XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

ANÁLISE DE DESEMPENHO LUMINOSO DE SALAS DE AULA

Tatiana Paula Alves (1); Wellington Guilherme Ribeiro de Assis (2); Lucas Teixeira da Silva (3); Aureliana Karen Rodrigues Amancio (4)

(1) Phd, Arquiteta e Prof. do Dep.de Arquitetura do Centro Universitário UNA, tatiana.alves@prof.una.br, Centro Universitário UNA, Rua da Bahia 1764, Belo Horizonte- MG. 30160-011, Tel.:(31)992010321
(2) Graduando de Arquitetura e Urbanismo do Centro Universitário UNA, wellingtongra@hotmail.com.br
(3) Graduando de Arquitetura e Urbanismo do Centro Universitário UNA, lucas.teixeira72@gmail.com
(4) Graduando de Arquitetura e Urbanismo do Centro Universitário UNA, aurelianaamancio@gmail.com

RESUMO

O conhecimento do desempenho luminoso de um ambiente é uma importante ferramenta para o desenvolvimento de estratégias futuras de melhoria do sistema de iluminação. O objetivo principal deste estudo foi analisar o desempenho luminoso do conjunto de salas de aula do edifício de ensino superior UnaLiberdade, em Belo Horizonte, MG. O procedimento metodológico proposto percorre os seguintes passos: levantamento de dados, elaboração de diagnóstico do sistema de iluminação artificial atual em relação ao atendimento dos critérios de iluminância mantida e uniformidade da NBR ISO/CIE 8995-1, elaboração da proposta de ajuste do sistema de iluminação artificial e identificação do desempenho energético do sistema de iluminação atual e da proposta de adequação. Os resultados obtidos indicam que nenhuma das salas estudadas atenderam aos critérios de norma analisados. Os resultados mostram ainda a possibilidade de adequação e melhoria do sistema através da padronização das lâmpadas, da introdução de luminárias e da redistribuição das mesmas no ambiente. No entanto, os resultados também evidenciam que para uma efetiva melhoria da performance energética do sistema de iluminação é necessário a incorporação de iniciativas de integração entre os sistemas de iluminação artificial e natural.
Palavras-chave: iluminação artificial, desempenho luminoso, simulação computacional.

ABSTRACT

Understanding the lighting energy use performance of a space is an important means of being effective in propose lighting performance improvement. This study develops a framework to analyse the electric lighting performance of a set of classrooms in the UnaLiberdade Building. The methodology consists of the following steps: data collection, current electric lighting system analysis according to NBR ISO/CIE 8995-1 illuminance and uniformity criteria, electric lighting system adjustment proposition and lighting system energy performance evaluation. The study results showed that no room met the NBR ISO/CIE 8995-1 illuminance and uniformity minimum quality criteria. The results also show that there is a room for improvement, especially regarding lamps standardization and luminaires redistribution. In order to maximize lighting system performance, the study suggests that it would be necessary to develop an integration between daylighting and electric lighting solutions.
Keywords: electric lighting system, lighting performance, lighting simulation

1. INTRODUÇÃO

No que diz respeito a edificações comerciais e de serviço, sabe-se que os usos finais de energia elétrica se encontram concentrados em ar condicionado, iluminação e equipamentos, sendo responsáveis por aproximadamente 30%, 20% e 15% respectivamente do consumo de energia elétrica destas edificações (MME, 2018). Observa-se ainda uma tendência ao crescimento do consumo de energia nestas edificações apesar das rápidas e significativas melhorias técnicas dos sistemas prediais e do aprofundamento da visão crítica sobre o desempenho ambiental de edifícios nos últimos anos (AMORIM et al., 2016).

