



# ESTRATÉGIAS PARA EFICIENTIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

**FABIO TEMPEL**

Fevereiro de 2018

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA ELÉTRICA

FABIO TEMPEL

ESTRATÉGIAS PARA EFICIENTIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

São Paulo  
2016

FABIO TEMPEL

ESTRATÉGIAS PARA EFICIENTIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Elétrico.

ORIENTADOR: PROF. EDISON MASSAO MOTOKI

ORIENTADOR: PROF. ROQUE BRANDÃO

São Paulo

2016

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Edison Massao Motoki e o prof. Roque Brandão, pelas suas orientações que, com diretrizes seguras, muita paciência, constante acompanhamento e incentivo, me aceitaram com todas as minhas restrições.

Ao Prof. Rodrigo Vieira pela sua disponibilidade e palavras de sabedoria, na qual sem ele o trabalho não seria o mesmo.

À toda equipe de manutenção da Universidade Presbiteriana Mackenzie, que mostrou-se sempre prestativa e engajada no projeto, em especial o Eng. Ricardo Poli.

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta estratégias para maximizar a eficiência em sistema de iluminação, tendo como pilares as normas brasileiras e as internacionais. O estudo de caso mostra que as estratégias adotadas proporcionam excelentes resultados de eficiência energética como opções para decisão de investimento. Além disso, esta pesquisa aborda alguns conceitos técnicos de um programa brasileiro de eficiência energética, denominado PROCEL EDIFICA. O trabalho também aborda as tecnologias de iluminação presentes no mercado brasileiro, utilização de software para definição de layout na disposição física das luminárias, bem como a potência necessária para este ambiente. Sistemas eletrônicos automatizados de medição e sensores de luminosidade também são considerados neste trabalho.

A parte prática baseia-se em uma sala típica de um edifício da escola de engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie – UPM, nomeadamente Prédio 6, para realizar medições de consumo e do comportamento de uso deste ambiente.

**Palavras-chave:** Iluminação. Eficiência. LED.

## **ABSTRACT**

The present study aims to develop strategies for electrical consumption efficiency in lighting system, looking forward to accomplish Brazilian and International standards. As a result, the present study shows that strategies for energy efficiency in fact can optimize electrical savings and increase environmental comfort. In addition, this paper discusses an overview of computational lighting system simulation, power consumption analysis and lamps technology available in Brazilian market.

This work also presents a field study based on a classroom at Mackenzie University aiming to evaluate the sunlight harvest system electrical behavior.

**Keywords:** Lighting. Efficiency. LED

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Referência de Temperatura de Cor. ....	24
Figura 2: Influência do IRC sobre a cor. ....	24
Figura 3: Curvas fotométricas horizontais e verticais. ....	25
Figura 4: Rendimento e fadiga visual vs. iluminância.....	26
Figura 5: Níveis de conforto visual. ....	27
Quadro 1: Pré-requisitos para os níveis de certificação Procel Edifica.....	28
Figura 6: Funcionamento da lâmpada de Indução.....	31
Figura 7: Funcionamento da lâmpada Fluorescente tubular.....	33
Figura 8: Tipo de lâmpada vs. aproveitamento espelho refletor.....	33
Figura 9: Comparativo entre diferentes fontes de luz.....	34
Figura 10: Manutenção do fluxo luminoso LED.....	36
Figura 11: Sensor de presença Infravermelho. ....	39
Figura 12: Curva de carga com sensor de aproveitamento solar. ....	40
Figura 13: Gráfico de eficiência vs. potência de saída .....	41
Figura 14: Relação entre tensão de entrada e corrente de saída. ....	43
Figura 15: 3ª andar da Escola de Engenharia do Mackenzie.....	46
Figura 16: Armadura presente nas instalações .....	47
Quadro 2: Levantamento de luminárias do prédio 5 e 6.....	47
Figura 17: Iluminância atual.....	48
Figura 18: Planta no software Relux. ....	49
Figura 19: Simulação situação atual.....	49
Quadro 3: Comparação entre simulação e situação real.....	50
Figura 20: Medição lâmpadas tubular LED. ....	50
Figura 21: Comparação entre fluxo luminoso lâmpadas LED. ....	51
Figura 23: Refletor 85% com aleta simples 1 lâmpada T5 de 54W.....	52
Figura 22: Refletor 95% com aleta simples 1 lâmpada T5 de 54 W.....	52
Figura 24: Armadura com Refletor 85% com controle rigoroso de ofuscamento e 2 lâmpadas T5 de 28W.....	52
Figura 25: Armadura original sem controle de ofuscamento e refletor com 4 lâmpadas T8 de 36W.....	52
Figura 26: Refletor 95% com aleta simples 1 lâmpada T5 de 54 W. ....	53

Figura 27: Refletor 85% com aleta simples 1 lâmpada T5 de 54W.....	53
Figura 28: Armadura com Refletor 85% com controle rigoroso de ofuscamento e 2 lâmpadas T5 de 28W.....	53
Figura 29: Armadura original sem controle de ofuscamento e refletor com 4 lâmpadas T8 de 36W .....	53
Figura 30: 4 lâmpadas LED tubular 1700 lúmens .....	54
Figura 31: 4 lâmpadas LED tubular 1900 lúmens .....	54
Figura 32: 3 lâmpadas LED tubular 2200 lúmens .....	54
Figura 33: 4 lâmpadas LED tubular 2500 lúmens .....	54
Figura 34: 4 lâmpadas LED tubular 1700 lúmens .....	55
Figura 35: 4 lâmpadas LED tubular 1900 lúmens .....	55
Figura 36: 3 lâmpadas LED tubular 2200 lúmens .....	54
Figura 37: 4 lâmpadas LED tubular 2500 lúmens .....	55
Figura 38: 3 Luminária LED 2725 ITAIM.....	55
Figura 39: 2 Lâmpadas LED retangular de alta eficiência .....	55
Figura 40: Luminária LED 2725 ITAIM.....	55
Figura 41: 2 Lâmpadas LED retangular de alta eficiência .....	55
Quadro 5: Comparativo das simulações .....	57
Figura 42: Disponibilidade da luz solar ao longo do ano. ....	58
Figura 43: Circuito de iluminação. ....	59
Fonte: Autoria própria. ....	60
Figura 44: Adaptação da lâmpada LED na armadura original .....	60
Figura 45: Circuito de controle.....	60
Quadro 6: Nível de iluminância com sensor. ....	60
Figura 46: Interface do analisador de energia. ....	61
Quadro 7: Tarifa de energia vigente. ....	63
Quadro 8: Tempo de operação.....	64
Quadro 9: Comparativo econômico lâmpada fluorescente.....	66
Quadro 10: Estudo financeiro lâmpada fluorescente.....	66
Quadro 11: Comparativo econômico lâmpada Tubular LED.....	67
Quadro 12: Estudo financeiro lâmpada fluorescente.....	67
Quadro 13: Comparativo econômico lâmpada Tubular LED.....	67
Quadro 14: Estudo financeiro lâmpada fluorescente.....	68
Quadro 15: Comparação entre soluções. ....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSES	<i>French Agency for Food, Environmental and Occupational Health &amp; Safety</i>
CDL	Curva de Distribuição Luminosa
CCT	Temperatura de Cor Correlacionada
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
DALI	Digital Addressable Lighting Interface
DPI	Densidade de Potência Instalada
DHT	Distorção Harmônica Total
IES	Sociedade de Engenharia de Iluminação
IESNA	Sociedade Norte Americana de Engenharia de Iluminação
IRC	Índice de Reprodução de Cor
ISO	Organização Internacional de Normalização
LED	Diodo Emissor de Luz
NBR	Norma Brasileira
MME	Ministério de Minas e Energia
PROCEL	Programa Nacional de Eficiência Energética
PIR	Passive infrared Sensor
RAC	Regulamento de Avaliação de Conformidade
UPM	Universidade Presbiteriana Mackenzie

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS .....	12
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>12</b>
1.2	JUSTIFICATIVA .....	12
1.3	METODOLOGIA .....	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA – O ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>15</b>
2.1	A IMPORTÂNCIA DOS TRABALHOS DE <i>RETROFITS</i> E AUTOMAÇÃO EM EDIFÍCIOS .....	15
2.2	RISCOS RELACIONADOS A ILUMINAÇÃO.....	18
2.3	INFLUÊNCIA DA ILUMINAÇÃO NO APROVEITAMENTO DO ALUNO.....	19
2.4	USUÁRIOS E SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO .....	22
<b>3</b>	<b>CONCEITOS FOTOMÉTRICOS E CONFORTO AMBIENTAL.....</b>	<b>23</b>
3.1	CONCEITOS FOTOMÉTRICOS .....	23
3.2	CONFORTO VISUAL .....	26
3.3	PROCEL EDIFICA .....	27
3.4	NORMA TÉCNICA ABNT NBR/ISO 8995-1 .....	28
<b>4</b>	<b>TIPOS DE LÂMPADAS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....</b>	<b>30</b>
4.1	FONTES DE LUZ .....	30
<b>4.1.1</b>	<b>Lâmpadas de Indução.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Lâmpadas de Descarga de Baixa Pressão.....</b>	<b>32</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Diodos Emissores de Luz – LED’s.....</b>	<b>32</b>
4.1.3.1	CARACTERÍSTICAS DO LED.....	35
4.1.3.2	CERTIFICAÇÃO DE QUALIDADE.....	36
<b>4.1.4</b>	<b>QUALIDADE DE ENERGIA .....</b>	<b>37</b>
4.2	DISPOSITIVOS DE AUTOMAÇÃO .....	38
<b>4.2.1</b>	<b>Sensores de presença.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Sensor de luz solar .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Localização dos sensores .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Controle de agendamento.....</b>	<b>42</b>
4.3	PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO.....	42

4.3.1	0-10V .....	43
4.3.2	DALI.....	44
5	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>46</b>
5.1	SITUAÇÃO ATUAL DO LOCAL.....	46
5.2	TESTE ELÉTRICO DE LÂMPADAS .....	50
5.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	51
5.3.1	<b>Simulação com Lâmpadas Fluorescentes .....</b>	<b>52</b>
5.3.2	<b>Simulação com Lâmpadas LED .....</b>	<b>54</b>
5.4	APROVEITAMENTO DE LUZ SOLAR.....	57
5.4.1	<b>IMPLEMENTAÇÃO DO SENSOR DE LUZ DO DIA.....</b>	<b>58</b>
6	<b>ANÁLISE ECONÔMICA .....</b>	<b>62</b>
6.1	CUSTOS E TARIFAS .....	62
6.1.1	<b>Sistema de tarifação de energia elétrica no Brasil .....</b>	<b>62</b>
6.1.2	<b>Modalidade tarifária aplicada no <i>Campus</i> UPM .....</b>	<b>63</b>
6.2	RETORNO DE INVESTIMENTO.....	64
6.3	ESTUDO FINANCEIRO.....	65
6.3.1	<b>Lâmpada fluorescente .....</b>	<b>65</b>
6.3.2	<b>Lâmpada tubular de LED .....</b>	<b>66</b>
6.3.3	<b>Luminária LED.....</b>	<b>67</b>
6.3.4	<b>Comparativo .....</b>	<b>68</b>
7	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A iluminação artificial é fundamental para o contínuo funcionamento dos edifícios, em locais com baixa incidência de luz solar e horários em que a luz, não atinge os requisitos mínimos de iluminação. Também é essencial para garantir os níveis adequados de iluminação em ambientes internos para o bom desempenho de tarefas por parte dos usuários.

Por outro lado, além de consumir energia, a iluminação artificial gera carga térmica. Uma vez que as lâmpadas originalmente instaladas não apresentam boa eficiência, o calor gerado pela iluminação deverá ser retirado pelo sistema de ar condicionado, o que gera um consumo elétrico indireto devido ao maior trabalho de troca térmica.

No que concerne o consumo de energia elétrica, desde 1985 têm se aplicado sistematicamente o estímulo à sua racionalização, ano no qual o Ministério de Minas e Energia (MME) criou o Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). Em 2003, lançaram o Procel Edifica, com o objetivo de construir as bases necessárias para racionalizar o consumo nas edificações brasileiras. Sendo uma das medidas de eficiência destacadas pelo Procel é o *retrofit*.

Define-se *retrofit* como a simples troca de um componente ultrapassado por uma tecnologia mais eficiente sem grandes alterações no local. Em iluminação, sua principal vantagem é a facilidade da troca e geralmente um rápido retorno financeiro (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011).

