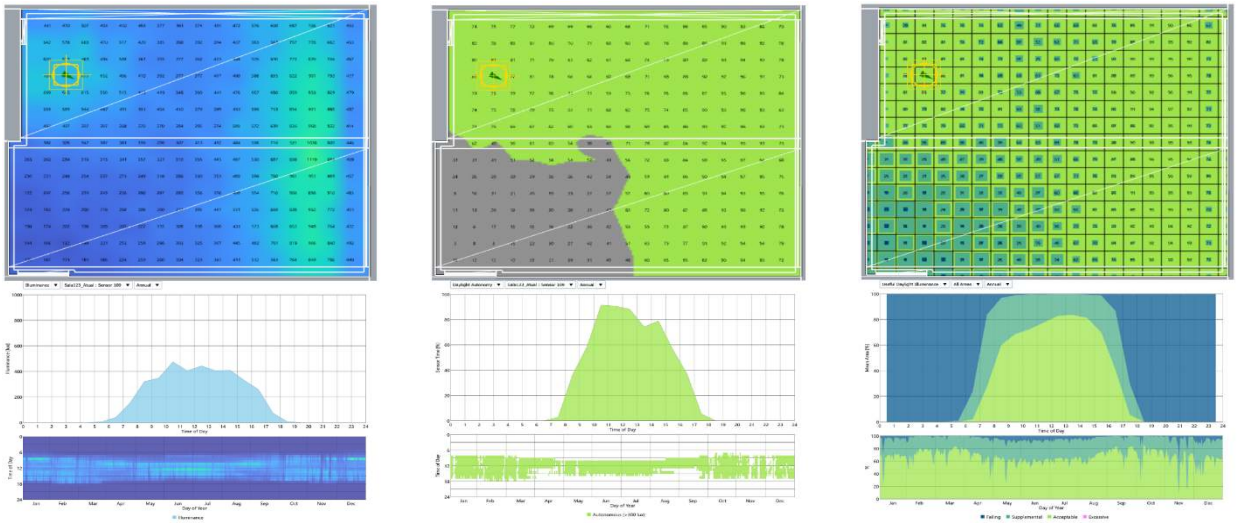
(a) (b) (c)

Figura 8 – Condição atual da sala: a) iluminância média anual, b) autonomia espacial da luz do dia (sDA) e c) iluminância útil da luz do dia (UDI), seguidos pelos respectivos gráficos de distribuição horária e mensal.

Em relação a iluminância útil da luz do dia (Figura 8c), predominam as áreas situadas na faixa UDI_s (100-300lux). Portanto, a luz do dia não é considerada suficiente para o conforto dos ocupantes, sendo necessário usar constantemente o sistema de iluminação artificial. As áreas adjacentes à abertura estão inseridas na faixa UDI_a (300-3000lux), enquanto as áreas opostas estão na faixa UDI_f (>100lux). A faixa UDI_e não foi registrada, visto que toda a área da sala de aula atingiu iluminâncias abaixo de 3000lux, indicando que não há o potencial de ofuscamento. No entanto, como percebido pelos ocupantes, o contraste entre as áreas mais iluminadas e as áreas menos iluminadas pode gerar algum desconforto.

4.2 Simulação da sala de aula com os dispositivos tubulares de iluminação natural

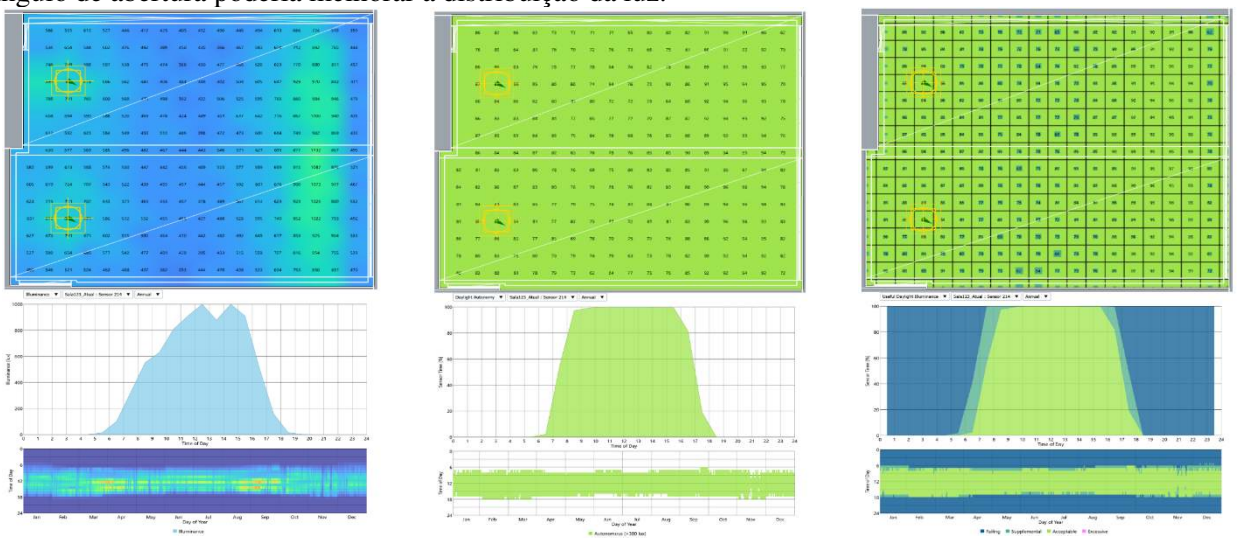
Após a adição de um duto de iluminação (Figura 9a), a iluminância média da sala de aula ultrapassou 300lux na área imediatamente abaixo do duto de luz. No que tange a autonomia espacial da luz natural (Figura 9b), houve o acréscimo de até 20% das áreas que alcançaram mais de 300lux em até 50% das horas de ocupação. Quanto a iluminância útil da luz do dia (Figura 9c), percebeu-se a redução de áreas classificadas na faixa UDI_f e o aumento de áreas classificadas na faixa UDI_s. Além disso, pelo menos 60% das áreas da sala alcançaram a faixa UDI_a. Sendo assim, pode-se dizer que o acréscimo do duto de iluminação contribuiu para o aumento da disponibilidade da luz do dia, porém, não foi suficiente para atender aos níveis exigidos para a autonomia da luz natural.