Dentro de um contexto onde a renovação do estoque de edifícios é pouco representativa (aproximadamente 1.5%) o *retrofit* de edificações existentes configura como sendo um forte indicador de melhoria de performance energética (GONÇALVES; BODE, 2015). Dentre as intervenções mais acessíveis de *retrofit* está o do sistema de iluminação, principalmente o de iluminação artificial. Em geral estas intervenções estão relacionadas a trocas de lâmpadas e/ou luminárias, e incorporação de sistemas de controle. Em intervenções de *retrofit* mais profundas a integração com a iluminação natural aparece como medida de *retrofit* com significativo resultado na diminuição do consumo energético. Dentre os estudos existentes podemos citar como exemplo um extenso material documental da Agência Internacional de Energia (IEA) *SHC Task 50* sobre soluções de *retrofit* do sistema de iluminação artificial e natural (AKTUNA et al., 2016; AMORIM et al., 2016). O material fornece informações técnicas e exemplos para servir como guia durante o processo de desenvolvimento e implantação de soluções de *retrofit*.

Neste contexto, estudos que possibilitem conhecer mais a fundo o sistema de iluminação de um edifício tornam-se uma importante ferramenta para subsidiar suas futuras intervenções de melhoria.

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é analisar o desempenho luminoso e energético do conjunto de salas de aula do edifício de ensino superior UnaLiberdade, pertencente ao Centro Universitário UNA em Belo Horizonte, MG.

3. MÉTODO

O procedimento metodológico proposto apresenta quatro passos principais: (1) levantamento de dados do sistema de iluminação artificial, (2) elaboração de diagnóstico do sistema de iluminação artificial atual em relação ao atendimento dos critérios de iluminância mantida e uniformidade da NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013), (3) elaboração da proposta de adequação do sistema de iluminação artificial das salas de aula e (4) identificação do desempenho energético do sistema de iluminação atual e da proposta de adequação das salas de aula estudadas.

3.1. Levantamento dos dados do edifício estudado

Para a compreensão da situação atual das 16 (dezesseis) salas de aula estudadas foram realizadas visitas de campo durante o mês de junho de 2018. Foram coletados dados do edifício e do sistema de iluminação. As rotinas de uso e funcionamento foram levantadas junto ao gestor de manutenção do edifício. A Figura 1 ilustra as informações coletadas para o sistema de iluminação artificial. Para a coleta de dados foi utilizado questionário semiestruturado. O questionário foi subdividido em 2 categorias: (1) informações físicas do ambiente (2) caracterização do sistema e sua rotina de uso.

Local	**Área**	**Pé-direito**	**Janelas**		**Portas**	
			Dimensão	Quantidade	Dimensão	Quantidade
	Parede		**Piso**		**Teto**	
	Tipologia construtiva	Acabamentos	Tipologia construtiva	Acabamentos	Tipologia construtiva	Acabamentos
	Sistema de Iluminação					
	Sistema Lâmpada/Luminária					
	Tipo lâmpada	Potência	Temperatura de Cor/ IRC	Tipo de Reatores	Tipo de Luminária	Quantidade de luminárias
	Rotina de Uso		Integração com luz natural		Controle de Luz Natural	
	Horas de Operação	Forma de Acionamento	Subdivisão de circuitos ?	Relação com as janelas?	Cortinas, persianas, internas	Sistema de Proteção Solar
	Croqui do sistema de Iluminação no ambiente					

Figura 1 - Questionário referência para levantamento de dados técnicos e de uso do sistema de iluminação.

3.2. Caracterização dos modelo para simulação

O edifício em estudo foi construído no ano 1997 para receber uma escola de ensino fundamental e médio cuja atividade acadêmica principal acontecia no período diurno. No ano de 2005, o edifício foi incorporado ao complexo de edifícios de ensino superior denominado de Campus Urbano pelo Centro Universitário UNA e suas principais atividades acadêmicas passaram a ocorrer no turno da manhã e da noite. O edifício UnaLiberdade apresenta forma quadrada (23,40m x 23,40m) com átrio central coberto que serve como elemento de circulação horizontal e vertical. As salas de aula estão distribuídas ao redor deste átrio central ao longo dos pavimentos térreo e superiores (1º e 2º Pavimentos). Estes três pavimentos contam com um total de 16 salas de aula de tamanhos variados que serão o objeto deste estudo. A Figura 2 apresenta as nomenclaturas das dezesseis salas de aula estudadas e suas respectivas localizações nos pavimentos.