Importante considerar também que, uma vez que ocorrem desperdícios no uso de energia por parte dos usuários, ou às vezes não considerando o aproveitamento da luz solar, o *retrofit* simples, sem nenhum controle ativo e composto apenas pela substituição por lâmpadas mais eficientes, pode não alcançar todo potencial de economia, o que significa que o uso de *software* para ajudar no estudo de luminotécnica e a aplicação de novas tecnologias de automação dos edifícios, podem ser estratégicos e alavancar outras oportunidades de ganho energético.

Atualmente existem diversos elementos finais de controle, como os controladores para automação de iluminação. Seu principal objetivo visa gerar economia sem alterar o conforto luminoso dos usuários. Enquanto todos os autores de diferentes trabalhos sobre o tema concordam com os impactos positivos da automação, nem todos acreditam que tais métodos tragam benefícios econômicos ao edifício (ROISIN et al., 2007).

Concluindo, sob a ótica de A Room et al. (2006), diversos pesquisadores têm investigado psicologicamente os aspectos da luz. Atualmente, existem muitas pesquisas sobre

o tema, sendo que existem resultados que estão alinhados e outros contraditórios. Entretanto, a maioria afirma que são necessárias maiores pesquisas, para chegar a um resultado conclusivo sobre o tema.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Determinar estratégias que permitam a eficiência em sistemas de iluminação respeitando os requisitos luminotécnicos mínimos, exigidos pela ABNT/ISO 8995 e outras necessárias ao estudo de pesquisa deste trabalho.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral os seguintes objetivos específicos devem ser considerados:

- Identificar o ambiente típico, alvo de estudo e levantar as necessidades da instalação, juntamente com o responsável;
- Verificar as tecnologias disponíveis de iluminação, em termos de lâmpadas, sensores e sistemas de iluminação;
- Considerar a norma brasileira ABNT/ISO 8995 para estudo de luminotécnica;
- Promover o uso de ferramentas computacionais para estudo de luminotécnica;
- Relacionar eficiência e conforto visual de determinada solução;
- Desenvolver estudo do retorno econômico do investimento;
- Sugerir alternativas para reformulação do sistema de iluminação, pela especificação da distribuição de luminárias e parâmetros luminotécnicos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Em 2014, o consumo de energia elétrica foi um dos fatores que mais contribuiu nas emissões dos gases de efeito estufa, responsável por 25% das emissões globais de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2014). Em 2006, o gasto energético com a iluminação apresentou uma emissão de

poluentes de aproximadamente 1.900 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, ou o equivalente a três vezes a poluição gerada por todo setor de aviação (IEA, 2006).

Ademais, considerada a importância da qualidade da iluminação face suas influências sobre os usuários, são essenciais garantir níveis adequados aos ambientes com desenvolvimento de trabalhos visuais. Considerando que desde os anos 90, data do projeto do sistema de iluminação da UPM, em um estudo realizado em 59 salas de aula de 5 diferentes instituições, todas as salas apresentaram deficiências em sua iluminação, evidenciando medições da área de trabalho e iluminância vertical das lousas abaixo do recomendado conforme as normas emitidas pela *Illuminating Engineering Society* (IES) (COOK, 1990).

A fim de adequar os níveis de iluminação previstos em norma, existem diversas técnicas e tecnologias de iluminação em questão, sendo válida também a adoção de componentes de automação ou até mesmo com o rearranjo da distribuição das luminárias.

Porém, é importante lembrar que nada adianta investir em tecnologias de última geração caso seu projeto não gere também um retorno financeiro. Deste modo, requisitos econômicos também será um tema constantemente abordado no trabalho.

Portanto, ao garantir a eficácia do sistema de iluminação com o consumo eficiente de energia elétrica, todos serão beneficiados: os usuários por desfrutarem de melhor desempenho visual e produtivo, os administradores do edifício por alocar o montante economizado na energia elétrica em diferentes investimentos e a sociedade como um todo pelo destino racional dos recursos energéticos do País.

### 1.3 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido com base em pesquisas teóricas, avaliação experimental em laboratório e modelagem computacional no *software* Relux.

A pesquisa teórica se inicia com uma revisão bibliográfica subdividida em quatro subcapítulos: Trabalhos de Retrofits e Automação, Riscos Relacionados e Iluminação, Usuários e Sistemas de Automação.

No laboratório de elétrica da Escola de Engenharia do Mackenzie, através da fonte de tensão alternada, da marca Califórnia Instruments, modelo 1501ix, foram avaliados os parâmetros elétricos fundamentais, que influenciam na eficiência energética, como a DHT – Distorção Harmônica Total, potência ativa e fator de potência.

Após a definição dos principais componentes de iluminação, implementou-se um modelo computacional para as diferentes alternativas de iluminação disponíveis no mercado

nacional, além de instalar um sistema de aproveitamento de luz solar em uma sala típica na Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), objetivando o aproveitamento em termos de iluminação natural e *modus operandi* da mesma.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho estará estruturado em seis seções.

A Seção 1 apresenta a Introdução, que é composta pelos seguintes itens: texto de conceituação e caracterização do tema; Objetivos; Justificativas; e Metodologia.

A Seção 2 retrata a Revisão de Literatura referente ao Estado da Arte, que abordará comparações de resultados dos autores em relação ao presente trabalho.

A Seção 3 retrata a fundamentação teórica com o conteúdo necessário para entendimento dos parâmetros luminotécnicos apresentados neste trabalho.

A Seção 4 traz a pesquisa com as tecnologias presentes para o desenvolvimento da parte prática.

A Seção 5 um estudo de caso com a simulação computacional para solução de alternativas para o sistema de iluminação, .

A Seção 6 aborda o estudo econômico das soluções encontradas.

A Seção 7 relata as conclusões do trabalho e indica algumas recomendações para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA – O ESTADO DA ARTE

A fim de melhor compreensão sobre o tema do trabalho, este capítulo subdivide-se em quatro subcapítulos:

- A Importância dos Trabalhos de Retrofits e Automação em Edifícios
- Riscos Relacionados a Iluminação
- Influência da Iluminação no Aproveitamento Do Aluno
- Usuários e Sistemas de Automação

### 2.1 A IMPORTÂNCIA DOS TRABALHOS DE *RETROFITS* E AUTOMAÇÃO EM EDIFÍCIOS

É importante salientar que o ciclo de vida de um edifício inicia no projeto, planejamento, construção, comissionamento, conclusão, entrega, manutenção e operação do edifício. Após determinado tempo de uso a manutenção já não consegue mantê-lo pois está no final de vida útil, com sua infraestrutura interna, como equipamentos auxiliares de operação e sistemas de iluminação deixam a desejar, necessitando aí de um projeto de reforma ou *retrofit*, para a volta de um novo ciclo vida deste edifício.

**Floyd et. al (1995)** conduziu um estudo a fim de determinar a performance de um sistema de iluminação com diferentes elementos de controle de presença, nomeadamente infravermelho e ultrassônico, na aplicação de uma escola elementar na Flórida. Ambos os sensores apresentaram resultados satisfatórios e reduziram o consumo de energia em 10,2% e um *payback* de 4,8 anos, com uma taxa de retorno de investimento de 21%. Os autores também destacam que o sucesso da campanha de efficientização depende exclusivamente do posicionamento dos sensores, na qual sugerem estudos apropriados como o uso de *light loggers* ou auditorias presenciais.

Em sua tese de Mestrado, **Ghisi (1997)** objetivou em seu trabalho a criação de uma metodologia para estudos de *retrofit* em sistemas de iluminação. De forma objetiva, visa criar um manual para auxílio na substituição de um sistema já existente. A fim de comprovar a eficácia de seu método, o autor conduziu um estudo de caso na Universidade Federal de Santa Catarina. Embora, devido à época de seu estudo, as lâmpadas empregadas não serem tão eficientes quanto as disponíveis atualmente, sua metodologia resultou em uma economia de 42% em todo consumo elétrico da universidade, evidenciando bons resultados e um potencial

ainda maior, quando adotadas tecnologias mais atuais. Em suas recomendações para trabalhos futuros, o autor destaca a importância da comparação entre resultados de modelos computacionais, com os resultados práticos obtidos e uma monitoração *pós-retrofit*, para avaliar as informações fornecidas pelo fabricante e o fator de manutenção adotado.

**Ghishi et Al (1998)**, apresenta a avaliação de conservação de energia através de um estudo de *retrofit* no sistema de iluminação da sede da FIESC – Federação das Indústrias de Santa Catarina. A análise de redução do consumo foi feita analiticamente e por simulações computacionais. Concluiu-se que o edifício apresentou um potencial de conservação de energia de 35%, através do *retrofit* da iluminação, com um período de retorno de investimento de 14 meses. Considerou-se também a influência da carga térmica no sistema de refrigeração do prédio, atingindo uma economia de 14% no consumo do ar-condicionado. Os autores recomendam que, após um trabalho de *retrofit* no sistema de iluminação de um edifício de grande porte, deve-se fazer, também, uma avaliação e possíveis ajustes no sistema de refrigeração de acordo com a nova carga térmica.

**Bodart e Herde (2002)** avaliaram computacionalmente os impactos no consumo elétrico de um escritório fictício, conforme diferentes orientações e reflexões das paredes internas. Tanto o consumo elétrico da iluminação, quanto a influência da carga térmica, sobre o consumo do sistema de refrigeração foram levados em conta em sua análise. Apesar de certas combinações apresentarem economias teóricas de até 80% no consumo elétrico, os níveis de economia também variaram conforme o nível de transmitância das janelas. Os autores destacam que os resultados podem não ser compatíveis com a realidade, porque não consideraram o uso de cortinas, para evitar o ofuscamento dos usuários e possíveis obstruções solares externas.

No trabalho de **Roisin et al. (2007)**, os autores compararam diferentes métodos de controles em três localidades na Europa. O método foi baseado no uso do *software* DAYSIM e medições em laboratoriais para avaliar o consumo de energia elétrica. Os sistemas de controle testados foram sensores de iluminação dimerizáveis e sensores de presença com ou sem integração em sistema central. Percebeu-se que a orientação exerce grande influência sobre a economia atingida, quando usado o sensor solar, na qual atingiu uma economia de 61% (orientação sul em Atenas). Quando avaliado o sensor de presença, verificou-se que o ajuste de luz em função da presença atinge maiores potenciais de economia quando as luzes são desligadas, ao invés de apenas dimerizáveis, porém, por questões de conforto, tal prática é recomendada apenas para escritórios únicos ou salas de reuniões. Os autores concluem que o ajuste de luz solar gera maiores economias quando comparados ao ajuste de presença, nos casos em que exista uma alta taxa de ocupação no ambiente. Considerando uma taxa de ocupação

maior que 44%, o controle solar é sempre preferível. Abaixo de 27%, apenas o sensor de presença se torna mais viável.

**Danny et al** (2009) apresenta um estudo de eficiência em lâmpadas fluorescentes associadas a reatores eletrônicos de alta frequência e dimerizadores fotoelétricos instalados em um ambiente escolar. Foram analisados também os níveis de iluminância nas salas de aula. Constataram que alterando as lâmpadas T8 por T5 de alta eficiência, atingiu-se um nível de economia de 28%.

**Braga et al.** (2014) propuseram a comparação entre diferentes tecnologias de lâmpadas: Fluorescentes T8 e lâmpadas LED TUBE T8. Tanto os parâmetros elétricos e físicos quanto simulações computacionais foram consideradas na conclusão. A análise comparativa entre lâmpadas LED e fluorescentes equivalentes concluiu que cada lâmpada apresentou vantagens em diferentes pontos de vista. No que trata a distorção harmônica total, a lâmpada fluorescente levou vantagem. Porém, no geral, devido ao aumento da eficiência da tecnologia do LED e seus parâmetros fotométricos, concluiu-se que os diodos apresentaram grandes vantagens comparadas a tecnologia fluorescente.

A fim de avaliar o desempenho de um trabalho de *retrofit* realizado em 10 escritórios, **Aghemo, Blaso e Pellegrino (2014)** consideraram os efeitos térmicos, luminotécnicos e a satisfação dos usuários, um ano após a troca do sistema de iluminação. Ao levar em conta o consumo anual do edifício, os resultados obtidos demonstraram um potencial de economia entre 17% e 32%. Um importante dado observado foi o consumo dos equipamentos periféricos de controles (reatores, drivers, sensores e sistemas), no qual representaram aproximadamente  $\frac{1}{4}$  do consumo do novo sistema. Na prática, esse estudo afirma que os resultados de economia não condisseram com o esperado devido à insatisfação a nível de conforto aos usuários, pois os mesmos alteraram as configurações de iluminação e temperatura previamente planejados a fim de melhorar seu conforto.