(a) (b) (c)

Figura 9 – a) iluminância média, b) autonomia espacial da luz do dia e c) iluminância útil da luz do dia, seguidos pelos respectivos gráficos de distribuição horária e mensal, após a inserção de um duto de luz.

Com a integração de dois dutos de luz, em conjunto ao sistema de esquadrias, a iluminância média ultrapassa 300lux em toda a área da sala de aula (Figura 10a). De maneira similar, os níveis de autonomia espacial da luz do dia (Figura 10b) e iluminância útil da luz do dia (Figura 10c) foram alcançados. Contudo, esta última aponta que a luz não é distribuída de forma homogênea, uma vez que pontos inseridos na faixa UDI_s podem ser identificadas na região central da sala. A escolha por um modelo de duto de luz com maior ângulo de abertura poderia melhorar a distribuição da luz.



(a) (b) (c)

Figura 10 – a) iluminância média, b) autonomia espacial da luz do dia e c) iluminância útil da luz do dia, seguidos pelos respectivos gráficos de distribuição horária e mensal, após a inserção de dois dutos de luz.

Paralelamente, devido às limitações para a reforma da infraestrutura, somada a ausência de vistas externas, a realocação da sala de aula e a adaptação do espaço a novos usos revelou-se uma solução alternativa. Deste modo, por não apresentar potencial de ofuscamento, o espaço poderia ser adaptado para comportar uma sala de computação.

4.3. Síntese dos resultados

A tabela 5 sintetiza os resultados obtidos nas simulações da sala de aula para as condições atuais e após o acréscimo dos dispositivos tubulares de iluminação natural.

Tabela 5 - Síntese das simulações para a condição atual e após o acréscimo dos dutos de luz

Simulação	$E_{méd}$ (lux)	sDA (%)	UDI (%)
Condição atual	373	45	45,06
Um duto de luz	484	64,8	65,13
Dois dutos de luz	594	100	82,4

Para a condição atual é possível inferir que a Autonomia Espacial da Luz Natural não é alcançada para garantia de um desempenho mínimo. No entanto, é alcançada em níveis aceitáveis já a partir da colocação de um duto e com a colocação de 2 dutos, a iluminação torna-se preferível (ver recomendações na Tabela 1). Igualmente, os níveis UDI, recomendados pela EFA não foram alcançados na situação atual, mas foram atingidos com a colocação de dois dutos (UDIa ≥ 80% da área do ambiente).

5. CONCLUSÕES

Pensar no conforto lumínico dos espaços educacionais perpassa pelo investimento na boa iluminação natural, sempre que possível, o que envolve a combinação dos níveis de iluminação requeridos e a adequada distribuição da luz. Assim, buscou-se investigar a disponibilidade da luz do dia em uma sala de aula, localizada na Escola de Arquitetura da UFMG, a partir da simulação dinâmica baseada no clima. A sala analisada fica abaixo do nível da rua e, portanto, não é possível admitir quantidade significativa de luz por sua abertura lateral. Decidiu-se iluminá-la então com o uso de dutos de luz. No entanto, até recentemente não havia ferramenta disponível que possibilitasse a análise do desempenho destes elementos com a devida qualidade.

O *plugin ClimateStudio* para *Rhinoceros 3D*, atualmente possibilita a inserção de dutos de luz, baseados nos dados medidos de um fabricante, para a avaliação da iluminação natural fornecida por este tipo de elemento e foi esta a ferramenta utilizada para análise no presente trabalho.