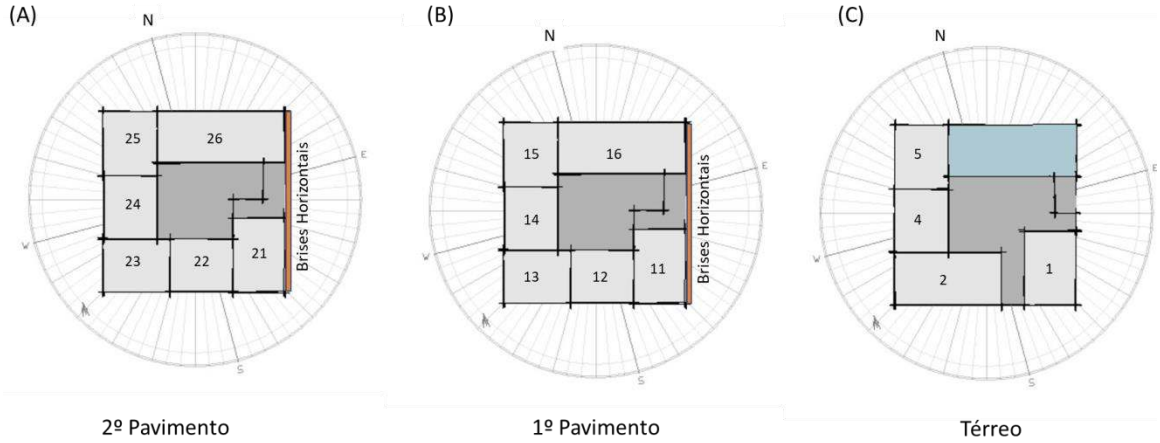


Figura 2 – Identificação das Salas que serão objeto de estudo - (A) Nomenclatura das salas do 2º Pavimento, (B) Nomenclatura das salas do 1º Pavimento, (C) Nomenclatura das salas Pavimento Térreo.

Com base no levantamento de campo do sistema de iluminação foi desenvolvida a planta de iluminação do sistema atual. O esquema da distribuição das luminárias pode ser visualizado na Figura 3.

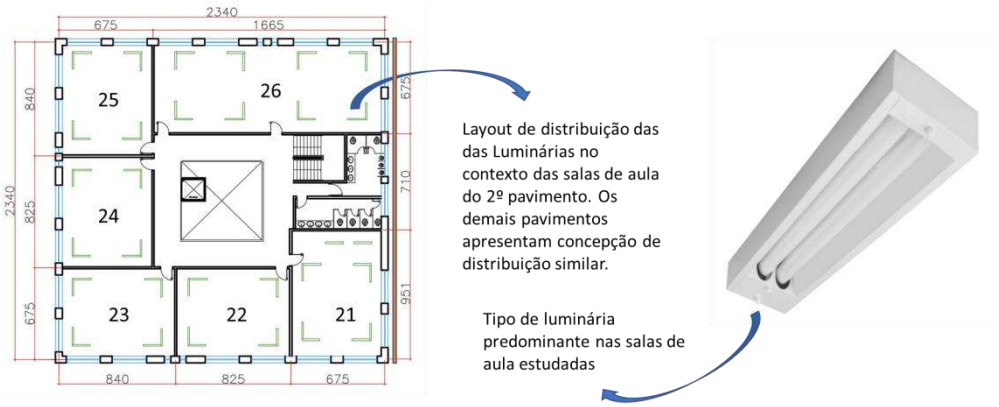


Figura 3 – Esquema de distribuição da Iluminação Artificial das salas de Aula.