**Pandharipande e Caicedo (2015)**, da **Philips Research Labs**, estudaram a possibilidade futura da integração de sensores, tanto de luminosidade quanto presença nas luminárias, a fim de controlar a intensidade da luz, conforme a presença de usuários e disponibilidade de luz natural. Tanto o controle central, quanto o distribuído foram considerados na análise econômica. A principal diferença, quando comparado a outros casos, é a possibilidade de controlar individualmente cada setor de uma grande sala dependendo de sua ocupação. Segundo os autores, tanto um controle central inteligente, quanto controles autônomos encontrados em luminárias inteligentes apresentam um futuro potencial, porém, suas aplicações dependem conforme o uso final.

## 2.2 RISCOS RELACIONADOS A ILUMINAÇÃO

Nos últimos anos, diversos estudos correlacionam a influência da iluminação com a performance dos usuários e saúde dos mesmos. Uma vez que o mercado de LED está inundado com lâmpadas de qualidade questionável e dados imprecisos (ANSES, 2010), uma pesquisa mais aprofundada torna-se relevante, para obter um resultado satisfatório no trabalho de *retrofit*.

A luz não só induz respostas visuais como também efeitos não visíveis, afetando a performance, o humor, a atenção e sincronização do relógio biológico (**BEHAR-COHEN et al., 2011**). Seus efeitos variam conforme duração, horário, intensidade e espectro emitido pelas lâmpadas no ambiente.

O relógio biológico, localizado no núcleo supraquiasmático - SCN, é responsável pela regulação dos ciclos naturais como o acordar e dormir, secreção hormonal entre outros (**MILLS; SCHALEG; TOMKINS, 2007**)

Nos humanos, o ciclo do relógio biológico é regulado por ondas na faixa dos 480 nm, na qual suprime a produção de melatonina (**Wang, Q et. Al, 2015**). Como tal faixa é frequentemente encontrada em altas intensidades nos LEDs, certas luminárias podem apresentar características espectrais e energéticas específicas, apresentando potenciais riscos à saúde e particularmente ao olho humano, entre elas, graves danos na retina de pessoas predispostas a doenças oculares degenerativas (ANSES, 2008)

**Behar-cohen et al. (2011)** conduziram de forma intensa a avaliação de riscos oculares causadas pela iluminação e concluíram que, testados diversos modelos e tipos de luminárias de LED, alguns produtos encontrados no mercado, não cumprem as normas a respeito dos grupos de riscos fotobiológicos emitidas pela ANSES. O autor também recomenda a utilização de luminárias com maior área de distribuição de luz ao invés de *spots*, ou lâmpadas com foco de luz concentrado.

A respeito do flicker, ou cintilação da iluminação, **Wilkins. A; Veitch. J; Lehman. B, (2010)** complementam algumas considerações importantes a saúde, segundo a norma IEEE PAR1789. Os efeitos do *flicker* podem causar resultados imediatos, em que poucos segundos de exposição causam efeitos como epilepsia; ou outros que se manifestam ao longo do tempo, como dores de cabeça e alteração na performance visual. Os efeitos biológicos do

flicker sobre os humanos variam em função da frequência, diferença entre a intensidade máxima e mínima, brilho, aplicação da iluminação entre outros.

### 2.3 INFLUÊNCIA DA ILUMINAÇÃO NO APROVEITAMENTO DO ALUNO

Nos anos 80 e início dos 90, estudos têm se focado em determinar níveis de iluminância para melhorar a *performance* em tarefas específicas. No final dos anos 90 e anos 2000, os estudos voltam aos aspectos da coloração e espectro na luz.

Conforme foram se desenvolvendo novas tecnologias, as pesquisas a respeito do aspecto funcional da luz se tornaram cada vez mais específicas e apuradas. Finalmente, com a descoberta de um terceiro receptor no olho humano, responsável por alterações na produção hormonal, as influências biológicas também começam a ser estudadas no contexto da *performance* dos usuários.

Apesar da normativa referente a iluminação ser amplamente conhecida, **Cook (1990)** comprova a importância da aferição dos níveis de iluminação em instituições de ensino. Em seu trabalho, o autor fez medições em 59 salas de aulas, em 5 diferentes instituições de ensino. A partir dos resultados, o autor conclui que grande parte das salas de aula apresentam valores de iluminância horizontal, da área de trabalho, e iluminância vertical, das lousas, abaixo do recomendado, segundo a IES, é alto o grau de ofuscamento e é de baixa uniformidade. Apesar do trabalho ser considerado “antigo” para os padrões de pesquisa de um Trabalho de Conclusão de Curso, seu impacto ainda é relevante, pois retrata o cuidado que devemos ter, ao assumir que o projeto luminotécnico das salas esteja de acordo com a norma vigente.

**Kenez, (1995)**, em seu trabalho publicado no “*Journal of Environmental Psychology*”, o autor questiona se os principais parâmetros usados nas normas vigentes (1995) são adequados para um projeto de iluminação. Para testar sua hipótese, foram conduzidos alguns testes práticos com voluntários para avaliação da *performance* cognitiva através do humor. Os experimentos variam em dois níveis de iluminação (300lx X 1500lx) e duas temperaturas distintas (3000K e 4000K) e um CRI de 95 e um CRI de 55. Em sua conclusão, o autor afirma que existem diferentes respostas à iluminação conforme o gênero da pessoa e, por isso, necessário alterar a norma vigente mediante maiores estudos sobre as influências da iluminação.

**Winterbottom e Wilkins (2008)** estudaram os efeitos da iluminação sobre os alunos em 90 salas de aula em diferentes instituições de ensino. Os estudos mostraram que,

apesar de já existirem reatores eletrônicos que mitigam esse efeito, em mais de 80% das salas a iluminação apresenta *flicker*, ou oscilações dos níveis de luminosidade. Com relação a iluminação, 88% das salas apresentaram excessos nos níveis de iluminância devido reflexões indesejadas e falta de controle da entrada da luz solar. Conforme o autor afirma, a maioria dos problemas encontrados podem ser resolvidos com medidas simples e baixo custo. Em sua conclusão, há varias recomendações úteis para aplicação de melhor qualidade na iluminação nas salas de aula.

**Linhart e Scartezzini (2010)** compararam dois tipos de cenários, já considerados energeticamente eficientes, expondo os usuários a diferentes testes cognitivos e a realização de suas tarefas cotidianas. O primeiro cenário apresenta um consumo de  $4,5\text{w/m}^2$  e baixo grau de ofuscamento e um outro, com maiores níveis de iluminância e menor consumo, com  $3,9\text{w/m}^2$  e maior grau de ofuscamento. Nas conclusões, os usuários preferiram o cenário com iluminação mais distribuída, porém, apresentaram melhores resultados quando expostos à uma iluminação mais forte, mas não muito significativos. A iluminação não apresentou influências significativas quando avaliadas tarefas com o uso de computador. Esses resultados indicam a possibilidade de adotar diferentes níveis de iluminação conforme o ambiente e, também, não necessariamente, devem-se aumentar os níveis de iluminância, afim de melhorar seu desempenho.

**Sivaji. et AL (2013)** objetivam analisar a influência da temperatura de cor e o uso da iluminação natural e suas influências na performance, conforto visual e preferências de cenário. Diferente de outros autores, a luz de 3000 K mostrou-se mais eficiente para o aumento do nível de alerta, porém, a menos preferível entre os usuários. Os autores concluem que seus resultados podem apresentar distorções devido ao efeito *Hawthorne*, em que os participantes podem se comportar de forma diferente, quando sujeito a pesquisa e, portanto, há a necessidade de maiores estudos, a fim de definir o melhor tipo de iluminação para escritórios. Porém, conforme suas conclusões, é mais benéfico adotar o uso de iluminação de cor fria, devido a preferência e conforto dos usuários.

**Bellia. L; Pedace, A; Barbato, G (2013)**, através do cálculo teórico da supressão de melatonina, os autores conduzem estudos na universidade de Nápoles, Italia, afim de estabelecerem as características da iluminação natural e artificial e influências sobre o ciclo circadiano dos alunos. Os resultados obtidos demonstram que não apenas a intensidade, mas também as superfícies reflexivas exercem grande influência sobre os níveis de melatonina nos humanos. Segundo os autores, o nível de supressão de melatonina não sofreu significativas alterações em relação ao CCT, porém, um completo comportamento do ciclo circadiano ainda

é compreendido, e, portanto, os autores recomendam maiores estudos sobre a qualidade da luz e suas implicações. Os estudos provam a importância da luz natural em ambientes, onde os usuários passam muito tempo, principalmente em ambientes escolares, devido a melhores resultados sobre o nível do alerta. Vale lembrar que o estudo foi totalmente teórico e não houve testes práticos sobre tais influências.

**Youran Li et al. (2015)** destacam que, apesar das várias pesquisas existentes sobre o assunto, grande parte delas foram conduzidas baseadas nas tradicionais fontes de iluminação. Uma vez que o LED é um produto com características óticas e cromáticas bem diferente das outras fontes, não se pode afirmar que os parâmetros estabelecidos para fontes tradicionais são adequados para esta nova tecnologia. A fim de estabelecer melhores combinações de luz e CRI específicas para lâmpada de LED, os autores criaram 12 ambientes com diferentes níveis de iluminação e coloração. Com testes práticos baseados na Teoria de Detecção de Sinal (SDT) os autores discutem o melhor tipo de iluminação para os usuários em ambientes internos. Os autores sugerem que: a temperatura de 3000 K deve ser evitada; para uma temperatura de 4000 K, o ideal é uma média de 1000 lux; para uma iluminação de 6000 K, deverá ser evitada iluminação com 1000 lux ou mais. Considerando as 12 diferentes situações, a iluminação mais adequada é de 6000 K com 300 lux. Uma vez que a norma NBR8995 sugere maior nível de iluminância e não comenta sobre o CRI para salas de aula, esse trabalho tem a importância de eliminar dúvidas sobre a relação entre iluminância e *performance* do aluno e estabelece uma recomendação em relação à temperatura de cor.

**Wang. Q et al (2015)**, analisaram diferentes condições de iluminação (tecnologia, CCT, nível de iluminação) e seus impactos na fadiga visual. Neste estudo, as respostas da fadiga e *performance* foram avaliadas analiticamente e qualitativamente em 12 usuários (6 homens e 6 mulheres) durante 5 seções, com 2 horas cada. Os autores encontraram que diferentes condições de iluminação realmente impactam sobre a fadiga visual. Foi verificado que a iluminação de LED também pode suprir de forma mais eficiente efeitos da diminuição da fadiga visual, quando comparados a iluminação de lâmpadas fluorescentes. Porém, não houve alterações significativas sobre a *performance* dos usuários quando comparados a eficácia dos testes sob os diferentes cenários de iluminação.

## 2.4 USUÁRIOS E SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO

**Heydarian et AL (2015)** destacam o impacto no consumo elétrico de um edifício conforme o comportamento do usuário. Em seu estudo, os autores investigaram através de testes reais, a reação dos usuários conforme às diferentes formas de controle na automação, na qual foram expostos. Dentre as formas de controle, os usuários foram submetidos aos seguintes cenários: (1) controle manual da iluminação artificial e persiana; (2) controle manual da iluminação e semiautomático da persiana; (3) controle semiautomático da iluminação e controle artificial da persiana; (4) controle semiautomático iluminação e persiana.

Entre os resultados, os autores afirmam que os usuários são mais propensos ao uso da iluminação artificial para aumentar os níveis de iluminação, porém, mostram-se mais dispostos ao aproveitamento da luz solar, caso as persianas tenham algum tipo de controle semiautomático. Como sugestão, automatizando o espaço e colocando o controle em fácil acesso, estimula o usuário aproveitar a iluminação natural disponível. Por mais que esse artigo tenha se referido integralmente a aplicação para escritórios, é sensato basear suas conclusões para uso nas salas de aula.

**Pedro Correa et Al (2014)** conduziram estudos para melhor entender hábitos comportamentais e interações dos usuários, com sistemas de automação da iluminação. Para isso, automatizaram oito escritórios individuais e analisaram as reações dos usuários, conforme mudanças dos níveis de iluminação. Como conclusões, os pesquisadores observaram que 91% dos acionamentos dos controles, aconteceram durante os primeiros momentos da entrada ou logo antes da saída dos usuários da sala. Também foi observado que, os usuários normalmente se basearam nos níveis de iluminância natural, para determinar se liga a luz ou não, porém, alguns usuários agiram de maneira independente, ligando a luz mesmo com níveis de iluminação adequados. Visto os resultados dos estudos, os autores sugerem maiores cuidados, na instalação de controles de iluminação devem ser usados com certa precaução, uma vez que os usuários se comportam de maneiras diferentes.

