

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DESEMPENHO LUMINOSO E ENERGÉTICO DE AMBIENTES DE
ESCRITÓRIO: ESTUDO DE CASO EM PARANAÍ - PR**

Débora Thomé Miranda

São Carlos
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DESEMPENHO LUMINOSO E ENERGÉTICO DE AMBIENTES DE
ESCRITÓRIO: ESTUDO DE CASO EM PARANAÍ - PR**

Débora Thomé Miranda

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian

Coorientador: Prof. Dr. Douglas Barreto

São Carlos
2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Débora Thomé Miranda, realizada em 29/04/2020:

Prof. Dr. Douglas Barreto
UFSCar

p/ Prof. Dr. Eneidir Ghisi
UFSC

p/ Profa. Dra. Luciana Marcia Gonçalves
UFSCar

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Eneidir Ghisi, Luciana Marcia Gonçalves e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Prof. Dr. Douglas Barreto

RESUMO

MIRANDA, Débora Thomé. **Desempenho luminoso e energético de ambientes de escritório: estudo de caso em Paranaíba – PR**. 2020. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

A busca constante pela melhoria dos desempenhos luminoso e energético nos edifícios é devida principalmente pela necessidade de economia de energia, já que seu consumo tem aumentado significativamente nas últimas décadas. Proporcionar boa iluminação nos ambientes requer que níveis mínimos de iluminação sejam garantidos de modo que não afete negativamente a saúde do ocupante e contribua positivamente para sua produtividade. O presente estudo objetivou avaliar o sistema de iluminação de escritórios de um edifício existente da década de 1990 a fim de verificar os desempenhos luminoso e energético e explorar novos sistemas com potencial de melhoria dos desempenhos. As análises foram realizadas por meio de simulações computacionais utilizando o programa DIALux evo, que permite a avaliação das iluminações artificial e natural simultaneamente. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que o sistema de iluminação existente não atende ao valor médio de iluminância recomendado por norma. Logo, a partir de simulações com novos arranjos e tipos de luminárias/lâmpadas, foram apresentados dois sistemas mais eficazes: um abordando a substituição das lâmpadas fluorescentes T12 por luminárias LED, que propiciou economia de energia elétrica de 15,5%, e outro que utilizou a iluminação artificial para complementar a luz natural disponível durante o horário de trabalho com o auxílio de sistema de dimerização vinculado à luz natural. Este último sistema apresentou economia de energia elétrica de até 65% quando comparado ao sistema de iluminação existente. Com relação ao desempenho luminoso, a densidade de potência de iluminação limite exibiu melhoria de mais de 60% nos novos sistemas. Logo, ao modificar o arranjo das luminárias e substituí-las por LED, o sistema de iluminação artificial atendeu o valor de iluminância média recomendado por norma e ainda gerou redução significativa no consumo de energia elétrica de iluminação. A economia de eletricidade também foi observada ao avaliar o potencial de aproveitamento da luz natural associada ao uso de *dimmer*.

Palavras-chave: Desempenho luminoso. Iluminação natural. Iluminação artificial. Simulação computacional.

ABSTRACT

MIRANDA, Débora Thomé. **Luminous and energy performances of office environments: case study in Paranaíba - PR.** 2020. 104f. Dissertation project (Master in Civil Engineering) - Federal University of São Carlos, São Carlos, 2020.

The constant search for the performances of luminous and energetic efficiencies in buildings is due mainly to the need for energy savings, since its consumption has increased significantly in the last decades. Providing good lighting in the environments requires that minimum levels of lighting be guaranteed so that it does not negatively affect the occupant's health and contributes positively to their productivity. The present study aimed to evaluate the office lighting system of an existing building from the 1990s in order to verify the luminous and energetic performances and explore new systems with the potential to improve performances. The analyzes were carried out by means of computer simulations using the DIALux evo program, which allows the evaluation of artificial and natural illuminations simultaneously. Based on the results obtained, it was found that the existing lighting system does not meet the average recommended illuminance value. Therefore, based on simulations with new arrangements and types of luminaires/lamps, two more effective systems were presented: one considering the replacement of T12 fluorescent lamps with LED luminaires, which provided an energy saving of 15.5%, and another that used artificial lighting to complement the available daylight during working hours with the aid of a dimming system linked to daylight. This last system showed an energy saving of up to 65% when compared to the existing lighting system. Regarding light quality, the limit lighting power density showed an improvement of more than 60% in the new systems. Therefore, by modifying the arrangement of the luminaires and replacing them with LEDs, the artificial lighting system reached the average illuminance value recommended by the standard and also generated a significant reduction in the consumption of lighting electricity. Electricity savings were also observed when assessing the potential for using natural light associated with the use of dimmers.

Keywords: Luminous performance. Natural lighting. Artificial lighting. Computational simulation.

Figura 1 - Alguns benefícios da eficiência energética	11
Figura 2 - Consumo final de energia por fonte no Brasil em 2018.....	12
Figura 3 - Os dez maiores consumidores de energia elétrica em 2017	13
Figura 4 - Os dez maiores consumidores de energia elétrica <i>per capita</i> em 2017	13
Figura 5 - Abrangência mundial das políticas energéticas no consumo total final de energia em edifícios, 2000-2018	21
Figura 6 - Classificação de luminárias para iluminação interna de acordo com a distribuição luminosa para baixo e para cima	24
Figura 7 - Tipos de luminárias mais comuns para ambientes internos.....	25
Figura 8 - Exemplo do efeito visual realista para diferentes valores de IRC a 2700 K	26
Figura 9 - Comparação de temperaturas de cor em Kelvin	26
Figura 10 - Vendas de lâmpadas por tipo no Cenário de Desenvolvimento Sustentável (CDS) ao nível mundial, 2010-2030	29
Figura 11 - Exemplo de céus (a) limpo, (b) parcialmente encoberto e (c) encoberto	31
Figura 12 - Exemplos de controle de iluminação.....	37
Figura 13 - Interface do programa DIALux evo 8.2	44
Figura 14 - Representação gráfica do processo de desenvolvimento do estudo.....	45
Figura 15 - Localização do município de Paranavaí/PR	48
Figura 16 - Consumo de energia elétrica por classe no município de Paranavaí/PR	49
Figura 17 - Visão 3D do entorno do edifício avaliado (na cor alaranjada).....	49
Figura 18 - Fachada principal do edifício avaliado	50
Figura 19 - Planta do pavimento tipo	51
Figura 20 - Planta da sala 2	52
Figura 21 - Vista das aberturas da sala 2	53
Figura 22 - Planta da sala 4	53
Figura 23 - Vista das aberturas da sala 4	54
Figura 24 - Dados de entrada referente à localização do edifício.....	58
Figura 25 - Dados de entrada referente a luz natural nos solstícios de (a) inverno e (b) verão	58
Figura 26 - Disposição dos pontos analisados nos ambientes das salas (a) 2 e (b) 4	59
Figura 27 - Termo-higro-decibelímetro-luxímetro utilizado	60
Figura 28 - Comparação entre a iluminância nos pontos medidos <i>in loco</i> e simulados.....	61
Figura 29 - Visão 3D do ambiente da sala 2 com o sistema de iluminação existente	65
Figura 30 - Representação das linhas isográficas do ambiente da sala 2 para o sistema de iluminação existente (valores em lux)	66
Figura 31 - Visão 3D do sistema de iluminação proposto A	69
Figura 32 - Representação das linhas isográficas do sistema de iluminação proposto A (valores em lux)	70
Figura 33 - Visão 3D do sistema de iluminação proposto B	72
Figura 34 - Representação das linhas isográficas do sistema de iluminação proposto B (valores em lux)	72
Figura 35 - Visão 3D do sistema de iluminação proposto C	74
Figura 36 - Representação das linhas isográficas do sistema de iluminação proposto C (valores em lux)	75
Figura 37 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 2 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural mais 0% da iluminação artificial	77
Figura 38 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 4 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural mais 0% da iluminação artificial.....	78
Figura 39 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 2 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural mais 100% da iluminação artificial.....	79

Figura 40 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 4 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural mais 100% da iluminação artificial.....	80
Figura 41 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 2 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural integrada à iluminação artificial e aliados ao sistema de dimerização	81
Figura 42 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 4 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural integrada à iluminação artificial e aliados ao sistema de dimerização	82
Figura 43 - Grupo 1 mais próximo das aberturas	83
Figura 44 - Grupo 2 mais distante das aberturas	84
Figura 45 - Comparação entre a potência total do sistema para as condições de cenário do ambiente da sala 2	85
Figura 46 - Comparação entre a potência total do sistema para as condições de cenário do ambiente da sala 4	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens de métodos de estimativa	32
Quadro 2 - Pontos fortes e fracos de alguns métodos de previsão da luz natural (continua)	33
Quadro 3 - Modelos de acionamento da iluminação artificial.....	36
Quadro 4 - Comparação entre controles de comutação e dimerização vinculados à luz natural	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de diferentes parâmetros de lâmpadas.....	27
Tabela 2 - Alguns dados de entrada para o programa de simulação referentes às salas avaliadas (continua)	51
Tabela 3 - Recomendação de refletâncias para superfícies internas mais importantes	55
Tabela 4 - Recomendação de iluminância mantida de acordo com os ambientes de um escritório	55
Tabela 5 - Ficha técnica da luminária existente nos ambientes das salas	64
Tabela 6 - Disposição do sistema de iluminação existente do ambiente da sala 2.....	65
Tabela 7 - Resumo dos resultados obtidos do sistema de iluminação existente do ambiente da sala 2	66
Tabela 8 - Disposição do sistema de iluminação A proposto para o ambiente da sala 2	68
Tabela 9 - Ficha técnica da luminária A proposta (continua)	68
Tabela 10 - Disposição do sistema de iluminação B proposto para o ambiente da sala 2	70
Tabela 11 - Ficha técnica da luminária B proposta	71
Tabela 12 - Disposição do sistema de iluminação C proposto para o ambiente da sala 2	73
Tabela 13 - Ficha técnica da luminária C proposta (continua).....	73
Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos para os sistemas de iluminação propostos. Modelo de céu: sem luz natural	75
Tabela 15 - Resumo dos valores obtidos de acordo com sistemas de iluminação para cada ambiente de sala	87
Tabela 16 - Ambiente da sala 2 - Solstício de inverno (continua).....	101
Tabela 17 - Ambiente da sala 2 - Solstício de verão (continua).....	102
Tabela 18 - Ambiente da sala 4 - Solstício de inverno	103
Tabela 19 - Ambiente da sala 4 - Solstício de verão	104

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 GERAL	16
1.2.2 ESPECÍFICOS	16
1.3 QUESTÃO DE PESQUISA.....	17
1.4 DELIMITAÇÕES	17
1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL	24
2.2 APROVEITAMENTO DA LUZ NATURAL	29
2.3 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL	35
2.4 PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO	40
2.4.1 DAYSIM.....	41
2.4.2 ENERGYPLUS.....	41
2.4.3 DIALUX	41
3. METODOLOGIA.....	45
3.1 DELINEAMENTO DE ASPECTOS GERAIS	46
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	48
3.3 DELINEAMENTO DE PARÂMETROS RECOMENDADOS POR NORMA E INTEGRAÇÃO DAS ILUMINAÇÕES	54
3.3.1 ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL	54
3.3.2 ILUMINAÇÃO NATURAL.....	57
3.3.3 INTEGRAÇÃO DAS ILUMINAÇÕES.....	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
4.1 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DO PROJETO INICIAL	63
4.2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PROPOSTOS.....	67
4.3 INTEGRAÇÃO DAS ILUMINAÇÕES ARTIFICIAL E NATURAL E USO DE SISTEMA DE DIMERIZAÇÃO	76
4.4 COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO SIMULADOS.....	86
5. CONCLUSÕES.....	89
REFERÊNCIAS	92
APÊNDICE A - ILUMINÂNCIAS MÉDIAS E UNIFORMIDADES DAS COMBINAÇÕES DOS GRUPOS DE LUMINÁRIAS	101

1. INTRODUÇÃO

Após a crise do petróleo ocorrida na década de 70, a preocupação a respeito da preservação ambiental e da eficiência energética ganhou maiores proporções mundialmente, visto que o aumento da produção de energia acarreta em impactos ambientais (como inundações e poluição) e demanda grandes investimentos do governo (SOUZA; GUERRA; KRUGER, 2011).

No Brasil, foram desenvolvidos programas com o intuito de promover o uso eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente, como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), instituído em 1985, a Lei nº 10.295/2001, (BRASIL, 2001) e o Programa de Eficiência Energética (PEE), criado por meio da Lei nº 9.991/2000 (BRASIL, 2000). Em 2017, por exemplo, houve economia de 4,57% do consumo total de energia elétrica em virtude do PROCEL (PROCEL, 2018).

De acordo com a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ABESCO), eficiência energética pode ser definida como “relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização”. Esse conceito também engloba o conjunto de ações para otimizar o uso de recursos naturais e reduzir perdas e desperdícios sem prejudicar a eficiência dos serviços energéticos (ABESCO, s.d.).

A Agência Internacional de Energia (IEA) aponta diversos benefícios tanto econômicos quanto sociais proporcionados por investimentos em eficiência energética como observado na Figura 1. As reduções da demanda de energia e das emissões de gás de efeito estufa (GEE), por exemplo, têm sido importantes metas de decisores políticos ao redor do mundo, principalmente pela melhoria da eficiência de produtos e processos que consomem energia (CAMPBELL, 2014).

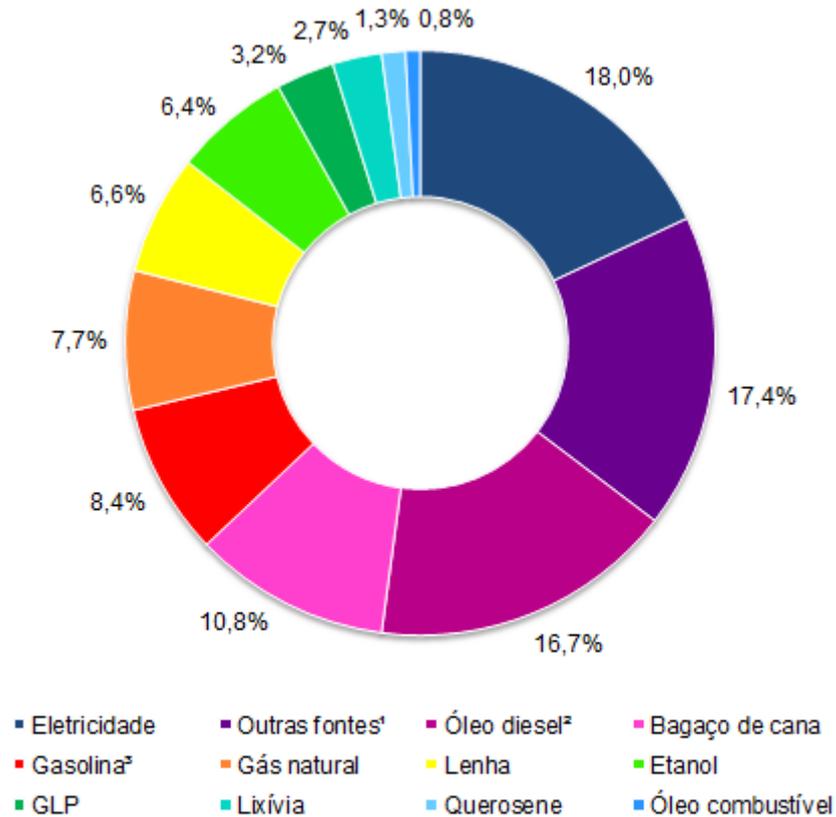
Figura 1 - Alguns benefícios da eficiência energética



Fonte: adaptado de Campbell (2014).

No Brasil, o consumo final de energia é devido principalmente pela eletricidade (Figura 2), gerada em sua maioria por hidrelétricas (66,6%). No ano de 2018, o consumo total de energia elétrica foi distribuído, principalmente, entre os setores industrial (31,6%), residencial (21,4%) e comercial (14,3%), além das perdas (15,9%) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019).

Figura 2 - Consumo final de energia por fonte no Brasil em 2018



¹ Inclui gás de refinaria, coque de carvão mineral, de carvão vegetal e de petróleo, alcatrão, nafta, carvão mineral, outros energéticos de petróleo, asfalto, lubrificantes e solventes

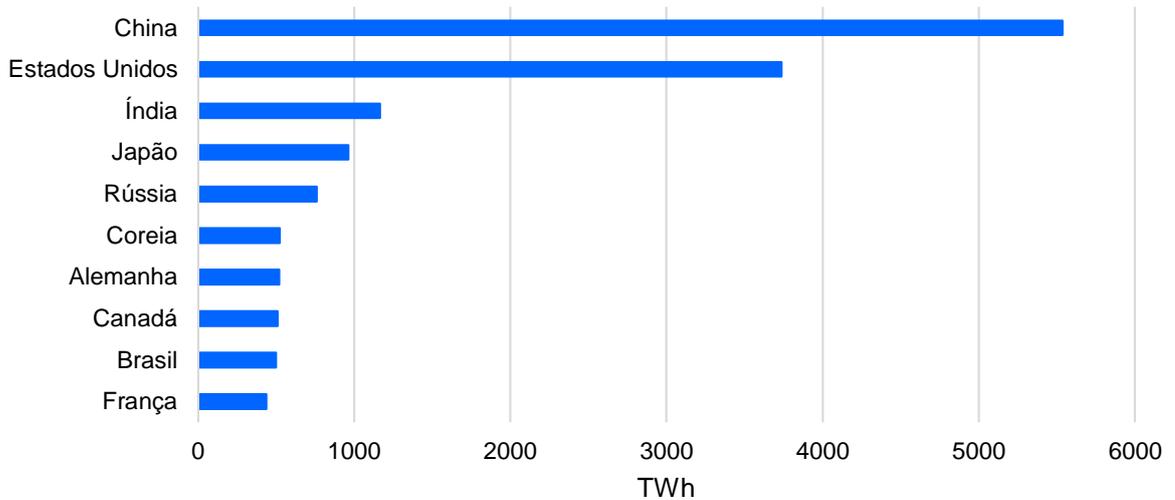
² Inclui biodiesel

³ Inclui gasolina de aviação

Fonte: adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2019).

Ao nível mundial, dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2019a) de 2017 mostram que o Brasil ocupava o nono lugar no *ranking* dos principais consumidores de eletricidade, representando 2,3% do consumo total. Juntos, a China e os Estados Unidos constituíam mais de 40% do total (Figura 3).

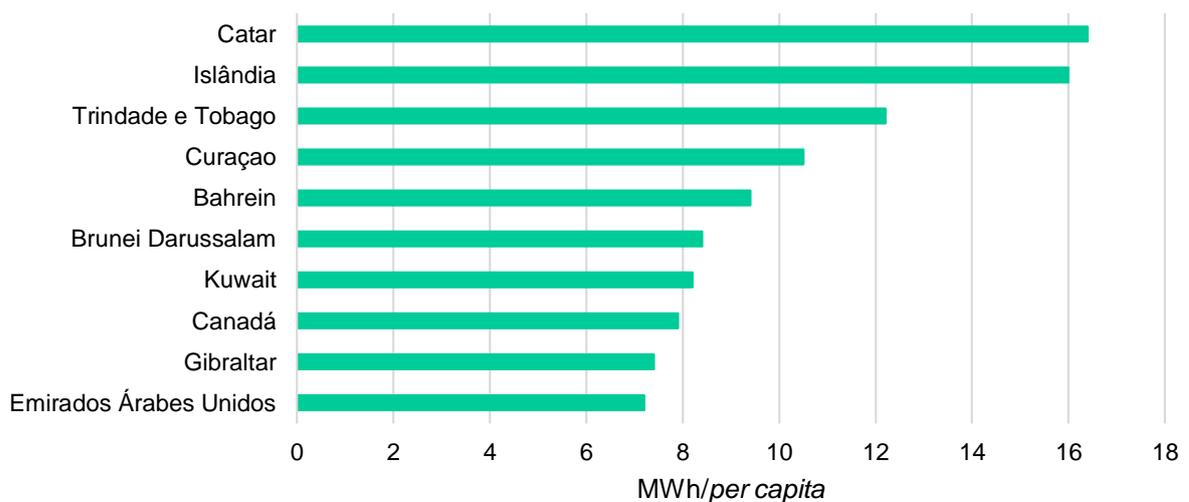
Figura 3 - Os dez maiores consumidores de energia elétrica em 2017



Fonte: adaptado de IEA (2019a).

Entretanto, ao analisar o consumo de eletricidade *per capita* ao nível mundial, o cenário é completamente diferente (Figura 4) conforme explicitado pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2019c): isso ocorre devido aos fatores preponderantes nos níveis de consumo *per capita*, como taxa de eletrificação, penetração de aparelhos, saturação do mercado e requisitos de aquecimento ou resfriamento elétrico.

Figura 4 - Os dez maiores consumidores de energia elétrica *per capita* em 2017



Fonte: adaptado de IEA (2019c).

O comportamento energético dos edifícios é influenciado por diversos fatores, como condições climáticas, estrutura e características da edificação, ocupação e operação de sistemas de iluminação e climatização (aquecimento, ventilação e ar condicionado). A previsão do uso de energia é, portanto, essencial para melhorar o desempenho energético do edifício a fim de alcançar a conservação de energia e reduzir o impacto ambiental (ZHAO; MAGOULÈS, 2012). Porém, devido à complexidade dos aspectos envolventes, a previsão precisa do consumo de energia de um edifício torna-se um problema não trivial (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2016). É essencial analisar a interação entre edifício, clima e sistemas de controle para cada caso e não apenas adotar uma dada solução baseada em dados gerais de economia de energia (FERNANDES *et al.*, 2018).

Em 2018, as edificações foram responsáveis por 28% das emissões globais de CO₂ (dióxido de carbono) relacionadas à energia (IEA, 2019b), gás que influencia as mudanças climáticas e que pode contribuir com o aquecimento global. Isso indica que medidas que visam a conservação de energia em edifícios podem contribuir tanto para a redução de emissão de gases poluentes como para a melhoria do desempenho energético (LI, 2010).

A iluminação artificial é um dos sistemas que possui parcela significativa no consumo de energia em edifícios comerciais, atrás dos sistemas de refrigeração e aquecimento de ar (ALRUBAIIH *et al.*, 2013; WONG, 2017), e que possui grande potencial de economia tanto em novos edifícios quanto existentes (RUPARATHNA; HEWAGE; SADIQ, 2016).

Para os autores Michael, Gregoriou e Kalogirou (2018), os desempenhos energético e luminoso na maioria dos edifícios antigos existentes é insatisfatório, pois certamente não seguiram normas e/ou princípios de eficiência energética na época de projeto, ou seja, apresentam alto consumo de energia e não oferecem níveis luminosos que garantem a segurança e o conforto visual dos usuários. Por isso, pesquisas que envolvem restauração dos sistemas de edifícios antigos são de grande interesse e importância.

Haq *et al.* (2014) mencionam alguns métodos que melhoram o desempenho de energia utilizada na iluminação, como: instalação de lâmpadas com maior eficácia luminosa, projeto de iluminação baseado em tarefas, sistemas de iluminação relacionados à luz natural e uso de sensores de ocupação para áreas de trabalho.

Para Ikuzwe, Ye e Xia (2020), o aprimoramento dos sistemas de iluminação deve levar em consideração dois aspectos relevantes: economia de energia e conforto visual dos usuários, ou seja, incluir tecnologias de iluminação mais eficientes e atender requisitos subjetivos de quantidade e qualidade da luz em um determinado espaço.

1.1 JUSTIFICATIVA

A iluminação, tanto natural quanto artificial, desempenha um papel fundamental não apenas para o conforto visual, mas também para o desempenho cognitivo do ser humano (BURATTINI *et al.*, 2019). Uma iluminação adequada pode tanto melhorar a saúde e o bem-estar dos usuários como também propiciar melhor desempenho, menos erros, maior segurança, menos acidentes e menor absenteísmo no trabalho (VAN BOMMEL, 2006).

Tendo em vista que as pessoas passam longos períodos dentro de edifícios recebendo grande quantidade de iluminação artificial e uma pequena porção de luz natural, é importante que os sistemas luminosos estejam projetados apropriadamente (BURATTINI *et al.*, 2019). Além disso, a iluminação desnecessária e descontrolada em uma edificação pode tanto acarretar em desperdício de energia elétrica como afetar outros subsistemas da edificação, como a necessidade de resfriamento em locais onde a iluminação aumentou a temperatura ambiente (SINOPOLI, 2010).

Por ser um país tropical, o Brasil possui potencial para utilizar a luz natural como um importante recurso para reduzir o consumo de energia elétrica nas edificações, seja por meio de economia direta ou indireta como menciona Amorim (2002). A primeira consiste na utilização otimizada da luz natural para reduzir o uso da luz artificial, sendo que é necessário um sistema de controle que desligue ou diminua a luz artificial de acordo com a luz natural disponível no ambiente. Já o segundo modo de economia é por meio da redução da carga do ar condicionado quando se dispõe de um projeto que proporciona a entrada de luz natural difusa controlada e, assim, diminui tanto o ganho de calor solar quanto o ganho de calor gerado pela iluminação artificial.

Ao considerar que a luz natural é variável ao longo natural devido à trajetória solar e condições de céu, faz-se necessária a complementação com sistemas de controle e de automação de iluminação artificial para melhor aproveitamento da luz natural e economia de energia. Além disso, esses sistemas fornecem ambientes mais agradáveis aos seus usuários ao mesmo tempo em que garantem condições mínimas de iluminação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013; SHISHEGAR; BOUBEKRI, 2017).

Em edifícios existentes, melhorias nos sistemas de energia podem reduzir o impacto ambiental (por exemplo, emissões de gases de efeito estufa), obter benefícios econômicos (por exemplo, melhorar o desempenho energético), aumentar os níveis de conforto interno e melhorar a aparência da arquitetura (RUPARATHNA; HEWAGE; SADIQ, 2016). Essas melhorias podem ser ainda mais significativas em edificações antigas que não tiveram o *feedback* dos usuários após a entrega da obra. A prática da Avaliação Pós-Ocupação (APO)

é uma importante ferramenta que pode auxiliar na avaliação do desempenho energético real de um edifício depois que o mesmo foi construído e ocupado (MENEZES *et al.*, 2012).

Dada a importância de ações de eficiência no uso da energia elétrica, bem como na melhoria do desempenho luminoso de ambientes de escritório, o presente estudo se dedica à avaliação do sistema de iluminação de escritórios de um edifício existente por meio de simulações computacionais, com o objetivo de verificar os níveis luminosos em relação aos requisitos recomendados em norma e explorar novos sistemas com potenciais de melhoria dos desempenhos luminoso e energético.

Por se tratar de uma edificação da década de 1990 e por conta da evolução da tecnologia das lâmpadas e luminárias, viu-se como oportuna a avaliação dos desempenhos luminoso e energético do sistema de iluminação de escritórios existentes. Tendo em vista o clima tropical da região da edificação, também foi abordado o potencial de aproveitamento da luz natural nos ambientes com o intuito de se obter redução no consumo de energia elétrica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GERAL

O estudo tem como objetivo avaliar as condições atuais de iluminação e energia elétrica em salas de escritório de um edifício existente desde a década de 1990, localizado na cidade de Paranaíba/PR e, por meio de simulações, propor condições de melhoria de desempenhos luminoso e energético destes ambientes.

1.2.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Avaliar os desempenhos luminoso e energético do sistema de iluminação existente nos ambientes de escritório por meio de simulações computacionais a fim de analisar se atendem aos requisitos mínimos recomendados pela NBR ISO/CIE 8995-1/2013;
- Verificar novos tipos e arranjos de luminárias disponíveis no mercado brasileiro com potencial de substituição do sistema de iluminação existente de modo a melhorar os desempenhos luminoso e energético;

- Avaliar o aproveitamento da luz natural integrado ao sistema de iluminação otimizado com o uso de dispositivo de controle de iluminação artificial;
- Comparar os desempenhos dos sistemas tanto em relação aos níveis de iluminação quanto à economia de energia elétrica;
- Definir o quanto pode ser melhorado em termos de desempenhos luminoso e energético.

1.3 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa desse estudo consiste em se avaliar a possibilidade de melhorias nos desempenhos luminoso e energético do sistema de iluminação existente em ambientes de escritórios de um edifício existente da década de 1990 e verificar a possibilidade de otimização desse sistema integrando luz natural e estratégia de controle de energia elétrica.

1.4 DELIMITAÇÕES

Este trabalho delimitou-se ao uso de programa de simulação de iluminação artificial e natural considerando ambientes de escritório de um edifício comercial existente localizado no município de Paranavaí, Paraná.

1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho foi organizado em seis capítulos como descrito a seguir.

O capítulo 1 trata do tema de forma geral, abordando dados históricos de eletricidade e a respeito de eficiência energética. Também estão presentes neste capítulo os objetivos, a justificativa e a problemática da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica dos principais assuntos abordados no decorrer do estudo, como iluminação artificial, iluminação natural e estratégias de controle de iluminação.

O capítulo 3 descreve o método empregado para a realização da avaliação dos ambientes das salas de escritório.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por meio de simulação computacional e respectiva discussão.

Por fim, o capítulo 5 traz as considerações finais do estudo apresentando os pontos de destaque dos resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As políticas energéticas em edifícios visam reduzir o consumo de energia elétrica sem prejudicar níveis de conforto, saúde e produtividade, ou seja, ser mais eficiente energeticamente. Órgãos reguladores, como governo e agências de energia, propõem três instrumentos básicos para incentivar a economia e potencializar o desempenho energético em edifícios: regulamentos, auditoria e certificação (PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2009).

Regulamentos ou normas têm como objetivo primário economizar a energia final ou algum parâmetro relacionado (como emissões de gás carbônico e custos de energia), enquanto fornece serviços iguais ou aprimorados nos edifícios. Algumas normas que especificam diretrizes para melhoria no desempenho energético de edificações são ABNT NBR ISO 50004:2016, ISO 50047:2016 e ASHRAE 90.1-2019.

As auditorias, sejam internas ou externas, avaliam o sistema de gestão de energia de acordo com critérios, políticas e metas energéticas, e geram informações sobre consumo de energia e desempenho energético atuais como resultados, além de poderem apontar uma série de recomendações específicas (ABNT, 2018).

Já a certificação fornece garantias de que a organização implementou um sistema de gestão em conformidade com requisitos especificados, além de apresentar a descrição das características energéticas da edificação. O processo da certificação é pertinente não apenas para o desempenho de energia, mas também para incluir uma classe que permita aos usuários comparar e avaliar o desempenho energético do edifício com outros similares (PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2009).

Para o desenvolvimento de um esquema de certificação de energia, Pérez-Lombard *et al.* (2009) sugerem algumas questões que devem ser examinadas: (1) O que deve ser calculado para avaliar o desempenho energético do edifício? (2) Como isso deve ser calculado? (3) Como deve ser estabelecido o limite para o desempenho energético? (4) Com o que deve ser comparado o desempenho energético do edifício? (5) Como rotular o desempenho energético do edifício? (6) Que melhorias de desempenho energético devem ser recomendadas? (7) Que informação o certificado energético deve incluir?

Na avaliação do desempenho energético, a ferramenta *benchmarking* (termo oriundo da palavra inglesa *benchmark* - marca de referência) permite a comparação de um índice de desempenho energético entre edifícios com características similares, como consumo de

energia, emissões de dióxido de carbono ou custo de energia por unidade de área limitada. O processo de *benchmarking* consiste basicamente em quatro etapas: desenvolver um banco de dados com informações sobre o desempenho energético dos edifícios de referência; selecionar as informações relevantes para a avaliação do índice de desempenho energético do edifício real; comparar esse índice em relação às amostras mantidas no banco de dados, e; recomendar medidas de desempenho energético viáveis tanto técnica quanto economicamente (PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2009).