O software Dialux EVO 8.1 (DIALux EVO, 2018) foi utilizado para a simulação do sistema de iluminação artificial atual. A Tabela 1 apresenta as informações dos parâmetros utilizados para simulação do sistema de iluminação artificial atual no software Dialux EVO.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no cálculo de iluminação artificial

Itens		**Valores**	
Pé direito do ambiente (m)		2,8	
Altura do plano de trabalho (m)		0,75	
Altura de Montagem da luminária (m)		1,95	
Refletância interna das Superfícies (%)			
	Piso	10	
	Parede	50	
	Teto	70	
Tipo de Luminária		Sobrepor para duas lâmpadas, sem aletas	
Tipo de Lâmpada		LED 18W (2000lm/4000K e 6500K)	Fluorescente 32W (2700lm/4000K)
Reator		-	Eletrônico (6W)

A Tabela 2 apresenta os parâmetros e os valores utilizados na construção do modelo energético. Cada sala de aula foi considerada uma zona térmica. Para as simulações energéticas das salas de aula foi utilizado o software EnergyPlus 9.1 (DOE, 2019). Para a análise do desempenho energético foi utilizado o indicador de intensidade de consumo de energia (EUI) expresso em função de quilowatt-hora por metro quadrado por ano [kWh/m^2/ano].

Tabela 2**.** Parâmetros de Desempenho e referências utilizadas no desenvolvimento do modelo energético para simulação

Envoltórias		
Parâmetros	**Valores de referência**	**Fonte**
Cor do vidro	(1) Transparente com filme refletor prata (Salas 11,22,23,26). (2) Transparente com filme opaco cor preta (Demais salas);	Levantamento de Campo
Espessura do vidro	(1) 6mm; (2) 6mm	Levantamento de Campo
Percentual de Abertura nas fachadas	38,5%	Levantamento de Campo
Transmitância Vidro (W/m².k), SHGC, FS	(1) 5.02, 0.402,0.395 (2) 5.80, 0.466, 0.001	Simulação das informações de Campo no Window7.7
Transmitância térmica paredes externas (W/m².k)	1.85	Com base no levantamento de campo e Catálogo de Propriedades Térmicas (INMETRO, 2013)
Transmitância térmica paredes internas (W/m².k)	2.39	
Transmitância térmica cobertura (W/m².k)	2.06	
Absortância paredes e cobertura (α)	0.4, 0.4	Catálogo de Propriedades Térmicas (INMETRO, 2013)
Sistemas Prediais		
DPI iluminação (W/ m²)	Variável de acordo com sistema de iluminação presente em cada sala.	Levantamento de Campo e Software Dialux EVO
Padrões de Uso e Ocupação		
Horas de Ocupação	7h as 12h e 18h as 22h durante a semana, fins de semana sem uso	Levantamento de Campo
Horas de uso Iluminação	7h as 12h e 18h as 22h durante a semanas, fins de semana sem uso.	Levantamento de Campo

3.3. Elaboração do diagnóstico e análise do desempenho energético

O diagnóstico do sistema de iluminação atual consiste na análise do atendimento aos critérios de iluminância mantida ($\overline{E}_m$ = 500 lux) e uniformidade (U ≥ 0.6) estipulados pela NBR ISO/CIE 8995-1 para o uso educacional adulto, classe de aula período noturno. O sistema de iluminação artificial identificado durante o levantamento de campo é, portanto, simulado no software Dialux EVO e os resultados obtidos comparados aos valores da norma. Para as salas de aula cujos resultados não atenderem ao critério de norma serão propostas adequações aos sistema atual. Nenhuma análise de custo foi realizada neste estudo.

O desempenho energético do sistema de iluminação artificial foi aferido em dois momentos. O primeiro registrou a situação atual do sistema. O segundo momento diz respeito a proposta de adequação do sistema de iluminação atual. Para melhor estabelecer um comparativo entre a situação atual do sistema de iluminação artificial e o que sofreu ajustes, o indicador de intensidade de consumo de energia (EUI) do sistema atual foi denominado de EUI Caso Base (EUI_BC) enquanto o da proposta de ajuste foi denominado de EUI Cenário Melhoria (EUI_CM).