Como resultados, percebeu-se que para as condições atuais, os níveis de $E_{méd}$, sDA e UDI são coerentes à realidade vivenciada no local, visto que há um decréscimo exponencial da luz do dia na zona secundária de iluminação artificial a partir das aberturas unilaterais. A partir da inserção dos dutos de luz, foram percebidas melhorias na distribuição da luz natural, alcançando-se a autonomia da luz do dia conforme os critérios da LM-83 e da EFA.

Ressalta-se que como o ambiente é uma sala de aula e há uso de *datashow*, deve-se prever um sistema que permita o escurecimento, ou seja o fechamento do duto de luz quando do uso deste dispositivo.

Contudo, devido aos impactos de uma eventual reforma, a adaptação dos usos da sala de aula mostrou-se uma solução alternativa. Atualmente, não há consenso quanto aos níveis de autonomia baseados nos usos dos ambientes, indicando que estudos de caso futuros poderão contribuir para a discussão e a determinação de faixas preferíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AECWEB, Iluminação natural por tubos pode gerar economia de até 100%. 2013. Disponível em: https://www.aecweb.com.br/revista/materias/iluminacao-natural-por-tubos-pode-gerar-economia-de-ate-100/6485

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-3**: Iluminação Natural Parte 3: Procedimentos para avaliação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro. 2005.

_____. NBR **15220-3**: Desempenho térmico Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Rio de Janeiro, 2005.

BERNARDES, M. VERGARA, L. G. L. MARTINS, M. S. **A arquitetura da sala de aula sob a ótica dos usuários.** Revista Projetar, vol.5, pp. 49-61, 2020. Disponível em: https://periodicos.ufrn.br/revprojetar/article/view/19126/12426. Acesso em: 08 jul. 2022.

COSTANZO, V., EVOLA G., MARLETTA, L., NASCONE F. P.. **Application of Climate Based Daylight Modelling to the Refurbishment of a School Building in Sicily.** Sustainability Journal, MDPI, vol.10, pp.1-19, 2018. Disponível em: https://www.academia.edu/37144107/Application_of_Climate_Based_Daylight_Modelling_to_the_Refurbishment_of_a_School_Building_in_Sicily. Acesso em: 24 abr. de 2022.

EDUCATION FUNDING AGENCY. **EFA daylight design guide**. Departmental advice. Version 2, pp.1-14, London, 2014. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/388373/EFA_Daylight_design_guide.pdf. Acesso em: 16 jun. 2022

FERNANDES, L. L., REGNIER, C. M., **Lighting and visual comfort performance of commercially available tubular daylight devices**, Solar Energy, 2023. Doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.022

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. INMETRO.

LAMBERTS, R. DUTRA, L. PEREIRA, F. O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3 ed. pp.151-159. Rio de Janeiro, 2014.

LEDER, S. M. QUIRINO, L. M. M. PEREIRA, Y. V. C. Dutos verticais de captação de luz natural e ventilação cruzada em salas de aula. XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, pp.1095-1106. São Paulo, 2016.

LESLIE, R et al. **Goals and Metrics for Designing Daylighting for Schools**. Em: Patterns to daylight schools for people and sustainability. Rensselaer, pp.16-48, 2010. Disponível em: https://www.lrc.rpi.edu/programs/daylighting/pdf/DaylightingPatternBook_Final.pdf. Acesso em: 16 jun. 2022.

NABIL, A., MARDALJEVIC, J. **Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors**. Elsevier B.V., UK, 2006. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4434083/mod_resource/content/0/Useful%20daylight%20illuminances.%20A%20replacement%20for%20daylight%20factors.pdf. Acesso em: 08 jul. 2022.

MENA-BARRETO, L.; WEY, D., **Ontogênese do sistema de temporização – a construção e as reformas dos ritmos biológicos ao longo da vida human**, psicologia, USP, 2007, 18(2), 133-153.

SCHMID, A. L. **A ideia de conforto: reflexões sobre o ambiente construído**. Curitiba: Pacto Ambiental, pp.21-32, 2005.

SOLEMMA. **ClimateStudio Video Tutorials**. Disponível em: https://www.solemma.com/climatestudio-tutorial-videos. Acesso em: 16 jun. 2022.

SOLEMMA. **Daylight Availability.** Disponível em: https://climatestudiodocs.com/docs/daylightAvailability.html. Acesso em: 16 jun. 2022.

SOLEMMA. **Tubular Daylighting Devices**. Disponível em: https://climatestudiodocs.com/docs/TDDs.html. Acesso em: 16 jun. 2022.

SHUXIAO, W; JIANPING, Z.; LIXIONG, W., **Research on energy saving analysis of tubular daylight devices**, Energy Procedia, 78 (2015) 1781 – 1786.

WYMELENBERG, K.V.D.; MAHIC, A. **Annual Daylighting Performance Metrics, Explained: Adopted by the Illuminating Engineering Society, Spatial Daylight Autonomy and Annual Sunlight Exposure allow designers to quantify and compare the success of daylit spaces**. Architect Magazine, abril 2016.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNP por bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e à UFMG por fomento a participação no evento.