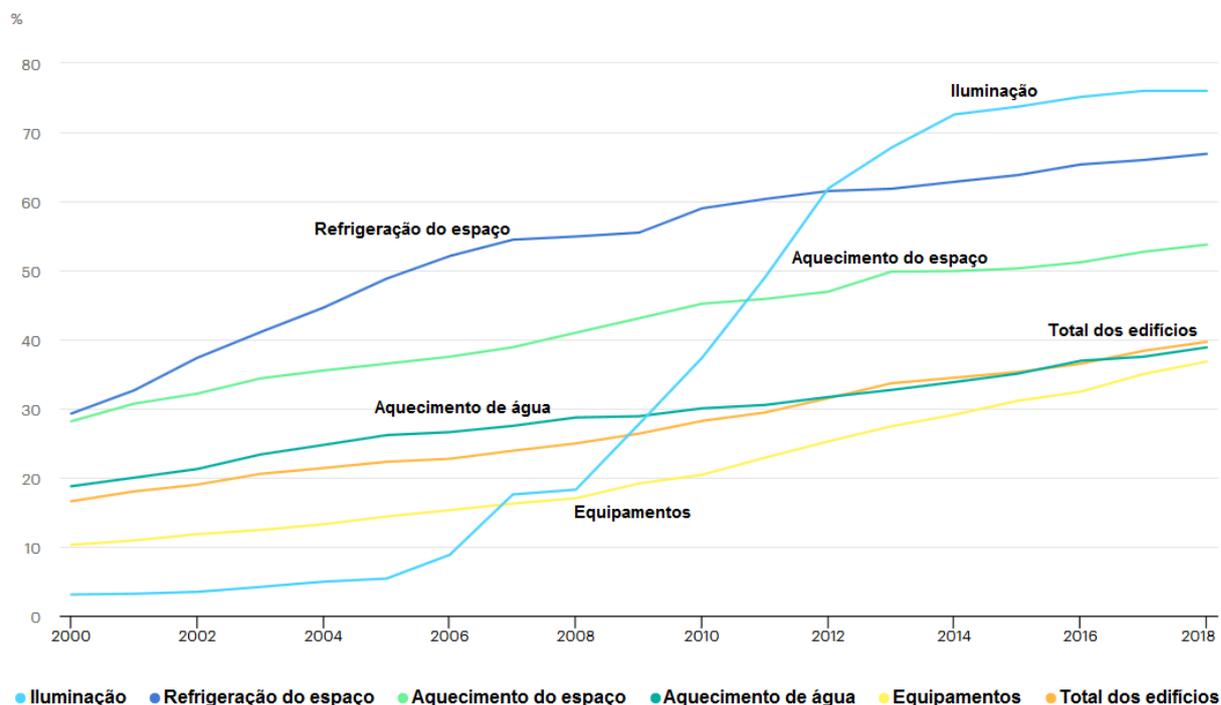
A técnica de *benchmarking* pode ser realizada tanto em edificações novas (em fase de projeto) quanto em existentes. Para a comparação, Pérez-Lombard *et al.* (2009) indicam que sejam considerados edifícios com características similares, como mesmo clima e tipo de construção. Alternativamente, na ausência de edificações equivalentes, recomenda-se que seja realizada a autorreferência, na qual a comparação é feita com um edifício de referência derivado do edifício real. Nesse último caso, desempenho energético é comparado com base em um índice indicando a porcentagem de economia em relação à autorreferência.

As oportunidades de melhoria no comportamento energético de uma edificação devem ser consideradas como um todo, desde projetos de instalações e equipamentos até sistemas e processos de uso de energia (ABNT, 2018). A partir da identificação dos consumos substanciais de energia e/ou o que pode ser um potencial para melhoria do desempenho energético, a organização pode focar por instalação (por exemplo, depósito, alojamento, escritório), processo ou sistema (por exemplo, iluminação, vapor, aquecimento) ou equipamento (por exemplo, turbina, resfriador).

Assim, o desempenho energético das edificações pode ser maior ao adotar programas de conscientização entre os usuários do edifício, incorporar medidas técnicas para melhoria do desempenho energético, aprimorar a gestão da energia do edifício e incentivar o uso de energia renovável. A interação entre as mudanças comportamentais, organizacionais e tecnológicas facilitam o aumento do desempenho energético e da economia resultante (RUPARATHNA; HEWAGE; SADIQ, 2016).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2019b), a política de eficiência energética para edifícios continuou a progredir em 2018, embora tenha desacelerado se comparado com os anos anteriores (Figura 5). Isso indica que os esforços e investimentos para melhorar o desempenho energético nas edificações não estão acompanhando o rápido crescimento da demanda de energia das economias emergentes. Observa-se ainda que a iluminação tem sido um dos pontos com maior êxito de melhoria.

Figura 5 - Abrangência mundial das políticas energéticas no consumo total final de energia em edifícios, 2000-2018



Fonte: adaptado de IEA (2019b).

No que se refere à melhoria nos sistemas de iluminação, Dubois e Blomsterberg (2011) apresentaram uma revisão a respeito do potencial e das estratégias para reduzir o consumo de energia elétrica na iluminação de escritórios envolvendo sistemas de controle, com ênfase no contexto do norte europeu. Entre as estratégias diretamente relacionadas à instalação de iluminação artificial, estão: melhorias nas tecnologias das lâmpadas, dos reatores e de luminárias; melhoria nos fatores de manutenção e de utilização, e; emprego de sensores de ocupação e/ou escurecimento manual/automático. Já as estratégias relacionadas ao aproveitamento da luz natural comentadas são os efeitos de latitude e orientação, das características da janela, de dispositivos de sombreamento, da refletância das superfícies internas e da altura do pé direito.

Bodart e De Herde (2002) mostraram que o potencial da economia de energia elétrica está fortemente relacionado a parâmetros como o coeficiente de transmissão luminosa do vidro, a configuração da fachada, a orientação de abertura, a largura da sala e os coeficientes de reflexão das paredes. A partir de simulações computacionais térmicas utilizando o TRNSYS (KLEIN *et al.*, 2017) e da luz natural por meio do ADELIN (CHRISTOFFERSEN, 2000) para o clima da Bélgica, os autores concluíram que as economias de energia de iluminação que podem ser alcançadas em um edifício de escritórios pelo escurecimento

artificial da iluminação estão contidas entre 50 e 80%, ao considerar uma vidraça com um coeficiente de transmissão luminosa de 60%.

Almeida e Martins (2014) citam que há dois meios de reduzir o consumo de energia dos sistemas luminosos nas edificações. O primeiro é definir níveis máximos de potência para promover o uso de sistemas de iluminação eficientes. O segundo é incentivar a adoção de aberturas na envoltória do edifício ainda na fase de projeto para permitir a entrada da luz natural e complementar a iluminação utilizando estratégias de controle que reduzam a necessidade do consumo de energia elétrica.

Para Haq *et al.* (2014), o consumo de energia elétrica (Wh) pode ser reduzido ao diminuir a potência de luz instalada (W) e/ou o tempo de uso (h), visto que esses dois fatores compõem a equação básica do consumo de eletricidade. Para diminuir a potência de luz instalada, devem-se utilizar lâmpadas mais eficientes que produzam uma quantidade adequada de iluminância (lux) utilizando menos energia de entrada possível. Dessa forma, ao empregar lâmpadas com maior eficácia luminosa, a carga geral de iluminação também pode ser reduzida. Além do mais, um projeto de iluminação adequado pode contribuir na diminuição da carga de iluminação ao fornecer os níveis necessários de luz de acordo com as tarefas executadas em cada ambiente.

Yun, Kim e Kim (2012) relataram os resultados de uma pesquisa de campo de quatro escritórios na Coreia, com o objetivo de revelar padrões de ocupação e de uso de iluminação e seus efeitos na energia de iluminação resultante. Uma das conclusões é que os ocupantes tendem a ativar a iluminação quando entram no escritório e mantêm a mesma ligada até que saiam do escritório, ou seja, o uso de iluminação pelos usuários nos escritórios estudados não está estatisticamente relacionado à iluminação natural, mas tem uma estreita relação com os padrões de ocupação. Isso indica que os sistemas de controle que regulam a iluminação com base nos níveis internos da luz natural seriam eficazes na redução do uso de energia de iluminação. Outra conclusão obtida foi que fatores urbanos (como orientação e ângulo de obstrução) possuem significativo efeito sobre os níveis internos de luz natural e, portanto, são determinantes para a redução na demanda de energia de iluminação.

Susorova *et al.* (2013) avaliaram a influência de fatores geométricos no desempenho de energia de um modelo de sala de um edifício típico de escritórios comerciais, considerando seis zonas climáticas dos Estados Unidos. A partir de simulações energéticas realizadas no programa EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2020), foram analisados fatores como orientação da janela, relação janela-parede e relação largura-profundidade da sala. Os autores recomendaram que os fatores geométricos sejam cuidadosamente abordados tanto nos projetos de edifícios de escritórios novos quanto na reforma de edifícios antigos. Isso porque

a otimização desses parâmetros pode diminuir o consumo de energia da edificação. Ao considerar climas quentes e temperados, os melhores desempenhos energéticos obtidos foram em salas rasas para todas as orientações e tamanhos de janelas, em salas rasas com janelas de tamanho médio e em salas profundas com janelas grandes. As salas orientadas para o sul apresentaram melhor desempenho de energia em todos os climas. Com relação ao consumo de energia em climas quentes e temperados, os menores valores foram encontrados em salas orientadas a norte com janelas grandes e em salas com janelas pequenas orientadas a sul.

De acordo com Ghisi e Tinker (2005), o consumo de energia varia muito de país para país não somente por conta das condições climáticas, mas também devido aos hábitos culturais.

Fernandes *et al.* (2018) avaliaram os desempenhos luminoso, energético e térmico de um edifício comercial em Campinas/SP considerando um sistema de iluminação com *dimmers* e persianas automatizadas. Com o auxílio dos programas de simulação Daysim (DAYSIM, 2020) e EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2020), foram considerados dois modelos de referência, um orientado no sentido norte-sul e outro no sentido leste-oeste, sendo ambos sem *dimmers* ou persianas e acesos durante o período de ocupação. A análise do desempenho luminoso foi realizada por meio do índice UDI (*useful daylight index* ou índice de iluminância natural útil), que se baseia nos níveis de iluminância disponíveis no ambiente durante o período de um ano. O modelo com *dimmer* e persiana apresentou redução da possibilidade de ofuscamento de até 75% quando comparado ao modelo apenas com *dimmer*. Ao avaliar o uso final de energia considerando a categoria de iluminação artificial, o uso de *dimmers* resultou economia de até 11% no consumo quando comparado ao modelo de referência. Do mesmo modo, o uso de *dimmers* associado a persianas automatizadas proporcionou redução de até 7% no consumo de energia com iluminação artificial. Por fim, os autores comprovaram que a estratégia do uso de *dimmers* e persianas acarretam não somente o aumento da qualidade visual pela redução da possibilidade de ofuscamento, como também melhoria nos desempenhos térmico e energético dos sistemas de iluminação.

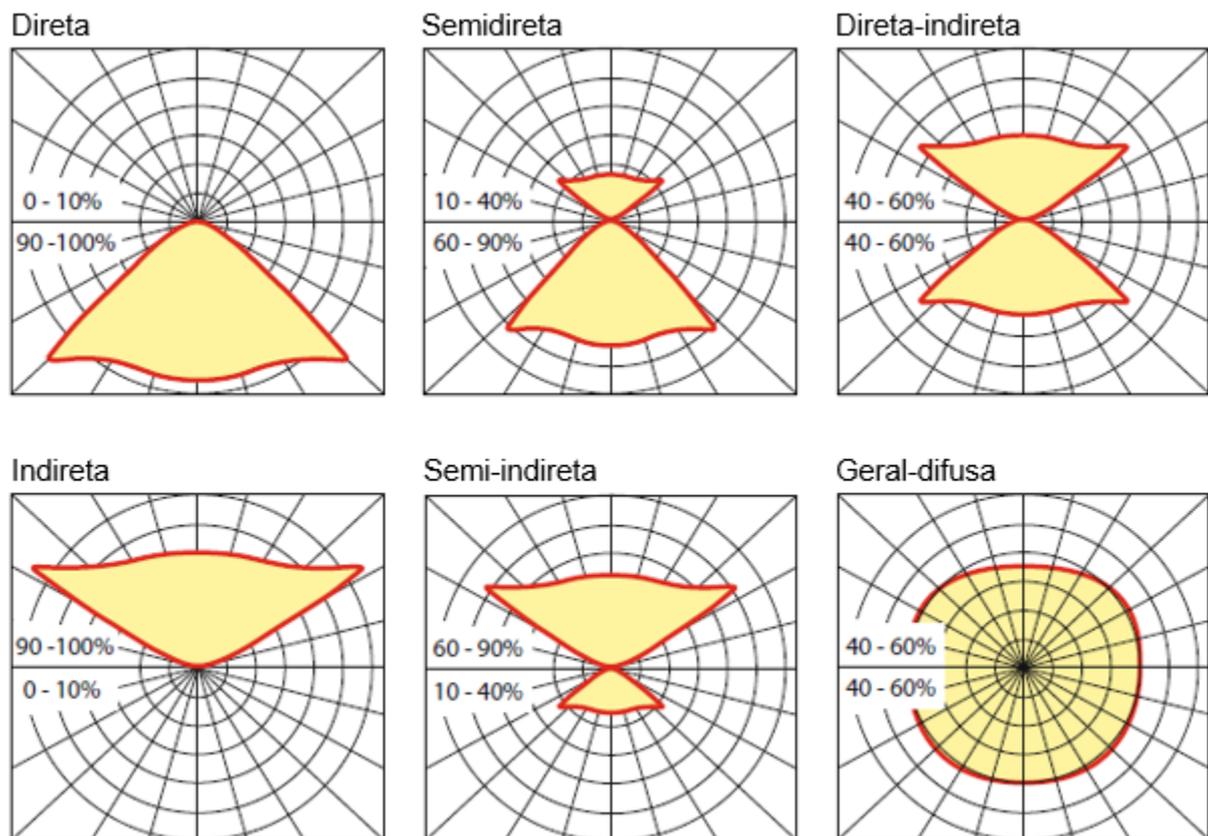
Rupp e Ghisi (2013) avaliaram o potencial de economia de eletricidade utilizando luz natural e uso de ventilação híbrida em edifícios comerciais localizados em Florianópolis/SC. A partir dos programas de simulação EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2020) e Daysim (DAYSIM, 2020), foram considerados diferentes modelos de ambientes variando proporções (largura:profundidade), áreas de janela e orientação da fachada envidraçada. Os autores concluíram que ambientes com ventilação híbrida e com iluminação natural integrada ao sistema de iluminação artificial podem gerar redução do consumo de energia elétrica em até 64,9%, além de melhorar o desempenho energético desse tipo de edificação.

2.1 ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

A iluminação artificial permite que os usuários desempenhem tarefas visuais de maneira precisa, segura e confortável oferecendo níveis luminosos em qualidade e quantidade adequados. As fontes de iluminação artificial são as lâmpadas, que têm eficiências e características diferentes conforme o princípio de geração de luz (KALYANI; SWART; DHOBLE, 2017).

A luminária é o dispositivo que permite o controle da distribuição da luz emitida pelas lâmpadas, além de servir como proteção e conexão das lâmpadas ao circuito de alimentação elétrica. As luminárias podem ser classificadas conforme a distribuição da luz (Figura 6).

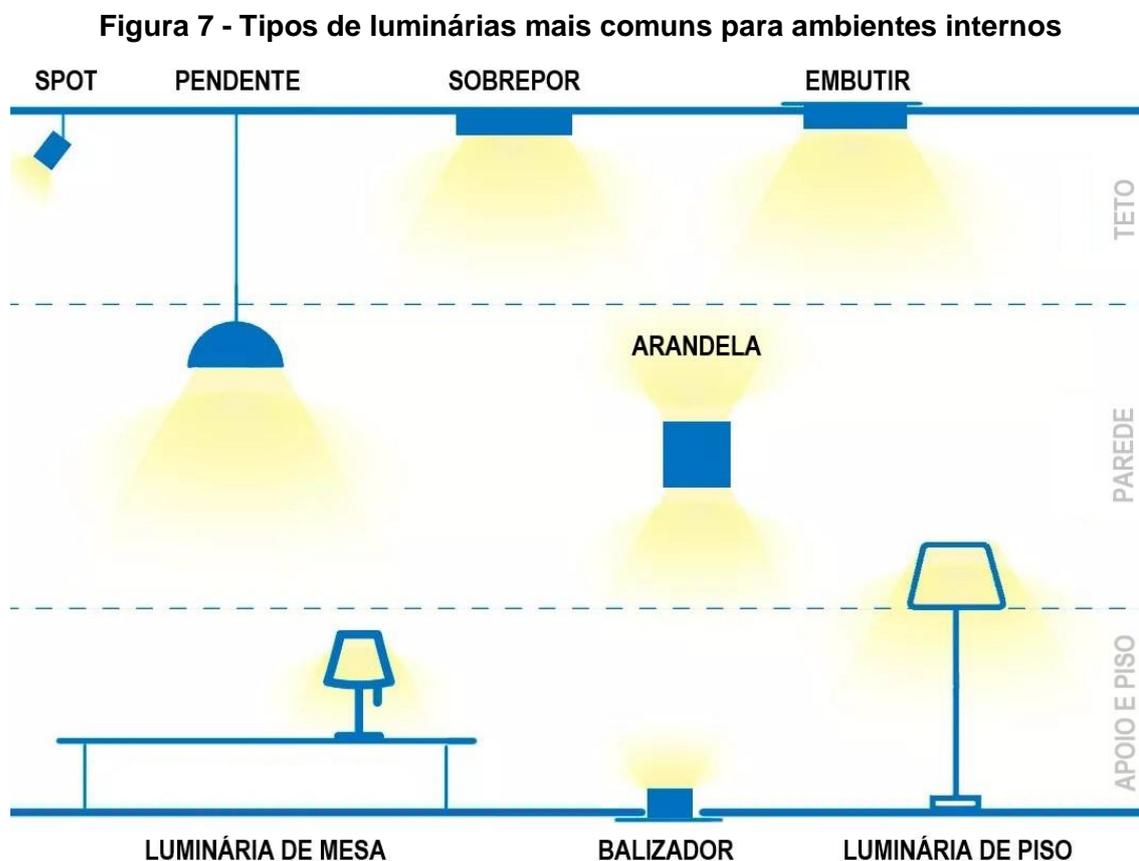
Figura 6 - Classificação de luminárias para iluminação interna de acordo com a distribuição luminosa para baixo e para cima



Fonte: adaptado de van Bommel (2019).

A opção do tipo de luminária depende de fatores como aplicação final (como escritórios, quartos, supermercados, leitura), direção desejada (luz difusa ou foco de luz) e

estética (luminárias decorativas por exemplo). A Figura 7 apresenta os tipos de luminárias mais comuns utilizados em ambientes internos.



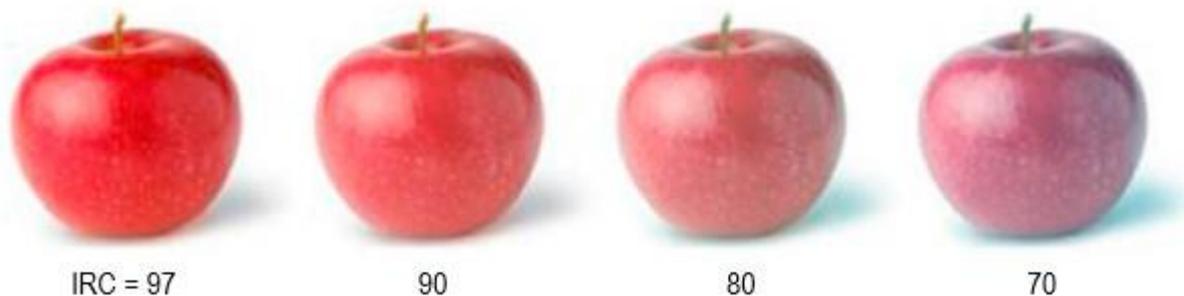
A escolha do tipo de luminária e lâmpada é tarefa primordial e deve ser analisada de acordo o uso final pretendido para garantir segurança e conforto visual dos usuários.

A quantidade e a qualidade da luz emitida dependem de aspectos como cor e temperatura da fonte de luz, vida útil e rendimento luminoso.

O índice de reprodução de cor (IRC) é um parâmetro utilizado para indicar a capacidade de uma lâmpada reproduzir com precisão as cores em um ambiente iluminado. O IRC de uma fonte de luz é medido em uma escala que varia de 0 a 100, sendo que quanto mais próximo de 100, maior é a capacidade de reproduzir a verdadeira cor dos objetos iluminados (Figura 8).

¹ Disponível em: <<https://www.solutudo.com.br/sp/atibaia/noticias/toda-luz-materiais-eletricos-e-iluminacao/93346/detalhes/tipos-de-luminarias/9377>>. Acesso em: 05 fev. 2020.

Figura 8 - Exemplo do efeito visual realista para diferentes valores de IRC a 2700 K



Fonte: adaptado de Kalyani, Swart e Dhoble (2017).

A temperatura de cor representa a aparência da cor das lâmpadas (Figura 9) e é classificada em quente (abaixo de 3.300 K), intermediária (3.300 K a 5.300 K) e fria (acima de 5.300 K).

Figura 9 - Comparação de temperaturas de cor em Kelvin



Fonte: adaptado de Hyperikon².

² Disponível em: <<https://www.hyperikon.com/pages/blog/what-led-color-kelvin-temperature-should-i-choose/>>. Acesso em: 05 fev. 2020.

A vida útil da lâmpada é o tempo decorrido até que o fluxo luminoso seja depreciado em 30% (RICHTER; TÄHKÄMÖ; DALHAMMAR, 2019). É usualmente expressa em horas (h) e pode ser afetada conforme a temperatura e a umidade do ambiente (CHITNIS *et al.*, 2016).

Já o rendimento luminoso (lm/W) é definido pela razão entre o fluxo luminoso emitido pela lâmpada e sua potência, ou seja, mede a eficácia de uma lâmpada converter energia em luz visível (CHOUDHURY, 2014).

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as fontes de iluminação artificial mais comuns, desde as de aquecimento de filamentos (lâmpadas incandescentes e halógenas) até as lâmpadas de descarga (lâmpadas de vapores de sódio e de mercúrio e lâmpadas fluorescentes) e diodos emissores de luz (LED e OLED).

Tabela 1 - Comparação de diferentes parâmetros de lâmpadas

	Rendimento luminoso (lm/W)	IRC	Temperatura (K)	Vida útil (h)
Incandescente	12 - 18	100	2.700 - 5.000	750 - 1.200
Halógena	40 - 100	99	2.800 - 3.400	1.700 - 2.500
Vapor de sódio	100 - 190	24	2.100	18.000
Vapor de mercúrio	35 - 65	20 - 60	6.800	24.000
Fluorescente linear	80 - 100	74 - 90	3.600	7.000 - 10.000
Fluorescente compacta	70	89	4.080	8.000
LED	28 - 150	70	2.540 - 10.000	35.000 - 50.000
OLED	64	92	5.410	10.000

Fonte: adaptado de Chitnis *et al.* (2016).

Cada tipo de lâmpada possui suas vantagens e desvantagens. As lâmpadas halógenas, por exemplo, têm alto índice de reprodução de cor (IRC) e são indicadas para destacar objetos, como em decorações. Apesar de serem mais eficientes que as incandescentes, as lâmpadas halógenas também emitem muito calor e são caras. Já as lâmpadas de vapor de mercúrio, por exemplo, são recomendadas para iluminar grandes áreas, como parques e fábricas, devido sua vida útil longa e seu baixo custo de investimento. Entretanto, contém resíduos perigosos de mercúrio e baixo rendimento luminoso (CHITNIS *et al.*, 2016).

Para Aman *et al.* (2013), algumas medidas poderiam ser adotadas mundialmente a fim de assegurar que apenas as lâmpadas de alta qualidade sejam produzidas e estejam disponíveis para os usuários. Dessa forma, o uso de tais lâmpadas aumentará o desempenho energético do sistema de iluminação e reduzirá o consumo de energia elétrica.

Tais medidas sugeridas são: adotar padrões rigorosos para não permitir que lâmpadas de baixa qualidade adentrem no mercado; realizar campanhas na mídia para orientar o consumidor em geral a respeito das lâmpadas e suas terminologias básicas (pois, geralmente, as lâmpadas são comparadas com base na potência, o que pode ser enganoso); inserir informações sobre fluxo luminoso, eficácia e vida útil da lâmpada na parte frontal das embalagens, assim como indicações do conteúdo de mercúrio com o intuito de minimizar seu efeito no ambiente (AMAN *et al.*, 2013).

Nos Estados Unidos, a etiqueta “*Lighting Facts*”, em vigor desde 2012, tem como objetivo auxiliar os consumidores a adquirir a lâmpada energeticamente mais eficiente. Para isso, são fornecidos dados de brilho, custo de energia, vida, aparência de luz e potência de cada lâmpada. Além disso, para lâmpadas que contêm mercúrio, um informe também é impresso na etiqueta da embalagem (e-CFR, 2019).

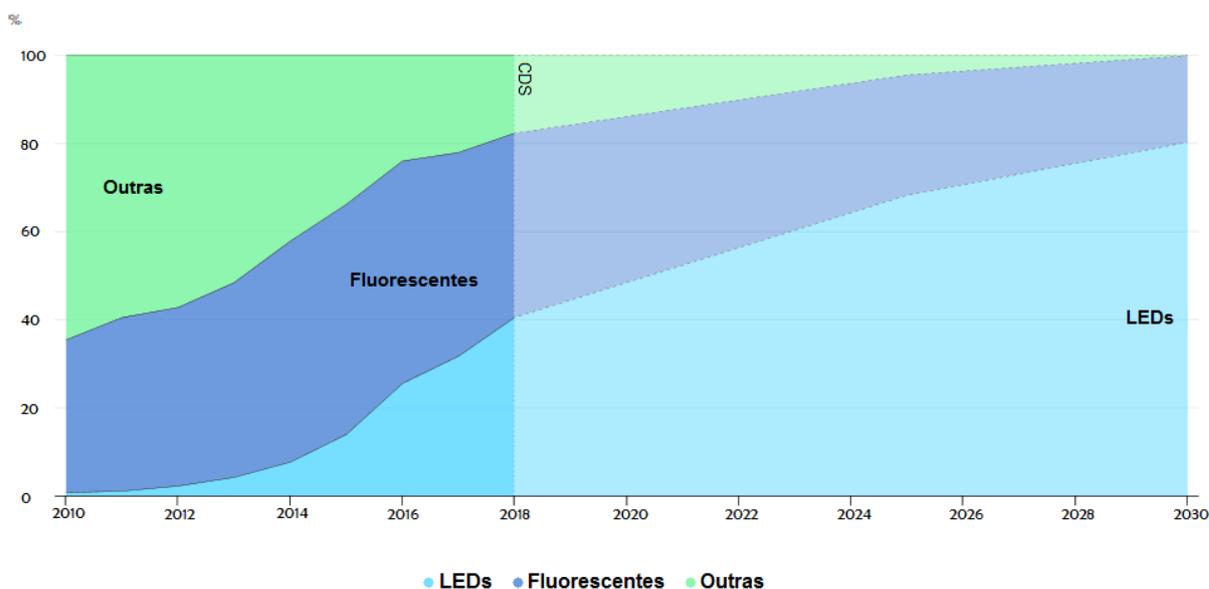
No Brasil, a Portaria Interministerial 1.007/2010 aprovou a Regulamentação Específica de Lâmpadas Incandescentes que define os níveis mínimos de eficiência energética desse tipo de lâmpada. Aquelas que não atendiam às disposições da referida regulamentação, tiveram sua fabricação e importação para fins de comercialização no país proibidos a partir de 2012 de acordo com sua potência (BRASIL, 2010).

Outras condutas de boas práticas que podem ser adotadas nos projetos de sistemas de iluminação artificial são: projetar os circuitos de energia das luminárias de acordo com suas posições em relação às aberturas nas fachadas e conforme a distribuição das atividades nos espaços, e; posicionar os interruptores dentro do espaço a ser iluminado e permitir acesso facilitado ao controle dos circuitos de alimentação elétrica quando este for do tipo manual (ALMEIDA; MARTINS, 2014).

Na busca pela economia de eletricidade e por maior eficiência nas iluminações interna e externa, a lâmpada LED (*Light Emitting Diode* ou Diodo Emissor de Luz) tem se destacado frente aos demais tipos de lâmpadas. Entre suas vantagens pode-se citar: menor impacto ambiental, maior eficiência luminosa (lm/W), maior durabilidade, maior resistência mecânica, possibilidade de dimerização e baixa emissão de calor. Em contrapartida, ainda possui alto custo de aquisição quando comparada a outros tipos de lâmpada e algumas são comercializadas com baixa qualidade (KUMAR *et al.*, 2019; NARDELLI *et al.*, 2017).

Ao nível mundial, as vendas de lâmpadas LED se equipararam às fluorescentes em 2018 (Figura 10) e, à medida que os custos declinam, a implantação de LEDs progride não somente na iluminação residencial, como também na comercial e em aplicações externas (IEA, 2019b).

Figura 10 - Vendas de lâmpadas por tipo no Cenário de Desenvolvimento Sustentável (CDS) ao nível mundial, 2010-2030



Fonte: adaptado de IEA (2019b).

2.2 APROVEITAMENTO DA LUZ NATURAL

Os impactos da utilização da luz natural podem ser observados por meio de vários benefícios tanto energéticos como na saúde e no bem-estar do usuário. A partir da adequada integração da luz natural com a luz artificial, é possível obter redução no consumo de eletricidade. Conseqüentemente, ao melhorar o desempenho energético, as emissões de gás carbono e os custos operacionais do edifício também são reduzidos (LI; COLOMBIER, 2009). As aberturas que permitem a entrada da luz solar, também proporcionam vista para o exterior sinalizando período do dia, orientação espacial e condições climáticas, por exemplo, o que pode aumentar o interesse e a estimulação do usuário (KONIS, 2019). Além disso, a visão humana responde melhor sob condições de luz natural do que sob iluminação artificial devido à qualidade e ao índice de reprodução de cores da luz natural superiores, permitindo melhor desempenho visual (ARIES; AARTS; VAN HOOFF, 2013).

A integração da luz natural com os componentes de um edifício tem sido uma das estratégias de projetistas e tomadores de decisão para conservação de energia. Fasi e Budaiwi (2015) investigaram o impacto de três diferentes tipos de janelas envidraçadas na energia e no conforto visual em um modelo de edifício de escritórios, além de examinar, associadamente, a integração das luzes natural e artificial por meio de sensores. Considerando condições climáticas quentes, as simulações realizadas por meio do programa DesignBuilder (DESIGNBUILDER, 2020) permitiram avaliar a iluminação anual, o resfriamento e o consumo total de energia para os seguintes tipos de vidraça: com vidros duplos transparentes, com vidros duplos coloridos (na cor bronze) e com vidros duplos *low-e* (baixa emissividade).

Por meio dos resultados obtidos, Fasi e Budaiwi (2015) revelaram que, ao utilizar janelas com vidros duplos transparentes com integração da luz natural, a iluminação anual, o resfriamento e o consumo total de energia seriam reduzidos em 70%, 8% e 14% respectivamente, em comparação com o mesmo edifício modelado com vidros duplos transparentes sem integração com a luz natural. Da mesma forma, ao empregar janelas com vidros duplos coloridos e com vidros duplos de baixa emissividade, o consumo anual de energia diminuiu 15% e 16%, respectivamente, ao ser comparado com os consumos de modelos que não utilizaram a luz natural.

Pesquisadores também têm estudado a otimização da iluminação natural por meio de sistemas não convencionais (como heliostatos, dutos de luz e prateleiras de luz) que visam suprir a iluminação oriunda de sistemas convencionais (janelas e aberturas zenitais) que muitas vezes são insuficientes (BÜLOW-HÜBE, 2001; KAZANASMAZ, 2013; OUAHRANI; AL TOUMA, 2017).

As prateleiras de luz, por exemplo, são capazes de redirecionar a luz natural para dentro do ambiente e reduzir o aquecimento das regiões próximas às aberturas e o ofuscamento direto da luz solar. Estudos realizados comprovaram que, quando bem dimensionados, esses dispositivos melhoram o índice de iluminância do ambiente e reduzem o consumo de energia elétrica utilizada no sistema de iluminação artificial e de condicionamento de ar (ALVES NETTO; BARRETO; AKUTSU, 2015; GAGO *et al.*, 2015; LEE; JANG; SEO, 2018).

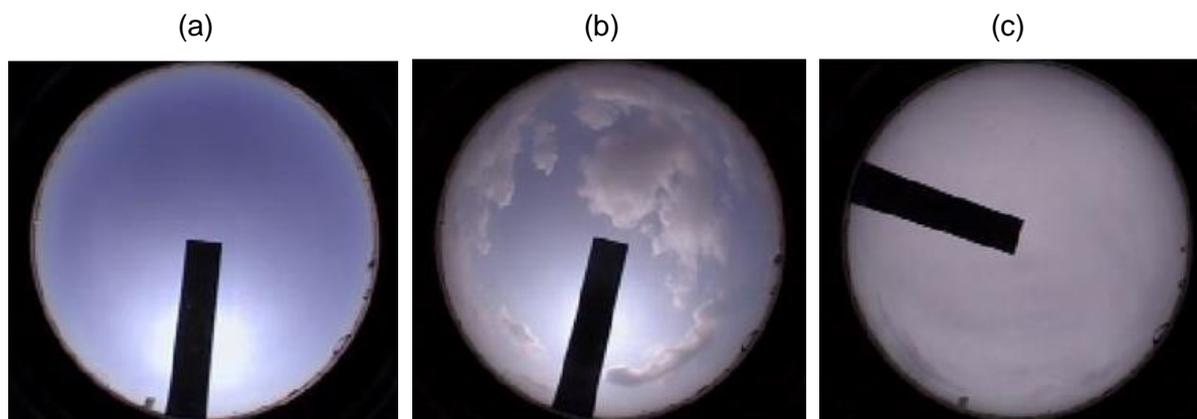
A avaliação do desempenho da luz natural em um ambiente interno indica a disponibilidade da luz natural que pode ser aproveitada no sistema de iluminação. Alguns fatores que podem influenciar o desempenho da luz natural em ambientes internos são: localização geográfica, obstruções, geometria da construção, propriedades das aberturas e refletividades das superfícies internas. O procedimento para examinar o desempenho da luz

natural consiste em duas partes: a primeira é avaliar a disponibilidade da luz natural no ambiente; a segunda é estimar com precisão a potencial economia de energia elétrica ao considerar o uso da luz natural (YU; SU, 2015).