4. RESULTADOS

Dentre as características do edifício que possuem interface com o sistema de iluminação está o percentual de aberturas nas fachadas da edificação que é da ordem de 38,5%. Uma das mais marcantes característica das aberturas é a de possuir na maioria das salas o filme opaco preto (salas 1, 2, 4,5,12,13,14,15,16, 21, 24, 25), o que reduz expressivamente a entrada de luz natural nas salas durante o dia, limitando esta entrada aos momentos em que as esquadrias estiverem abertas. A esquadria padrão do prédio apresenta dimensão de 2,30 x 2.45m, no entanto sua área de ventilação e abertura se reduz a 1/3 desta extensão. Dentre as características construtivas internas levantadas, temos a presença nas salas de aula de piso vinílico cinza, paredes e tetos (laje) pintados de branco.

Quanto ao sistema de iluminação artificial atual das salas de aula observou-se a predominância de luminárias de sobrepor, sem aletas, para 2 lâmpadas. As lâmpadas LEDs tubulares de 18W correspondem a 58% das lâmpadas encontradas nas salas de aula. Os 42% restantes correspondem a lâmpadas fluorescentes de 32W. Quanto a temperatura de cor das lâmpadas observa-se em uma mesma sala uma mistura entre as temperaturas de 4000K e 6500K. O Índice de Reprodução de Cor (IRC) das lâmpadas é superior a 80. Outra

característica presente no sistema é que as luminárias estão subdivididas em 2 circuitos cujos acendimentos se relacionam com o quadro. As salas não apresentam internamente nenhum sistema de controle de iluminação natural.

Para compreender melhor a iluminância mantida ($\bar{E}_m$), uniformidade (U) e densidade de potência instalada (DPI) de cada sala foi simulado no software Dialux EVO o sistema de iluminação atual e os resultados destas simulações estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores aferidos de iluminância mantida (E_m), uniformidade (U) e densidade de potência instalada (DPI) pela simulação do sistema de iluminação artificial das salas de aula atuais.

# Sala da Aula	$\bar{E}_m$ (lux)	U	DPI (W/ m²)	# Sala de Aula	$\bar{E}_m$ (lux)	U	DPI (W/ m²)
Sala 01	251	0.36	7.64	**Sala 15**	259	0.40	8.34
Sala 02	238	0.40	5.46	**Sala 16**	298	0.52	7.70
Sala 04	167	0.40	4.68	**Sala 21**	441	038	12.19
Sala 05	254	0.39	6.80	**Sala 22**	346	0.40	10.80
Sala 11	330	0.41	8.96	**Sala 23**	371	0.43	10.84
Sala 12	270	0.40	8.31	**Sala 24**	346	0.40	10.80
Sala 13	291	0.45	8.34	**Sala 25**	259	0.40	8.34
Sala 14	271	0.41	8.31	**Sala 26**	377	0.49	10.01

A análise dos valores de $\bar{E}_m$ indica uma variação entre as salas de aula apesar da existência de arranjos de distribuição de luminárias similares. Uma análise mais próxima dos ambientes, indica que todas as salas com valores de $\bar{E}_m$ inferiores a 300 lux apresentam lâmpadas exclusivamente LEDs. As salas com valores superiores apresentam o uso exclusivo de lâmpadas fluorescentes ou uma mistura entre fluorescente e LED. Este fato é um indicativo que as lâmpadas LEDs de 18W e de fluxo luminoso de 2000lm entraram no sistema original para substituição das lâmpadas de 32W e de fluxo luminoso de 2700lm impactando a iluminância mantida das salas. A análise de U indica baixa uniformidade nos ambientes e pode ser evidenciada na Figura 4. Observa-se que a forma com que as luminárias estão distribuídas favorece a formação de áreas centrais de baixa iluminância em contraste com áreas de alta iluminância logo abaixo do conjunto de luminárias.