### 3 CONCEITOS FOTOMÉTRICOS E CONFORTO AMBIENTAL

Para uma melhor compreensão do trabalho, é essencial apresentar alguns conceitos básicos para o desenvolvimento de um projeto de luminotécnico. Além de parâmetros quantitativos previsto nos cálculos de iluminação, o capítulo também aborda aspectos subjetivos da luz, retratando assim questões de conforto ambiental e questões relativas a eficiência do sistema de iluminação, conforme previsto pelo programa de etiquetagem Procel Edifica.

#### 3.1 CONCEITOS FOTOMÉTRICOS

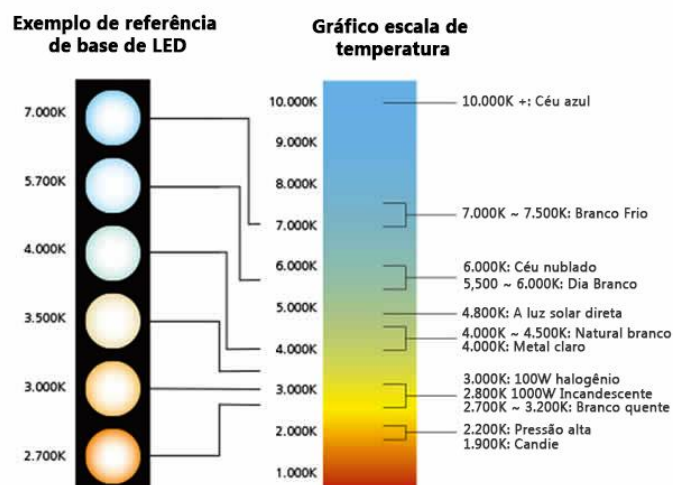
Sendo uma das unidades fundamentais de iluminação, o fluxo luminoso é dado como a quantidade total de luz de uma fonte luminosa, entre os limites de comprimento de ondas entre 380 e 780nm e medido em lúmens (A RENDÓN, 2012).

Uma vez que este fluxo atinge uma superfície, a relação entre o fluxo luminoso incidente e a superfície sobre qual incide, é chamado iluminância. Designada pelo símbolo E, indica o fluxo luminoso de uma fonte de luz que incide sobre um ponto situado à uma certa distância dessa fonte (COSTA, 2013).

já a luminância, é a medida da intensidade da luz refletida numa dada direção, que descreve a quantidade de luz que atravessa ou é emitida de uma superfície refletida por um corpo luminoso. Em outras palavras, é a medida da sensação de claridade percebida pelo olho humano (MINOLTA, 2015).

O espectro da luz visível se localiza entre a faixa de 380 e 780nm e cada lâmpada emite uma quantidade variada de luz em determinado comprimento de onda. Com isso, têm-se a sensação de uma luz mais amarelada ou esbranquiçada, que no caso é chamado de temperatura de cor (cct). A temperatura de cor é uma analogia entre a cor da luz emitida por um corpo negro aquecido até a temperatura especificada em Kelvin e a cor que estamos comparando. A unidade de medida da temperatura de cor é o Kelvin (K) (COSTA, 2013). Quanto mais alta a temperatura de cor, mais clara é a tonalidade de cor da luz. É importante destacar que ao falamos em luz quente ou fria, não estamos nos referindo ao calor físico da lâmpada, e sim a tonalidade de cor que ela irradia ao ambiente (figura 1).

Figura 1: Referência de Temperatura de Cor.



Fonte: Retirado do site Nova Eletrônica, 2005.

Também dependente do espectro de luz emitido pela fonte de luz, o índice de reprodução de cores (*color rendering index*, em inglês) é a correspondência entre a cor real de um objeto ou superfície e sua aparência diante de uma fonte de luz. A luz artificial deve permitir ao olho humano perceber as cores corretamente, ou o mais próximo possível da luz natural do dia, conforme verifica-se através da figura 2. Quanto mais alto o índice, melhor a reprodução das cores. Lâmpadas com IRC de 100% apresentam as cores com total fidelidade e precisão. (ROSADO, 2014).

Figura 2: Influência do IRC sobre a cor.



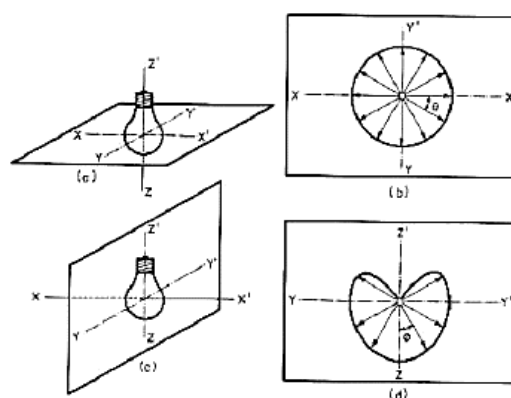
Fonte: Retirado do site do fabricante Fusion Lamps.

Um importante parâmetro para cálculo dos requisitos de iluminação em um ambiente é a REFLETÂNCIA, definida sendo a razão entre a luz refletida e a luz incidente em um objeto ou superfície, também conhecida como fator de reflexão. Diretamente ligada a

eficiência do ambiente, quanto maior o fator de reflexão das superfícies internas, melhor será o aproveitamento das luminárias. Além de superfícies, para escolha de luminárias de alto rendimento também é utilizado este parâmetro, na qual é adotado para tipificar a qualidade do espelho refletor.

Uma vez que cada luminária apresenta um padrão de saída de luz específico, a escolha da luminária deverá ser baseada pela sua Curva de Distribuição Luminosa (CDL). A Curva Fotométrica é obtida a partir das medidas da intensidade luminosa pelo fotômetro (luxímetro digital), em todas as direções segundo azimutes e declinações (DIB, 2005). Sendo a superfície fotométrica espacial, ela não pode ser representada diretamente sobre um único plano, traçando-se assim a curva fotométrica horizontal e vertical, como exemplificado na Figura 3. Para a uniformização dos valores das curvas, geralmente são referidas a 1000 lm. São estas curvas que indicam se a lâmpada ou luminária têm uma distribuição de luz concentrada, difusa, simétrica, assimétrica, etc.

Figura 3: Curvas fotométricas horizontais e verticais.



Fonte: Dib (2005).

Com a CDL e o fluxo de saída da lâmpada em mãos, é possível contar com o apoio de alguns métodos de cálculos existentes, para o dimensionamento de um sistema de iluminação adequado para projeto luminotécnico. Os cálculos mais usuais são o método ponto a ponto e o método dos lumens, sendo este último previsto pela CIE. O método dos lumens fornece um resultado único em iluminância e é obtida em função dos equipamentos especificados ou características do ambiente. Este método leva em consideração a dimensão da instalação, características reflexivas das superfícies presentes, frequência de manutenção do local e requisitos mínimos de iluminação previstos na norma.

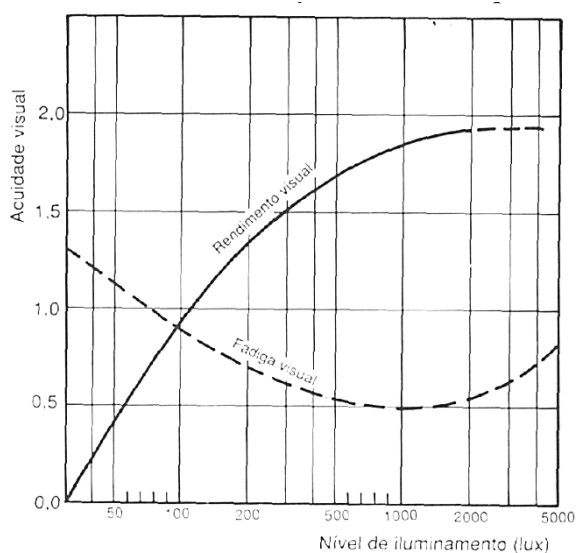
Além dos métodos já descritos, existem outros bem mais complexos e precisos, na qual é impossível sua utilização sem ajuda de softwares especializados, como o método da radiosidade, na qual é implementado pelo software Relux e é baseado no princípio da lei da conservação de energia e teoria da transferência de calor.

O método da radiosidade tem por objetivo o cálculo da iluminação e do sombreamento em cenas em que predominam superfícies refletoras difusas, e consiste na equação de trocas de radiação térmicas entre superfícies empregue em Transmissão de Calor adaptado à Computação Gráfica (BRISSON. J, 2013)

### 3.2 CONFORTO VISUAL

O nível de iluminação médio é um importante parâmetro previsto na ABNT/ISSO 8995, variando conforme a aplicação e níveis de acuidade visual previstos para determinada tarefa. Via de regra, o rendimento visual tende a crescer, a partir de 10 lux, até aproximadamente 1000 lux, ao mesmo tempo em que fadiga visual diminui, como mostra a figura 4. A partir de 1000 lux, o aumento de iluminância não proporciona melhoras sensíveis no rendimento visual, começando a ocorrer, inclusive, um aumento na fadiga visual.

Figura 4: Rendimento e fadiga visual vs. iluminância.

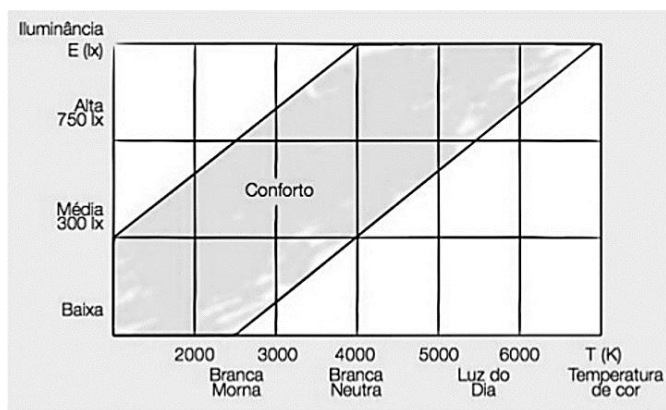


Fonte: Albuquerque (1998).

Além do adequando nível de iluminância, também é necessário considerar a temperatura do sistema de iluminação a fim de propiciar um maior conforto visual. A figura 5

relaciona o nível de iluminância com a temperatura de cor a fim de manter um ambiente visualmente confortável.

Figura 5: Níveis de conforto visual.



Fonte: Passold (2014)

Porém, não só questões de temperatura de cor e iluminância proporcionam um ambiente agradável. Pela norma ABNT/ISO 8995, iluminância geral do ambiente deverá respeitar um limite mínimo de uniformidade. Em projetos onde é prevista a performance de tarefas visuais, a distribuição da iluminação deverá ser o mais uniforme possível para evitar sombras ou alto contraste, resultando na redução do desempenho visual do usuário.

Além do mais, como também já destacado na revisão da literatura, são necessários maiores cuidados com os níveis de *flicker* da fonte luminosa, pois dependendo da frequência e intensidade, tais efeitos podem causar náuseas e perda de performance por parte dos usuários.

### 3.3 PROCEL EDIFICA

Assim como já existem órgãos que classificam os aparelhos de acordo com seu consumo energético, também existem diversas certificações de eficiência energética em edifícios. Essas certificações corroboram para um melhor aproveitamento energético como um todo. O mais conhecido é o LEED, criado nos Estados Unidos e reconhecido mundialmente.

No Brasil, temos o equivalente nacional, o Selo Procel Edifica. Estabelecido em novembro de 2014, o selo é um instrumento de adesão voluntária que tem por objetivo principal classificar a eficiência em três requisitos: ar condicionado; envoltória e iluminação. Pelo seu regulamento, o edifício pode apresentar uma classificação geral das três áreas ou, se preferir, em apenas determinado requisito.

Na classificação do sistema de iluminação, a eficiência dos sistemas de iluminação é definida através de sua densidade de potência instalada (DPI), ou a potência total instalada em watt para cada metro quadrado de área, e uma série de pré-requisitos para cada nível de eficiência, conforme mostra a quadro 1.

Uma vez cumprido os pré-requisitos, o sistema de iluminação será classificado de acordo com a DPI de referência para cada tipo de tarefa. Evidente que os níveis de iluminação do local deverão seguir a norma vigente.

Quadro 1: Pré-requisitos para os níveis de certificação Procel Edifica.