A análise da disponibilidade da luz natural é realizada principalmente por meio de simulações computacionais e/ou medições de campo usando métricas de disponibilidade da luz natural, como fator de luz natural, coeficiente de luz natural e autonomia da luz natural (YU; SU, 2015). Um dos aspectos mais importantes é a distribuição de luminância do céu, que varia de acordo com fatores como posição do sol, clima, turbidez e cobertura das nuvens (LOU; LI; LAM, 2017).

Visto a complexidade de determinar o tipo de céu em cada local e tempo, a Comissão Internacional de Iluminação ou CIE - *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE, 2003), como é conhecida, padronizou 15 (quinze) tipos de céu, sendo os três principais: céu claro, céu parcialmente encoberto e céu encoberto. Enquanto o céu claro possui uma fonte de luz (sol) pontual e brilhante, o céu encoberto apresenta homogeneidade de luminância e representa a pior condição de luz natural (LI, 2010). A Figura 11 apresenta um exemplo desses modelos de céu que foram identificados usando a descrição da CIE. A faixa preta em cada imagem foi usada para bloquear a luz direta do sol.

Figura 11 - Exemplo de céus (a) limpo, (b) parcialmente encoberto e (c) encoberto



Fonte: Janjai e Plaon (2011).

Já o potencial de economia de eletricidade ao integrar a luz natural no sistema de iluminação pode ser estimado por medições em campo, simulações computacionais e cálculos manuais baseados em equações e algoritmos matemáticos (YU; SU, 2015). O Quadro 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos métodos de estimativa citados.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens de métodos de estimativa

Algoritmo	Vantagem	Desvantagem
Simulação computacional	<ul style="list-style-type: none"> • É um método rápido e econômico, especialmente útil na fase de projeto do edifício. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pode haver falta de precisão, especialmente quando é feita muita suposição. • Processo de validação é necessário.
Medição de campo	<ul style="list-style-type: none"> • É um método com precisão relativamente alta. 	<ul style="list-style-type: none"> • É necessária uma medição de longo período para obter o potencial de economia; • O custo também é relativamente alto. • Na maioria das vezes, os parâmetros de projeto são inflexíveis.
Fórmula empírica	<ul style="list-style-type: none"> • É um método rápido e econômico eficaz. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os dados empíricos podem não ser aplicáveis a todas as ocasiões. • Um método de estimativa relativamente grosseira, especialmente usando normas.
Algoritmo 1: Cálculo usando a distribuição de frequência cumulativa da iluminação da luz natural	<ul style="list-style-type: none"> • Os dados de iluminação natural são baseados na medição de campo. • Uma tentativa efetiva de converter os dados anuais de iluminação no valor cumulativo de distribuição de frequência. 	<ul style="list-style-type: none"> • Usa a iluminação média interna da luz natural. • Não considera a influência das posições do fotossensor e da iluminação artificial no potencial de economia de energia da iluminação
Algoritmo 2: Cálculo usando integração matemática	<ul style="list-style-type: none"> • A integração matemática é uma boa tentativa de estimar grosseiramente a economia de energia da iluminação artificial. • A influência do excesso de carga de resfriamento devido à luz excessiva também é considerada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Assim como o algoritmo 1, não considera a influência das posições do fotossensor e da iluminação artificial. • É limitado a um momento específico, não adequado para estimativas de longo período.
Algoritmo 3: Algoritmo de cálculo da emissão de luz artificial considerando a contribuição de outras luminárias	<ul style="list-style-type: none"> • Leva em conta o arranjo da iluminação artificial e do fotossensor e, em especial, a contribuição da iluminação de outras luminárias. 	<ul style="list-style-type: none"> • O processo iterativo é um pouco complicado, especialmente quando há grande número de luminárias.
Algoritmo 4: Cálculo baseado na propriedade do sistema de escurecimento sensível à luz natural	<ul style="list-style-type: none"> • O algoritmo de controle do sistema de controle de iluminação foi levado em consideração, o que poderia calcular com precisão a relação entre a taxa de saída de iluminação e a disponibilidade da luz natural. 	<ul style="list-style-type: none"> • As informações para o algoritmo de controle são necessárias.

Fonte: adaptado de Yu e Su (2015).

Wong (2017) também apresentou os pontos fortes e fracos de alguns métodos comumente usados para investigar o desempenho da luz natural, como modelos de construção em escala com simuladores, modelagem matemática ou analítica, modelos em escala real ou modelos para medição em campo e simulação computacional (Quadro 2). Para o autor, os modelos em escala real são os mais eficazes para avaliar o desempenho da luz natural, mas também os mais caros. Já os estudos baseados em simulações computacionais podem oferecer soluções econômicas e previsões precisas, apesar de precisarem ser validados por resultados experimentais ou medidos.

Quadro 2 - Pontos fortes e fracos de alguns métodos de previsão da luz natural
(continua)

Métodos	Pontos fortes	Pontos fracos
Modelos em escala	<ul style="list-style-type: none"> • Visualiza o desempenho da luz natural; • Auxilia o processo de tomada de decisão quanto à opção do projeto apropriado; • Construído em escalas desejadas; • Os estudos podem ser realizados usando o céu artificial para representar uma hora, data e latitude específicas; • Construído em todas as etapas do projeto; • Mais fácil e mais barato que o edifício real; • Os modelos podem ser criados e manipulados facilmente; • Aplica sensores/câmera dentro do modelo; • Configurações de fachada e alterações geométricas podem ser feitas facilmente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Normas e considerações na construção de modelos; • Iluminação superestimada; • Problemas com simuladores do céu.

Quadro 2 (conclusão)

Modelos matemáticos	<ul style="list-style-type: none"> • Mais fácil e rápido de calcular, mesmo sem detalhes específicos do projeto (por exemplo, fator de luz natural médio). 	<ul style="list-style-type: none"> • A precisão precisa ser validada e testada em comparação com os experimentos.
Modelos em escala real/maquetes	<ul style="list-style-type: none"> • Visualiza o desempenho da luz natural em condições reais do céu; • Representação real do projeto atual; • Construção e sistemas reais sob condições reais do céu; • Capacidade de usar materiais reais e precisos no interior dos edifícios; • Adequado para sistema de guia de luz complexo que não pode ser replicado em escala. 	<ul style="list-style-type: none"> • Grande e caro; • Difícil, demorado e dispendioso para implementar tecnologias; • Configurações de fachada não facilmente substituíveis; • A maioria das avaliações se limita às condições reais do céu; • Os modelos devem ser à prova de intempéries e orientados corretamente se localizados ao ar livre;
Simulações computacionais	<ul style="list-style-type: none"> • Custo-benefício; • Interface amigável; • Renderização tridimensional; • Análise mais fácil com parâmetros variáveis e modelos complexos; • Capacidade de realizar simulação anual; • Fornece “visualização” do efeito da luz natural; • Visualização dinâmica, como animações do sol e lapso de tempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de renderização de <i>software</i>; • A precisão precisa ser validada e testada em comparação com experimentos; • Erros de cálculo; • Certos programas exigem usuários habilidosos e bem treinados; • A qualidade da entrada afeta a precisão; • A saída precisa de cuidadosa interpretação especializada.

Fonte: adaptado de Wong (2017).

Outro método para reduzir a potência elétrica na iluminação artificial é utilizar a luz natural que adentra no ambiente aliada a estratégias de controle de iluminação. Conforme o

nível de luz natural disponível no local, os sistemas de controle alternam ou diminuem o fluxo luminoso das luminárias para manter os níveis de iluminância mínimos necessários para a execução da tarefa na sala. Já com relação ao tempo de uso, esse pode ser diminuído instalando sensores de ocupação que detectam a presença dos ocupantes e desligam as lâmpadas quando a área é desocupada (HAQ *et al.*, 2014).

2.3 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

Controles de iluminação desempenham um papel significativo tanto na diminuição do consumo de energia elétrica quanto na melhoria das condições de conforto visual: primeiro, por contribuir com a redução do tempo de funcionamento dos sistemas de iluminação, e; segundo, por permitir definir cenários de iluminação adequados às funções do espaço, tarefas e preferências dos usuários (BELLIA; FRAGLIASSO; STEFANIZZI, 2016; GENTILE; LAIKE; DUBOIS, 2016).

Os sistemas de controle de iluminação podem ser classificados em três categorias: temporizadores, controles baseados em ocupação e controles relacionados à luz natural. Os temporizadores controlam as luzes artificiais de acordo com uma programação pré-fixada. Os controles baseados em ocupação alternam iluminação artificial a partir da presença/ausência detectada dos usuários pelos sensores de ocupação. Já os controles vinculados à luz natural regulam os níveis de iluminação por meio de fotossensores e algoritmos (BELLIA; FRAGLIASSO; STEFANIZZI, 2016).

Para Haq *et al.* (2014), é importante realizar um levantamento prévio dos padrões de ocupação e das tarefas que são executadas no ambiente para selecionar o controle de iluminação mais adequado e, assim, obter desempenho satisfatório tanto em termos de economia de energia quanto para o conforto dos usuários. Os detectores de ocupação, por exemplo, são mais vantajosos para espaços em que a ocupação é menos frequente e/ou irregular. Para locais que são ocupados constantemente sem interrupções significativas durante o período de atividade, Haq *et al.* (2014) sugerem uso de interruptor horário, que permite ligar e desligar a iluminação de acordo com horários pré-estabelecidos.

Rocha e Pereira (2011) e Soares, Lemos e Souza (2014) apresentaram em seus estudos duas categorias de sistemas de controle de iluminação artificial: estado liga/desliga (*on/off*) do aparelho e sistema de dimerização, sendo que esses modelos podem simular o comportamento de um acionamento manual ou automático.

A escolha do tipo de sistema a ser instalado depende basicamente da forma de ocupação e do uso do ambiente. O Quadro 3 apresenta algumas combinações de diferentes sistemas de controle de iluminação artificial.

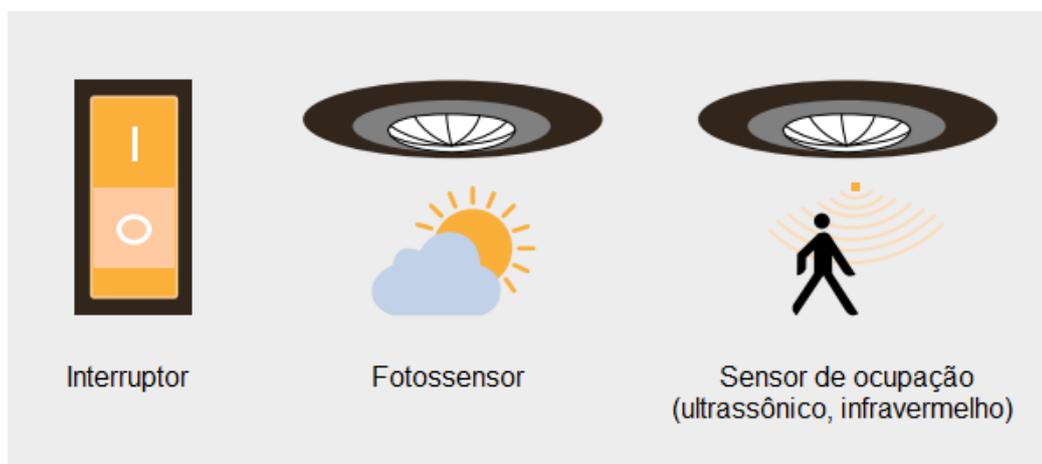
Quadro 3 - Modelos de acionamento da iluminação artificial

Modelo	Características
Manual <i>on/off</i> próximo a porta	Acionamento típico de interruptor manual (<i>on/off</i>) próximo a porta. O usuário aciona o sistema uma vez ao dia, quando o nível de iluminância no ambiente é insuficiente, e permanece com o sistema acionado durante o restante do período de ocupação, desligando-o ao deixar o ambiente.
Sensor de ocupação <i>off</i>	Considera o acionamento do sistema pelo usuário como no modelo manual acima, mas com desligamento automatizado por sensor de presença.
Sensor de ocupação <i>on/off</i>	Modelo automatizado que vincula o acionamento e o desligamento do sistema de iluminação à ocupação do ambiente, por meio de um sensor de presença.
Sistema dimerizado controlado por fotossensor	Modelo cujo acionamento se dá como no modelo manual, porém é dimerizável, ou seja, complementa o nível de iluminância fornecido pela luz natural.
Combinação de sensor de ocupação <i>off</i> e sistema dimerizador	Considera o acionamento inicial manual pelo usuário ao ocupar o ambiente, porém com uma ativação dimerizável do sistema por fotossensor e o desligamento automatizado por sensor de presença.
Combinação de sensor de ocupação <i>on/off</i> e sistema dimerizador	Modelo automatizado que vincula o acionamento e desligamento do sistema de iluminação artificial à ocupação do ambiente, porém com ativação dimerizável do sistema por fotossensor.

Fonte: adaptado de Rocha e Pereira (2011) e Soares, Lemos e Souza (2014).

No estudo de Soares, Lemos e Souza (2014), foi considerado um modelo de cada acionamento, automático (sensor-automatizado) e manual (sensor-usuário), sendo eles: sistema de dimerização acionado por fotossensor e sensor de ocupação *off* e a combinação de sensor de ocupação *on/off* respectivamente (Figura 12). Além disso, para cada modelo foi considerada a existência ou não de algumas configurações de dispositivos de proteção solar, como venezianas. Como conclusão, os autores recomendaram a utilização do sensor-automatizado por representar um usuário idealizado, que aciona a iluminação artificial somente quando há necessidade de complementação dos níveis de iluminação natural e também por permitir melhor visualização da influência dos dispositivos de proteção solar na iluminação natural do ambiente.

Figura 12 - Exemplos de controle de iluminação



Fonte: adaptado de Wisions³.

Gentile, Laike e Dubois (2016) investigaram o desempenho de sistemas de controle de iluminação em salas de escritório individuais, voltadas para o oeste e localizadas na periferia de um edifício do campus da Universidade de Lund (LTH), Suécia. Foram analisados o uso de eletricidade e a satisfação dos ocupantes para quatro sistemas diferentes: detecção de presença, detecção de ausência, aproveitamento da luz natural com detecção de ausência e uma luminária de mesa regulável manualmente. Os resultados apontaram que os sistemas de detecção de ausência e o de aproveitamento da luz natural combinado com algum tipo de controle manual (neste caso, sensor de ausência) tiveram os melhores desempenhos em termos de energia e de satisfação dos ocupantes. As luminárias de mesa atingiram o menor consumo de eletricidade e foi considerada tolerável para a execução das tarefas em papel, mas não necessariamente agradável, visto que as atividades realizadas longe da mesa exigiam o uso adicional da luz artificial. Por fim, o detector de presença alcançou os piores resultados tanto na avaliação os usuários quanto no desempenho energético no caso específico de escritórios individuais. Para os autores, esse último tipo de sistema de controle pode apresentar melhor funcionamento em espaços com mais ocupantes e padrões de ocupação irregulares, como átrios, *halls* de entrada ou corredores parcialmente iluminados pelo dia. Além disso, constatou-se que os usuários preferem ter controle sobre a iluminação, sendo recomendado, portanto, sempre fornecer algum tipo de controle manual.

Bellia, Fragliasso e Stefanizzi (2016) apresentaram uma revisão da literatura a respeito dos controles relacionados à luz natural, abordando tópicos desde sobre os processos de projeto, instalação e calibração, até as opiniões dos usuários. Apesar dos benefícios que os controles vinculados à luz natural podem propiciar em termos de economia de energia elétrica

³ Disponível em: <https://www.wisions.net/files/uploads/Lighting_WISIONS_2013.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2020.

e melhoria do conforto dos usuários, os resultados da pesquisa permitiram aos autores concluir que os principais empecilhos que limitam a disseminação desse tipo de controle podem ser associados a três pontos. Primeiro, por causa das dificuldades relacionadas ao seu projeto e instalação, visto que a luz natural é uma fonte de energia variável e o sistema necessita avaliar de forma precisa a disponibilidade da luz natural interna e ter sua calibração realizada corretamente. Segundo, devido aos limites nos programas de modelagem usados para avaliar o desempenho dos sistemas em termos de conforto, economia de energia, cálculo dos custos de instalação e definição dos períodos de retorno. E, terceiro, em virtude do grau de aceitação dos usuários, que geralmente preferem controlar pessoalmente os sistemas de iluminação.

Lashina *et al.* (2019) também estudaram o comportamento de usuários em escritórios abertos após a instalação de controles de iluminação pessoais, a fim de observar se ocorreria conflito entre os indivíduos e em que grau. Os autores concluíram que, em espaços multiusuários, as pessoas são conscientes da presença de outros ocupantes, porém, ao invés de discutirem sobre suas preferências e entrarem em um consenso, os indivíduos utilizavam estratégias para evitar possíveis conflitos, como alterar a iluminação na ausência dos vizinhos ou mover o controle deslizante lentamente para que a mudança não fosse percebida pelos companheiros.

Para Delzendeh *et al.* (2017), o comportamento humano é um fenômeno complexo e varia de pessoa para pessoa devido a parâmetros pessoais (fisiológicos, psicológicos) e sociais, que afetam diretamente o uso de energia do ocupante. Além disso, parâmetros climáticos, econômicos, arquitetura e tipos de espaço e de construção influenciam diretamente o comportamento energético dos usuários.

Haq *et al.* (2014) comentam que vários fatores são determinantes na escolha do sistema de controle mais adequado, como custo de instalação, disponibilidade da luz natural no ambiente e comportamento dos ocupantes em termos de tipo de tarefa e de frequência de entrada e saída. Além disso, em comparação com os controles de comutação, a dimerização não ocasiona efeito negativo na vida útil da lâmpada. Os autores ainda apresentaram algumas vantagens e desvantagens do uso dos sistemas de comutação e dimerização conforme o Quadro 4.

Quadro 4 - Comparação entre controles de comutação e dimerização vinculados à luz natural

Fatores	Comutação	Dimerização
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Alta economia em áreas adequadas • Custo inicial baixo em comparação com sistemas dimerizáveis • Instalação relativamente fácil 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta economia de luz natural variável • Mudança gradual entre os níveis de luz, menos intrusiva para os ocupantes • Maior precisão no controle
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Menor precisão no controle • Mudança eminente no estado de iluminação causa menos aceitação do usuário 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior custo inicial • Requer ajuste preciso para desempenho ideal

Fonte: adaptado de Haq *et al.* (2014).

Moreno *et al.* (2013) analisaram a economia de energia e de custo obtida ao propor diferentes sistemas de iluminação em espaços de escritórios na Espanha. Os autores compararam o desempenho de quatro sistemas de iluminação e dois controles de iluminação de ocupação usando lâmpadas fluorescentes e variando a distribuição de iluminação no plano de trabalho. Os sistemas de iluminação avaliados correspondem a uma proposta de iluminação geral, uma proposta de iluminação localizada geral e duas propostas de iluminação geral em combinação com a iluminação local. Por meio dos programas de simulação Daysim (DAYSIM, 2020) e DIALux (DIAL GMBH, 2019), foram calculados a contribuição da luz natural e o consumo de energia elétrica dos sistemas de iluminação respectivamente. Os resultados apontaram que um sistema de iluminação localizado geral proporciona maior economia de energia e uniformidade dos níveis de iluminação no plano de trabalho em comparação aos demais sistemas estudados. Além disso, pode-se obter redução de 15% no consumo de energia elétrica ao incorporar um controle de iluminação artificial.

Xu *et al.* (2017) estudaram o desempenho energético de vários sistemas de iluminação e estratégias de controle aplicados em escritórios do tipo *open-plan* (aqueles que utilizam espaços amplos e abertos ao invés de salas pequenas e fechadas) na China. Utilizando sensores de ocupação e controles ligados à luz natural, foram analisadas 8 (oito) estratégias de controle predefinidas em um escritório teste com o auxílio do programa de simulação Daysim (DAYSIM, 2020). Entre as conclusões obtidas, destaca-se: a estratégia de controle da iluminação ligada manualmente e desligada automaticamente foi a que apresentou melhor desempenho energético, sendo que a utilização isolada de sensores de ocupação e de

controles ligados à luz natural pode atingir economia de energia de mais de 30% e 23% respectivamente.

Shishegar e Boubekri (2017) avaliaram os impactos de vários tipos de sistemas de controle da luz natural na iluminação e no consumo total de energia elétrica de um edifício de escritórios virtual considerando climas quentes e áridos de três cidades estadunidenses. Foram simulados sistemas de controle de luz natural dos tipos *switch*, automático *on/off* e *dimming* por meio do programa eQuest (EQUEST, 2020). Os resultados apontaram que a instalação desses controladores de luz natural é capaz de economizar até 85% da energia de iluminação, 15% da energia de refrigeração e 30% do consumo total de energia elétrica de um escritório em climas quentes. A quantidade de economia varia de acordo com os tipos de controladores e a relação entre as dimensões das janelas e paredes. Quanto maior o valor dessa relação, maior a economia de energia de iluminação devido à maior exposição à luz natural e menor a economia de energia de resfriamento pelo mesmo motivo.

Byun e Shin (2018) propuseram um sistema de controle de iluminação que economiza energia elétrica levando em consideração a satisfação dos usuários, utilizando sensores de ocupação e de iluminação em um ambiente de trabalho real. Inicialmente, os autores mediram o consumo de energia nos escritórios, corredores e escadas considerando lâmpadas fluorescentes de 58 W durante 20 dias. Em seguida, removeram essas lâmpadas e instalaram o sistema proposto, que engloba lâmpadas LED de 42 W e os sensores de ocupação e de iluminação, medindo por 20 dias também. Os resultados indicaram que o sistema proposto pode reduzir 43% do consumo de energia, sendo 27,6% referente à substituição do tipo das lâmpadas, 6% referente ao ajuste da iluminância máxima conforme os valores de brilho e 9,4% devido ao controle da luz de acordo com o movimento dos ocupantes.

Embora existam vários sistemas de controle de iluminação diferentes, é difícil quantificar o potencial de economia de eletricidade de cada um, visto que muitos parâmetros podem influenciar nos resultados, como as particularidades do clima, da edificação e do sistema de iluminação natural (BODART; DE HERDE, 2002).

2.4 PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO

Atualmente, para auxiliar a identificação de melhorias na iluminação, existem diversos programas de simulação de iluminação que permitem avaliar as soluções mais apropriadas para alcançar ambientes confortáveis e seguros para seus usuários, além de facilitar a modelagem e a análise de inúmeros dados necessários para o cálculo luminotécnico e

consequente análise energética. A seguir, alguns programas usualmente utilizados para esse fim são descritos brevemente.

2.4.1 DAYSIM

O *Daylight Simulation* (DaySIM), elaborado pelo *National Research Council Canada* (NRCC) e pelo *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, na Alemanha, é uma ferramenta baseada nos algoritmos de simulação do programa Radiance que permite analisar a luz natural sob condições de céu durante o ano todo (REINHART, 2006).

O programa também é capaz de simular o comportamento dos usuários por meio do modelo denominado *Lightswitch* e, desta forma, prever a economia de energia elétrica a partir de controles automatizados de iluminação e dispositivos de sombreamento, como sensores de ocupação e venezianas respectivamente (REINHART, 2006).

2.4.2 ENERGYPLUS

O EnergyPlus é um programa de simulação que possibilita a avaliação do desempenho térmico e energético de um edifício e foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. O programa oferece a modelagem do consumo de energia para aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e, ainda, do uso de água em edificações, ou seja, associa vários sistemas e simula diferentes condições ambientais e operacionais (ENERGYPLUS, 2020).

Por não dispor de interface amigável, foi criado o programa DesignBuilder para integrar ao EnergyPlus e auxiliar na construção do modelo e na análise dos resultados e relatórios. O programa também oferece a opção de importar dados de projetos BIM e CAD e gera imagens e vídeos, sendo utilizado em qualquer fase do projeto (DESIGNBUILDER, 2020).

2.4.3 DIALUX

O DIALux, desenvolvido pela alemã *DIAL GmbH*, é um software gratuito utilizado mundialmente para projeto, cálculo e visualização de sistemas de iluminação artificial e natural tanto para ambientes internos (CHIRADEJAA; NGAOPITAKKUL; JETTANASEN, 2015; SOORI; VISHWAS, 2013) como externos (SAWICKI; WOLSKA, 2019; YOOMAK *et al.*, 2018).

Disponível em 25 línguas e com cerca de 700.000 usuários, o programa possibilita importar dados de um software CAD diferente (como formatos de arquivo DWG e DXF), além de catálogos das principais fabricantes de luminárias (DIAL GMBH, 2019).

A empresa dispõe duas versões do seu produto, o DIALux 4 e o DIALux evo, ambas validadas de acordo com o relatório técnico da CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) - Comissão Internacional de Iluminação (CIE, 2006; DIAL GMBH, 2016a; DIAL GMBH, 2016b).

O DIALux 4 utiliza o método de radiosidade (*radiosity method*), introduzido inicialmente na área da computação gráfica em 1984 na *Cornell University*. Este modelo de cálculo é baseado no princípio de conservação de energia e parte da premissa que a energia (ou luz) que incide em uma superfície é igual à soma de sua própria emissão e da luz refletida por essa superfície (DIAL GMBH, 2016a; COHEN; GREENBERG, 1985).

Após o usuário definir a geometria e suas características, como objetos, texturas e sistemas de iluminação, o programa divide o ambiente em n superfícies (*patches*), visto que poderá haver diferentes valores de iluminância em todo o ambiente (DIAL GMBH, 2016a).

Logo, a radiação de uma determinada superfície discretizada dentro de um ambiente fechado é dada pela Equação 1.

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n B_j F_{ij} \quad (1)$$

Onde:

B_i = radiosidade da superfície i ;

E_i = emissividade da superfície i ;

ρ_i = refletividade da superfície i ;

B_j = radiosidade da superfície j ;

F_{ij} = fator de forma entre a superfície i e a superfície j , isto é, fração da energia que é irradiada de uma superfície e chega à outra superfície.

Aplicando a Equação 1 a um conjunto de superfícies, será obtido um sistema de equações cuja solução representa o brilho de cada superfície individual de um ambiente (DIAL GmbH, 2016a).

Acosta *et al.* (2015) analisaram a precisão de alguns programas de simulação de iluminação usualmente utilizados e, entre eles, o DIALux 4.8. Sob condições de céu encoberto, seguiram o método estabelecido pela Comissão Internacional de Iluminação e obtiveram margem de erro média em relação ao cálculo analítico inferior a 10% em modelos

com geometria complexa e inferior a 3% em salas com grandes aberturas, concluindo que o programa possui precisão aceitável.

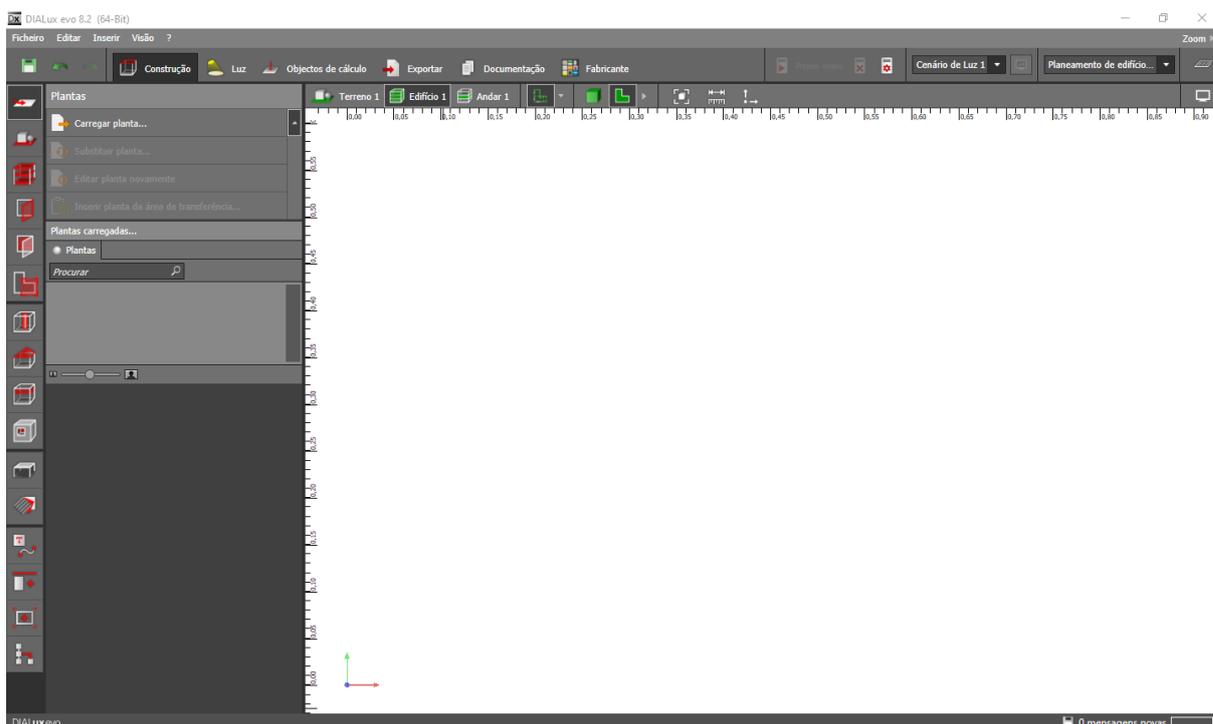
De acordo com a DIAL GmbH (2016b), apesar de a radiossidade possuir a vantagem do cálculo ocorrer independentemente do ponto de vista do observador, esse método apresenta dois pontos fracos: o cálculo de cenas grandes e geometrias complexas pode durar muito tempo e apenas são levados em consideração materiais que refletem difusamente.

Por isso, em 2012, foi lançada a nova geração do DIALux, denominada DIALux evo. Essa versão utiliza o algoritmo de mapeamento de fóton (*photon mapping algorithm*) nos seus cálculos (DIAL GMBH, 2016b), desenvolvida por Henrik Wann Jensen entre 1993 e 1994. De acordo com o próprio autor, o mapeamento de fótons refere-se a “um algoritmo que gera, armazena e usa a iluminação como pontos, e o mapa de fótons é a estrutura de dados usada para processar esses pontos.” (JENSEN, 2001, p. 54, tradução nossa).

Isto é, o algoritmo de mapeamento de fóton é um método de dois passos. No primeiro, mapas de fótons são criados emitindo um grande número de pacotes de energia (fótons) das fontes de luz e armazenando-os ao atingirem as superfícies não especulares da cena. O segundo passo, a etapa da renderização, utiliza a estrutura de dados do mapa de fótons para extrair informações sobre o fluxo de entrada e o brilho refletido em qualquer ponto da cena (JENSEN, 2001).

Após instalar e abrir o programa, o usuário pode escolher entre criar um novo projeto ou editar um projeto existente. Entre as opções de novo projeto, estão planejamento de áreas externas, planejamento de ambientes e iluminação de rua, por exemplo, além da opção de importar arquivo nos formatos DWG, DXF e IFC. O programa possui interface amigável e apresenta abas principais como Construção, Luz, Objetos de cálculo, Documentação e Fabricante na parte superior e abas secundárias na lateral esquerda da tela (Figura 13).

Figura 13 - Interface do programa DIALux evo 8.2



Além da visualização da planta baixa, o programa oferece opções de vistas laterais e visualização 3D do modelo. Após os cálculos computacionais, o usuário pode conferir os dados de saída na aba Documentação a partir de relatórios que constam informações como iluminância média (lx), uniformidade, densidade de potência de iluminação (DPI) e rendimento luminoso (lm/W), além de representações de linhas isográficas.