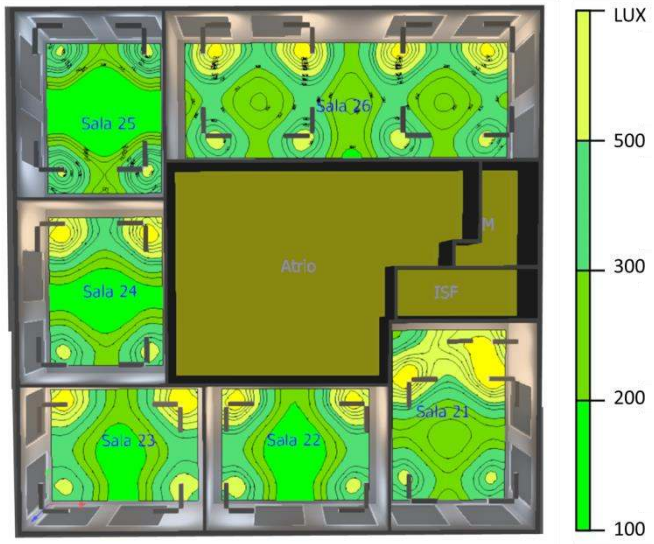


Figura 4 - Curvas de Isolux do 2º Pav.- Software Dialux EVO.

A análise das salas tendo como referência a NBR ISO/CIE 8995-1 indica que os ambientes não atendem aos valores mínimos de iluminância mantida ($\bar{E}_m$ = 500 lux) e uniformidade (U ≥ 0.6).

O não atendimento ao critério de $\bar{E}_m$ é um indicativo que o sistema de iluminação artificial não sofreu adaptação para receber aulas no período noturno e para educação de adultos uma vez que originalmente o edifício escolar recebia ensino médio e fundamental nos turnos diurnos cuja iluminância requerida é de 300lux.

Tendo como referência as informações provenientes do diagnóstico da situação atual, foi proposto o ajuste do sistema de iluminação artificial das salas tendo como foco principal o atendimento simultâneo aos critérios de $\bar{E}_m$ e U. A proposta de modificação foi simulada e os resultados das alteração apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores simulados para atendimento NBR ISO/CIE 8995-1. Informações de E_m, U e DPI.

# Sala da Aula	E_m (lux)	U	DPI (W/ m²)	# Sala de Aula	E_m (lux)	U	DPI (W/ m²)
Sala 01	508	0.74	7.68	**Sala 15**	535	0.72	8.03
Sala 02	551	0.70	6.88	**Sala 16**	558	0.68	8.11
Sala 04	593	0.73	9.23	**Sala 21**	593	0.71	9.34
Sala 05	569	0.70	9.60	**Sala 22**	543	0.75	8.34
Sala 11	593	0.71	9.34	**Sala 23**	583	0.71	8.34
Sala 12	543	0.75	8.34	**Sala 24**	541	0.74	8.03
Sala 13	583	0.71	8.34	**Sala 25**	535	0.72	8.03
Sala 14	541	0.74	8.03	**Sala 26**	558	0.68	8.11

Além do atendimento aos critérios da norma ($\bar{E}_m$ =500 lux e U ≥0.6), a revisão do sistema contou com a padronização das lâmpadas (LEDs 18W, fluxo luminoso 2000lm, temperatura de cor 4000K e IRC 80). O

DPI limite do sistema foi de 10,7 W/m², baseado no nível de eficiência Classe A -RTQ-C (INMETRO, 2010). Para atendimento aos critérios de $\bar{E}_m$ e U ocorreu a redistribuição e inserção de novas luminárias.

A Tabela 4 mostra que os valores de DPI sofreram variações neste novo cenário. Uma análise mais detalhada destas variações indica que para as salas onde as lâmpadas já eram exclusivamente LEDs ocorreu um acréscimo dos valores de DPI fruto do acréscimo de novas luminárias, enquanto que para as salas onde se tinha o uso exclusivo de fluorescente ou o uso misto de fluorescente e LEDs ocorreu a diminuição dos valores de DPI, mesmo quando do acréscimo de luminárias para atendimento aos critérios de norma. A Figura 5 ilustra as curvas de distribuição de iluminância da proposta de melhoria do sistema de iluminação.