Pré-requisito	Nível A	Nível B	Nível C
4.1.1 Divisão dos circuitos	Sim	Sim	Sim
4.1.2 Contribuição da luz natural	Sim	Sim	
4.1.3 Desligamento automático do sistema de iluminação	Sim		

Fonte: Manual Para Aplicação do RTQ-C – Procel Edifica, 2014

### 3.4 NORMA TÉCNICA ABNT NBR/ISO 8995-1

Estabelecendo apenas os valores mínimos e médios de iluminância em iluminação de interiores, a ABNT NBR5413 estava desatualizada em relação às práticas recomendadas internacionalmente, sendo revista em 2012 pela Comissão de Estudos para Aplicações Luminotécnicas e Medições Fotométricas da ABNT/CB-03.

Com o texto baseado na Norma Internacional ISO8995-1: *lighting of work places*, a ABNT NBR/ISO 8995-1 aborda aspectos quantitativos e qualitativos da iluminação visando a maior performance dos usuários na praticas que desempenhem tarefas visuais (Iwashita. J, 2014)

A norma, além de especificar níveis de iluminância atualizados e, também aborda questões de ofuscamento e IRC do ambiente de trabalho, especifica malhas de medição e contém orientação para caracterização do ambiente de trabalho.

Segundo consta no Anexo B da NBR/ISSO 8995, as superfícies de referência retangulares são subdivididas em pequenos retângulos, aproximadamente quadrados de um metro, com os pontos de cálculo ao seu centro. A média aritmética de todos os pontos é a iluminância média.

Uma vez estabelecidos os conceitos básicos necessários para uma boa iluminação, o sucesso do projeto se dá na escolha adequada das tecnologias em iluminação presentes.

Considerando que há disponíveis no mercado diversos tipos de lâmpadas produzidas por inúmeros fabricantes, é imprescindível a adoção de uma abordagem técnica e uma análise crítica das tecnologias em iluminação existentes, na qual será abordada no próximo capítulo.

## 4 TIPOS DE LÂMPADAS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Na revisão da literatura são destacados alguns modelos de lâmpadas com diferentes tipos de aplicação, princípio de funcionamento, eficiência energética específica e, neste momento, é importante destacar as principais características de tais lâmpadas.

A seguir, é apresentado um resumo com suas vantagens e desvantagens, além de *drivers* e reatores, componentes de automação para iluminação e uma breve abordagem da Portaria 144 (INMETRO, 2015), que trata sobre a regulamentação de lâmpadas de LED tubulares.

No final deste capítulo o conceito de lâmpadas LED tem um destaque especial, pois apesar de relativamente bem difundido no mercado, existem alguns cuidados que devem ser considerados ao adquirir estes produtos (ANSES, 2010).

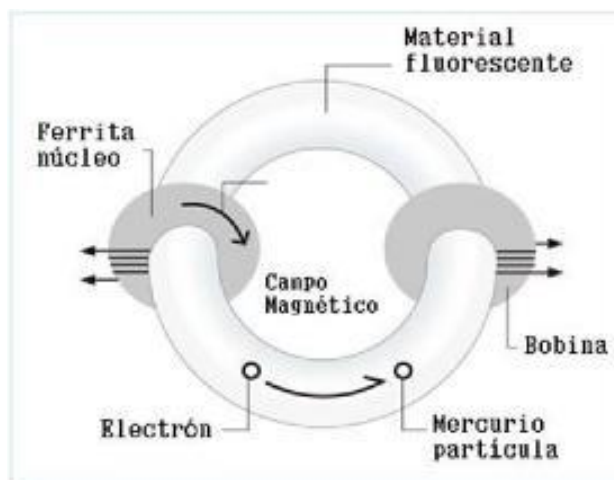
### 4.1 FONTES DE LUZ

No século passado, o mercado da iluminação evoluiu significativamente, aumentando a variedade de produtos e diferentes níveis de eficiência (ANÍBAL, 2014). Para melhor esclarecer as diferenças entre os produtos indicados para iluminação interna, os próximos subcapítulos trazem uma introdução sobre os conceitos básicos de cada tecnologia e suas vantagens e desvantagens.

#### 4.1.1 Lâmpadas de Indução

Similar a lâmpada fluorescente, a lâmpada de indução tem a vantagem de não depender de filamentos para excitação do gás presente. Transformadores eletromagnéticos criam um campo eletromagnético em torno de um tubo de vidro que contém o gás. A descarga, induzida pelas bobinas, forma um circuito fechado causando a aceleração de elétrons livres, que colidem com os átomos de mercúrio e excitam os elétrons. À medida que os elétrons excitados a partir destes átomos mudam deste estado de energia mais elevada a um nível inferior estável, emitem radiação ultravioleta, que por sua vez, através de uma camada de fósforo, se transforma em luz visível. A figura 6 representa o comportamento desta lâmpada.

Figura 6: Funcionamento da lâmpada de Indução.



Fonte: Figura retirada do site da SOKO Produtos de Iluminação.

Apesar de já bem estabelecida, as lâmpadas ganharam mercado apenas nos anos 90, quando grandes fabricantes investiram nessa tecnologia. Porém, devido efeitos não desejáveis, como interferências eletromagnéticas, diminuição do fluxo e a falta de capacidade de dimerização, os usuários perderam interesse nessa tecnologia (WRIGHT, 2014).

Com o surgimento dos mercados emergentes na China e Índia, novos fabricantes entraram no mercado e começaram a investir novamente nessa tecnologia. Passados os problemas, as atuais lâmpadas possuem uma ótima eficiência (chegando até 230 lm/w) e apresentam o tempo de vida útil estimado em até 60.000 horas e custos menores que as lâmpadas de LED de mesma característica (ANÍBAL *et AL*, 2015).

Como desvantagem, ainda apresenta um custo elevado perante as lâmpadas compactas e possíveis problemas no reator, responsável muitas vezes por distúrbios e falta de qualidade na iluminação. Além disso, apresentam alta concentração de mercúrio e uma elevada emissão eletromagnética que, em determinadas aplicações, podem causar problemas de interferências com outros equipamentos.

Outro fator limitante que as lâmpadas de indução é sua forma física, pois não apresentam versões compactas e por isso, dificultam o desempenho fotométrico das luminárias.

Sua principal aplicação se dá em ambientes com pés direito elevados ou para iluminação de túneis, entre outros cuja manutenção costuma ser cara e trabalhosa.

#### 4.1.2 Lâmpadas de Descarga de Baixa Pressão

Por apresentar boa eficiência e durabilidade, as lâmpadas de descarga são extremamente difundidas nas mais diversas aplicações. Seu princípio de funcionamento se dá através da excitação de um gás submetido a uma descarga elétrica entre seus dois terminais. Como a luz gerada através dessa reação está num espectro ultravioleta, é necessário o depósito de fósforo na superfície de seu tubo para torna-la visível. Existem tanto versões tubulares quanto as versões compactas.

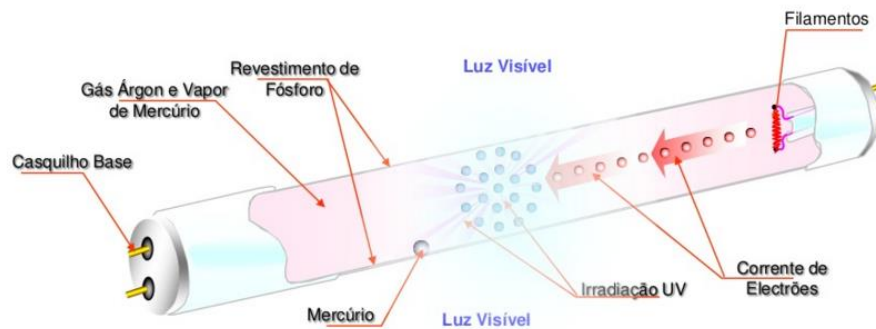
Para funcionamento de ambos os modelos, as lâmpadas de descarga deverão estar acompanhadas de dispositivos eletrônicos auxiliares, entre eles:

**Arrancadores ou ignitores** - dispositivos que atuam durante os instantes iniciais de operação, na qual produzem um breve pico de tensão entre os terminais dos tubos e vencem a resistência inicial do gás à corrente elétrica. Com o surgimento de reatores eletrônicos, esse dispositivo se torna obsoleto em algumas aplicações.

**Reatores** - dispositivos que atuam na alimentação das lâmpadas, limitando a passagem de corrente elétrica que atravessa a lâmpada e, assim, evitar a condição que leve a sua destruição. Existem dois tipos de reatores: eletrônicos e magnéticos. Os reatores eletrônicos apresentam maior frequência de chaveamento, maior fator de potência, durabilidade, aproveitamento da lâmpada e não necessita o uso de ignitores.

As lâmpadas de descarga de baixa pressão tubulares contêm ignitores em suas extremidades. Com o tubo hermeticamente fechado, é preenchido com vapores de mercúrio a baixa pressão e uma pequena quantidade de gases inertes, que servem para controlar o nível de descarga de elétrons e facilitar o acendimento. Como a radiação gerada está na faixa dos 253 nm, para torna a luz visível, as paredes internas são revestidas com compostos fluorescentes. A Figura 7 apresenta maiores explicações sobre o funcionamento de tais lâmpadas.

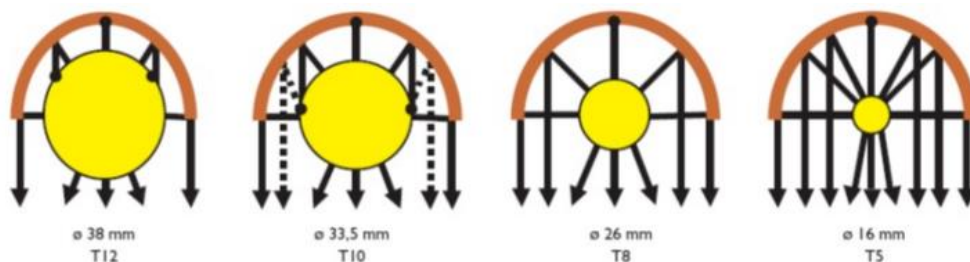
Figura 7: Funcionamento da lâmpada Fluorescente tubular



Fonte: Timóteo, 2011

A fim de aumentar o desempenho das armaduras, é possível adotar o uso de espelhos refletores para melhor aproveitar o fluxo emitido pela lâmpada. Como parte dos raios refletidos pela lâmpada incidem sobre seu próprio corpo, quanto menor o diâmetro da lâmpada utilizada, maior o aproveitamento final da luminária. A figura 8 ilustra o caminho seguido pelos raios após sua reflexão.

Figura 8: Tipo de lâmpada vs. aproveitamento espelho refletor.



Fonte: Araújo, 2016.

As lâmpadas compactas funcionam de forma similar as lâmpadas tubulares convencionais. Uma vez que estas lâmpadas possuem dimensões reduzidas e, portanto, eletrodos mais próximos, os compostos de fósforo não suportavam o arco voltaico e se desintegravam. Apenas nos anos 70, com a invenção dos aluminatos de fósforo, esse tipo de lâmpada pôde ser desenvolvido (TIMÓTEO, 2011).

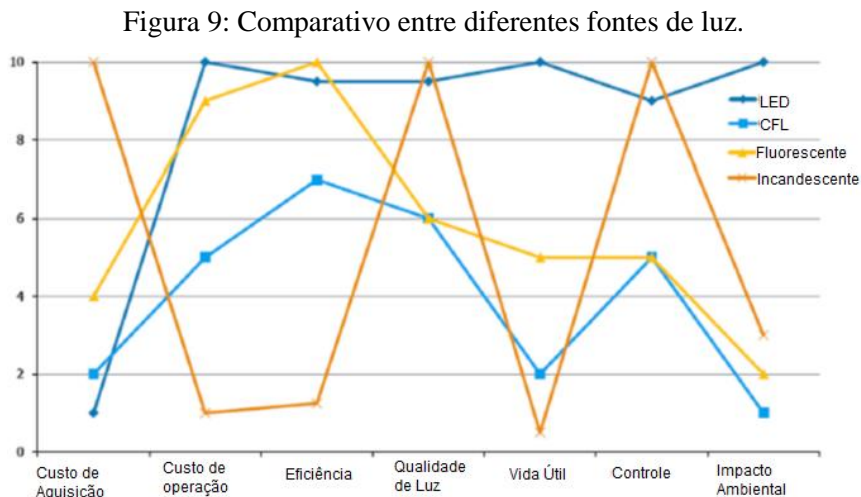
Existem no mercado dois tipos de lâmpadas compactas: com reatores integrados ou vendido em módulos. As lâmpadas com reatores integrados apresentam uma peça única, mostrando-se ideal para substituição da lâmpada incandescente. Seu único inconveniente é a

substituição da peça toda caso sofra alguma avaria. A grande vantagem da lâmpada não integrada é a possibilidade de trocar apenas o tubo fluorescente no caso de uma avaria, preservando a parte eletrônica.