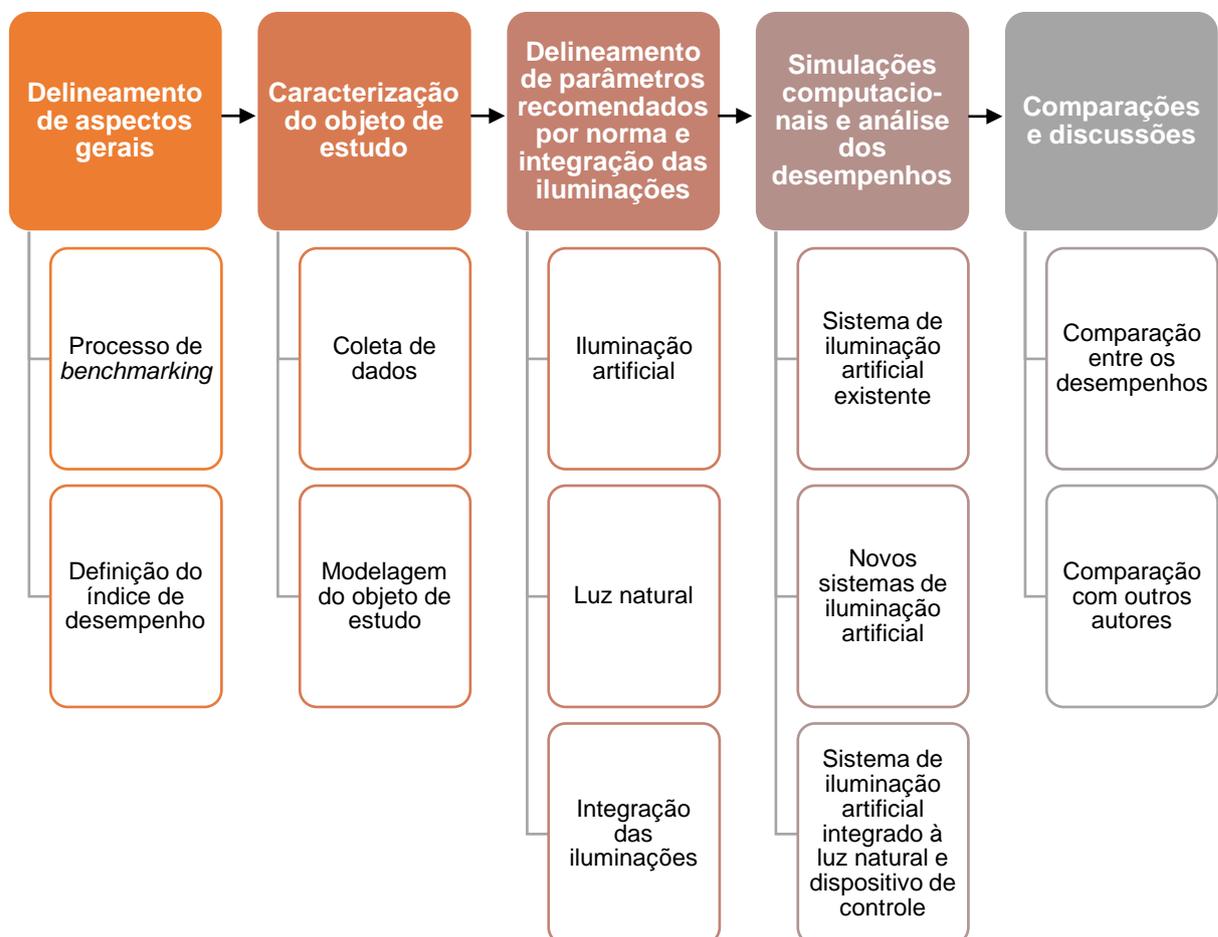
Salata *et al.* (2016) abordaram o estudo de caso de uma sala de aula em Roma com o intuito de avaliar a possibilidade da integração das iluminações artificial e natural. As medições *in loco* dos valores de iluminância foram realizadas com o auxílio de um luxímetro de precisão $\pm 2\%$ em um dia de condições de céu limpo, das 8 h às 17 h e em 24 pontos dispostos no interior da sala. A partir da modelagem e das simulações por meio do DIALux evo 5.1 (DIAL GMBH, 2019), os autores obtiveram erro percentual médio diário inferior a 10% para cada ponto de medição e, assim, puderam considerar o modelo reproduzido com o programa preciso o suficiente para seus objetivos.

Em suma, este capítulo abordou tópicos sobre iluminações artificial e natural de forma geral, além de estratégias de controle de iluminação artificial e programas computacionais de simulação usualmente utilizados para a avaliação de sistemas de iluminação. A partir de trabalhos realizados tanto no exterior como no Brasil, foi possível delinear as principais abordagens para alcançar o objetivo geral do presente estudo.

3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos realizados para alcançar os objetivos do presente estudo com base no referencial teórico apresentado no capítulo anterior. O método foi dividido em etapas conforme representado graficamente na Figura 14.

Figura 14 - Representação gráfica do processo de desenvolvimento do estudo



A primeira etapa abordou a descrição das etapas do processo de *benchmarking* que auxiliou no delimitação de aspectos gerais, bem como o índice de desempenho que foi utilizado para efeitos de posteriores comparações.

A partir de plantas originais e levantamentos *in loco*, a segunda etapa envolveu a coleta de informações do objeto de estudo pertinentes ao objetivo geral do estudo, como localização geográfica, dimensões e orientação das aberturas, características do sistema de iluminação e refletância das superfícies. A modelagem inicial realizada no programa de arquitetura Archicad (GRAPHISOFT, 2019) permitiu a exportação do arquivo no formato IFC (*Industry Foundation Classes*) para o programa de simulação DIALux evo (DIAL GMBH, 2019). A escolha deste último deu-se, principalmente, devido a possibilidade de simular sistemas de iluminação que permitem a integração de sistemas de iluminação artificial e natural simultaneamente, além do uso de sistemas de controle de iluminação. O processo de simulação consistiu na estruturação e na retroalimentação de dados de entrada relativos aos três principais parâmetros da configuração do programa: construção, luz e objetos de cálculo, que serão descritos nos próximos itens deste capítulo.

A terceira etapa apresentou recomendações de normas brasileiras que foram seguidas a fim de garantir a segurança e o conforto visual dos usuários, tanto considerando a iluminação artificial quanto a luz natural para ambientes internos.

Com base nos dados de entrada e nos requisitos gerais, na quarta etapa foram realizadas simulações computacionais na seguinte ordem: a primeira simulação considerou o sistema de iluminação artificial existente nas salas com o objetivo de avaliar os desempenhos luminoso e energético e verificar a necessidade de melhoria do sistema; a partir dessa análise, foram simulados diferentes arranjos e tipos de luminárias LED de sobrepôr que estão disponíveis no mercado atualmente a fim de se obter sistemas de iluminação eficientes; por fim, aliado a um sistema artificial otimizado, simulou-se a integração com a luz natural considerando o uso de sistema de dimerização vinculado à luz natural.

Por fim, na quinta etapa foram avaliados os desempenhos luminoso e energético dos sistemas em todos os cenários de simulação a fim de posteriores comparações e obtenção do sistema de iluminação mais eficaz para os ambientes de trabalho das salas.

A seguir, estão apresentadas detalhadamente as etapas do método, juntamente com as condições de contorno de cada uma e como foram estabelecidos e adotados os parâmetros de entrada (*set up*) das simulações.

3.1 DELINEAMENTO DE ASPECTOS GERAIS

Com base nas recomendações de Pérez-Lombard *et al.* (2009), algumas questões foram abordadas e, apesar do processo de certificação não ser um dos objetivos do presente

estudo, a análise baseada nesses tópicos auxiliou no delineamento de aspectos relevantes para o desenvolvimento da pesquisa.

- O que deve ser calculado para avaliar o desempenho energético do edifício?

Por ser uma tarefa complexa, a definição e a medição do desempenho energético pode ser substituída por indicadores de desempenho de energia para determinados serviços do edifício. O índice de desempenho energético analisado foi a densidade de potência de iluminação limite (DPI_L), dada em W/m² por lx, que leva em consideração o tipo de atividade do ambiente.

- Como deve ser calculado o desempenho energético?

Por meio de dados levantados previamente, utilizou-se o programa de simulação DIALux evo (DIAL GMBH, 2019) para examinar os comportamentos energético e luminoso do objeto de estudo.

- Como deve ser estabelecido o limite para o desempenho energético?

Como um dos objetivos do estudo é melhorar o desempenho luminoso utilizando o mínimo de energia elétrica possível, baseou-se na norma de iluminação para ambientes de trabalho NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) que recomenda valores que respeitam requisitos de segurança e de conforto visual dos usuários.

- Com o que deve ser comparado o desempenho energético do edifício?

Por se tratar de um edifício da década de 90, o *benchmarking* foi realizado por meio da abordagem de autorreferência, em que o índice de desempenho energético foi comparado entre o sistema de iluminação atual e o sistema de iluminação reformulado, ambos a partir de simulações computacionais, ou seja, o edifício de referência possui a mesma localização, geometria e padrão de uso, mas sistema de iluminação diferente.

- Como rotular o desempenho energético do edifício?

Por se referir a uma abordagem de autorreferência, o índice de rotulagem mostrou a porcentagem de economia de energia elétrica em relação ao desempenho do edifício de referência.

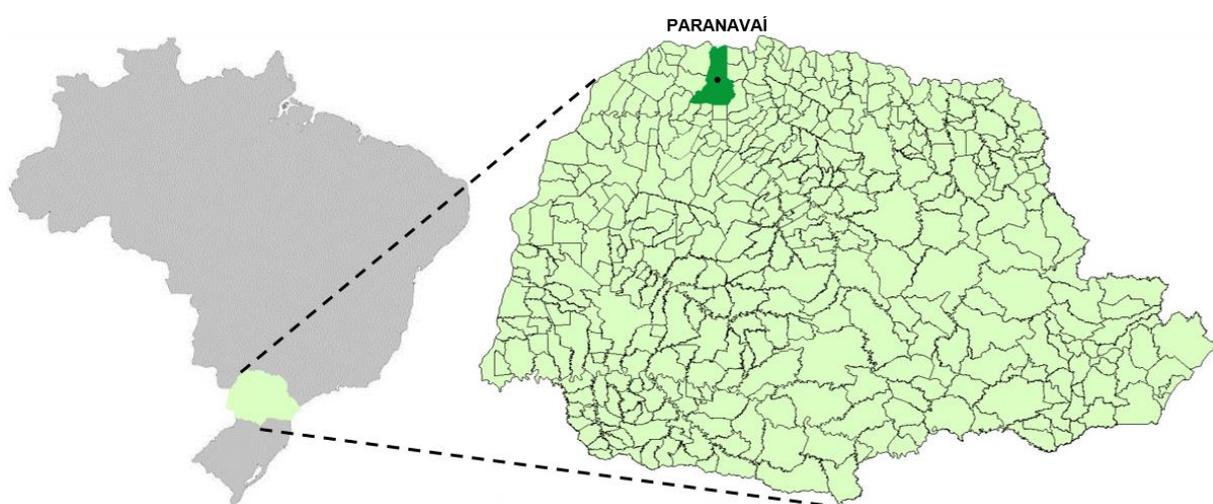
- Quais melhorias de desempenho energético devem ser recomendadas?

A partir da análise dos resultados, foram sugeridos sistemas de iluminação com melhores desempenhos energético e luminoso para ser implantado nos ambientes de trabalho das salas estudadas.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo refere-se a salas comerciais de um edifício existente localizado no município de Paranaíba, noroeste paranaense (Figura 15). O clima da região é classificado como Cfa (C: temperado quente; f: úmido; a: verão quente), ou seja, clima temperado úmido, com temperatura média mensal do ar do mês mais quente superior a 22 °C (KOTTEK *et al.*, 2006) e a população estimada é de cerca de 88.000 habitantes em 2019 (IBGE, 2019).

Figura 15 - Localização do município de Paranaíba/PR

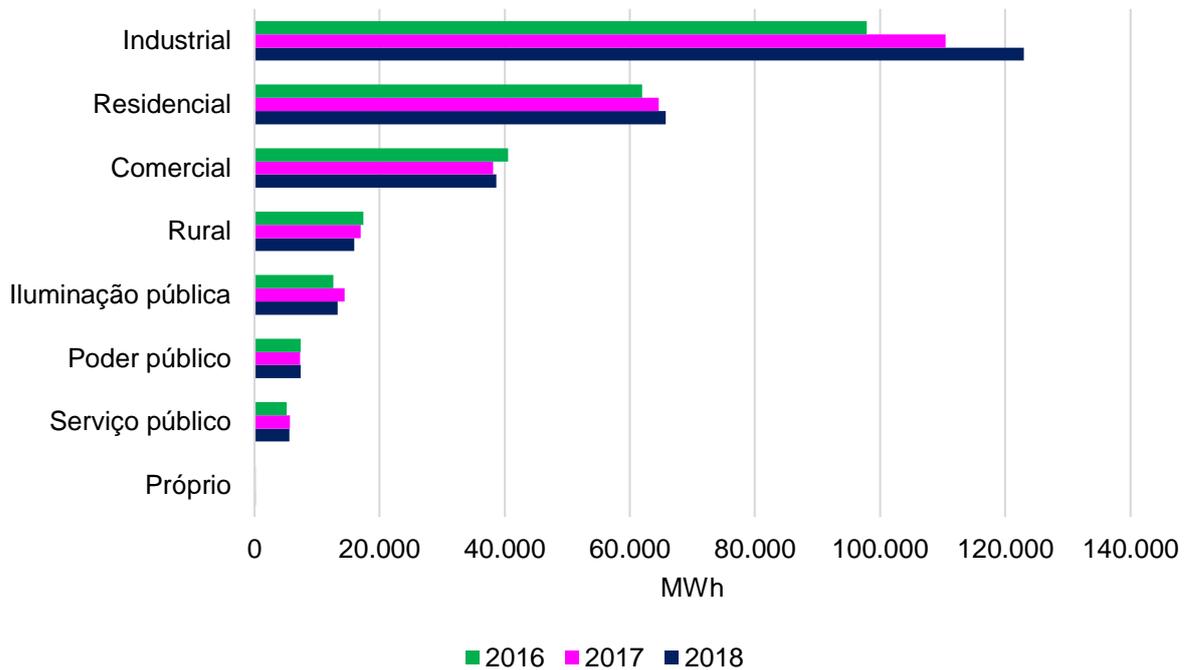


Fonte: adaptado de IBGE (2019).

De acordo com a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), o consumo de energia elétrica em Paranaíba no ano de 2018 aumentou 4,4% em relação ao ano anterior, atingindo quase 270.000 MWh⁴. Desse total, os setores industrial, residencial e comercial representaram mais de 80% do consumo (Figura 16).

⁴ Dados fornecidos pela Companhia Paranaense de Energia em 04/10/2019 via e-mail.

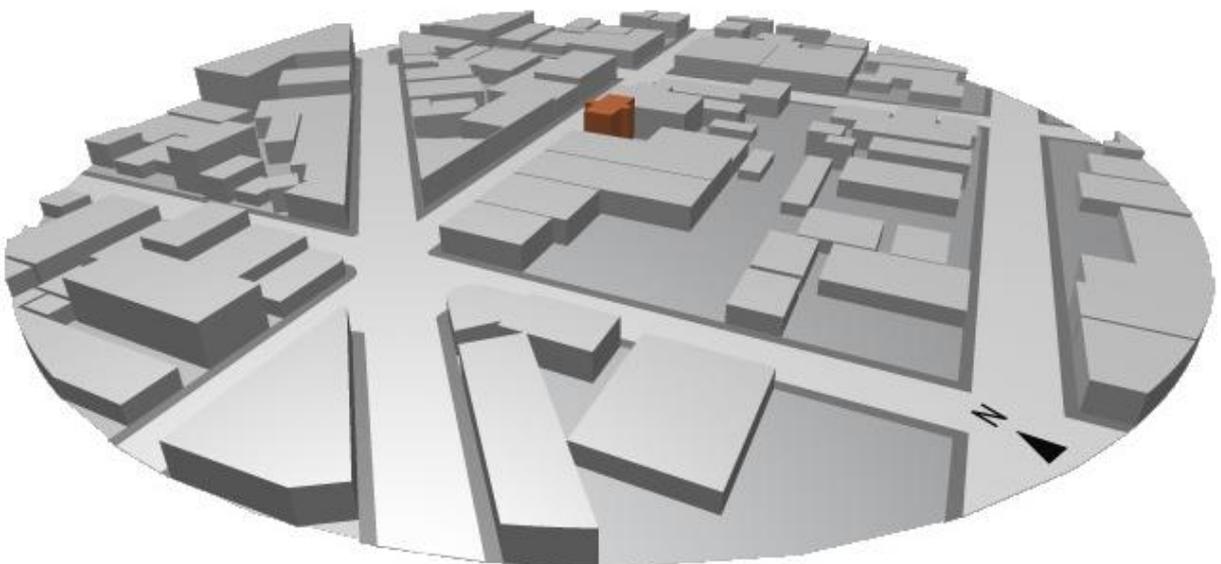
Figura 16 - Consumo de energia elétrica por classe no município de Paranaíba/PR



Fonte: adaptado de Copel⁴.

A edificação está situada no bairro Centro e possui localização geográfica de 23°05'00.4"S 52°27'54.8"O. O entorno do objeto é caracterizado por edificações comerciais com alturas por volta de 6 metros (Figura 17) principalmente. Apesar de ser a região central da cidade, há a presença de casas térreas e vários terrenos baldios, sendo que no estudo foi considerado o raio de até 130 metros como obstáculo da luz natural nas simulações.

Figura 17 - Visão 3D do entorno do edifício avaliado (na cor alaranjada)



O edifício foi construído entre os anos de 1990 e 1993 e possui três pavimentos (térreo + dois pavimentos tipo), sendo a fachada principal orientada a noroeste (Figura 18). No total, há dez salas comerciais, sendo nove para vários usos finais temporários (alugadas), como escritórios de administração, advocacia, contabilidade, engenharia e outros; e uma de uso permanente, abrigando um escritório de contabilidade.

Figura 18 - Fachada principal do edifício avaliado



No térreo, estão situadas duas salas comerciais com configurações arquitetônicas únicas, sendo uma delas a referente à sala permanente citada anteriormente. As outras oito salas possuem a mesma planta baixa e estão distribuídas igualmente no primeiro e no segundo andar do edifício, ou seja, quatro salas em cada andar.

Neste estudo, foram avaliadas apenas as salas dispostas no primeiro e no segundo andar. As salas 1 e 2 são espelhadas na planta e possuem aberturas orientadas para o noroeste. Da mesma forma, as salas 3 e 4 também são espelhadas, mas suas aberturas são orientadas para o sudeste (Figura 19). Todas as informações necessárias para o

Tabela 2 (conclusão)

Característica	Descrição
Altura do plano de trabalho	0,75 m
Refletância do piso	0,10
Refletância das paredes	0,77
Refletância do teto	0,77
Refletância das portas	0,10
Refletância dos caixilhos das janelas	0,03
Refletância dos vidros das janelas	0,47
Dispositivo de proteção solar	Inexistente

Cada sala possui pé direito livre de 2,95 m e dispõe de um ambiente de trabalho e um lavabo cada, com áreas de 18,17 m² e 2,00 m² respectivamente. As salas orientadas para a fachada principal possuem seis janelas basculantes de dimensões 1,00 x 1,60 m e peitoril de 0,50 m, ou seja, a relação janela-parede é de 54% (Figuras 20 e 21).

Figura 20 - Planta da sala 2

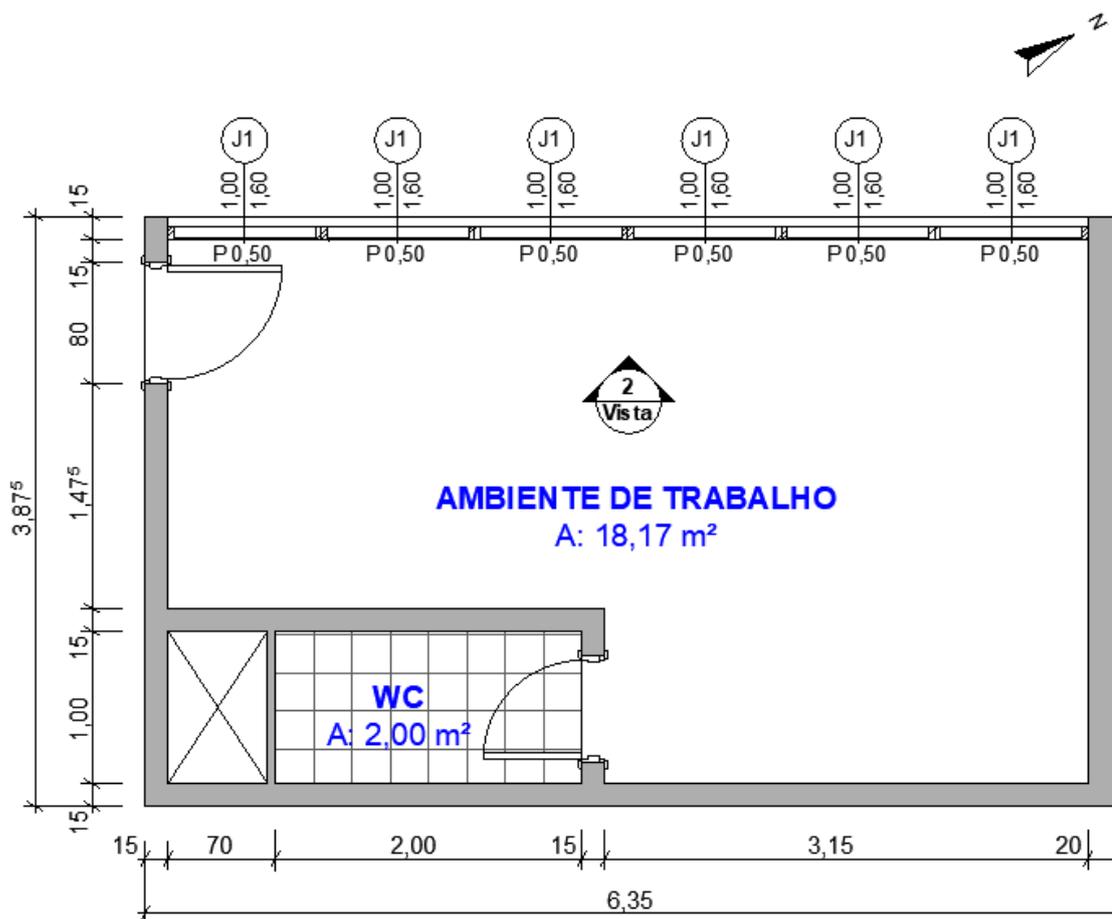
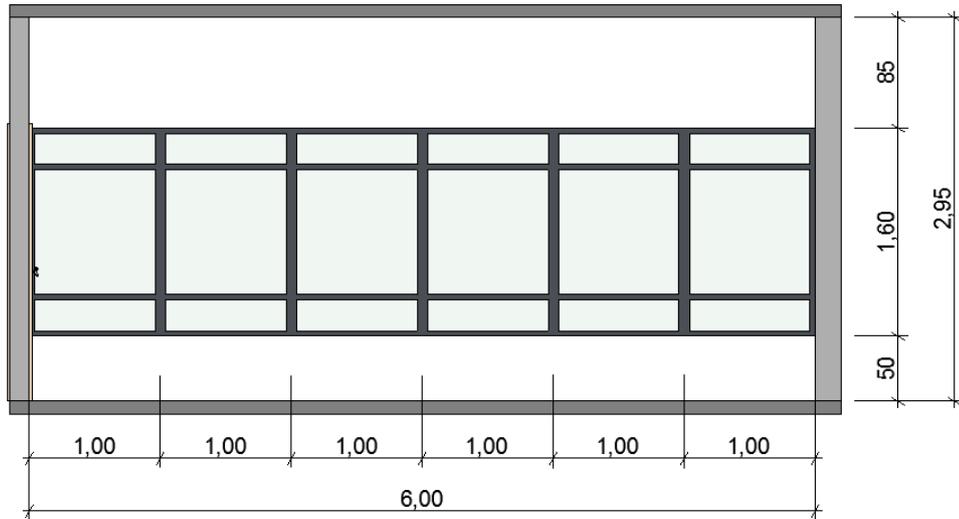


Figura 21 - Vista das aberturas da sala 2



As salas orientadas a sudeste possuem seis janelas basculantes de dimensões 0,95 x 0,60 m e peitoril de 1,50 m, ou seja, a relação janela-parede é de 19% (Figuras 22 e 23).

Figura 22 - Planta da sala 4

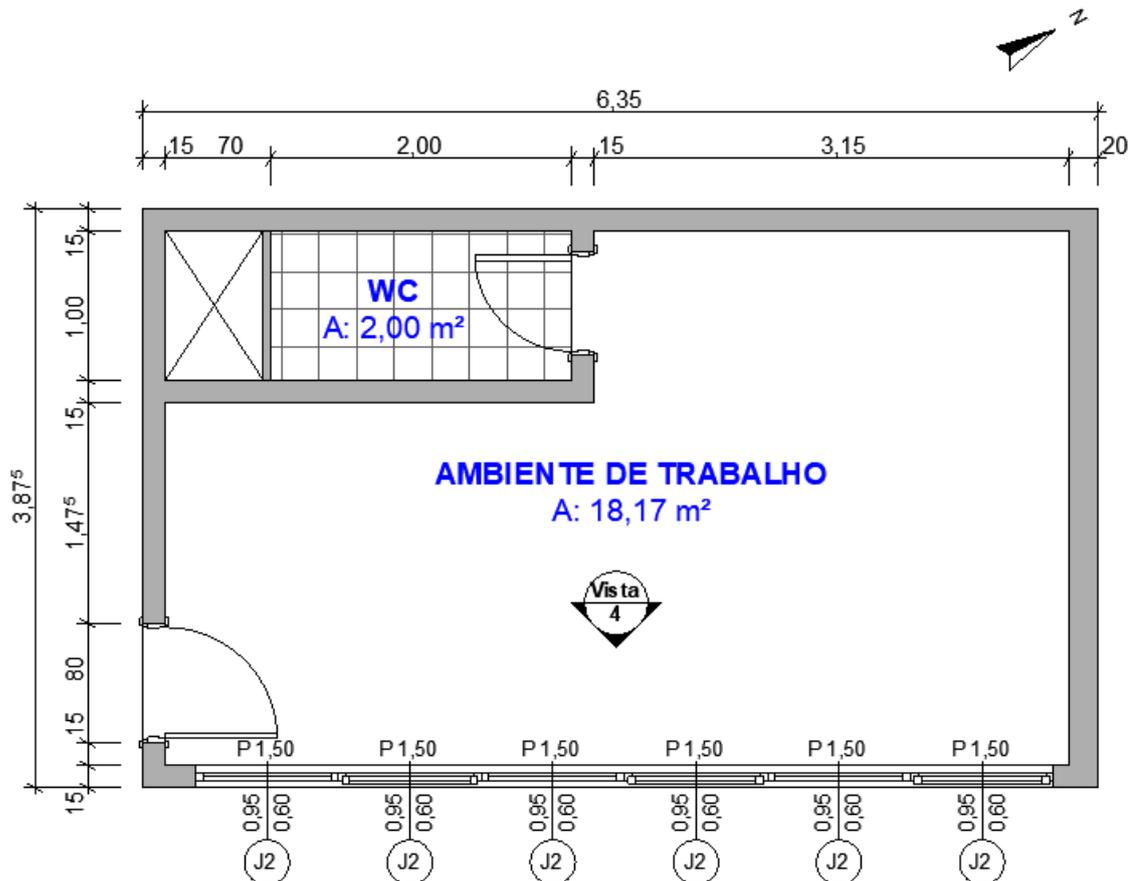
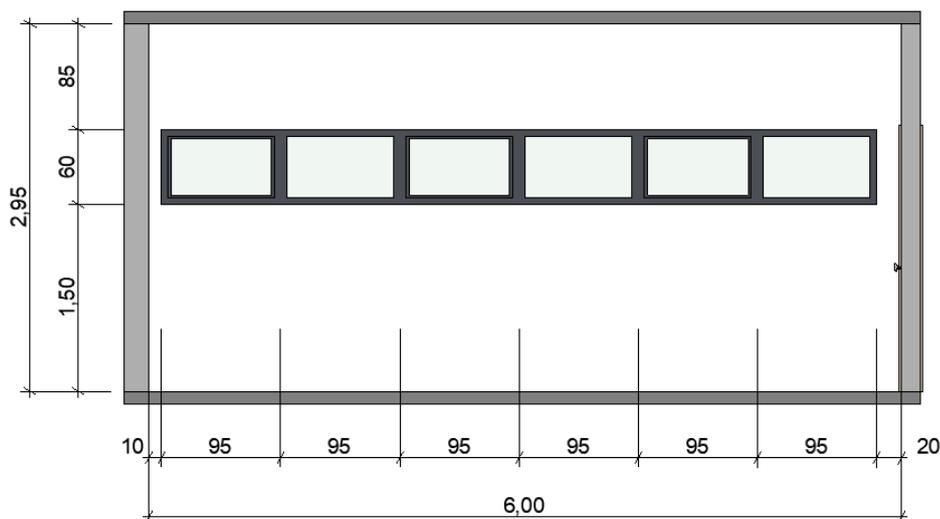


Figura 23 - Vista das aberturas da sala 4



A partir do levantamento das características do objeto de estudo, a próxima etapa contemplou os aspectos referentes à iluminação que também são dados de entrada do programa de simulação.

3.3 DELINEAMENTO DE PARÂMETROS RECOMENDADOS POR NORMA E INTEGRAÇÃO DAS ILUMINAÇÕES

Este item especifica os requisitos de iluminação adotados baseados em normas brasileiras que sugerem parâmetros com o intuito de permitir que os usuários desempenhem tarefas visuais de maneira segura, eficiente e confortável. Também estão apresentados os dados relativos aos parâmetros “luz” e “objetos de cálculo” da configuração do programa de simulação.

3.3.1 ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

As simulações e as análises a respeito da iluminação artificial seguiram parâmetros recomendados pela norma brasileira NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) conforme descrito a seguir.

- Refletância de superfícies: a norma apresenta faixas de refletâncias úteis para as superfícies internas mais relevantes conforme disposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Recomendação de refletâncias para superfícies internas mais importantes

Superfície interna	Faixa de refletância
Teto	0,6 - 0,9
Paredes	0,3 - 0,8
Planos de trabalho	0,2 - 0,6
Piso	0,1 - 0,5

Fonte: adaptado de NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013).

- Iluminância mantida (\overline{E}_m): para cada ambiente do escritório, é estabelecido um valor mínimo de iluminância. Nas áreas de recepção, arquivamento e circulação, a iluminância mantida recomendada é menor que nos locais onde se realizam tarefas de escrever e ler por exemplo (vide Tabela 4).

Tabela 4 - Recomendação de iluminância mantida de acordo com os ambientes de um escritório

Ambiente	\overline{E}_m (lux)
Arquivamento, cópia, circulação etc.	300
Escrever, teclar, ler, processar dados	500
Desenho técnico	750
Estações de projeto assistido por computador	500
Salas de reunião e conferência	500
Recepção	300
Arquivos	200

Fonte: adaptado de NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013).

- Uniformidade (U): por se tratar de ambientes com o arranjo do local de trabalho desconhecido, considera-se que a área de trabalho engloba a sala inteira menos a faixa marginal de 0,5 m de largura, sendo a altura de referência para iluminação de 0,75 m acima do piso. Desta forma, a uniformidade planejada (razão entre o valor mínimo e o valor médio) pode ser $\geq 0,6$, uma vez que é o suficiente para garantir uma uniformidade mínima de 0,7 nos locais de trabalho individuais (de acordo com a referida norma). Tanto a área de trabalho como a altura de referência descritas são dados de entrada do item “objetos de cálculo” do programa de simulação.

- Aspectos da cor: referem-se às qualidades da cor de uma lâmpada e influenciam no desempenho visual e bem-estar do usuário. A aparência da cor pode ser representada pela sua temperatura de cor correlata, que se classifica em quente (abaixo de 3.300 K), intermediária (3.300 K a 5.300 K) e fria (acima de 5.300 K). Já a reprodução de cor é definida pelo Índice de Reprodução de Cor (IRC), sendo que a qualidade de reprodução aumenta conforme se aproxima do valor máximo de 100.