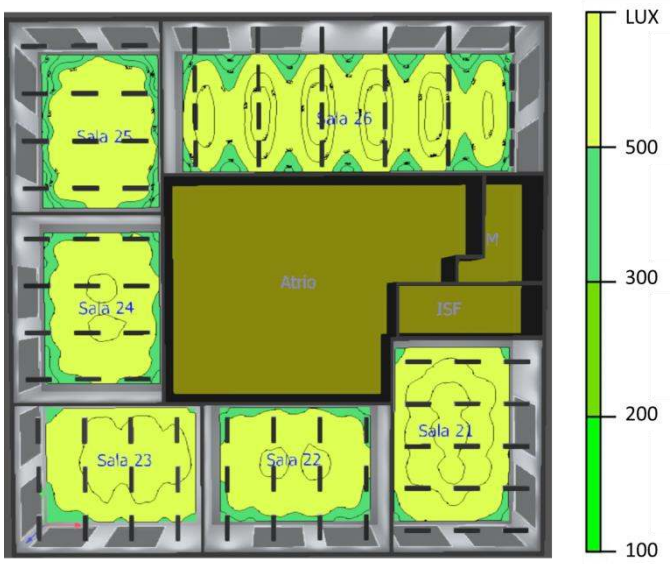


Figura 5 - Curvas de Isolux da proposta de adequação do 2º Pavimento desenvolvidas pelo Software Dialux EVO.

Uma vez realizada a adequação do sistema, foi realizada a simulação energética para aferição da intensidade energética (EUI) do conjunto de salas. Os valores de EUI do Caso Base e do Cenário Melhoria identificados foram 17.55 e 17.03 kWh/m²/ano respectivamente. A análise destes valores indica que sua relação de proximidade pode ser explicada pelo equilíbrio entre o acréscimo e decréscimo de DPIs ocorridos no Cenário de Melhoria mencionado anteriormente.

Do ponto de vista de melhorias de desempenho, sabe-se que o sistema atual não apresenta nenhuma integração com a iluminação natural, portanto potenciais melhorias passariam pela revisão do sistema de esquadrias visto estas estarem atualmente com filme preto opaco, revisão dos circuitos para acionamento das luminárias em relação as janelas e a possibilidade de dimerização do sistema.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento do desempenho do sistema de iluminação de uma edificação é uma importante ferramenta para o desenvolvimento de estratégias futuras de melhoria do sistema. Neste estudo foram levantadas informações do ambiente e do sistema de iluminação de dezesseis salas de aula. Com base nestas informações foi elaborado o diagnóstico de atendimento aos critérios de iluminância mantida e uniformidade relacionados a NBR ISO/CIE 8995-1. Os resultados do diagnóstico apontaram que nenhuma das salas estudadas atenderam aos critérios analisados da norma. Tendo como base estas informações foram propostas adequações no sistema de iluminação artificial. Como última etapa do processo foi realizada a simulação energética do sistema atual e o sistema que sofreu a adequação. Os valores de EUI resultantes das duas simulações foram muito próximos, apontando que para uma efetiva melhoria de desempenho energético será necessário a integração com a iluminação natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ISO/CIE 8995-1:2002/Cor 1:2005 - Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

AKTUNA, B. et al. Daylighting and electric lighting retrofit solutions. [s.l.] Universitätsverlag der TU Berlin, 2016.

AMORIM, C. N. D. et al. Lessons learned from monitoring daylighting in retrofit projects: A Technical Report of IEA SHC Task 50 (T50. D5). 2016.

DIALux EVO. Germany: DIAL GmbH, 2018.

DOE. EnergyPlus Engineering Reference - Energy Plus Version 9.1.0 Documentation. USA: Department of Energy, mar. 2019.

GONÇALVES, J. C. S. (ORG); BODE, K. (ORG). Edificio Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

INMETRO. Anexo geral V da Portaria INMETRO Nº 50/2013- Catálogo de propriedades térmicas de paredes, cobertura e vidros. 2013.

INMETRO. RTQ-C – Requisitos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos, Anexo da portaria INMETRO no. 372/2010, set. 2010.

MME. Balanço Energético Nacional 2018 - Ano Base 2017. Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 4 julho 2019.