No geral, governos têm estimulado massivamente sua adoção como uma alternativa para uma iluminação eficiente. De fato, tais lâmpadas consomem de 5 a 6 vezes menos que sua incandescente equivalente. Porém, por não abrangerem todo o espectro de luz visível, as CFL's apresentam um CRI bem inferior quando e contém altos níveis de mercúrio, metal altamente prejudicial ao ambiente (TIMÓTEO, 2011).

#### 4.1.3 Diodos Emissores de Luz – LED'S

Com economia e eficiência, o LED pode ser aplicado em iluminação pública, semáforos, lâmpadas para uso doméstico, lâmpadas de alta potência para uso em projetores, displays, entre outra infinidade de aplicações com maiores performances em comparação com outras fontes de luz, conforme Figura 9. Motivados por sua característica e baixo investimento inicial, o uso do LED proporcionou novas oportunidades para diversos pequenos fabricantes (ALMEIDA et al., 2014).



Fonte: Almeida et al. (2014).

Com o rápido crescimento da tecnologia LED, aliada a falta de informação dos consumidores, o mercado de iluminação sofreu uma verdadeira infestação de produtos de baixa qualidade e ineficientes. Uma vez que o LED mostra um grande potencial de economia, é importante tomar alguns cuidados em sua escolha e evitar maiores problemas futuros. (ANSES, 2010).

Para um posterior estudo de viabilidade para implementação dessa tecnologia, é importante ponderar diversos aspectos presentes no LED, destacando alguns pontos importantes e cuidados para sua aplicação.

#### 4.1.2.1 CARACTERÍSTICAS DO LED

O LED é um componente eletrônico semicondutor, do tipo bipolar, com características especialmente desenvolvidas para emitirem fótons durante seu momento de condução. Apesar de já existirem desde os anos 60, foi apenas em 1990 que desenvolveram a dopagem ideal para emissão de luz no espectro azul, preenchendo a lacuna necessária para sua aplicação em iluminação (THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS, 2014).

Para emissão da luz branca, existem algumas técnicas adotadas pelas indústrias de semicondutores: Uma solução é o depósito de uma camada de fósforo sobre o encapsulamento do LED a fim de gerar mais luz no espectro mais amarelado. Um outro método possível é através da combinação de três junções distintas em um mesmo encapsulamento, cada uma responsável por cada luz primária, reproduzindo uma cor branca excelente qualidade luminosa.

Assim como as lâmpadas fluorescentes, o LED também necessita de um dispositivo auxiliar para seu correto funcionamento. Existem tanto drivers de tensão constante como drivers de corrente constante, sendo que cada um é sugerido para diferentes aplicações. Para aplicações em iluminação, devido características construtivas dos diodos, é altamente sugerido o uso de drivers de corrente constante devido os aspectos típicos dos diodos (WILLIAMS, 2016).

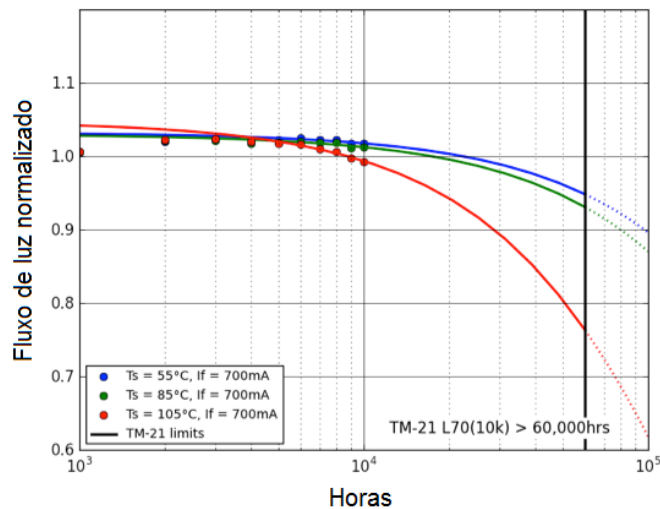
No caso do LED, à medida em que ocorre um aumento de temperatura durante sua operação, ocorre uma diminuição da tensão nominal do diodo. Ao passo que a corrente varia exponencialmente com sua tensão, caso não haja nenhum controle de corrente, pequenas variações de tensão poderão ocasionar um grande aumento de corrente e temperatura levando assim a efeitos indesejáveis, tais como diferentes colorações e intensidades, até sua falha completa.

#### 4.1.2.2 CERTIFICAÇÃO DE QUALIDADE

O relatório publicado por Almeida et al. (2012) destaca a quantidade de produtos com qualidade questionável no mercado da iluminação. Entre os principais problemas encontrados estão a baixa eficiência, CRI abaixo do recomendado e um curto tempo de vida útil. Sendo este último, o problema mais relatado nas luminárias.

Por não haver um padrão para a medição da durabilidade do LED, a Sociedade Norte Americana de Engenharia de Iluminação (IESNA), lançou um padrão para aferição da qualidade do LED, o LM-80. A fim de estimar o tempo de vida útil do diodo, o LM-80 sujeita o LED a diferentes condições de corrente e temperatura, por pelo menos 6.000 horas, a fim de aferir a manutenção de lúmens e mudanças cromáticas, como mostra a figura 10. No final do teste, seus resultados são extrapolados e assim estimam sua longevidade.

Figura 10: Manutenção do fluxo luminoso LED.



Fonte: Figura retirada do site da fabricante de diodos Lumiled.

Apesar de ser um parâmetro importante para escolha da luminária, segundo Almeida et al. (2012), alguns fabricantes utilizam apenas a manutenção de lúmens como critério de estimativa para o tempo de vida útil e, em muitos casos, superestimando a durabilidade do produto. Para o correto cálculo da durabilidade da luminária, é necessário considerar outros fatores, tais como alterações de cor, degradação ótica e temperatura de operação.

### 4.1.3 QUALIDADE DE ENERGIA

Considerando a grande quantidade de carga de iluminação instalada no Mackenzie, na ordem de 77kW apenas para o prédio 6, a escolha de uma Lâmpada Tubular de LED de alta qualidade é essencial para uma justa comparação de viabilidade técnico-econômica ante outras tecnologias de iluminação. Segundo Fassarela *et al.* (2014), a fim de tornarem suas lâmpadas mais competitivos, muitos fabricantes acabam reduzindo sua qualidade, levando ao não cumprimento das normas técnicas e qualidade vigentes no país onde são comercializados.

Ainda, segundo o autor, em uma instalação com algumas dezenas de unidades de lâmpadas, seus efeitos energéticos são imperceptíveis, porém, quando instalados em grandes quantidades as consequências são extremamente prejudiciais ao sistema. Entre os principais efeitos, há um excesso de harmônicas, na qual influencia diretamente no aumento da corrente transportada pelos condutores do neutro.

Além dos efeitos já destacados, Abed e Bravo (2013) ressaltam que as harmônicas são especialmente prejudiciais durante a noite, momento em que a maioria da carga é composta por lâmpadas e, portanto, suscetíveis aos efeitos de cintilação. A harmônica também não só contribui interferências em sistemas eletrônicos, como geram sobre tensões na instalação, falhas em equipamentos de proteção e um decréscimo de até 50% da capacidade de transformadores. Em seu trabalho, foram comparados 8 modelos de diversos fabricantes de lâmpadas LED e verificou-se uma variação entre 4.89% e 185.4% nos níveis de THD.

Shabbir *et al.* (2014) também comenta o ritmo acelerado na adoção de lâmpadas LED por consumidores residenciais e indústrias, na qual focam apenas na aparente economia e acabam acarretando graves no sistema de distribuição local. Com avançadas técnicas de análise de harmônicas, os autores avaliaram o efeito de diversos tipos de lâmpadas de LED na rede e comprovaram que lâmpadas de baixa qualidade, quando instaladas em grandes quantidades, aumentam consideravelmente os efeitos de perdas no sistema.

A fim de garantir a qualidade mínima das lâmpadas comercializadas no País, o Inmetro publicou em 2014 a Portaria 389 e, em 2015, a portaria 144, na qual impõe uma série de restrições relativos a parâmetros elétricos e mecânicos. Dentre os requisitos, as lâmpadas tubulares de LED deverão apresentar um valor máximo de THD e seu diodo deverá apresentar a certificação de durabilidade LM-80.

## 4.2 DISPOSITIVOS DE AUTOMAÇÃO

Com gerenciamento de presença e aproveitamento da luz do dia, os sensores apresentam uma ótima forma de economizar energia, na qual muitas vezes integrando os dois tipos de controle (AGHEMO; BLASO; PELLEGRINO, 2014). Sendo que em algumas normas europeias, já está previsto o uso de automação da iluminação como forma de economia de luz, como por exemplo a Diretiva em Eficiência Energética (*Energy Performance Buildings – 2002*) e a Diretiva de Energia Renovável (*Renewable Energy Directive – 2010*).

A fim de esclarecer os diferentes tipos de automação disponíveis, viabilidade técnica e métodos de implementação, os próximos subcapítulos apresentam um resumo com os principais métodos de controle e protocolos de comunicação existentes no mercado.

### 4.2.1 Sensores de presença

Sensores de ocupação reagem de acordo com a movimentação no espaço e podem gerar grandes economias, dependendo de sua aplicação, garantindo que as luzes permaneçam desligadas em ambientes vazios. Seu uso se torna vantajoso em locais aonde há um perfil de ocupação imprevisível ou locais com pouca utilização. Atualmente, os controladores mais comuns são os ultrassônicos ou infravermelhos e sua adoção varia conforme o ambiente.

Os sensores ultrassônicos emitem frequências sonoras ultrassônicas que, ao atingir objetos, são refletidas novamente ao sensor. Caso haja algum movimento no ambiente, por princípios baseados no Efeito Doppler, há uma alteração do comprimento da onda refletida e, com isso, o sensor detecta o movimento. Por utilizar ondas sonoras, esse sensor é adequado para aplicações em lugares aonde há barreiras físicas entre o sensor e o usuário, como escritórios, por exemplo.

Os sensores infravermelhos, ou *Passive Infrared Sensor (PIR)*, em inglês, reagem conforme a emissão de calor do corpo humano ou animais. O princípio básico de funcionamento desses sensores funciona por um composto por zonas de detecção, os sensores atuam conforme diferentes níveis de calor em cada seção. Com o ambiente em vazio, por exemplo, os diferentes elementos internos captam o mesmo nível de radiação infravermelha (IR) e, portanto, apresentam o mesmo diferencial. Quando um corpo emissor de calor passa sobre a primeira zona de detecção, o primeiro elemento apresenta uma incidência maior de

radiação e cria uma diferença de tensão positiva, estimulando sua resposta, como mostra a figura 11. Quanto maior o número de seções mais preciso será o sensor.

Figura 11: Sensor de presença Infravermelho.

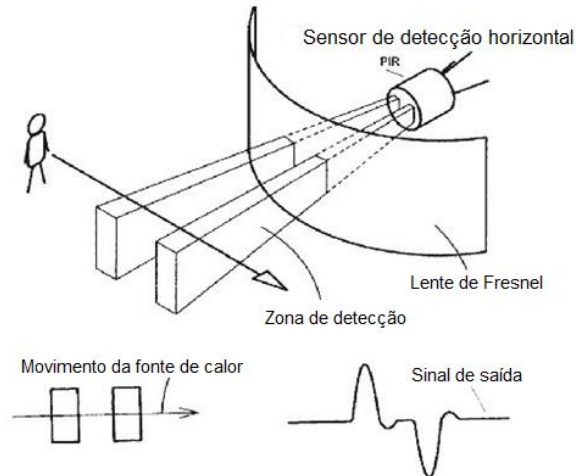


Figura retirada do artigo “How PIRs Work”.

Devido aspectos construtivos das lentes, os sensores PIR deverão ser otimizados para seu uso específicos em paredes ou para aplicação no teto. Sua principal desvantagem é a necessidade da exposição direta do corpo para acionar o sensor e devido sua sensibilidade varia proporcionalmente à distância.

Conforme Floyd (1995), a escolha do posicionamento é essencial para um bom aproveitamento dos sensores e menor desconforto aos usuários, causado por falsos acionamentos. Em seu trabalho, por exemplo, Floyd adotou o uso de sensores próximo à cadeira do professor e configurou o tempo de atraso de 12 minutos, mostrando-se um funcionamento eficaz na maioria dos eventos. Antes de sua aplicação em algum ambiente, o autor indica a adoção de registradores de movimentos, ou outras formas de registro, para sua avaliação de viabilidade econômica.