Foram consideradas as seguintes condições de contorno no desenvolvimento do estudo para melhorar o desempenho luminoso dos ambientes:

- Tipos de lâmpada e de luminária: até o momento do presente estudo, a tecnologia LED é a que possui maior eficiência luminosa, logo as demais tipologias de lâmpadas foram descartadas. Desta forma, optou-se por analisar luminárias com módulos/placas LED acopladas;
- Tipo de uso: alguns catálogos de fabricantes de luminárias possuem indicação de locais mais adequados para o uso de tais produtos. Desta forma, as linhas industrial e hermética, por exemplo, foram desconsideradas por não serem compatíveis com os ambientes avaliados (escritórios);
- Tipo de montagem e distribuição luminosa: dados a altura do pé direito do ambiente, a inexistência de forro e o tipo de uso da área de trabalho, foram analisadas apenas luminárias LED de sobrepor e com distribuição luminosa direta;
- Aspectos de cor: apesar de ser uma escolha psicológica e estética e, conforme recomendado na NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013), foi dada preferência para luminárias LED de aparência de cor mais fria pelo fato do edifício em questão estar localizado em uma região de clima quente. E, devido os objetos de estudo serem ambientes onde os usuários permanecem por longos períodos, foram selecionadas luminárias LED com Índice de Reprodução de Cor (IRC) maior ou igual a 80;
- Potência/Rendimento luminoso: a escolha da luminária por meio da característica de potência (W) de forma isolada não é adequada. Um indicador de desempenho energético comumente disponibilizado nos catálogos de produtos é o consumo de eletricidade por fluxo luminoso (W/lm) e, a partir dele, o usuário/projetista consegue verificar instantaneamente se aquele produto tende a satisfazer suas necessidades antes mesmo de realizar quaisquer cálculos luminotécnicos. Logo, ao analisar e comparar a potência e o rendimento luminoso das luminárias LED simultaneamente, pôde-se selecionar as mais adequadas para os devidos objetivos. Também foram evitadas luminárias LED com potências muito altas e que, conseqüentemente, poderiam ocasionar ofuscamento aos usuários e gastos desnecessários.

- Posicionamento: por fim, as luminárias foram dispostas nos ambientes de forma a garantir os critérios de iluminação primeiramente e, posteriormente, contribuir com a estética e com a etapa de instalação.

Considerando as condições de contorno, foram inseridos os dados de entrada relativos à iluminação artificial no item “luz” do programa de simulação e realizadas diversas simulações variando a posição e o modelo de luminárias LED de sobrepor. Consequentemente, comparou-se os sistemas de iluminação que melhor se encaixaram nos requisitos iniciais descritos anteriormente. Deste modo, foi possível selecionar o sistema mais eficaz com base na densidade de potência de iluminação limite (DPI_L).

3.3.2 ILUMINAÇÃO NATURAL

Para o levantamento de dados relacionados à iluminação natural, foram considerados aspectos relevantes que influenciam a estimativa das condições de disponibilidade de luz natural, como dados relativos as épocas de determinação, coordenadas geográficas e condições de céu.

De acordo com a NBR 15215-4 (ABNT, 2005), quando não é possível o monitoramento da iluminação natural ao longo do ano, recomenda-se que o levantamento de iluminância seja realizado nas condições de céu dos períodos de solstício de verão e de inverno e de 2 h em 2 h a partir do início do expediente.

Assim, considerou-se os seguintes parâmetros relacionados à luz natural:

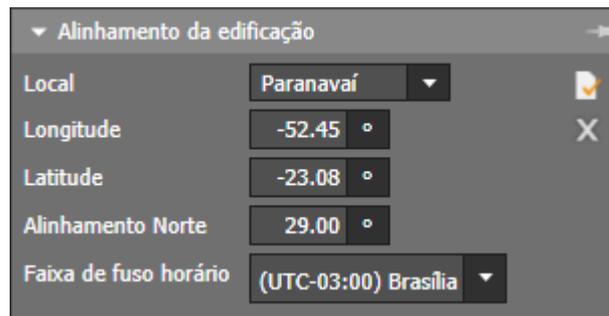
- Alinhamento do edifício: 29.00°.

- Épocas de determinação: foram considerados os solstícios de verão e de inverno por caracterizarem as épocas do ano com maior e menor incidência de raios solares respectivamente, no período das 8 h às 18 h, de 1 h em 1 h.

- Coordenadas geográficas: latitude -23.08° e longitude -52.45°.

- Tipo de céu: o tipo de céu escolhido para a realização das simulações computacionais foi o céu encoberto, visto que nesse cenário pode-se estabelecer condições mínimas de iluminação, pois representa a pior situação em termos de disponibilidade de luz natural.

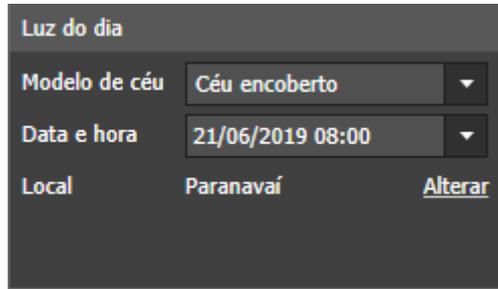
As simulações consideraram as iluminâncias dos solstícios referente ao ano de 2019 conforme dados climáticos disponíveis no próprio programa de simulação a partir da localização do edifício. As Figuras 24 e 25 apresentam os parâmetros de entradas introduzidos no referido programa.

Figura 24 - Dados de entrada referente à localização do edifício

Alinhamento da edificação	
Local	Paranavaí
Longitude	-52.45
Latitude	-23.08
Alinhamento Norte	29.00
Faixa de fuso horário	(UTC-03:00) Brasília

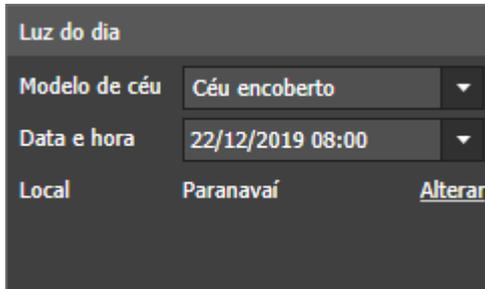
Figura 25 - Dados de entrada referente a luz natural nos solstícios de (a) inverno e (b) verão

(a)



Luz do dia	
Modelo de céu	Céu encoberto
Data e hora	21/06/2019 08:00
Local	Paranavaí

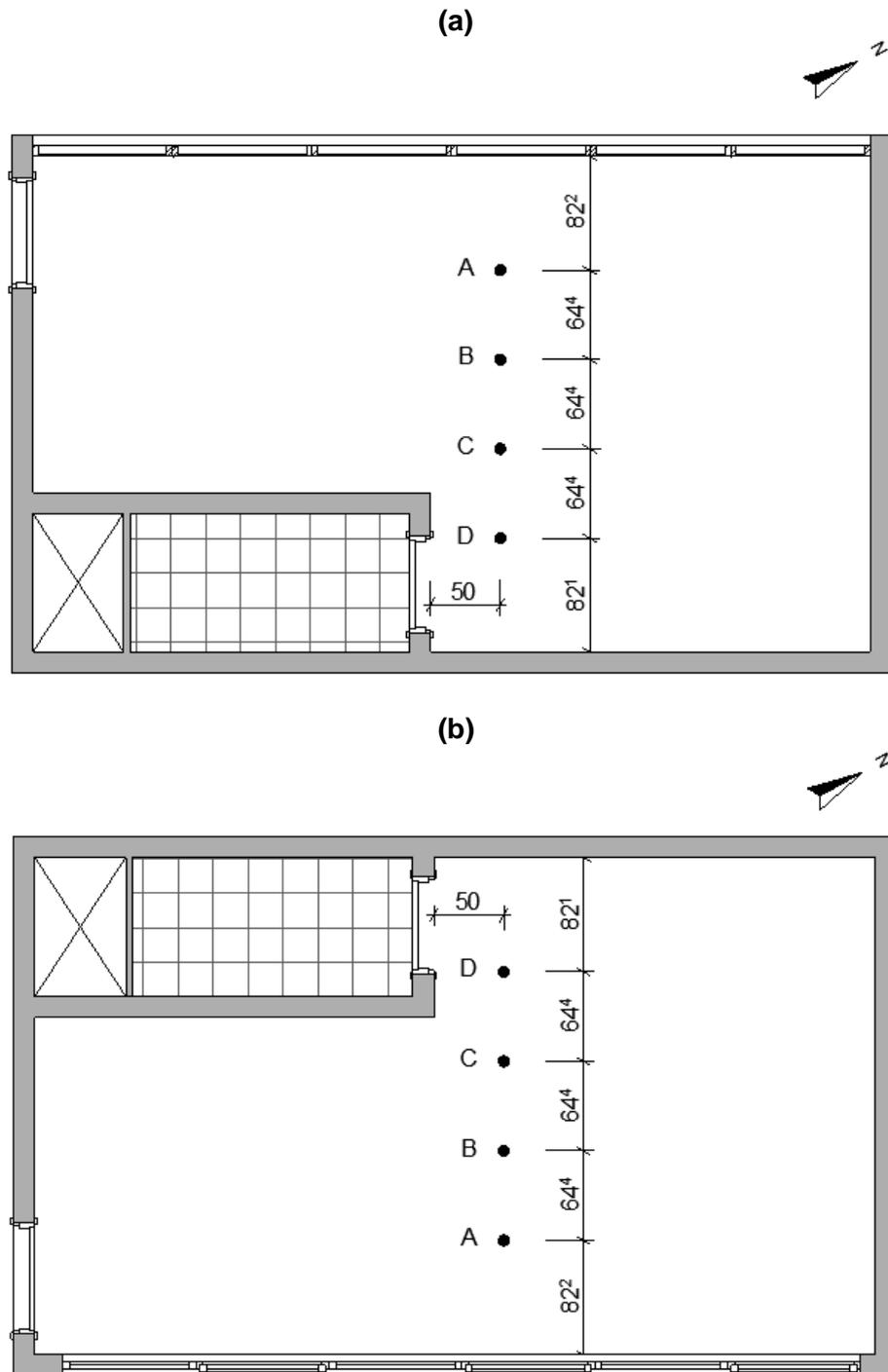
(b)



Luz do dia	
Modelo de céu	Céu encoberto
Data e hora	22/12/2019 08:00
Local	Paranavaí

Para a observação da distribuição da iluminância, foram selecionados os pontos medianos dos ambientes respeitando a distância mínima de 0,50 m das paredes a fim de evitar a influência da luz refletida pelas mesmas. Foram considerados quatro pontos (A, B, C e D) dispostos linearmente conforme Figura 26.

Figura 26 - Disposição dos pontos analisados nos ambientes das salas (a) 2 e (b) 4



Esta análise de distribuição de iluminância foi realizada para os seguintes cenários: luz natural; luz natural + 100% da iluminação artificial; luz natural + iluminação artificial controlada por *dimmer*.

Embora o objetivo principal deste estudo seja avaliar os desempenhos luminoso e energético de ambientes de escritórios por meio de simulações computacionais, foram

realizadas medições *in loco* durante um dia no período de expediente nos mesmos quatro pontos (A, B, C e D) medianos da sala a fim de posteriores comparações com os valores simulados pelo programa.

As medições ocorreram no dia 20/08/2020 sob condições de céu encoberto em uma das salas do edifício que estava desocupada a fim de evitar qualquer influência dos ocupantes. Foi utilizado o instrumento termo-higro-decibelímetro-luxímetro digital portátil, modelo THDL-400, da marca Instrutherm (Figura 27), cuja faixa de medição da intensidade de iluminação é por meio de um diodo de silício de alta estabilidade. O luxímetro possui faixa de medição de 0,01 a 200.000 lux e exatidão de +- 5% da leitura + 10 dígitos⁵.

Figura 27 - Termo-higro-decibelímetro-luxímetro utilizado



Fonte: Instrutherm⁵.

Para efeitos de comparação, os mesmos dados de entrada foram inseridos no programa computacional, sendo que tanto nas medições *in loco* quanto nas simulações foram considerados os valores de hora em hora durante todo o dia de expediente (8 h - 18 h). Ambos os resultados foram analisados com o auxílio do programa Microsoft Excel por meio do coeficiente de variação (Equação 2). A Figura 28 apresenta graficamente a comparação entre as iluminâncias obtidas.

⁵ Disponível em: <<https://www.instrutherm.com.br/termo-higro-decibel-luxim-mod-thdl-400-digital-portatil>>. Acesso em: 01 set. 2020.

$$C.V. = \frac{s}{\bar{X}} \times 100 \quad (2)$$

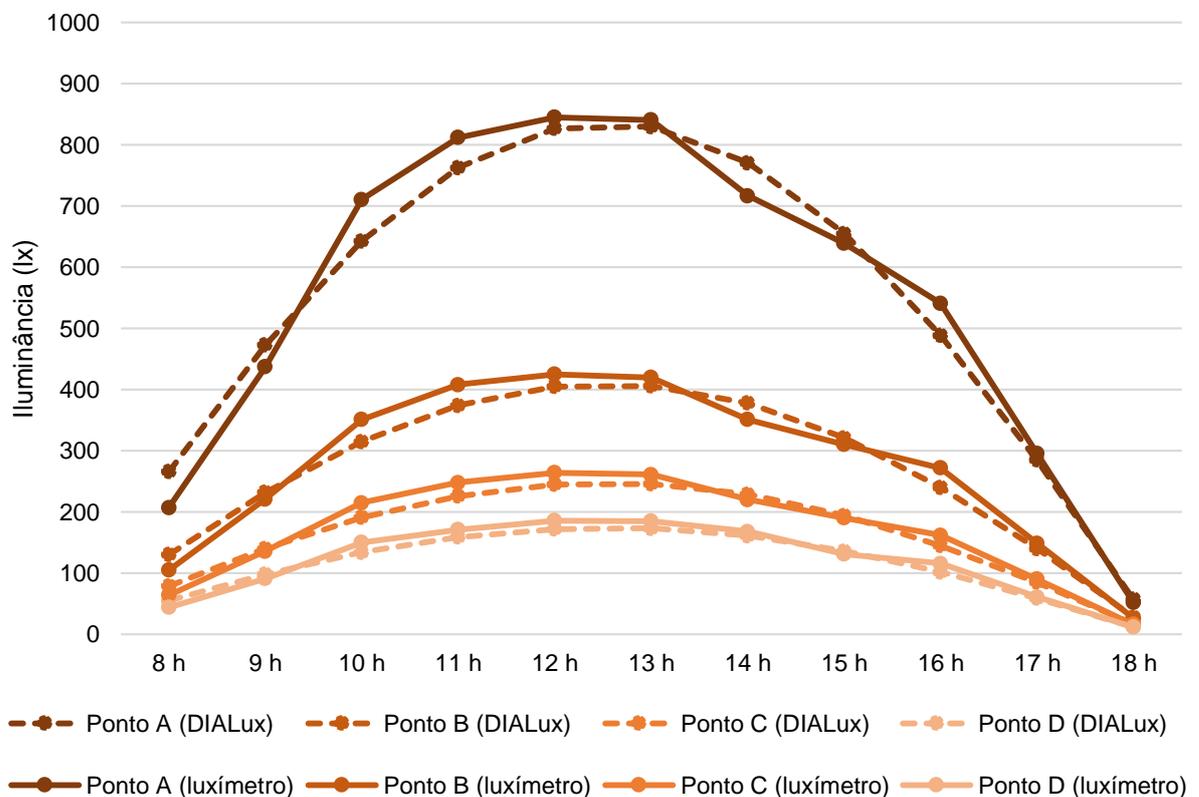
Onde:

C.V.: coeficiente de variação;

s: desvio padrão da amostra;

\bar{X} : média aritmética da amostra.

Figura 28 - Comparação entre a iluminância nos pontos medidos *in loco* e simulados



A análise dos valores de iluminância obtidos a partir do coeficiente de variação indicou que as maiores variações ocorreram no primeiro horário em todos os quatro pontos (até 17,6%), sendo que nos demais horários a variação não ultrapassou 9,1%, valores estes que se aproximam aos encontrados por Salata *et al.* (2016).

3.3.3 INTEGRAÇÃO DAS ILUMINAÇÕES

A partir do arranjo das luminárias escolhidas, foram realizadas as simulações computacionais integrando a luz natural ao sistema. Considerando que a região mais próxima das janelas recebe maior incidência solar, o sistema de iluminação artificial foi dividido em circuitos de alimentação paralelos ao sentido das janelas dos ambientes. Dessa forma, conforme a disponibilidade de luz natural, é possível reduzir o fluxo luminoso de saída de cada circuito isoladamente e, conseqüentemente, diminuir o consumo de energia elétrica.

Nesta etapa, as simulações dos sistemas de iluminação foram realizadas considerando a iluminação natural disponível em sua totalidade integrada à iluminação artificial, cujo fluxo luminoso de saída foi variado de 25 em 25%. Ou seja, inicialmente considerou-se todos os circuitos com 100% do fluxo luminoso mais a integração com a luz natural. Caso o sistema atendesse aos requisitos de iluminância média (≥ 500 lx) e uniformidade ($\geq 0,6$) durante o período do expediente (8 h - 18 h) simultaneamente, o fluxo luminoso dos circuitos era reduzido para 75% e assim por diante, até o momento em que algum dos dois requisitos não fossem mais atendidos. Esse método foi realizado para cada solstício e para a sala mais crítica de cada orientação.

Como as salas são simétricas e só variam a orientação, a dimensão das aberturas e a cota de nível, foi realizada uma verificação prévia daquelas que recebiam menor incidência solar devido ao entorno. Cada uma das 8 (oito) salas foi simulada previamente considerando apenas a contribuição da luz natural durante o horário de trabalho. Em seguida, foi selecionada uma sala de cada orientação para representar as demais. Ou seja, as simulações foram realizadas considerando o pior caso das salas orientadas a noroeste e a sudeste.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos em quatro tópicos. O primeiro aborda os resultados obtidos na simulação do sistema de iluminação com as características do projeto original do edifício. O segundo tópico apresenta os desempenhos de novos sistemas de iluminação artificial com luminárias LED. O terceiro contempla os resultados da integração das iluminações artificial e natural aliado a um sistema de dimerização. Por fim, a partir de todos esses resultados, comparou-se os sistemas de iluminação entre si a fim de se obter aquele energeticamente mais eficiente e que, ao mesmo tempo, garantisse as condições mínimas recomendadas pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013).

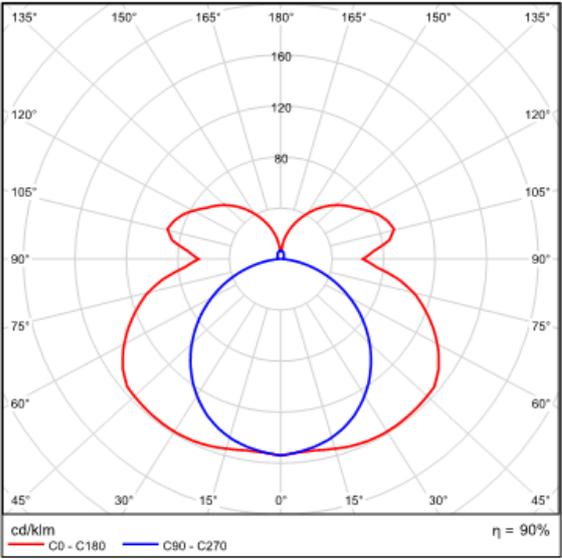
4.1 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DO PROJETO INICIAL

A partir das informações obtidas por meio das plantas originais e do levantamento *in loco*, o sistema de iluminação existente dos ambientes de trabalho foi reproduzido de forma similar por meio do programa de simulação.

O sistema atual é composto por duas luminárias com duas lâmpadas fluorescentes T12 cada, cujas potência e fluxo luminoso totais somam 80 W e 5.040 lm por luminária. O sistema de acionamento da iluminação artificial é por meio de um interruptor para cada conjunto luminária-lâmpada próximo à porta de entrada, ou seja, há dois interruptores no ambiente.

Como todas as salas possuem o mesmo sistema de iluminação artificial e esse não é influenciado pela orientação e pelas aberturas, a simulação foi realizada apenas para uma sala representativa e replicada para as demais. As Tabelas 5 e 6 apresentam as informações técnicas e a disposição do sistema de iluminação existente, enquanto que a Figura 29 exibe a visão tridimensional do ambiente simulado.

Tabela 5 - Ficha técnica da luminária existente nos ambientes das salas

Característica	Descrição
Visão 3D	
Curva de distribuição luminosa polar	
Equipamento	2 x lâmpada tubular fluorescente T12
Potência nominal da lâmpada	40,0 W
Fluxo luminoso da lâmpada	2.800 lm
Temperatura de cor	3.850 K (intermediária)
Índice de reprodução de cor	79
Dimensões	1,233 x 0,101 x 0,057 m
Fluxo luminoso total	5.040 lm
Potência total	80 W
Rendimento luminoso	63,0 lm/W

Fonte: catálogo Nardeen disponível no DIALux evo 8.2.

Tabela 6 - Disposição do sistema de iluminação existente do ambiente da sala 2

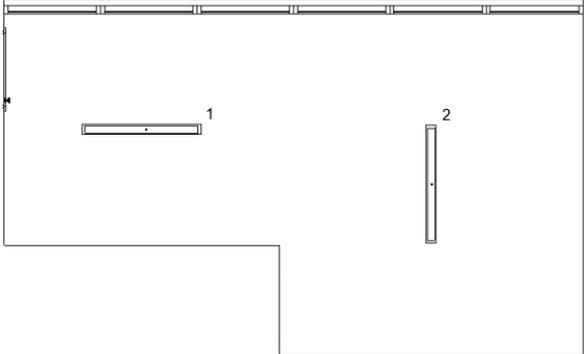
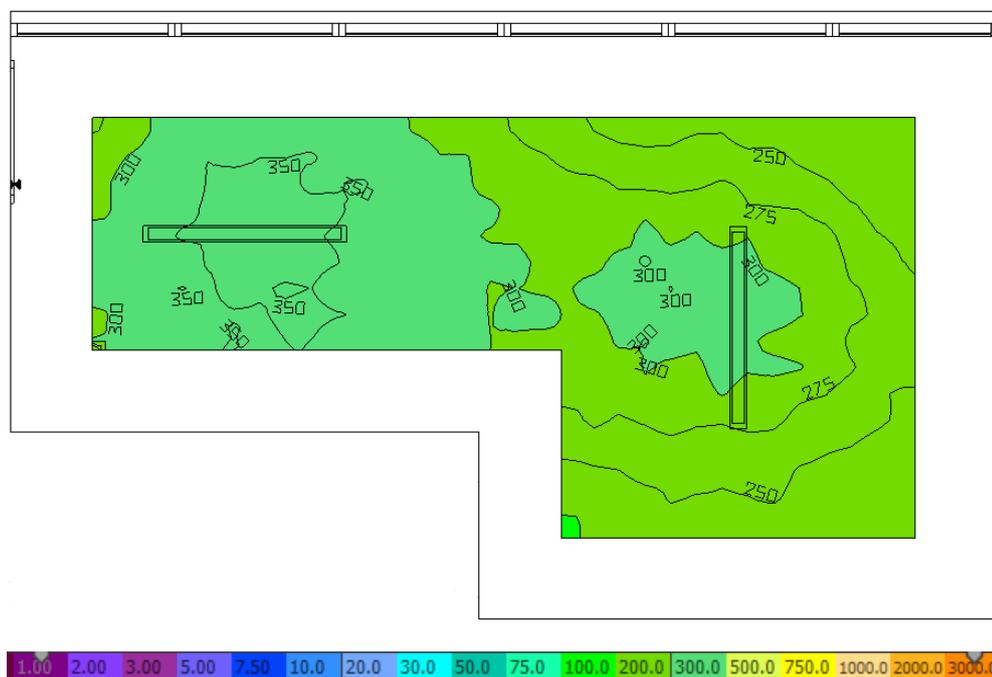
Característica/Item	Descrição
Representação gráfica	
Luminária 1	1,425 m; 2,362 m
Luminária 2	4,425 m; 1,787 m
Altura de montagem	2,950 m
Fator de manutenção	0,80

Figura 29 - Visão 3D do ambiente da sala 2 com o sistema de iluminação existente

Na Figura 30, é possível observar a distribuição da iluminância na área de trabalho considerando o sistema de iluminação existente.

Figura 30 - Representação das linhas isográficas do ambiente da sala 2 para o sistema de iluminação existente (valores em lux)



O programa de simulação apresenta como dados de saída os valores de iluminância e de uniformidade para a área de trabalho considerada, além de dados referentes ao desempenho do sistema de iluminação, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Resumo dos resultados obtidos do sistema de iluminação existente do ambiente da sala 2

Característica	Descrição
$E_{média}$	292 lx
$E_{mínima}$	197 lx
$E_{máxima}$	362 lx
Uniformidade	0,7
N.º de luminárias	2
Fluxo luminoso total	10.080 lm
Potência total	160,0 W
Rendimento luminoso	63,0 lm/W
Densidade de potência de iluminação	8,80 W/m ²
Densidade de potência de iluminação limite	3,01 W/m ² por 100 lx

Na Tabela 7, apesar da distribuição de iluminância no ambiente ser maior que 0,6, a iluminância média ($E_{\text{média}}$) no plano de uso não atende aos valores mínimos recomendados pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013), ou seja, 500 lx. Um dos fatores dessa insuficiência é o baixo rendimento luminoso das lâmpadas fluorescentes existentes, mesmo considerando que na época do projeto eram as mais eficazes disponíveis no mercado.

4.2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PROPOSTOS

Nesta etapa, abordaram-se as simulações de novos arranjos e tipos de luminárias com o intuito de se obter sistemas mais eficientes em termos luminoso e energético. Foram simulados sistemas de iluminação artificial com luminárias LED sem considerar a influência da luz natural, com o intuito de verificar os sistemas que garantiriam a iluminância média e a uniformidade mínima do ambiente em quaisquer horário, dia e condições de céu disponíveis.

Foi feita uma pesquisa entre os principais fabricantes brasileiros de luminárias LED de sobrepor e foram selecionadas as dos fabricantes Lumicenter Lighting e Intral, que estão no mercado de produtos de eletricidade há mais de quatro décadas (INTRAL, 2019; LUMICENTER LIGHTING, 2019). A escolha desses fabricantes deve-se, principalmente, pela disponibilidade de catálogos *online* e arquivos no formato IES da maioria dos seus produtos, o que possibilitou a importação dos dados das luminárias para o programa de simulação e consequentes avaliações.

Foram simulados diversos modelos variando posição, orientação e quantidade de luminárias LED de sobrepor que estavam disponíveis nos catálogos. Após as simulações, foram propostos três sistemas de iluminação artificial (A, B e C) com luminárias LED, cujas características, como dados técnicos e disposição das luminárias no ambiente, foram dispostas nas Tabelas 8 a 13. Também foi possível obter a visualização 3D e a distribuição da iluminância na área de trabalho para cada sistema proposto (vide Figuras 31 a 36).

Devido à geometria dos ambientes estudados, as luminárias retangulares apresentaram maior eficiência luminosa. O presente estudo não contemplou o custo de aquisição e evitou o emprego de luminárias de baixa potência que acarretariam maior quantidade das mesmas para alcançar os níveis mínimos de iluminação.

Tabela 8 - Disposição do sistema de iluminação A proposto para o ambiente da sala 2

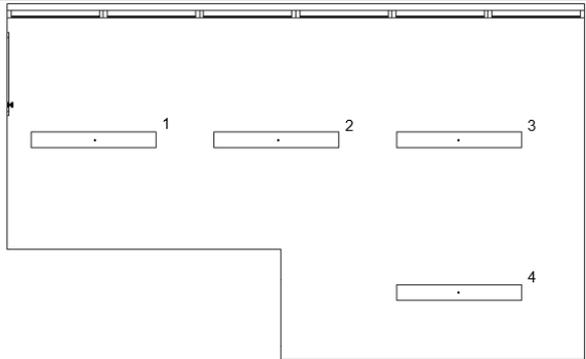
Característica/Item	Descrição
Representação gráfica	
Luminária 1	0,90 m; 2,30 m
Luminária 2	2,80 m; 2,30 m
Luminária 3	4,70 m; 2,30 m
Luminária 4	4,70 m; 0,70 m
Altura de montagem	2,95 m
Fator de manutenção	0,80

Tabela 9 - Ficha técnica da luminária A proposta (continua)

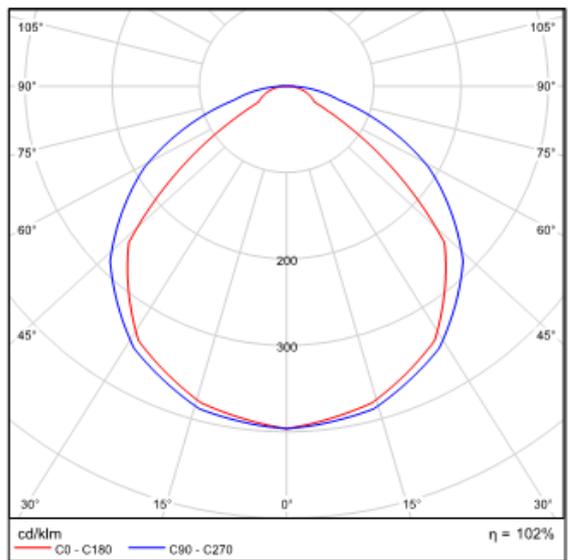
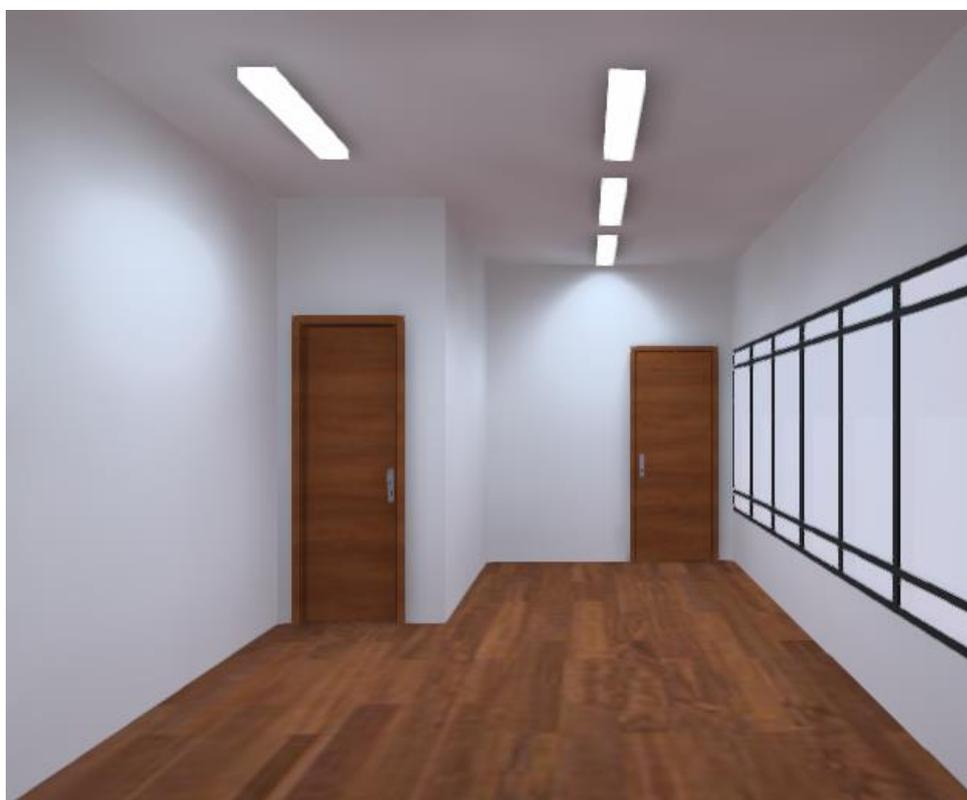
Característica	Descrição
Visão 3D	
Curva de distribuição luminosa polar	
Equipamento	Módulos de LED e driver integrados à luminária

Tabela 9 (conclusão)

Característica	Descrição
Temperatura de cor	5.000 K (intermediária)
Índice de reprodução de cor	>80
Dimensões	1,300 x 0,160 x 0,050 m
Fluxo luminoso total	4.350 lm
Potência total	36,5 W
Rendimento luminoso	119,2 lm/W

Fonte: adaptado do catálogo Lumicenter Lighting⁶.

Figura 31 - Visão 3D do sistema de iluminação proposto A

⁶ Disponível em: <<https://www.lumicenteriluminacao.com.br/catalogo/lcn12-s-p1144/>>. Acesso em: 06 fev. 2020.

Figura 32 - Representação das linhas isográficas do sistema de iluminação proposto A (valores em lux)

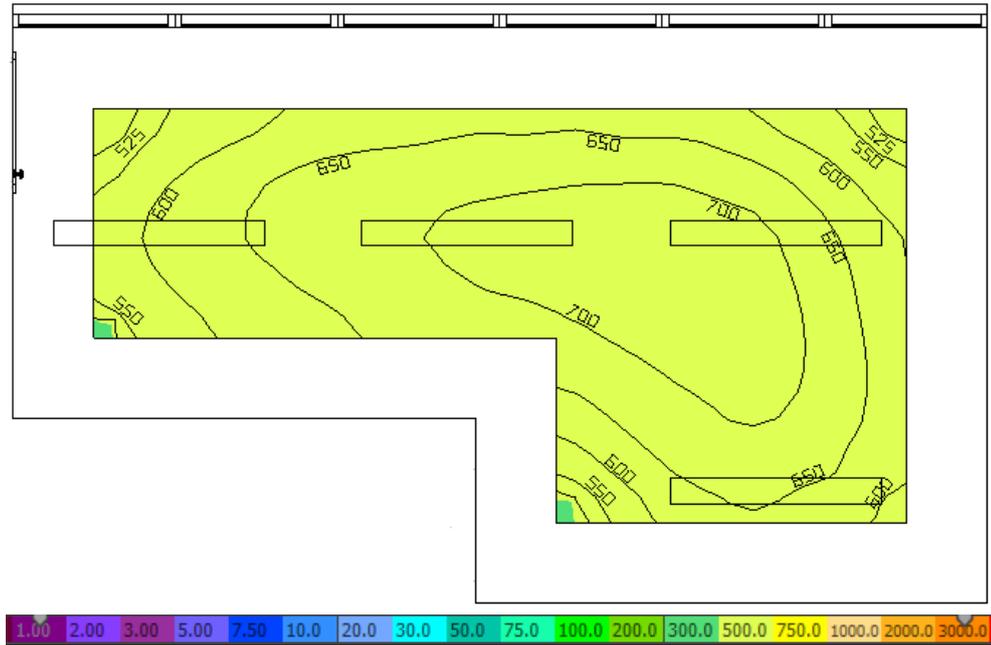
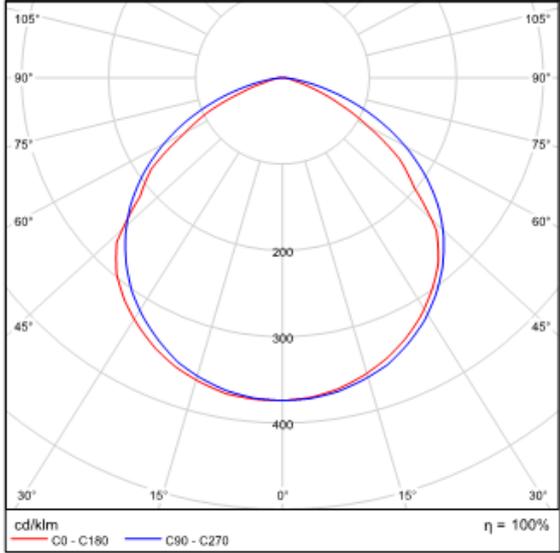


Tabela 10 - Disposição do sistema de iluminação B proposto para o ambiente da sala 2

Característica/Item	Descrição
Representação gráfica	
Luminária 1	1,50 m; 2,50 m
Luminária 2	4,50 m; 2,50 m
Luminária 3	4,50 m; 0,50 m
Altura de montagem	2,95 m
Fator de manutenção	0,80

Tabela 11 - Ficha técnica da luminária B proposta

Característica	Descrição
Visão 3D	
Curva de distribuição luminosa polar	
Equipamento	Módulos de LED e driver integrados à luminária
Temperatura de cor	4.000 K (intermediária)
Índice de reprodução de cor	>80
Dimensões	2,280 x 0,102 x 0,072 m
Fluxo luminoso total	6.000 lm
Potência total	46,0 W
Rendimento luminoso	130,4 lm/W

Fonte: adaptado do catálogo Intral⁷.

⁷ Disponível em: <<https://www.intral.com.br/pt/produtos/luminarias-led/aster/luminaria-aster>>. Acesso em: 06 fev. 2020.

Figura 33 - Visão 3D do sistema de iluminação proposto B

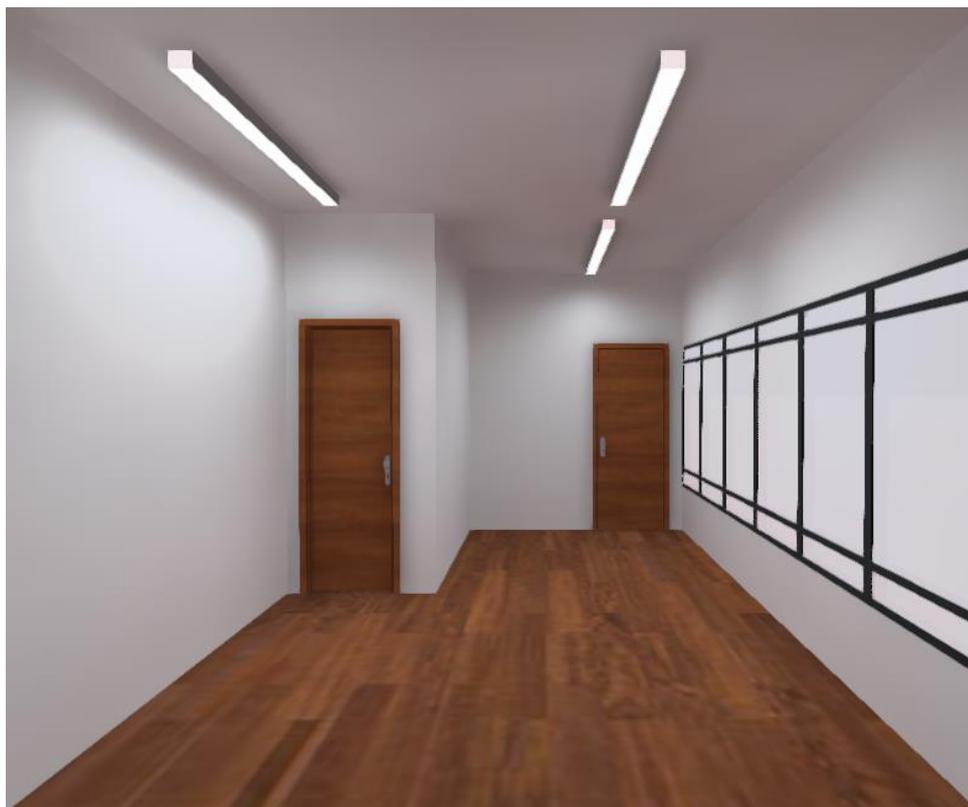


Figura 34 - Representação das linhas isográficas do sistema de iluminação proposto B (valores em lux)

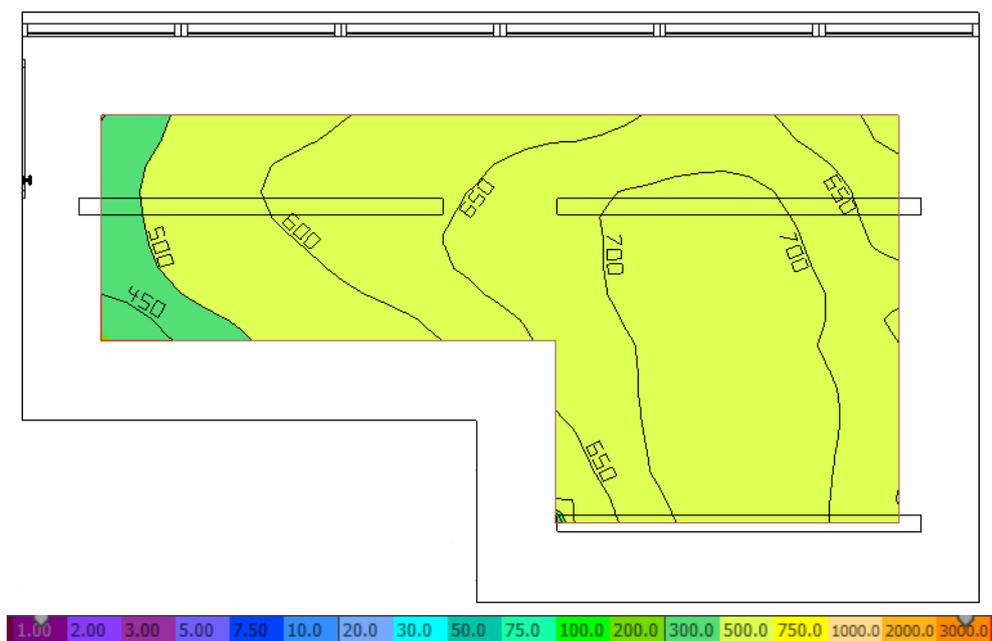


Tabela 12 - Disposição do sistema de iluminação C proposto para o ambiente da sala 2

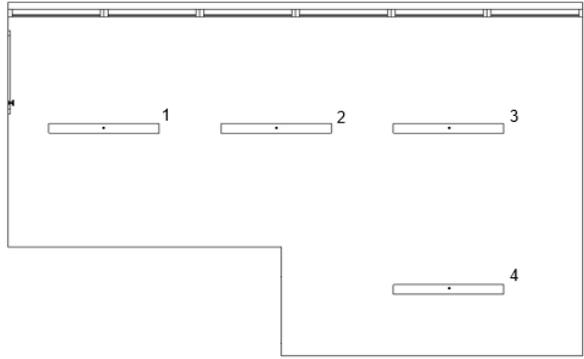
Característica/Item	Descrição
Representação gráfica	
Luminária 1	1,00 m; 2,40 m
Luminária 2	2,80 m; 2,40 m
Luminária 3	4,60 m; 2,40 m
Luminária 4	4,60 m; 0,70 m
Altura de montagem	2,95 m
Fator de manutenção	0,80

Tabela 13 - Ficha técnica da luminária C proposta (continua)

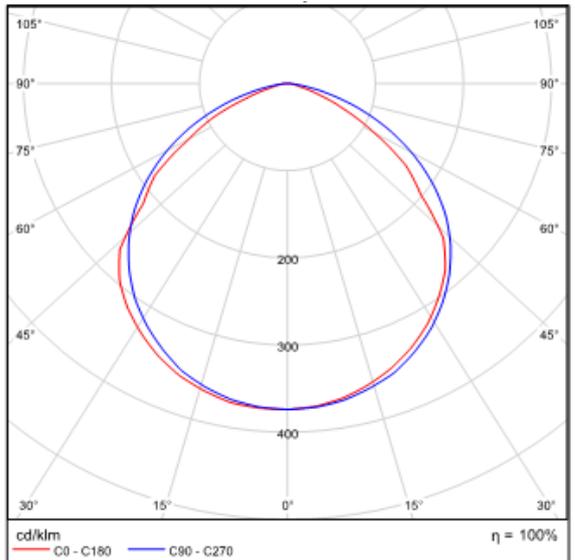
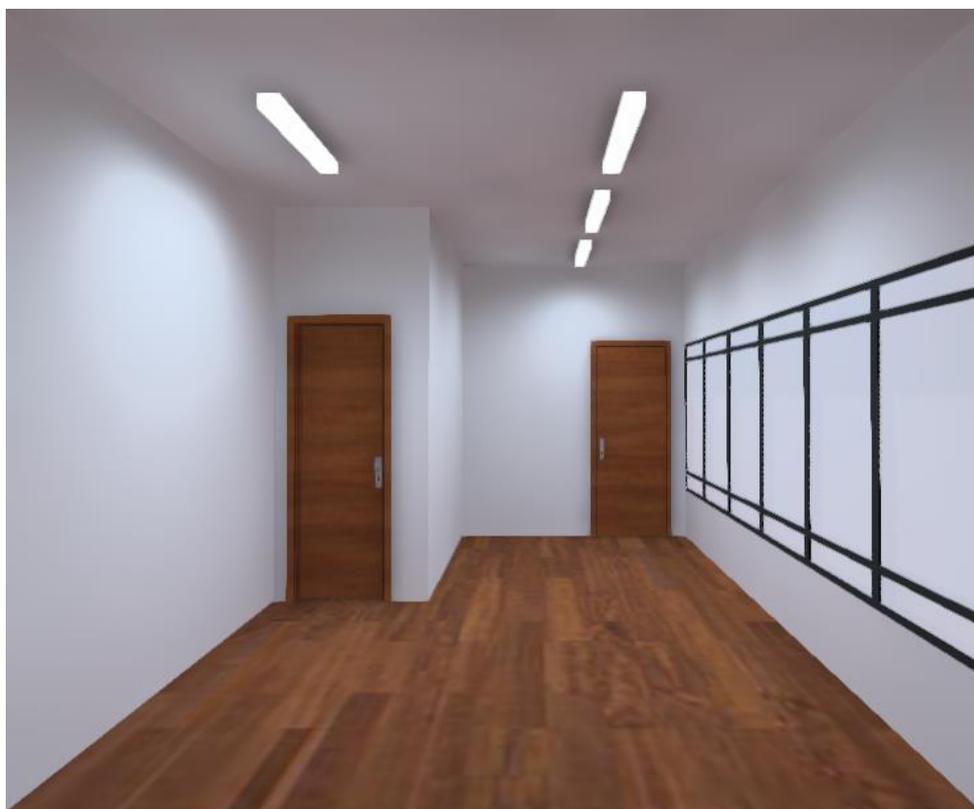
Característica	Descrição
Visão 3D	
Curva de distribuição luminosa polar	

Tabela 13 (conclusão)

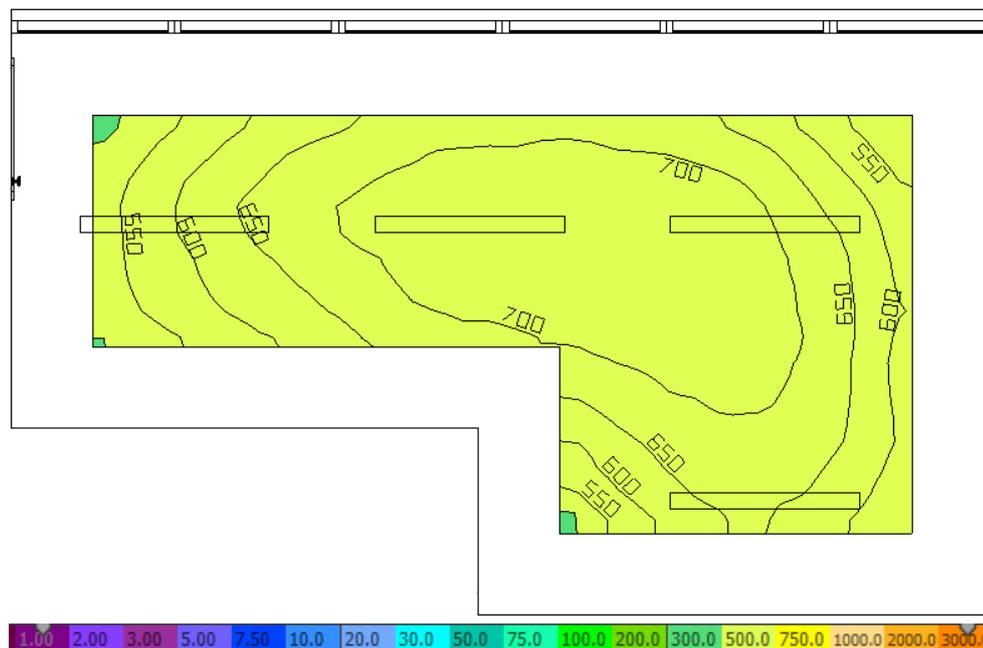
Característica	Descrição
Equipamento	Módulos de LED e driver integrados à luminária
Temperatura de cor	4.000 K (intermediária)
Índice de reprodução de cor	>80
Dimensões	1,154 x 0,102 x 0,072 m
Fluxo luminoso total	4.400 lm
Potência total	33,8 W
Rendimento luminoso	130,2 lm/W

Fonte: adaptado do catálogo Intral⁸.

Figura 35 - Visão 3D do sistema de iluminação proposto C

⁸ Disponível em: <<https://www.intral.com.br/pt/produtos/luminarias-led/aster/luminaria-aster>>. Acesso em: 06 fev. 2020.

Figura 36 - Representação das linhas isográficas do sistema de iluminação proposto C (valores em lux)



Os resultados obtidos a partir das simulações no programa de simulação foram apresentados resumidamente na Tabela 14.

Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos para os sistemas de iluminação propostos. Modelo de céu: sem luz natural

Característica	Proposta A	Proposta B	Proposta C
$E_{média}$	655 lx	646 lx	660 lx
$E_{mínima}$	507 lx	416 lx	486 lx
$E_{máxima}$	728 lx	734 lx	744 lx
Uniformidade	0,8	0,6	0,7
N.º de luminárias	4	3	4
Fluxo luminoso total	17.400 lm	18.000 lm	17.600 lm
Potência total	146,0 W	138,0 W	135,2 W
Rendimento luminoso	119,2 lm/W	130,4 lm/W	130,2 lm/W
Densidade de potência de iluminação	8,03 W/m ²	7,59 W/m ²	7,44 W/m ²
Densidade de potência de iluminação limite (DPI_L)	1,23 W/m ² por 100 lx	1,18 W/m ² por 100 lx	1,13 W/m ² por 100 lx

Considerando que um sistema de iluminação deve ser eficiente tanto em termos luminosos quanto em termos energéticos, foi analisado qual dos três sistemas apresentou a menor densidade de potência de iluminação limite (DPI_L). Ao comparar esse índice, notou-se

a diferença de até 8% entre os sistemas propostos. Por serem valores próximos, posteriormente foram analisadas as demais características dos sistemas. Portanto, o sistema proposto escolhido foi o sistema C, o qual apresentou ser mais eficiente tanto em termos energéticos quanto luminosos. Como as salas estudadas possuem as mesmas dimensões, o sistema de iluminação artificial escolhido foi empregado para as demais salas.

4.3 INTEGRAÇÃO DAS ILUMINAÇÕES ARTIFICIAL E NATURAL E USO DE SISTEMA DE DIMERIZAÇÃO

A partir da seleção do sistema de iluminação artificial com maior índice de desempenho energético e luminoso, a próxima etapa contemplou as simulações considerando a integração com a luz natural aliada a um sistema de dimerização vinculado à luz natural.

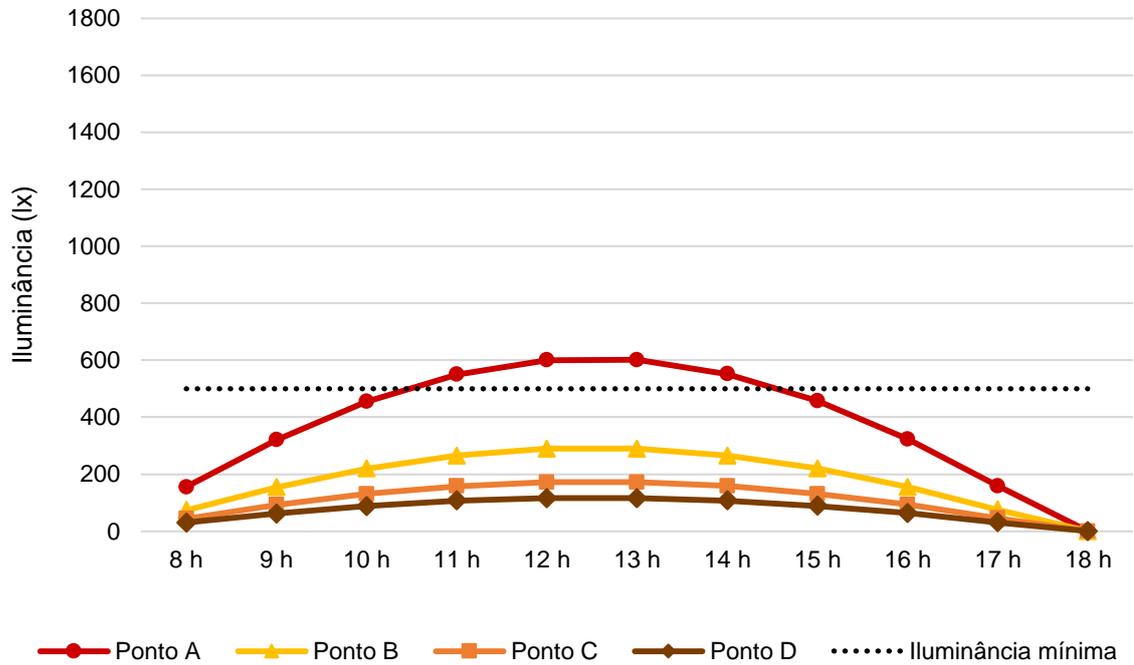
Apesar de as salas possuírem as mesmas dimensões, há salas com relação janela-parede diferentes, o que, conseqüentemente, afeta o aproveitamento da luz natural. Logo, foi selecionada uma sala representativa de cada orientação. A identificação dessas salas foi por meio de uma breve simulação com os mesmos dados de entrada apresentados neste capítulo, a qual englobou todas as salas do primeiro e segundo pavimentos. A partir dessa simulação, observou-se que os ambientes das salas 2 e 4 localizadas no primeiro pavimento recebiam menor incidência solar por serem mais influenciadas pelo entorno devido sua cota de nível. Portanto, por representarem a pior situação no quesito de aproveitamento da luz natural, as simulações desta etapa consideraram a orientação e a cota de nível dessas salas.

Após a inserção dos dados de entrada referentes à luz natural, foram simulados dois cenários de luz para a análise da distribuição da iluminância nos ambientes: um abordando apenas a luz natural e outro acrescentando 100% do fluxo luminoso das luminárias dispostas conforme Tabela 12.

Nas Figuras 37 e 38 estão apresentadas as curvas de distribuição para cada sala nos períodos de solstício de inverno e de verão. Observa-se que, ao considerar apenas a contribuição da luz natural nos ambientes, os pontos recebem iluminância inferior a 500 lx na maior parte do horário de expediente. Ou seja, a complementação com a iluminação artificial é necessária para garantir a segurança e o conforto visual dos usuários.

Figura 37 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 2 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural mais 0% da iluminação artificial

(a)



(b)

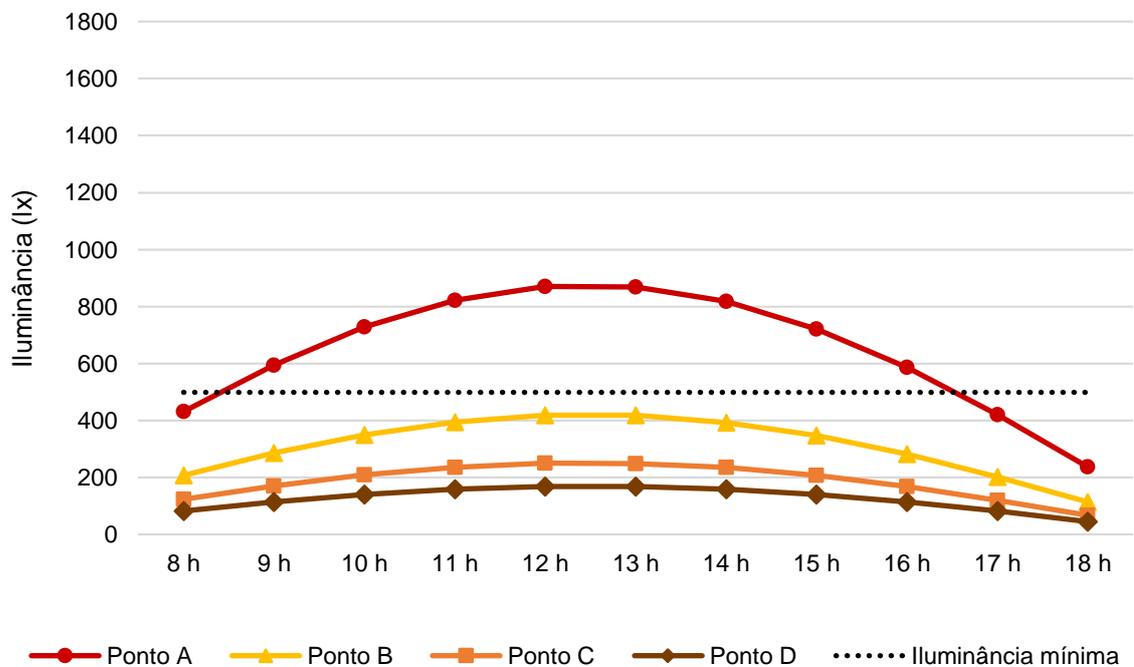
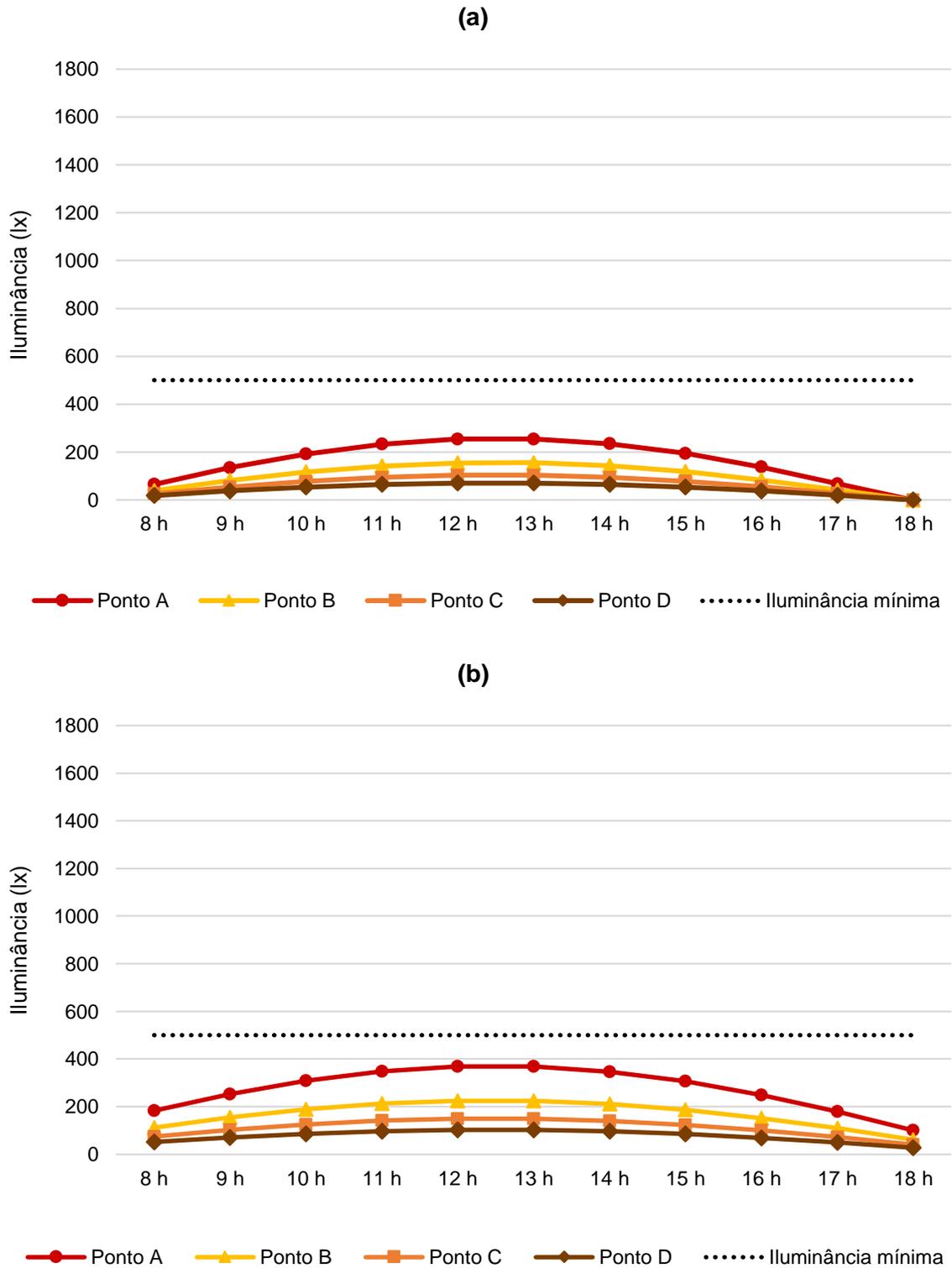


Figura 38 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 4 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural mais 0% da iluminação artificial



Ao acrescentar 100% do fluxo luminoso das luminárias, a iluminância permanece acima de 500 lx em todos os pontos, podendo alcançar até 1.600 lx no verão dependendo da orientação e da relação janela-parede (Figuras 39 e 40).

Figura 39 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 2 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural mais 100% da iluminação artificial

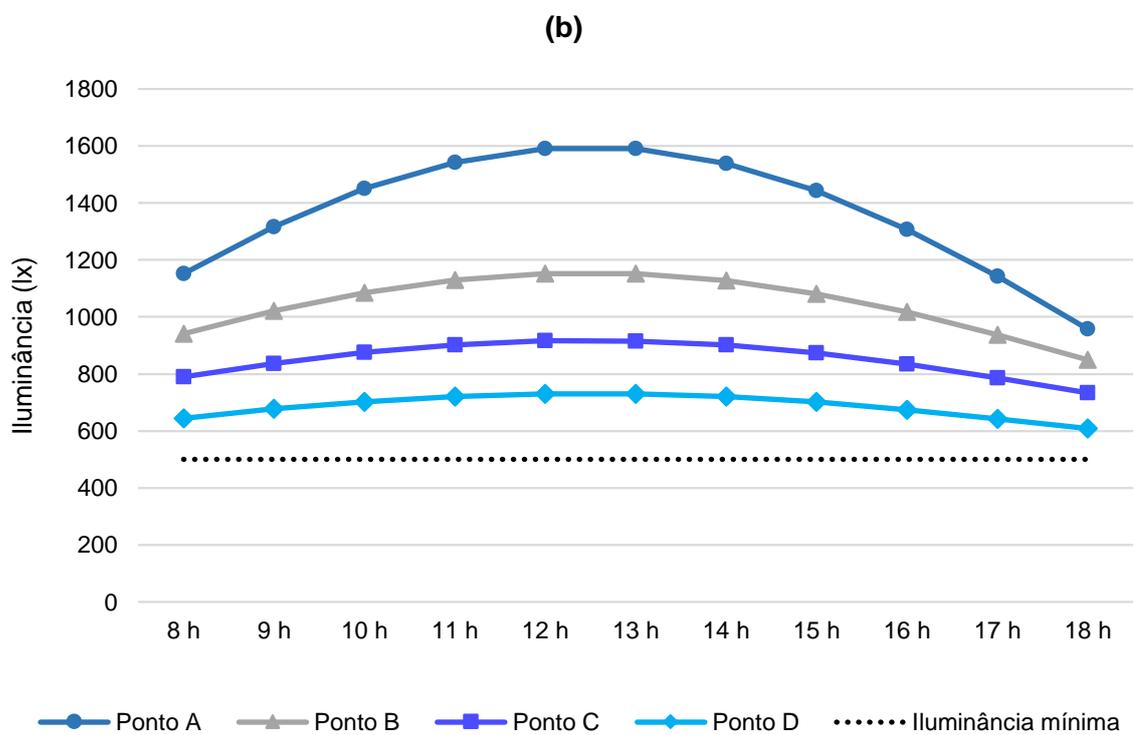
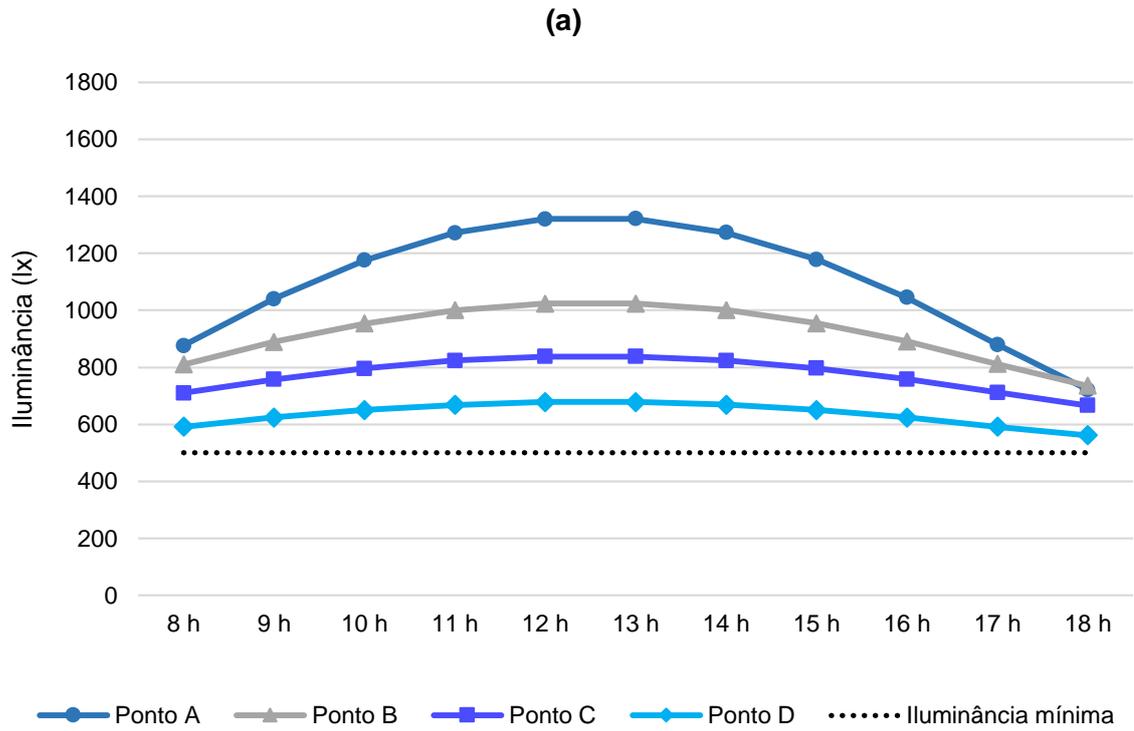
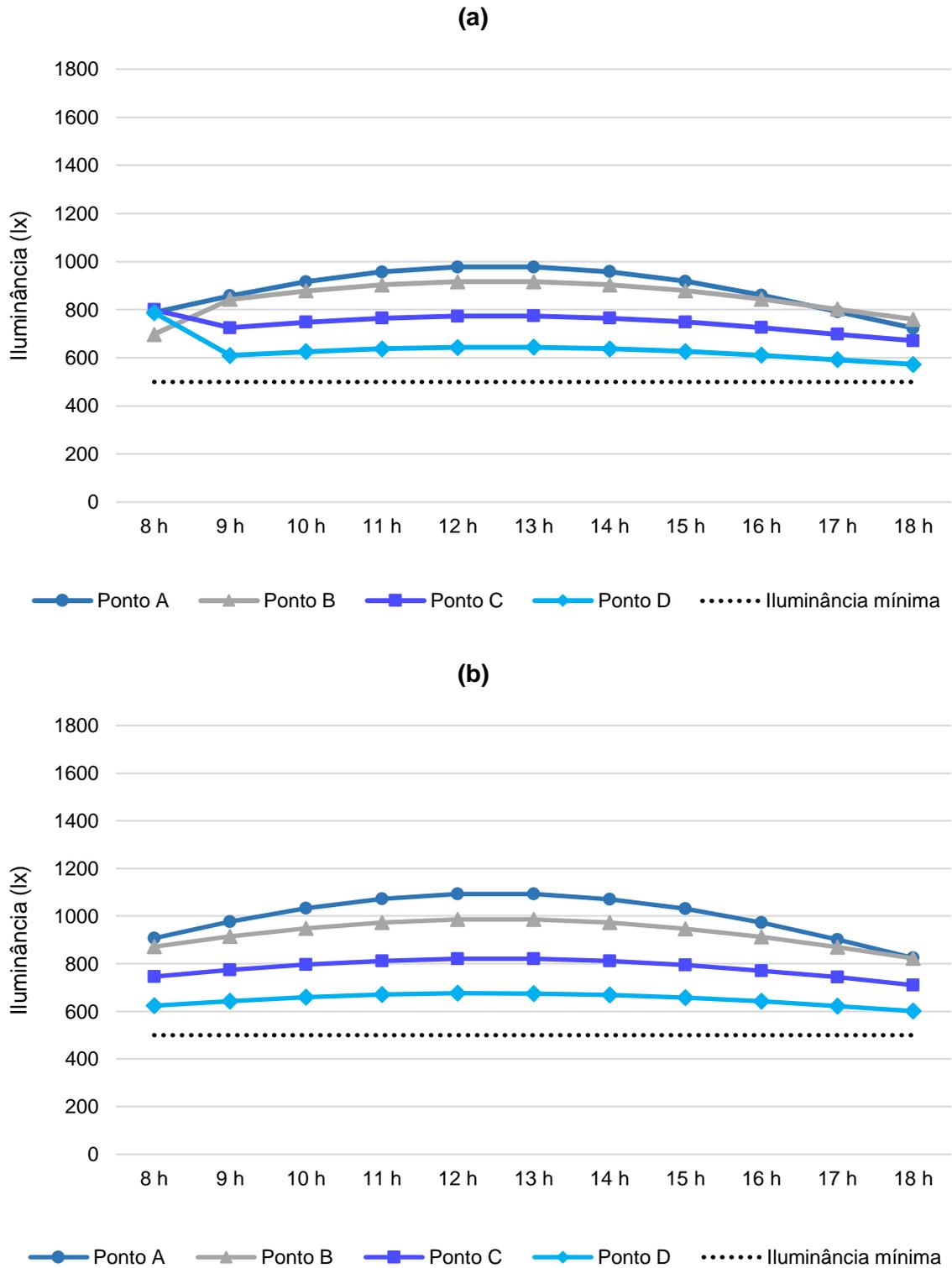


Figura 40 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 4 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural mais 100% da iluminação artificial



Como a iluminância pode atingir cerca de três vezes mais que o valor mínimo, foi utilizado um sistema de dimerização que permite reduzir o fluxo luminoso de saída das luminárias com o intuito de oferecer apenas o necessário para complementar a iluminância

advinda da luz natural. Deste modo, como a potência de saída das luminárias é proporcionalmente reduzida, pode-se obter economia de energia elétrica (Figuras 41 e 42).