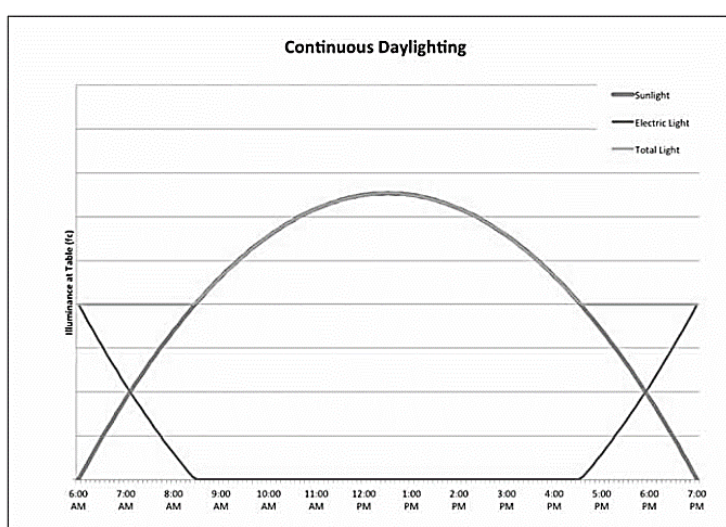
#### 4.2.2 Sensor de luz solar

De um modo geral, existem controladores de luz simples (liga/desliga) ou dimerizáveis. Os controladores simples funcionam conforme a variação da luz do ambiente, chaveando seu circuito elétrico para a posição liga ou desliga. Apesar de baixo custo, seu uso não é indicado para o uso em ambientes internos por alguns fatores, tais como redução da vida

útil da luminária e desconforto aos usuários, uma vez que há uma variação drástica do nível de luminosidade.

Os sensores de luz dimerizáveis se caracterizam por modular a potência de saída dos reatores a fim de manter a iluminação do ambiente mais constante possível. A figura 12 retrata a incidência solar e o consumo elétrico em uma sala com o uso de sensores. Para o controle de luminosidade, o reator deverá estar aliado a um reator ou driver compatível com o mesmo protocolo de comando.

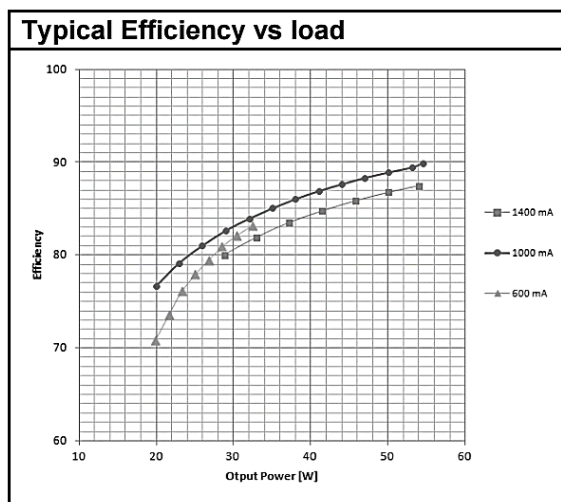
Figura 12: Curva de carga com sensor de aproveitamento solar.



Fonte: Figura retirada do catálogo de produtos Lutron.

Para Roisin et al. (2007), nos cálculos de rendimento de um projeto com sensores, é importante considerar alguns fatos que podem passar despercebidos, mas que causam grande influência no cálculo de consumo final. Além do consumo parasita dos sensores, como já citando anteriormente, é preciso considerar a variação do nível de eficiência dos reatores conforme a potência de saída. A figura 13 demonstra a relação de potência vs eficiência do driver de LED Osram OTe FIT50.

Figura 13: Gráfico de eficiência vs. potência de saída

Figura retirada do *Datasheet* do driver Osram OTe FIT50

### 4.2.3 Localização dos sensores

Como pré-requisito para certificação nível A no Procel Edifica, em ambientes com alguma das faces para a janela e pelo menos 2 fileiras de luminárias paralela à abertura, o Regulamento de Avaliação de Conformidade (RAC) prevê a adoção de algum controle para garantir um maior aproveitamento energético da luz solar. Esse controle deverá permitir o usuário controlar, manualmente ou não, a variação da luminosidade da lâmpada conforme os níveis de luz solar.

Como a luz solar não penetra totalmente no ambiente, no caso de uma janela ou abertura lateral, os níveis de iluminação serão diferentes conforme a distância da janela. Portanto, quanto mais próximo da parede com a abertura, maior será a influência solar e menor deverá ser a potência da luminária.

Na hora da adoção dos controladores, a localização dos sensores tem influência direta sobre o comportamento da automação. Numa abordagem de *Open Loop*, por exemplo, os sensores são focalizados à janela de modo a alterar os níveis de potência da luminária conforme a variação da luz solar. Seu uso é geralmente adotado para o controle de grandes áreas de modo a minimizar a quantidade de sensores instalados. Sua principal desvantagem é, por não haver nenhuma referência interna, manter os níveis de luminosidade abaixo ou acima do recomendado.

Numa abordagem *Closed Loop*, os sensores de luminosidade estão diretamente apontados para uma área de trabalho específica, de forma a manter a iluminância o mais

constante possível. Uma vez que o sensor não distingue flutuações da luz solar ou mudanças de refletância da área de trabalho, esse método de controle é eficaz quando implementado em pequenas áreas ou, no caso de grandes áreas, seja feito um controle individual por luminária.

Outro ponto importante para definição da localização dos sensores é a sua posição relativa à luminária, pois esta pode influenciar diretamente os níveis de saída do controlador, caso sua luz incida diretamente sobre o sensor, e causar comportamentos não previstos no projeto. Para minimizar este efeito, os controladores deverão ser instalados de tal maneira que não recebam incidência de luz direta ou a mínima possível.

#### **4.2.4 Controle de agendamento**

Outra forma de automação em eficiência energética é através de controle temporal, na qual se desliga o sistema de iluminação conforme um período já pré-programado. Atualmente existem inúmeros dispositivos para este fim, desde os simples controles analógicos ligados em série com o circuito até complexos sistemas com endereçamento à luminária, na qual as controla à distância.

Como principal vantagem, é possível assegurar que não haverá gastos desnecessários com a iluminação nos períodos fora do horário de funcionamento do edifício. Porém, uma vez que o aparelho liga e desliga independentemente da presença de usuários ou não, pode gerar um consumo indevido em feriados não previstos no sistema ou, na ocasião de alguém trabalhar após o expediente, o sistema de iluminação se apagar. Com essas considerações, faz-se sempre necessário aliar este sistema com um controle manual.

Uma variação deste sistema é o relógio astronômico. Normalmente usados em áreas externas, o aparelho calcula de acordo com sua coordenada geográfica a hora exata de nascer e pôr do sol, comutando seus contatos para ligar ou desligar a luz no momento adequado.

### **4.3 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO**

Na comunicação de sistemas automatizados, protocolo é um padrão que especifica a forma de dados e as regras a serem seguidas, determinando como um programa deve preparar os dados para serem enviados para o estágio seguinte do processo de comunicação. Para o funcionamento da automação de iluminação, a comunicação entre

sensores e luminárias é a peça chave para o sucesso de uma automação (BENEDIKTSSON, 2009).

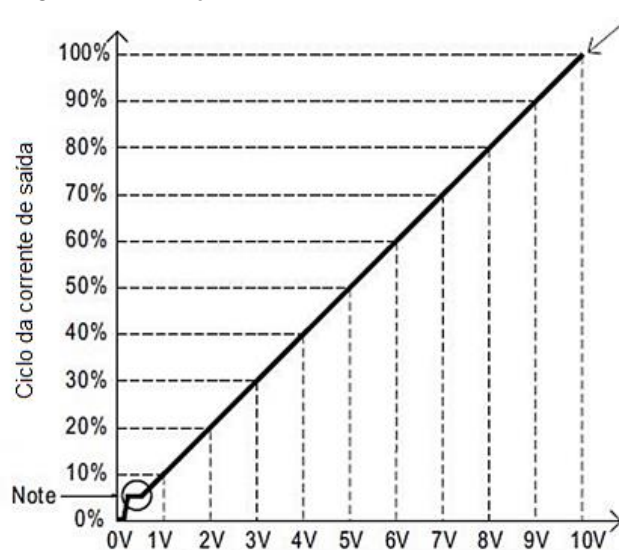
Da mesma forma que existem diversos tipos de controles de automação da iluminação, existem diversos protocolos de comunicação entre sensores e luminárias, sendo que cada um deles trazem vantagens e desvantagens.

Sendo alguns deles digitais e outros analógicos, o custo de implementação varia de acordo com a complexidade do sistema e os requisitos do projeto. Neste subcapítulo é apresentado um resumo sobre os principais protocolos de comunicação usados no mercado de iluminação.

### 4.3.1 Controle 0-10V

A dimerização baseada na entrada de sinal entre 0-10V foi um dos primeiros e mais simples sistemas de controle de iluminação disponíveis no mercado (BENEDIKTSSON, 2009). Seu controle é feito através de um sinal de tensão em corrente contínua que varia de 0 a 10 volts, sendo o fluxo de saída diretamente proporcional a entrada de tensão. 0 volts equivalente 0% da potência de saída e 10 volts equivale à potência total de saída. A figura 14 ilustra a curva de resposta de saída de um dispositivo de alimentação conforme seu nível de entrada.

Figura 14: Relação entre tensão de entrada e corrente de saída.



Fonte: Retirado do *Datasheet* do driver de corrente Meanwell PWM-40.

Por ser um sistema relativamente simples, os custos de seus componentes são extremamente baixos e o custo dos drivers 0-10V são praticamente iguais ao dos modelos convencionais, como pode ser verificado através de pesquisa de mercado.

No caso da adoção de algum sistema 0-10V, é necessário tomar alguns cuidados na hora da compra de equipamentos, pois alguns sistemas variam entre 0 e -10V e outros variam entre 0 e +10 volts e não são compatíveis entre si.

Como sua corrente de regulação, por norma, é de tipicamente 2mA, é possível utilizar cabos relativamente finos sem causar interferências devido queda de tensão. Entretanto, uma vez que cada cabo de sinal pode ser ligado a apenas uma luminária para seu controle independente, sistemas de automação sofisticados necessitariam de centenas de cabos e, conseqüentemente, aumentando seu custo de instalação. Outro fator significativo na hora da instalação é maior cuidado com interferências de cabos AC, pois sua frequência de 60Hz pode induzir oscilações do nível de tensão do sinal ocasionando *flicker* nas luminárias. (BENEDIKTSSON, 2009).

#### 4.3.2 DALI

Desenvolvida por um grupo de trabalho formada por diferentes fabricantes de dispositivos de iluminação, o AG-DALI tem como objetivo promulgar um novo protocolo de controle para sistemas de automação de iluminação e coordenar as atividades dos fabricantes destes dispositivos.

O DALI, ou “*Digital Addressable Lighting Interface*”, é um padrão de controle de iluminação que assegura a intercambialidade entre dispositivos de diferentes fabricantes. Apesar do padrão 0-10 V ser o mais adotado no controle de luminárias, padrão DALI está evoluindo rapidamente, tornando-se a principal escolha em novos projetos. (LEDYARD, 2015)

O protocolo DALI é usado exclusivamente para sistemas de iluminação e, portanto, otimizado para esse fim. Como DALI é um protocolo bidirecional e endereçável, é possível comandar individualmente cada luminária, receber feedbacks com a situação de funcionamento, temperatura de operação da lâmpada e até correção da depreciação do LED, regulando gradualmente a potência de saída do *driver* a fim de garantir um fluxo de luz constante. Além disso é possível a interconexão com sistemas de gerenciamento predial (BENEDIKTSSON, 2009).

Com relação à sua instalação, o DALI apresenta uma grande flexibilidade da instalação de luminárias, permitindo em um único cabo bipolar, controlar até 64 luminárias.

Por ser um sinal digital, também apresenta grande imunidade a ruídos. Diferente do sinal 0-10v, é possível mover ou adicionar luminárias sem necessidade grandes alterações da infraestrutura de controle. Para controle das luminárias, é necessário a adoção de dispositivos de controle na qual recebe os sinais de sensores e, em sua saída, encontra-se o terminal de conexão com os reatores.

Como desvantagens, em sistemas antigos onde necessita a substituição do *drivers*, não é possível a simples troca do equipamento, devido o endereço de cada dispositivo. Por isso, a cada troca, é necessário também a alteração de endereçamento no sistema de controle.

Também é necessário prever o elevado consumo de energia parasita destes dispositivos, pois, mesmo que não há luz acessa no ambiente, o *driver* sempre estará consumindo energia em sua comunicação permanente com o sistema de controle. Uma solução para este problema, é a utilização de contadores ligados à rede de energia para desconectar os dispositivos e evitar o consumo desnecessário.