Figura 41 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 2 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural integrada à iluminação artificial e aliados ao sistema de dimerização

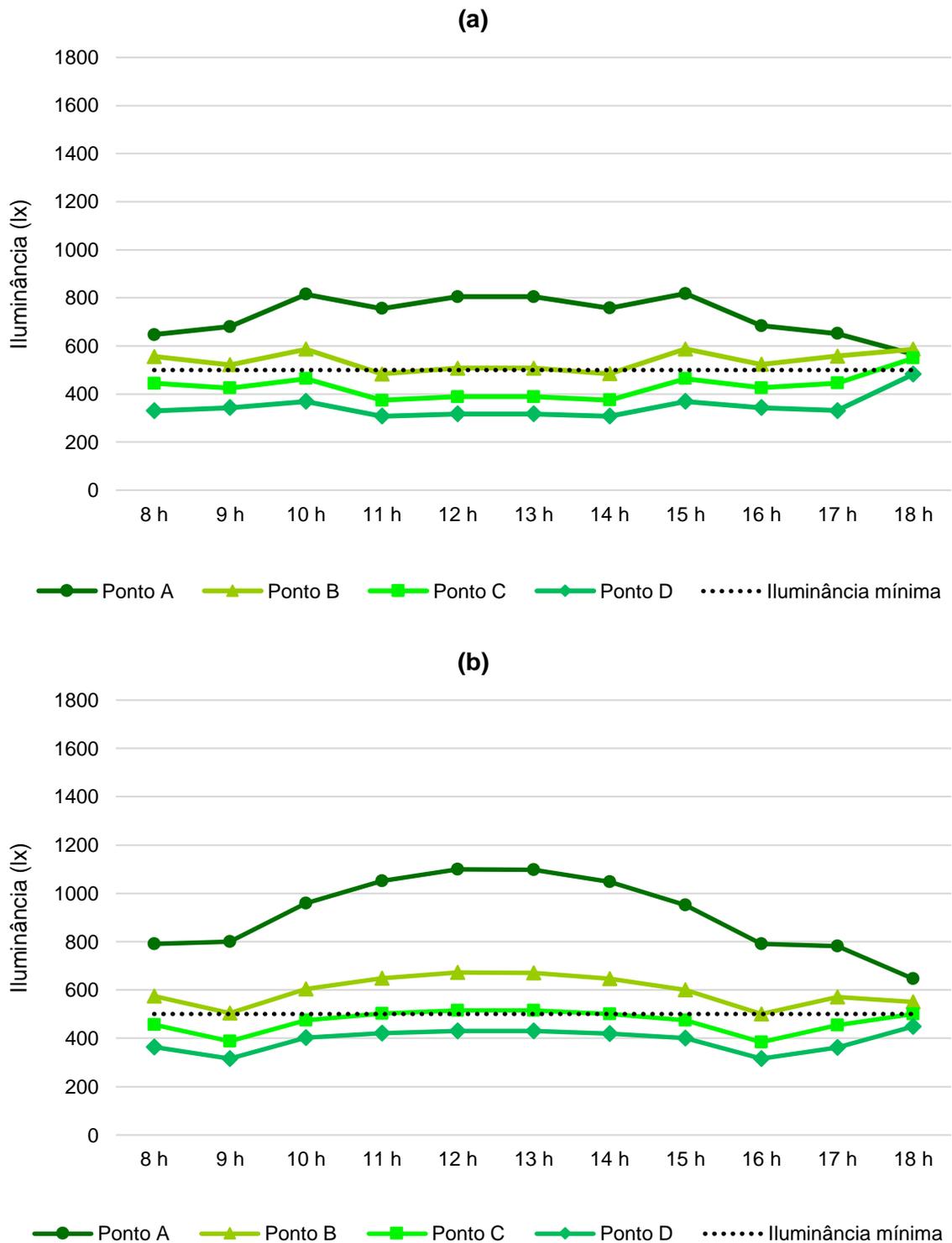
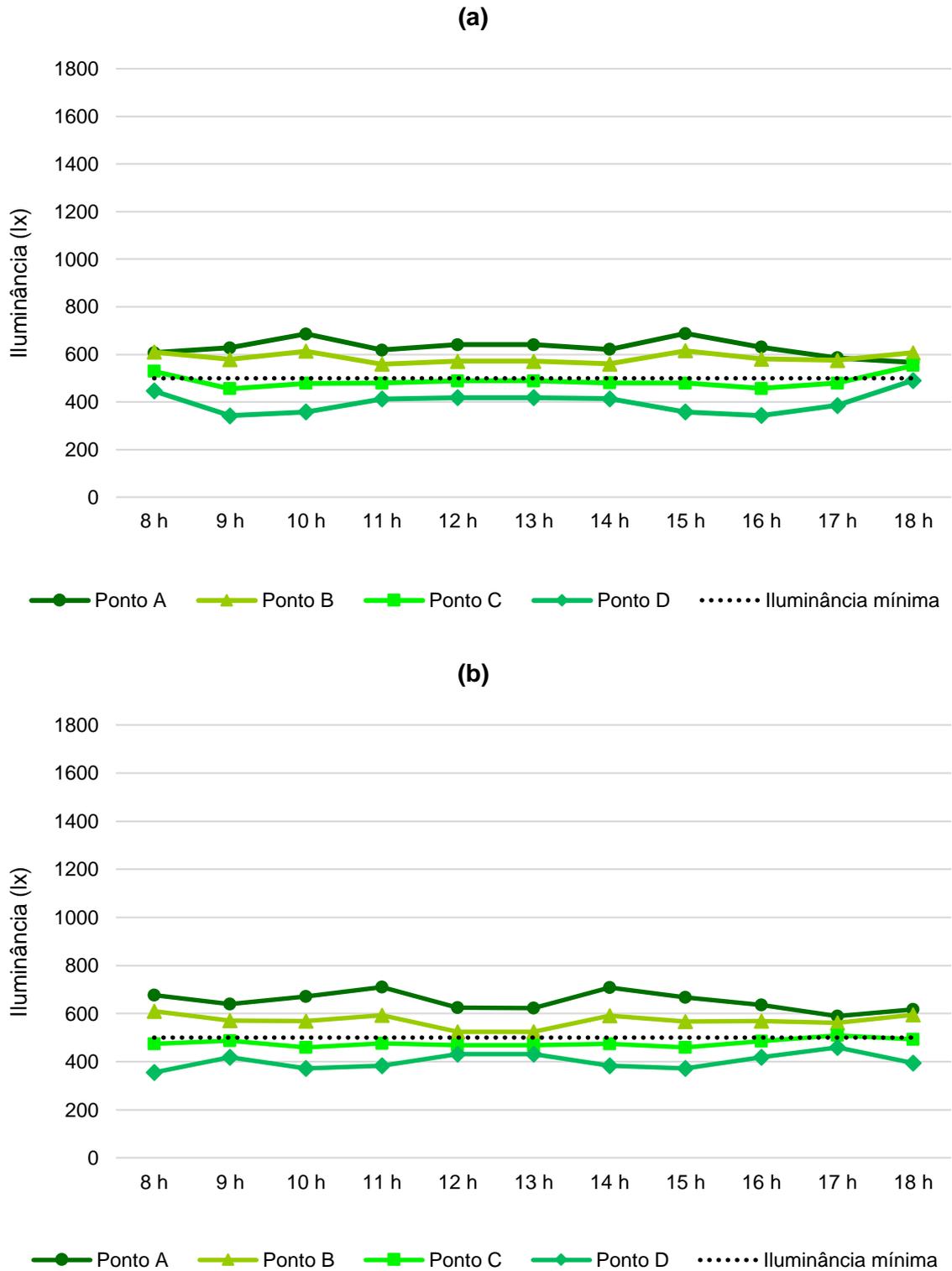


Figura 42 - Curvas de iluminância nos pontos do ambiente 4 durante o solstício de (a) inverno e (b) verão. Condição: luz natural integrada à iluminação artificial e aliados ao sistema de dimerização



A partir dos quatro pontos dispostos linearmente nos ambientes, constatou-se que aqueles mais próximos das aberturas recebem maior incidência solar e que, conforme maior

a distância das janelas, menor a iluminância nos pontos. Essa verificação permitiu a divisão do sistema de iluminação artificial em dois circuitos de alimentação, sendo um composto pelas 3 luminárias mais próximas das aberturas (Figura 43) e outro pela luminária mais distante das janelas (Figura 44), cada qual com seu interruptor próximo à entrada da sala.

As simulações iniciaram-se considerando 100% do fluxo luminoso de ambos os circuitos e, em seguida, esse fluxo foi sendo reduzido de 25 em 25% em cada circuito individualmente, até a porcentagem em que os requisitos mínimos de iluminância e uniformidade não fossem mais atendidos simultaneamente em nenhum horário do expediente. O resumo dos resultados obtidos nesta etapa foi apresentado no Apêndice A.

Figura 43 - Grupo 1 mais próximo das aberturas

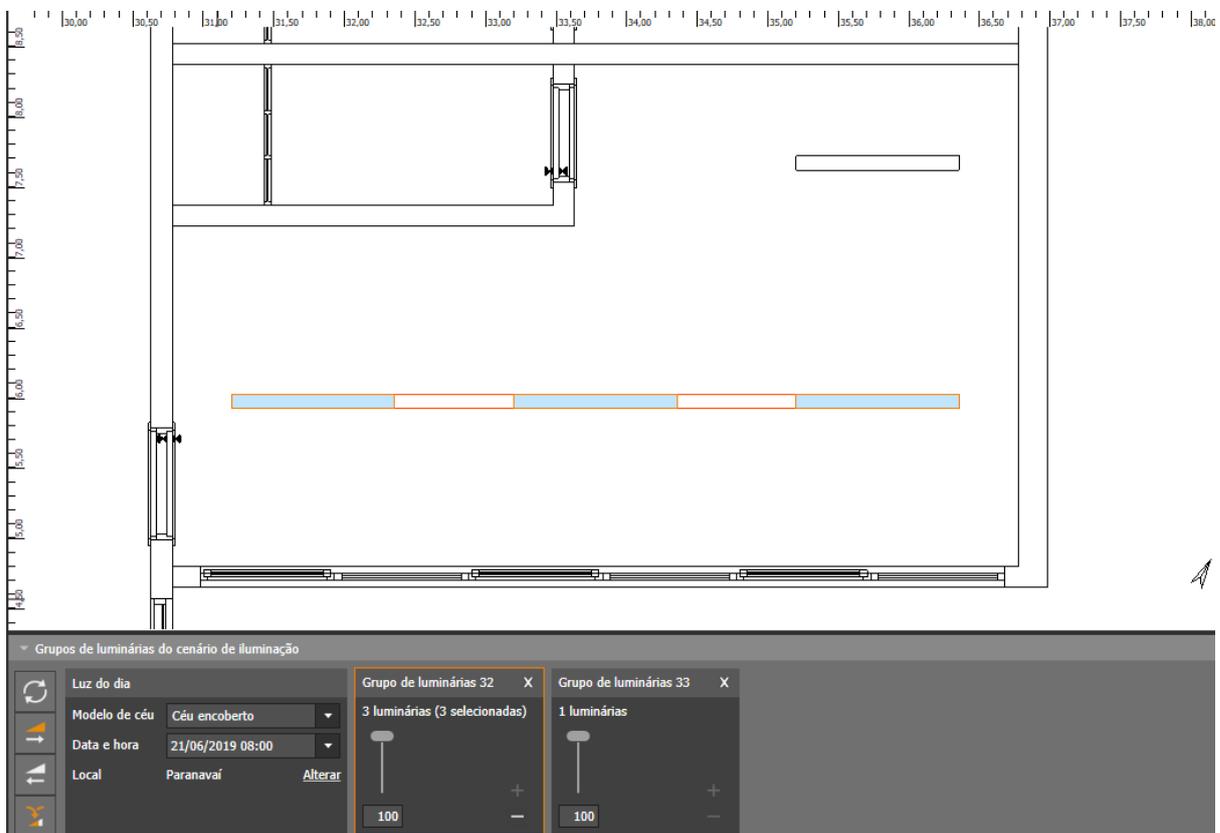
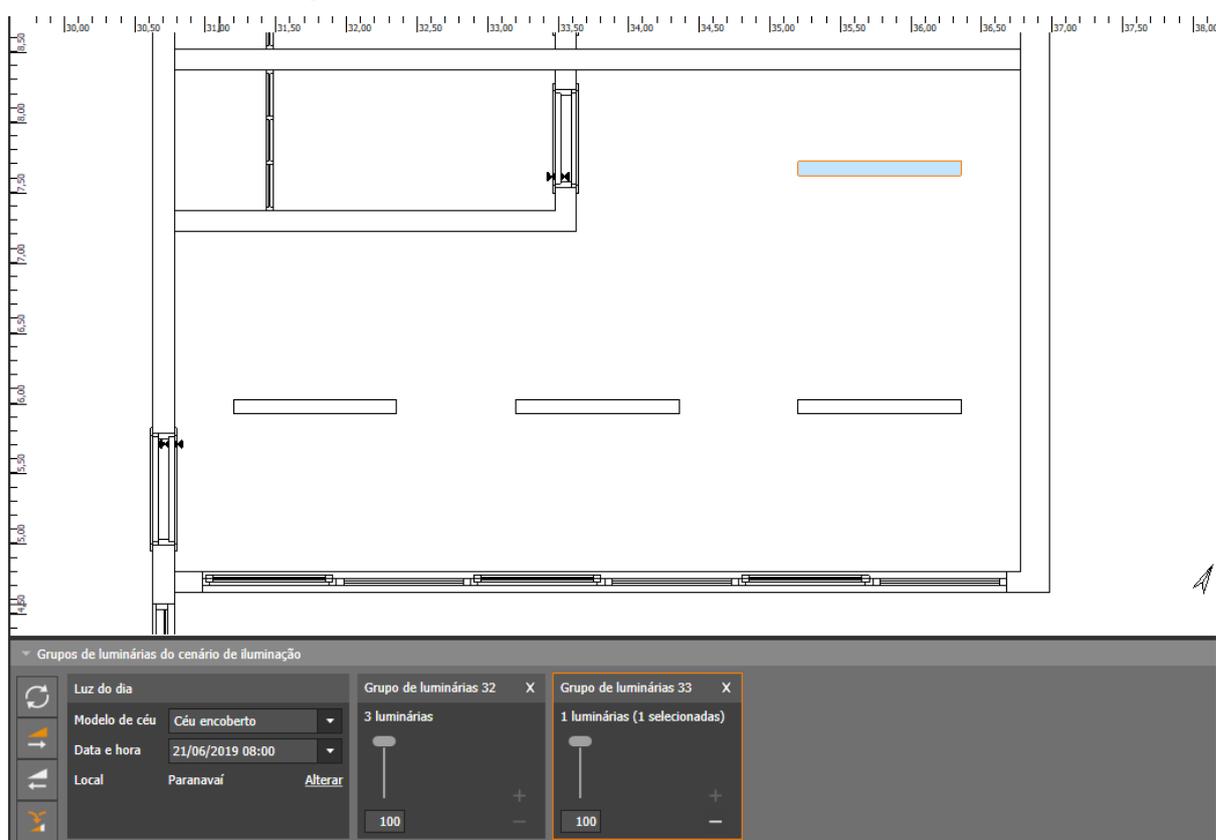


Figura 44 - Grupo 2 mais distante das aberturas

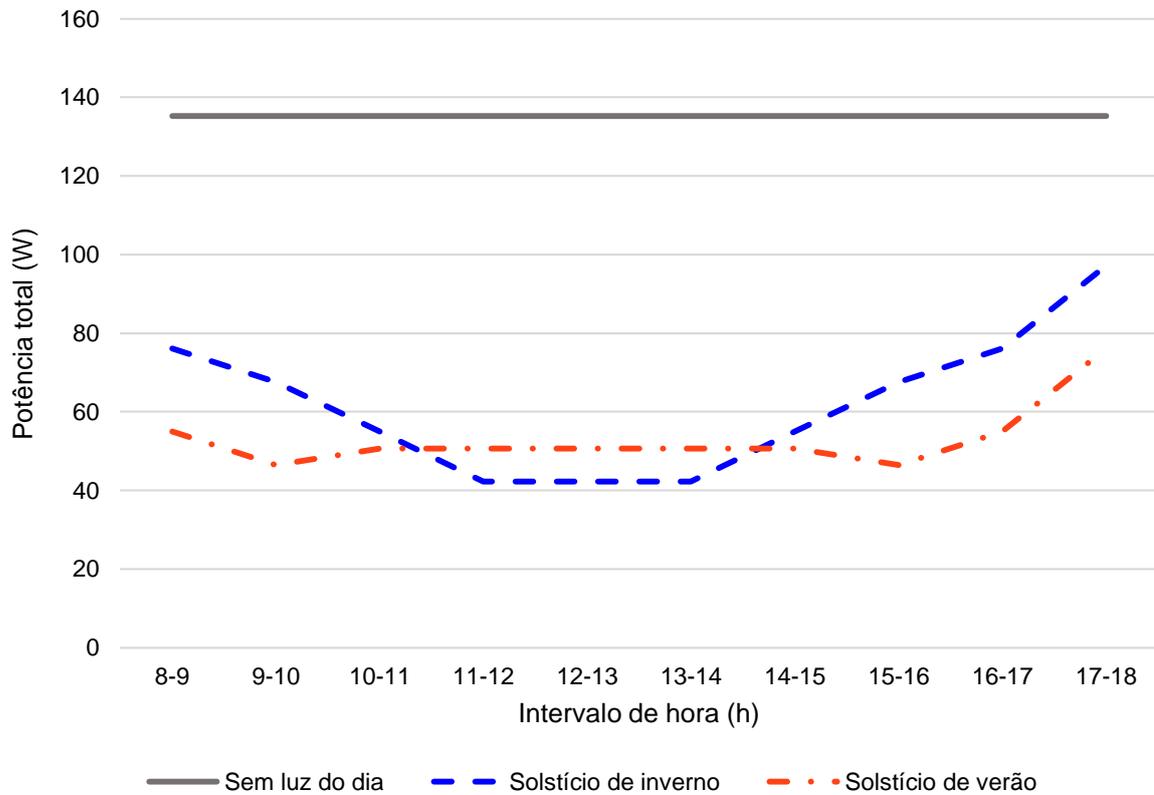


Após essas simulações, foi analisado qual era o menor fluxo possível de hora em hora que garantia a iluminância média, a uniformidade e o menor consumo de eletricidade de modo simultâneo.

No ambiente de trabalho da sala 2, que representa as salas orientadas para a fachada principal, ao considerar cenário sem luz natural, o consumo de energia elétrica atingiria 1.352,0 W/dia de expediente, enquanto que, ao integrar a luz natural e aliar um sistema de dimerização vinculado à luz natural que varia o fluxo luminoso de 25 em 25%, o consumo de eletricidade seria em torno de 532,4 a 621,1 W/dia de expediente. Essa medida poderia economizar em média 61% de energia elétrica por dia de trabalho.

A Figura 45 mostra graficamente a variação da potência total utilizada no sistema de iluminação para os diferentes horários de expediente (8 h - 18 h) e condições de cenário do ambiente da sala 2. Quando a luz natural não é considerada, é necessário 100% do fluxo luminoso das luminárias, ou seja, a potência total do sistema se manteria a 135,2 W durante todo o período de trabalho. Ao utilizar a iluminação artificial para complementar a luz natural com o auxílio de sistema de dimerização vinculado à luz natural, seria necessário entre 31 e 72% do fluxo luminoso/potência total do sistema de iluminação artificial.

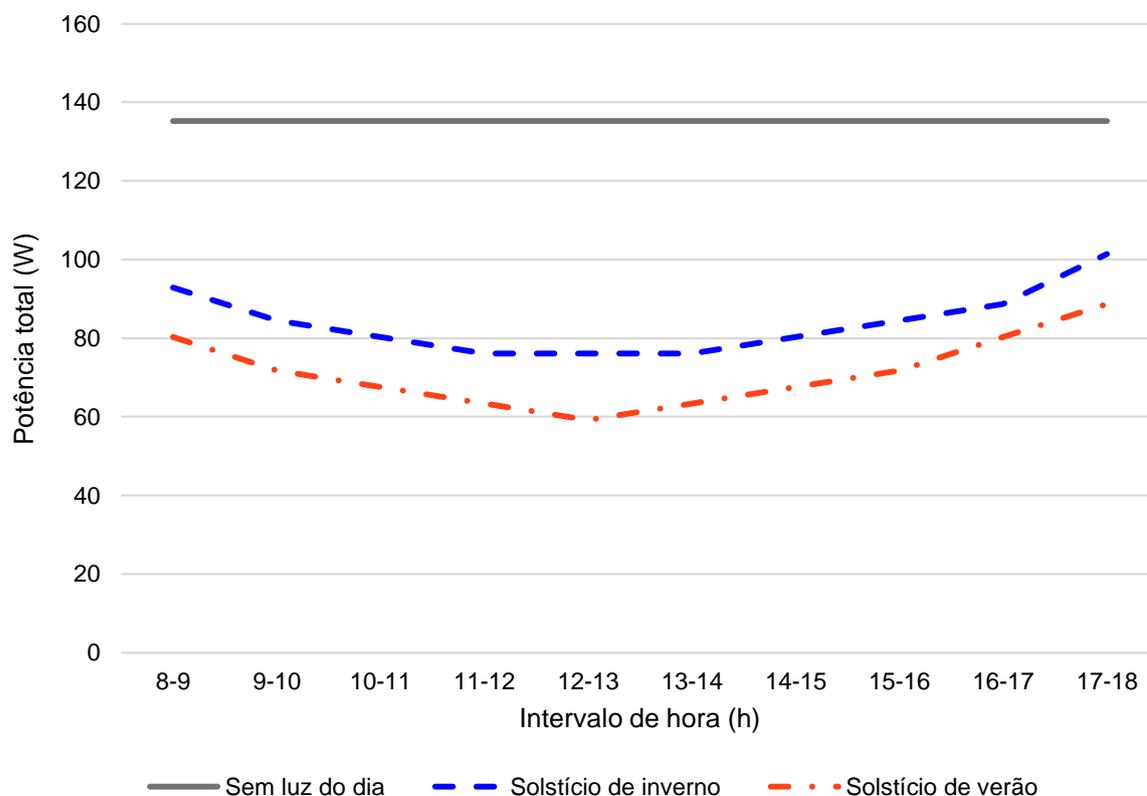
Figura 45 - Comparação entre a potência total do sistema para as condições de cenário do ambiente da sala 2



Ao considerar a mesma situação para o ambiente da sala 4, a qual representa as salas orientadas na fachada oposta à principal, o consumo de eletricidade em cenário sem luz natural seria a mesma que a anterior, ou seja, 1.352,0 W/dia de expediente. No entanto, a partir da integração da luz natural e do uso de um sistema de dimerização vinculado à luz natural, o consumo seria entre 714,0 e 840,8 W/dia de trabalho aproximadamente, o que economizaria até 47% de eletricidade por dia de expediente.

Na Figura 46, observa-se graficamente a variação da potência total utilizada no sistema de iluminação durante o expediente de trabalho (8 h - 18 h) e condições de cenário do ambiente da sala 4. Quando a luz solar não é considerada, é necessário o fluxo luminoso total das luminárias, ou seja, o sistema consumiria 135,2 W ao longo do período de trabalho. Ao utilizar a iluminação artificial para complementar a luz natural em conjunto com um sistema de dimerização vinculado à luz natural, seria necessário entre 44 e 75% do fluxo luminoso/potência total do sistema de iluminação artificial.

Figura 46 - Comparação entre a potência total do sistema para as condições de cenário do ambiente da sala 4



A diferença da economia de energia elétrica entre os ambientes das salas representativas foi devido à relação janela-parede e à orientação das aberturas. Enquanto que o ambiente da sala 2 possui relação janela-parede de 54% e orientação das aberturas à noroeste, o ambiente da sala 4 tem relação janela-parede de 19% e suas aberturas estão orientadas à sudeste.

A distribuição da iluminância nos pontos analisados (A, B, C e D) também foi verificada após a obtenção dos sistemas de iluminação otimizados. Notou-se que tanto nos ambientes orientados a noroeste quanto nos orientados a sudeste, a iluminância permaneceu próxima de 500 lx, ou seja, o sistema que englobou a integração com a luz natural e o dispositivo de controle de iluminação artificial ofereceu iluminância uniforme em todos os pontos e horas do dia.

4.4 COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO SIMULADOS

A Tabela 15 apresenta resumidamente os principais resultados obtidos para os sistemas de iluminação simulados. Como mencionado no Capítulo 3 - Metodologia,

considerou-se como área de trabalho toda a área do ambiente das salas menos uma faixa marginal de 0,50 m de largura e o plano de uso a 0,75 m do piso.

Tabela 15 - Resumo dos valores obtidos de acordo com sistemas de iluminação para cada ambiente de sala

	Sistema de iluminação artificial existente	Sistema de iluminação artificial proposto	Sistema de iluminação artificial proposto + luz natural + sistema de dimerização	
			Orientação: noroeste	Orientação: sudeste
E_{média}	292 lx	660 lx	≥ 500 lx	≥ 500 lx
U	0,7	0,7	≥ 0,6	≥ 0,6
DPI_L	3,01 W/m ² por 100 lx	1,13 W/m ² por 100 lx	-	-
Potência¹	1.600,0 W	1.352,0 W	532,4 a 621,1 W	714,0 e 840,8 W

¹ Potência total por dia de expediente (8 h - 18 h).

A partir da Tabela 15, é possível realizar três comparações, sendo que a primeira é entre o sistema de iluminação artificial existente e o proposto. Ao substituir as lâmpadas fluorescentes por luminárias LED, além da iluminância média atender ao recomendado pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013), a densidade de potência de iluminação limite (DPI_L) apresenta uma melhoria de mais de 60%. Isto é, o sistema de iluminação proposto consome menos energia elétrica na área de trabalho e ainda garante a segurança e o conforto visual ao oferecer iluminância média adequada a atividades de escritório.

Como observado na Tabela 15, o rendimento luminoso das lâmpadas empregadas no sistema existente não é suficiente para alcançar a iluminância requerida no plano de uso. Para atingir pelo menos 500 lx, a quantidade e/ou o fluxo luminoso das lâmpadas teria que ser maior, o que, conseqüentemente, aumentaria a potência total do sistema. No entanto, considerando a situação atual, a economia de eletricidade com a substituição do tipo de luminária/lâmpada empregada foi de 15,5%. Byun e Shin (2018), que também avaliaram a influência da troca de lâmpadas fluorescentes por LED em ambientes de escritório, obtiveram redução de 27,6% no consumo de energia elétrica.

A segunda comparação é entre o sistema de iluminação artificial proposto e o sistema que engloba a luz natural e o *dimmer*. Ao utilizar esse dispositivo de controle de iluminação artificial, a DPI_L varia conforme a disponibilidade da luz natural, mas não ultrapassa o valor de 1,13 W/m² por 100 lx. A economia de eletricidade variou entre 38 e 61% dependendo da orientação e da dimensão das aberturas. Como as simulações consideraram o modelo de céu

encoberto, a economia de energia elétrica pode ser maior ou menor ao obtido neste estudo pelo fato da incidência solar variar ao longo do dia.

Como mencionado por Susorova *et al.* (2013), em climas quentes e temperados, as salas orientadas a norte com janelas grandes consomem menos energia elétrica que as orientadas a sul com janelas pequenas, o que justifica a diferença na economia das salas avaliadas nesse estudo. Também a respeito das dimensões das aberturas, Shishegar e Boubekri (2017) comentaram que, quanto maior a relação janela-parede, maior a economia de energia de iluminação e menor a economia de energia de resfriamento devido à maior exposição à luz solar.

Por fim, a terceira comparação é entre o sistema de iluminação existente e o sistema de iluminação artificial proposto integrado à luz natural e ao sistema de dimerização vinculado à luz natural. Observa-se que, além da evidente melhora no desempenho luminoso, a substituição do sistema existente pelo sistema otimizado pode gerar economia de cerca de 67% no consumo de eletricidade.

5. CONCLUSÕES

Por meio de simulação computacional envolvendo características do sistema de iluminação existente e frente aos requisitos mínimos recomendados pela NBR ISO/CIE 8995-1/2013, os resultados obtidos mostraram que, apesar da uniformidade ser maior que 0,6, a iluminância média na área de trabalho atinge cerca de 292 lx, valor 42% inferior ao recomendado. Para o índice de densidade de potência de iluminação limite (DPI_L), o sistema existente apresentou 3,01 W/m² por 100 lx.

A simulação de modelos e arranjos de luminárias LED de sobrepor que garantiam os requisitos mínimos de segurança visual dos usuários indicou que o modelo C foi o mais eficaz para substituir o sistema de iluminação existente nos ambientes, o qual apresentou a menor densidade de potência de iluminação limite (1,13 W/m² por 100 lx).

Considerando-se este sistema de iluminação artificial, foi realizada a integração com a luz natural aliada a um sistema de dimerização vinculado à luz natural para se obter economia de eletricidade por meio da regulagem do fluxo luminoso das luminárias fornecendo apenas o necessário para complementar a luz solar incidente nos ambientes. As luminárias foram divididas em dois circuitos de alimentação, apontando que o sistema de iluminação otimizado consumiria cerca de 532,4 a 621,1 W por dia de trabalho no ambiente da sala 2 e em torno de 714,0 e 840,8 W por dia de expediente no ambiente da sala 4.

Destacam-se as seguintes considerações sobre o estudo realizado:

- O sistema de iluminação artificial existente no ambiente das salas estudadas não atende ao valor de iluminância média recomendada pela NBR ISO/CIE 8995-1/2013;

- Ao substituir o sistema de iluminação existente por outro composto por luminárias LED, seria obtida a economia de 15,5% no consumo de energia elétrica, além de oferecer melhor desempenho luminoso que garantiria o conforto visual dos usuários em termos de uniformidade e iluminância média simultaneamente na área de trabalho;

- Ao integrar a luz natural nos ambientes e utilizar um sistema de dimerização vinculado à luz natural, é possível economizar até 61% de eletricidade por dia de expediente de trabalho nas salas com aberturas orientadas a noroeste e até 47% naquelas com janelas orientadas a sudeste. Além da orientação das aberturas das salas, essa diferença na economia de energia elétrica deve-se também à relação janela-parede: enquanto as salas com aberturas

orientadas a noroeste (fachada principal) possuem relação janela-parede de 54%, as orientadas a sudeste têm relação janela-parede de 19%.

A substituição do sistema de iluminação existente por sistemas mais eficazes gera não somente benefícios econômicos, mas também pode reduzir o impacto ambiental devido às emissões de gases de efeito estufa e melhorar os níveis de conforto interno.

Tendo em vista que as simulações se basearam em níveis de iluminação mínimos recomendados por normas e que a satisfação dos usuários é um requisito importante a ser garantido, a preferência por níveis de iluminação maiores ou menores que os considerados neste estudo pode variar devido a diversos fatores que influenciam no comportamento humano.

Apesar das comparações terem indicado o sistema de iluminação mais eficaz em termos luminosos e energéticos, é necessária abordagem abrangente que envolva custos com equipamentos necessários para o funcionamento dos sistemas para a ratificação do mais oportuno.

O estudo considerou o tipo de céu encoberto por representar a pior situação de aproveitamento da luz natural, ou seja, por retratar as condições mínimas de luz natural no ambiente. Porém, com base na revisão bibliográfica apresentada, há o conhecimento de que, em condições de céu limpo, a incidência solar direta pode provocar ganho de calor no ambiente e desconforto visual devido ao brilho excessivo, ocasionando o possível fechamento de cortinas/venezianas e anulando qualquer aproveitamento da luz natural. Logo, futuras simulações podem ser realizadas considerando o tipo de céu limpo e seus reflexos nos confortos visual e térmico.

Ressalta-se que as conclusões apresentadas são válidas apenas para as salas analisadas neste trabalho, com mesmas dimensões, refletâncias, orientações, texturas, etc.

Como sugestão para futuros trabalhos, recomenda-se as seguintes abordagens complementares a esse estudo:

- Apesar de algumas salas terem persianas/venezianas instaladas por conta do inquilino, o presente estudo não considerou a existência desses nas simulações. Portanto, recomenda-se a avaliação da influência de dispositivos de proteção solar no consumo de eletricidade e nos confortos visual e térmico dos usuários;

- Por se tratar de salas comerciais alugadas temporariamente e considerando a natureza estocástica do comportamento humano, sugere-se também a consideração da influência dos usuários no consumo de energia elétrica.

Por fim, declara-se que não há qualquer vínculo com as fabricantes de luminárias citadas, sendo que as mesmas foram selecionadas aleatoriamente apenas para fins de estudo.

REFERÊNCIAS

- ABESCO. **O que é Eficiência Energética? (EE)**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficiencia-energetica-ee/>>. Acesso em: 18 fev. 2019.
- ACOSTA, I.; MUÑOZ, C.; ESQUIVIAS, P.; MORENO, D.; NAVARRO, J. Analysis of the accuracy of the sky component calculation in daylighting simulation programs. **Solar Energy**, v. 119, p. 54-67, 2015.
- ALMEIDA, A. M.; MARTINS, A. G. Efficient lighting in buildings: The lack of legislation in Portugal. **Energy Policy**, v. 67, p. 82-86, 2014.
- ALRUBAIH, M. S.; ZAIN, M. F. M; ALGHOUL, M. A.; IBRAHIM, N. L. N; SHAMERI, M. A.; ELAYEB, O. Research and development on aspects of daylighting fundamentals. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 494-505, 2013.
- ALVES NETTO, A. R.; BARRETO, D.; AKUTSU, M. Simulação de melhoria no desempenho lumínico de edifício por meio do uso de prateleiras de luz. *In*: **9º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção e 6º Encontro Latino Americano de Gestão e Economia da Construção**. São Carlos, 2015.
- AMAN, M. M.; JASMON, G. B.; MOKHLIS, H.; BAKAR, A. H. A. Analysis of the performance of domestic lighting lamps. **Energy Policy**, v. 52, p. 482-500, 2013.
- AMORIM, C. N. D. Estratégias de Projeto para uma Arquitetura Sustentável. Parte I do texto "Iluminação Natural e Eficiência Energética". **Paranoá: periódico eletrônico de arquitetura e urbanismo**, Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, UnB, Brasília, 2002.
- ARIES, M. B. C.; AARTS, M. P. J.; VAN HOOFF, J. Daylight and health: A review of the evidence and consequences for the built environment. **Lighting Research and Technology**, v. 47, p. 1-22, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-4: Iluminação natural. Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - Método de medição**. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho – Parte 1: Interior**. Rio de Janeiro, 2013.

BELLIA, L.; FRAGLIASSO, F.; STEFANIZZI, E. Why are daylight-linked controls (DLCs) not so spread? A literature review. **Building and Environment**, v. 106, p. 301-312, 2016.

BODART, M.; DE HERDE, A. Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting. **Energy and Buildings**, v. 34, p. 421-429, 2002.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 734-755, 2016.

BRASIL. **Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000**. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2000.

BRASIL. **Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001**. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2001.

BRASIL. **Portaria Interministerial nº 1.007, de 31 de dezembro de 2010**. Ministério de Minas e Energia. 2010. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/904396/Portaria_interminestral+1007+de+31-12-2010+Publicado+no+DOU+de+06-01-2011/d94edaad-5e85-45de-b002-f3ebe91d51d1?version=1.1>. Acesso em: 26 jun. 2019.

BÜLOW-HÜBE, H. **Energy-Efficient Window Systems - Effects on Energy Use and Daylight in Buildings**. 2001. Tese (Department of Construction and Architecture) – Lund University, Division of Energy and Building Design, Lund.

BURATTINI, C.; PICCARDI, L.; CURCIO, G.; FERLAZZO, F.; GIANNINI, A. M.; BISEGNA, F. Cold LED lighting affects visual but not acoustic vigilance. **Building and Environment**, v. 151, p. 148-155, 2019.

BYUN, J.; SHIN, T. Design and implementation of an energy-saving lighting control system considering user satisfaction. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 64, n. 1, p. 61-68, 2018.

CAMPBELL, N. Capturing the multiple benefits of energy efficiency. **International Energy Agency (IEA), Paris, France**, 2014.

CHIRADEJAA, P.; NGAOPITAKKUL, A.; JETTANASEN, C. Energy savings analysis and harmonics reduction for the electronic ballast of T5 fluorescent lamp in a building's lighting system. **Energy and Buildings**, v. 97, p. 107-117, 2015.

CHITNIS, D.; KALYANI, N. T.; SWART, H. C.; DHOBLE, S. J. Escalating opportunities in the field of lighting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 727-748, 2016.

CHOUDHURY, A. K. R. 1 - Characteristics of light sources. *In*: CHOUDHURY, A. K. R. **Principles of Colour and Appearance Measurement**. Woodhead Publishing, 2014, p. 1-52.

CHRISTOFFERSEN, J. ADELIN 3. Advanced daylighting and electric-lighting integrated new environment. SUPERLINK/RADLINK. User's manual: Solar Heating & Cooling Programme. International Energy Agency, IEA, 2000.

COHEN, M. F.; GREENBERG, D. P. **The hemi-cube**: A radiosity solution for complex environments. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Nova Iorque, v. 19, n. 3, p. 31-40, 1985.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **CIE 171: 2006 - Test cases to assess the accuracy of lighting computer programs**. Viena, 2006. 97 p.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **ISO 15469:2003 – Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky**. Viena, 2003. 10 p.

DAYSIM. **Programa Computacional Daysim**. Disponível em: <www.daysim.com>. Acesso em: 21 out. 2020.

DELZENDEH, E.; WU, S.; LEE, A.; ZHOU, Y. The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1061-1071, 2017.

DESIGNBUILDER. **DesignBuilder Software Limited**. 2020. Disponível em: <<https://designbuilder.co.uk/>>. Acesso em: 21 out. 2020.

DIAL GMBH. **DIALux - DIAL**. 2019. Disponível em: <<https://www.dial.de/en/dialux/>>. Acesso em: 09 jan. 2019.

DIAL GMBH. **DIALux 4 with new improved calculation kernel**. 2016a. Disponível em: <<https://dialux4.support-en.dial.de/helpdesk/attachments/9005537029>>. Acesso em: 09 jan. 2019.

DIAL GMBH. **DIALux evo – new calculation method**. 2016b. Disponível em: <<https://evo.support-en.dial.de/helpdesk/attachments/9005542781>>. Acesso em: 09 jan. 2019.

DUBOIS, M. C.; BLOMSTERBERG, A. Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 2572-2582, 2011.

Electronic Code of Federal Regulations. **Title 16 - Commercial Practices. Chapter I - Federal Trade Commission. Subchapter C - Regulations under specific acts of congress. Part 305 - Rule concerning disclosures regarding energy consumption and water use of certain home appliances and other products required under the energy policy and conservation act ("appliance labeling rule")**. 2019. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=a9671d778b45180f5e35a431fd34fe9c&mc=true&node=pt16.1.305&rgn=div5#_top>. Acesso em: 30 jul. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2019: Relatório síntese/Ano base 2018**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2019.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus**. U.S. Department of Energy. 2020. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 21 out. 2020.

EQUEST. **eQUEST - The Quick Energy Simulation Tool**. 2020. Disponível em: <<http://www.doe2.com/equest/>>. Acesso em: 21 out. 2020.

FASI, M. A.; BUDAIWI, I. M. Energy performance of windows in office buildings considering daylight integration and visual comfort in hot climates. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 307-316, 2015.

FERNANDES, L. O.; LOPES, F. da S. D.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Potencial do uso da iluminação natural com *dimmers* e persianas automatizadas: estudo de edifício de pequeno porte com uso comercial para diferentes orientações em clima tropical. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 217-235, 2018.

GAGO, E. J.; MUNEEER, T.; KNEZ, M.; KÖSTER, H. Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1-13, 2015.

GENTILE, N.; LAIKE, T.; DUBOIS, M. C. Lighting control systems in individual offices rooms at high latitude: Measurements of electricity savings and occupants' satisfaction. **Solar Energy**, v. 127, p. 113–123, 2016.

GHISI, E.; TINKER, J. A. An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. **Building and Environment**, v. 40, p. 51-61, 2005.

GRAPHISOFT. **Archicad**. 2019. Disponível em: <<https://graphisoft.com/solutions/products/archicad>>. Acesso em: 09 jan. 2019.

HAQ, M. A. U.; HASSAN, M. Y; ABDULLAH, H.; RAHMAN, H. A.; ABDULLAH, M. P.; HUSSIN, F.; SAID, D. M. A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 268-279, 2014.

IKUZWE, A.; YE, X; XIA, X. Energy-maintenance optimization for retrofitted lighting system incorporating luminous flux degradation to enhance visual comfort. **Applied Energy**, v. 261, 114379, 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades**. 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 08 jan. 2020.

IEA. **Electricity Information 2019 overview**. IEA, Paris. 2019a. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/electricity/>>. Acesso em: 25 out. 2019.

IEA. **Tracking Buildings**. IEA, Paris. 2019b. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/tracking-buildings#>>. Acesso em: 14 jan. 2020.

IEA. **Electricity**. IEA, Paris. 2019c. Disponível em: <<http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-1118783123/1>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

INTRAL. **Intral**. 2020a. Disponível em: <<https://www.intral.com.br/pt/intral/>>. Acesso em: 06 fev. 2020.

JANJAI, S.; PLAON, P. Estimation of sky luminance in the tropics using artificial neural networks: Modeling and performance comparison with the CIE model. **Applied Energy**, v. 88, p. 840-847, 2011.

JENSEN, H. W. **Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping**. Nova Iorque: A K Peters/CRC Press, 2001.

KALYANI, N. T.; SWART, H.; DHOBLE, S. J. Chapter 4 - Artificial Lighting: Origin—Impact and Future Perspectives. *In*: KALYANI, N. T.; SWART, H.; DHOBLE, S. J. **Principles and Applications of Organic Light Emitting Diodes (OLEDs)**. Woodhead Publishing, 2017, p. 87-113.

KAZANASMAZ, T. Fuzzy logic model to classify effectiveness of daylighting in an office with a movable blind system. **Building and Environment**, v. 69, p. 22-34, 2013.

KLEIN, S. A. *et al.* **TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program**. Madison, USA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, 2017.

KONIS, K. A circadian design assist tool to evaluate daylight access in buildings for human biological lighting needs. **Solar Energy**, v. 191, p. 449–458, 2019.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, p. 259-263, 2006.

KUMAR, A.; KUPPUSAMY, V. K.; HOLUSZKO, M.; SONG, S.; LOSCHIAVO, A. LED lamps waste in Canada: Generation and characterization. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 146, p. 329-336, 2019.

LASHINA, T.; CHRAIBI, S.; DESPENIC, M.; SHRUBSOLE, P.; ROSEMANN, A.; VAN LOENEN, E. Sharing lighting control in an open office: Doing one's best to avoid conflict. **Building and Environment**, v. 148, p. 1-10, 2019.

LEE, H.; JANG, H. I.; SEO, J. A preliminary study on the performance of an awning system with a built-in light shelf. **Building and Environment**, v. 131, p. 255-263, 2018.

LI, D. H. W. A review of daylight illuminance determinations and energy implications. **Applied Energy**, v. 87, p. 2109-2118, 2010.

LI, J.; COLOMBIER, M. Managing carbon emissions in China through building energy efficiency. **Journal of Environmental Management**, v. 90, p. 2436–2447, 2009.

LOU, S.; LI, D. H. W.; LAM, J. C. CIE Standard Sky classification by accessible climatic indices. **Renewable Energy**, v. 113, p. 347-356, 2017.

LUMICENTER LIGHTING. **Grupo Lumicenter Lighting**. Disponível em: <<https://www.lumicenteriluminacao.com.br/o-grupo/>>. Acesso em: 06 fev. 2020.

MICHAEL, A.; GREGORIOU, S.; KALOGIROU, S. A. Environmental assessment of an integrated adaptive system for the improvement of indoor visual comfort of existing buildings. **Renewable Energy**, v. 115, p. 620-633, 2018.

MENEZES, A. C.; CRIPPS, A.; BOUCHLAGHEM, D.; BUSWELL, R. Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap. **Applied Energy**, v. 97, p. 355-364, 2012.

MORENO, D.; MUNOZ, C.; ESQUIVIAS, P.; ACOSTA, I.; NAVARRO, J. Energy and cost savings by using lighting controls in offices. *In*: **CISBE & SLL International Lighting**

Conference. Dublin, 2013, p. 1-7. Disponível em: <<https://arrow.dit.ie/litcon/2013/>>. Acesso em: 14 out. 2019.

NARDELLI, A.; DEUSCHLE, E.; AZEVEDO, L. D.; PESSOA, J. L. N.; GHISI, E. Assessment of Light Emitting Diodes technology for general lighting: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 368-379, 2017.

OUAHRANI, D.; AL TOUMA, A. Selection of slat separation-to-width ratio of brise-soleil shading considering energy savings, CO₂ emissions and visual comfort – a case study in Qatar. **Energy & Buildings**, v. 165, p. 440–450, 2017.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; GONZÁLEZ, R.; MAESTRE, I. R. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. **Energy and Buildings**, v. 41, p. 272-278, 2009.

PROCEL. **Resultados PROCEL: 2018 ano base 2017.** 2018. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2018/>>. Acesso em: 18 fev. 2019.

REINHART, C. F. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design.** Ottawa: Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, 2006.

RICHTER, J. L.; TÄHKÄMÖ, L.; DALHAMMAR, C. Trade-offs with longer lifetimes? The case of LED lamps considering product development and energy contexts. **Journal of Cleaner Production**, v. 226, p. 195-209, 2019.

ROCHA, A. P. A.; PEREIRA, F. O. R. Avaliação do consumo de energia de edificações considerando a luz natural e sistemas de controle através de simulação computacional integrada. *In: XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído*, 2011, Búzios. **Anais [...]** Rio de Janeiro: UFRJ, 2011. v. 1. p. 1-10.

RUPARATHNA, R.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1032-1045, 2016.

RUPP, R. F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica através do uso da luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 75-86, 2013.

SALATA, F.; GOLASI, I.; DI SALVATORE, M.; VOLLARO, A. L. Energy and reliability optimization of a system that combines daylighting and artificial sources. A case study carried out in academic buildings. **Applied Energy**, v. 169, p. 250-266, 2016.

SAWICKI, D.; WOLSKA, A. Objective assessment of glare at outdoor workplaces. **Building and Environment**, 149, 537-545, 2019.

SHISHEGAR, N.; BOUBEKRI, M. Quantifying electrical energy savings in offices through installing daylight responsive control systems in hot climates. **Energy and Buildings**, v. 153, p. 87-98, 2017.

SINOPOLI, J. M. **Smart Buildings Systems for Architects, Owners and Builders**. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2010.

SOARES, C. P. S.; LEMOS, R. D.; SOUZA, R. V. G. Investigação de metodologias para simulação de desempenho da iluminação artificial com a presença de proteção solar em edifícios residenciais. In: **XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. 2014. Maceió, Alagoas.

SOORI, P. K.; VISHWAS, M. Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 329-337, 2013.

SOUZA, A.; GUERRA, J. C. C.; KRUGER, E. L. Os programas brasileiros em eficiência energética como agentes de reposicionamento do setor elétrico. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 7, n. 12, 2011.

SUSOROVA, I.; TABIBZADEH, M.; RAHMAN, A.; CLACK, H. L.; ELNIMEIRI, M. The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings. **Energy and Buildings**, v. 57, p. 6-13, 2013.

VAN BOMMEL, W. J. M. Luminaires. In: VAN BOMMEL, W. J. M. **Interior Lighting**. Cham: Springer, 2019, p. 329-350.

VAN BOMMEL, W. J. M. Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work. **Applied Ergonomics**, v. 37, p. 461-466, 2006.

WONG, I. L. A review of daylighting design and implementation in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 959-968, 2017.

XU, L.; PAN, Y.; YAO, Y.; CAI, D.; HUANG, Z.; LINDER, N. Lighting energy efficiency in offices under different control strategies. **Energy and Buildings**, v. 138, p. 127-139, 2017.

YOOMAK, S.; JETTANASEN, C.; NGAOPITAKKUL, A.; BUNJONGJIT, S.; LEELAJINDAKRAIRERK, M. Comparative study of lighting quality and power quality for LED and HPS luminaires in a roadway lighting system. **Energy and Buildings**, v. 159, p. 542-557, 2018.

YU, X; SU, Y. Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation – A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 494-503, 2015.

YUN, G. Y.; KIM, H.; KIM, J. T. Effects of occupancy and lighting use patterns on lighting energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 46, p. 152-158, 2012.

ZHAO, H.; MAGOULÈS, F. A review on the prediction of building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 3586-3592, 2012.

APÊNDICE A - ILUMINÂNCIAS MÉDIAS E UNIFORMIDADES DAS COMBINAÇÕES DOS GRUPOS DE LUMINÁRIAS

Tabela 16 - Ambiente da sala 2 - Solstício de inverno (continua)

	Grupo 1: 100%		Grupo 1: 75%		Grupo 1: 50%		Grupo 1: 25%		Grupo 1: 0%	
	Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%	
	Emédia	U								
8 h	745	0,7	619	0,7	493	0,6	368	0,5	242	0,3
9 h	836	0,7	710	0,7	585	0,6	459	0,5	333	0,4
10 h	910	0,6	785	0,7	659	0,6	533	0,5	408	0,4
11 h	963	0,6	838	0,6	712	0,6	586	0,5	460	0,4
12 h	991	0,6	865	0,6	739	0,6	614	0,6	488	0,4
13 h	991	0,6	865	0,6	740	0,6	614	0,6	488	0,4
14 h	964	0,6	838	0,6	713	0,6	587	0,6	461	0,4
15 h	912	0,6	786	0,7	661	0,6	535	0,5	409	0,4
16 h	838	0,7	712	0,7	586	0,6	461	0,5	335	0,4
17 h	747	0,7	621	0,7	496	0,6	370	0,5	244	0,3
18 h	659	0,7	534	0,7	408	0,6	282	0,5	157	0,1
	Grupo 1: 75%		Grupo 1: 50%		Grupo 1: 25%		Grupo 1: 0%		Grupo 1: 75%	
	Grupo 2: 75%		Grupo 2: 75%		Grupo 2: 75%		Grupo 2: 75%		Grupo 2: 50%	
	Emédia	U								
8 h	580	0,7	454	0,7	329	0,6	203	0,3	541	0,6
9 h	671	0,6	545	0,7	420	0,6	294	0,4	632	0,6
10 h	746	0,6	620	0,6	494	0,6	368	0,5	706	0,6
11 h	798	0,6	673	0,6	547	0,6	421	0,5	759	0,5
12 h	826	0,6	700	0,6	574	0,6	449	0,5	787	0,5
13 h	826	0,6	700	0,6	575	0,6	449	0,5	787	0,5
14 h	799	0,6	674	0,6	548	0,6	422	0,5	760	0,5
15 h	747	0,6	621	0,6	496	0,6	370	0,5	708	0,6
16 h	673	0,6	547	0,7	422	0,6	296	0,4	634	0,6
17 h	582	0,7	457	0,7	331	0,6	205	0,3	543	0,6
18 h	495	0,7	369	0,7	243	0,6	117	0,1	455	0,7

Tabela 16 (conclusão)

	Grupo 1: 75%		Grupo 1: 75%		Grupo 1: 50%		Grupo 1: 25%		Grupo 1: 25%	
	Grupo 2: 25%		Grupo 2: 0%		Grupo 2: 50%		Grupo 2: 50%		Grupo 2: 25%	
	Emédia	U								
8 h	502	0,6	463	0,4	415	0,7	289	0,6	250	0,6
9 h	593	0,5	554	0,4	506	0,6	381	0,6	341	0,5
10 h	667	0,5	628	0,4	581	0,6	455	0,6	416	0,5
11 h	720	0,5	681	0,4	634	0,6	508	0,6	469	0,5
12 h	748	0,5	708	0,4	661	0,5	535	0,6	496	0,5
13 h	748	0,5	709	0,4	661	0,5	536	0,6	496	0,5
14 h	721	0,5	682	0,4	634	0,6	509	0,6	470	0,5
15 h	669	0,5	630	0,4	582	0,6	457	0,6	417	0,5
16 h	595	0,5	556	0,4	508	0,6	382	0,6	343	0,5
17 h	504	0,6	465	0,4	417	0,7	292	0,6	253	0,6
18 h	416	0,6	377	0,4	330	0,7	204	0,6	165	0,7

Tabela 17 - Ambiente da sala 2 - Solstício de verão (continua)

	Grupo 1: 100%		Grupo 1: 75%		Grupo 1: 50%		Grupo 1: 25%		Grupo 1: 0%	
	Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%	
	Emédia	U								
8 h	897	0,6	772	0,7	646	0,6	520	0,5	394	0,4
9 h	988	0,6	862	0,6	736	0,6	611	0,6	485	0,4
10 h	1.062	0,6	936	0,6	810	0,6	684	0,6	559	0,5
11 h	1.113	0,6	988	0,6	862	0,6	736	0,6	611	0,5
12 h	1.140	0,6	1.014	0,6	888	0,6	763	0,6	637	0,5
13 h	1.139	0,6	1.013	0,6	888	0,6	762	0,6	636	0,5
14 h	1.111	0,6	985	0,6	860	0,6	734	0,6	608	0,5
15 h	1.058	0,6	932	0,6	806	0,6	681	0,6	555	0,5
16 h	983	0,6	857	0,6	732	0,6	606	0,6	480	0,4
17 h	892	0,6	766	0,7	640	0,6	515	0,5	389	0,4
18 h	790	0,7	664	0,7	539	0,6	413	0,5	287	0,3
	Grupo 1: 75%		Grupo 1: 50%		Grupo 1: 25%		Grupo 1: 0%		Grupo 1: 75%	
	Grupo 2: 75%		Grupo 2: 75%		Grupo 2: 75%		Grupo 2: 75%		Grupo 2: 50%	
	Emédia	U								
8 h	732	0,6	607	0,6	481	0,6	355	0,4	693	0,6
9 h	823	0,6	697	0,6	572	0,6	446	0,5	784	0,5
10 h	897	0,6	771	0,6	645	0,6	520	0,5	858	0,5
11 h	949	0,6	823	0,6	697	0,6	571	0,5	909	0,5
12 h	975	0,6	849	0,6	724	0,6	598	0,5	936	0,5
13 h	974	0,6	848	0,6	723	0,6	597	0,5	935	0,5
14 h	946	0,6	820	0,6	695	0,6	569	0,5	907	0,5
15 h	893	0,6	767	0,6	642	0,6	516	0,5	854	0,5
16 h	818	0,6	692	0,6	567	0,6	441	0,5	779	0,5
17 h	727	0,6	601	0,6	475	0,6	350	0,4	688	0,6
18 h	625	0,7	499	0,7	374	0,6	248	0,4	586	0,6

Tabela 17 (conclusão)

	Grupo 1: 75%		Grupo 1: 50%		Grupo 1: 25%		Grupo 1: 0%		Grupo 1: 25%	
	Grupo 2: 25%		Grupo 2: 50%		Grupo 2: 50%		Grupo 2: 50%		Grupo 2: 25%	
	Emédia	U								
8 h	654	0,5	568	0,6	442	0,6	316	0,5	403	0,5
9 h	745	0,5	658	0,5	532	0,6	407	0,5	493	0,5
10 h	818	0,5	732	0,5	606	0,5	480	0,5	567	0,5
11 h	870	0,5	784	0,5	658	0,5	532	0,5	619	0,4
12 h	897	0,5	810	0,5	684	0,5	559	0,5	645	0,4
13 h	896	0,5	809	0,5	684	0,5	558	0,5	644	0,4
14 h	868	0,5	781	0,5	656	0,5	530	0,5	616	0,4
15 h	815	0,5	728	0,5	602	0,5	477	0,5	563	0,5
16 h	740	0,5	653	0,6	528	0,6	402	0,5	488	0,5
17 h	649	0,5	562	0,6	436	0,6	311	0,5	397	0,5
18 h	547	0,5	460	0,6	335	0,6	209	0,4	295	0,6

Tabela 18 - Ambiente da sala 4 - Solstício de inverno

	Grupo 1: 100%		Grupo 1: 75%		Grupo 1: 50%		Grupo 1: 25%		Grupo 1: 75%	
	Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 75%	
	Emédia	U	Emédia	U	Emédia	U	Emédia	U	Emédia	U
8 h	704	0,8	578	0,7	451	0,7	324	0,5	538	0,8
9 h	747	0,7	620	0,7	493	0,7	366	0,5	581	0,7
10 h	782	0,7	655	0,7	528	0,7	401	0,6	615	0,7
11 h	806	0,7	679	0,7	552	0,7	425	0,6	640	0,7
12 h	819	0,7	692	0,7	565	0,7	438	0,6	653	0,7
13 h	819	0,7	693	0,7	566	0,7	439	0,6	653	0,7
14 h	807	0,7	680	0,7	553	0,7	426	0,6	641	0,7
15 h	783	0,7	656	0,7	529	0,7	402	0,6	617	0,7
16 h	749	0,7	622	0,7	495	0,7	368	0,5	582	0,7
17 h	707	0,8	580	0,7	453	0,7	326	0,5	540	0,8
18 h	665	0,7	538	0,7	412	0,6	285	0,5	499	0,7
	Grupo 1: 50%		Grupo 1: 25%		Grupo 1: 75%		Grupo 1: 75%		Grupo 1: 50%	
	Grupo 2: 75%		Grupo 2: 75%		Grupo 2: 50%		Grupo 2: 25%		Grupo 2: 50%	
	Emédia	U	Emédia	U	Emédia	U	Emédia	U	Emédia	U
8 h	411	0,7	284	0,6	499	0,7	459	0,6	372	0,7
9 h	454	0,7	327	0,6	541	0,7	502	0,6	414	0,7
10 h	488	0,7	361	0,6	576	0,7	536	0,6	449	0,7
11 h	513	0,7	386	0,6	600	0,6	561	0,6	474	0,7
12 h	526	0,7	399	0,6	613	0,6	574	0,6	486	0,7
13 h	526	0,7	399	0,6	614	0,6	574	0,6	487	0,7
14 h	514	0,7	387	0,6	601	0,6	562	0,6	474	0,7
15 h	490	0,7	363	0,6	577	0,7	538	0,6	450	0,7
16 h	455	0,7	328	0,6	543	0,7	503	0,6	416	0,7
17 h	413	0,7	286	0,6	501	0,7	461	0,6	374	0,7
18 h	372	0,7	245	0,5	460	0,7	420	0,6	333	0,7

Tabela 19 - Ambiente da sala 4 - Solstício de verão

	Grupo 1: 100%		Grupo 1: 75%		Grupo 1: 50%		Grupo 1: 25%		Grupo 1: 75%	
	Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 100%		Grupo 2: 75%	
	E _{média}	U								
8 h	776	0,7	649	0,7	522	0,7	395	0,6	610	0,7
9 h	818	0,7	691	0,7	564	0,7	437	0,6	652	0,7
10 h	852	0,7	725	0,7	598	0,7	471	0,6	686	0,7
11 h	876	0,7	749	0,7	622	0,7	496	0,6	710	0,7
12 h	889	0,7	762	0,7	635	0,7	508	0,6	722	0,7
13 h	888	0,7	761	0,7	634	0,7	507	0,6	722	0,7
14 h	875	0,7	748	0,7	621	0,7	494	0,6	709	0,7
15 h	851	0,7	724	0,7	597	0,7	470	0,6	684	0,7
16 h	816	0,7	689	0,7	562	0,7	435	0,6	649	0,7
17 h	773	0,7	646	0,7	519	0,7	393	0,6	607	0,7
18 h	726	0,8	599	0,7	472	0,7	345	0,5	560	0,7
	Grupo 1: 50%		Grupo 1: 25%		Grupo 1: 75%		Grupo 1: 75%		Grupo 1: 50%	
	Grupo 2: 75%		Grupo 2: 75%		Grupo 2: 50%		Grupo 2: 25%		Grupo 2: 50%	
	E _{média}	U								
8 h	483	0,7	356	0,6	570	0,7	531	0,6	443	0,7
9 h	525	0,7	398	0,6	612	0,6	573	0,6	485	0,7
10 h	559	0,7	432	0,6	646	0,6	607	0,6	520	0,7
11 h	583	0,7	456	0,6	671	0,6	631	0,6	544	0,6
12 h	595	0,7	468	0,6	683	0,6	643	0,6	556	0,6
13 h	595	0,7	468	0,6	682	0,6	643	0,6	555	0,6
14 h	582	0,7	455	0,6	669	0,6	630	0,6	543	0,6
15 h	557	0,7	430	0,6	645	0,6	605	0,6	518	0,7
16 h	522	0,7	396	0,6	610	0,6	571	0,6	483	0,7
17 h	480	0,7	353	0,6	567	0,7	528	0,6	441	0,7
18 h	433	0,7	306	0,6	520	0,7	481	0,6	393	0,7