## 5 ESTUDO DE CASO

Conforme descrito no capítulo 4, existem diferentes tecnologias de fontes de iluminação e variam de acordo com eficiência, custo, distribuição de luz e viabilidade técnica.

A fim de estabelecer uma comparação entre tais alternativas, este capítulo apresenta uma análise de parâmetros elétricos e simulação computacional dos níveis de iluminância atingidos com cada tecnologia.

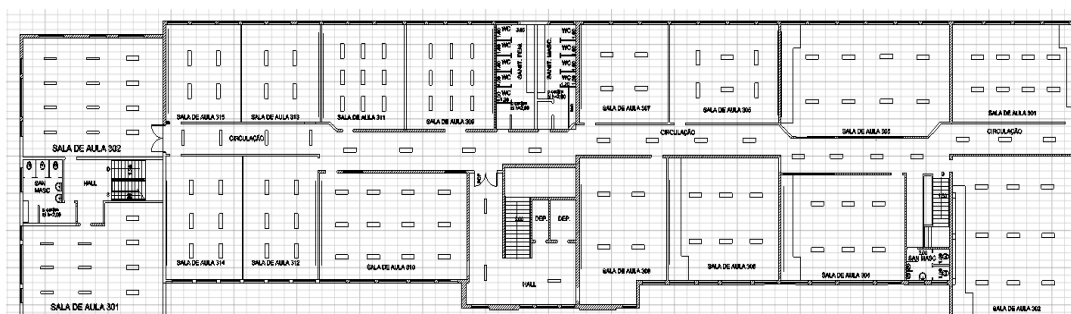
Entre tais tecnologias, é abordada a hipótese de substituição do sistema atual por luminária com lâmpada T5, adoção de lâmpadas tubulares de LED ou luminárias de LED e posteriormente a implementação de um sistema de aproveitamento de luz solar.

Para verificar se as estratégias foram condizentes com toda metodologia adotadas neste trabalho, é mostrada a simulação computacional luminotécnica e sistema de aproveitamento de luz solar com base em uma sala real do prédio 6 da Escola de Engenharia, que em conjunto com a equipe de *Facilities Service* da UPM, tornou-se possível a realização deste estudo de caso.

### 5.1 SITUAÇÃO ATUAL DO LOCAL

Por conter uma grande quantidade de lâmpadas e um sistema de iluminação baseado em uma tecnologia desenvolvida há mais de 30 anos, os prédios 5 e 6, cuja planta se encontra na figura 15, do Instituto Presbiteriano Mackenzie demonstra um bom potencial para um trabalho de eficiência energética.

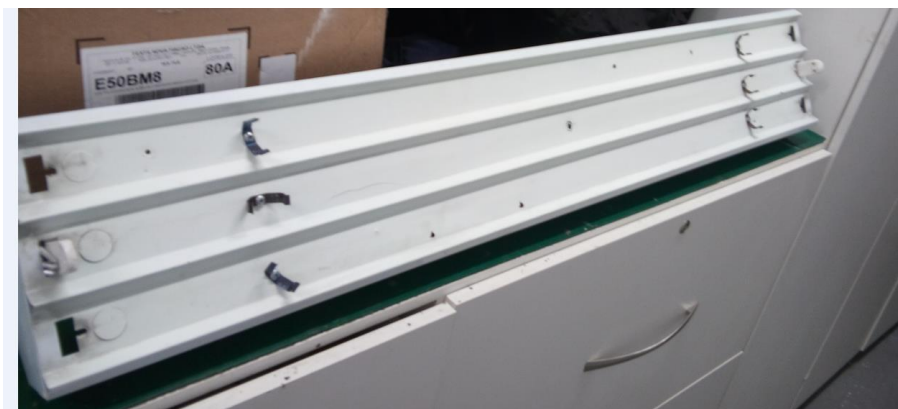
Figura 15: 3ª andar da Escola de Engenharia do Mackenzie.



Fonte: Figura fornecida pela equipe de *Facilities* UPM.

O atual sistema de iluminação é baseado no uso de luminárias compostas por uma chapa metálica na cor branca, sem espelho refletor e divididas em modelos com 2 lâmpadas, 3 lâmpadas e 4 lâmpadas, todas de 32 Watts. As lâmpadas presentes no sistema de iluminação são do tipo T8 e apresentam reatores individuais. Na figura 16, segue um exemplo da luminária de 3 lâmpadas

Figura 16: Armadura presente nas instalações



Fonte: Autoria própria.

Os modelos das luminárias foram adotados de acordo com o tamanho de cada sala aula e seu requisito luminotécnico. No geral, o quadro 2 apresenta o número total de lâmpadas e luminárias descritas de acordo com o edifício, andar e o tipo de luminária.

Quadro 2: Levantamento de luminárias do prédio 5 e 6.

Prédio	Andar	Tipos de Luminárias por Andar			Total lâmpada	Potência
		2 lâmpadas	3 lâmpadas	4 lâmpadas		
5	2	14	0	8	60	1920
5	3	14	0	8	60	1920
6	2	63	2	10	172	5504
6	3	0	18	95	434	13888
TOTAL		91	20	121	726	23232

Fonte: Dados fornecidos pela equipe de *facilities* da Universidade.

Para implementação do modelo computacional da sala de aula, o posicionamento atual das luminárias foi obtido com a trena a laser BOSCH GLM 80 e deram o seguinte resultado:

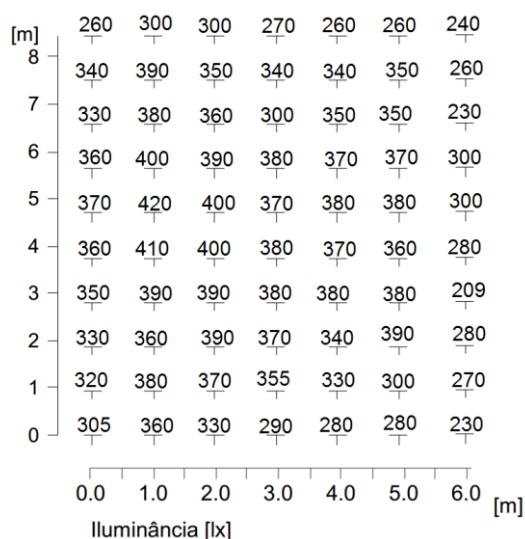
- Altura do pé direito: 4,12 metros;
- Altura do plano das luminárias: 3,5 metros;
- Altura do plano de trabalho: 0,8 metros.

A fim de validar o modelo computacional, foi realizado as medições do nível de iluminância de acordo com a norma ABNT/ISSO 8995 e seus resultados foram comparados aos

níveis encontrados na simulação computacional. Uma vez que os resultados obtidos na medição e simulação apresentam semelhança, o modelo computacional está condizente com a realidade e é considerado validado.

Para determinar a posição de cada ponto durante a medição, utilizou-se a trena a laser para ter uma referência da posição X e Y e os níveis de iluminância foram medidos através do luxímetro HM-1002 da Minipa. Os resultados obtidos foram transferidos ao computador e constam na figura 17, na qual cada ponto do gráfico equivale a iluminância medida com o luxímetro. De acordo com o critério de cálculo apresentado na norma, a iluminância média equivale a 338 Lux e o fator de uniformidade  $E_m/U_o = 0,657$ .

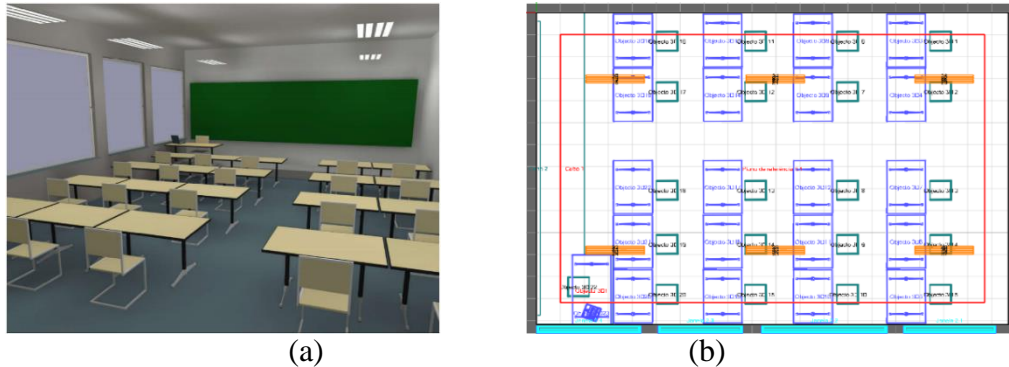
Figura 17: Iluminância atual.



Fonte: Autoria própria

No *software* Relux, é possível modificar alguns parâmetros do ambiente e métodos de cálculo para assim assegurar melhor conformidade com o local a ser simulado. A parametrização do modelo computacional implementado foi baseada conforme recomendação da NBR/ISO8995, sendo as paredes brancas com um índice de reflexão de 0,8 e o piso cinza com um índice de reflexão 0,5. A figura 18a representa a vista tridimensional e a Figura 18b mostra a planta vista de cima da sala de aula implementada no Relux.

Figura 18: Planta no software Relux.

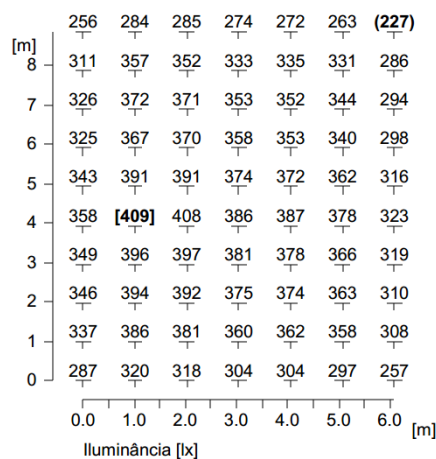


Fonte: Autoria própria.

Com relação a área de trabalho a ser considerada, segundo descrito pelo Anexo A.3.3 na NBR/ISO8995, em situações onde as mesas dos estudantes são muitas vezes reorganizadas, a área de trabalho considerada deverá ser a área inteira da sala menos o espaço de 0,5 metros da parede. A uniformidade planejada deve ser  $U1 \geq 0,6$  e fator de manutenção equivalente ao empregado em ambientes limpo e ciclo de manutenção e reposição conforme descrito pelo fabricante da luminária, que no caso equivale a 0.8.

Com estas considerações, a figura 19 apresenta os resultados obtidos pela simulação computacional, sendo os valores destacados em negrito o equivalente ao máximo e mínimo obtidos.

Figura 19: Simulação situação atual



Fonte: Dados obtidos no software Relux

Comparando os valores obtidos na simulação e as medições realizadas em campo, verificam-se semelhanças entre os dois valores e suas distribuições, conforme apresentados pelo quadro 3.

Quadro 3: Comparação entre simulação e situação real.

	Iluminância média	Uniformidade Emin/Emax
Medição real	343	0,63
Simulação	342	0,67
Semelhança	100%	94%

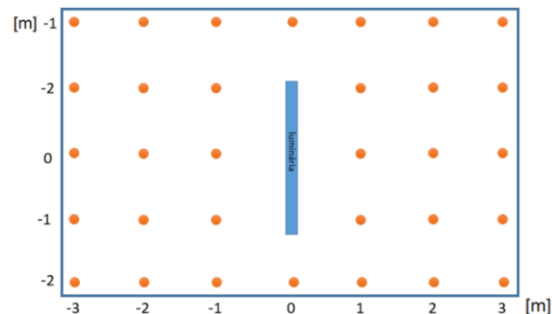
Fonte: Autoria própria.

## 5.2 TESTE ELÉTRICO DE LÂMPADAS

Já com relação aos LEDs, apesar de existir a Portaria 144, na qual regulamenta e especifica a qualidade mínima exigida para as lâmpadas de LED com *driver* integrado, sua homologação é compulsória e a venda de produtos não homologados está permitida até março de 2017. Considerando estes fatos, foram comparados os parâmetros elétricos de diversas lâmpadas tubulares de LED a fim de indicar a qualidade das amostras obtidas.

Para comparação do fluxo luminoso entre diferentes lâmpadas de LED tubular, foi realizado um teste semelhante ao descrito no artigo “*Techno Economic Analysis of LED Lighting*” (GAN et al., 2013) na qual, em uma sala sem interferência de luz externa, a lâmpada a ser testada é alocada em um suporte acima de uma malha de pontos e com um luxímetro é realizado a medição de iluminância cada ponto, conforme ilustra a figura 20.

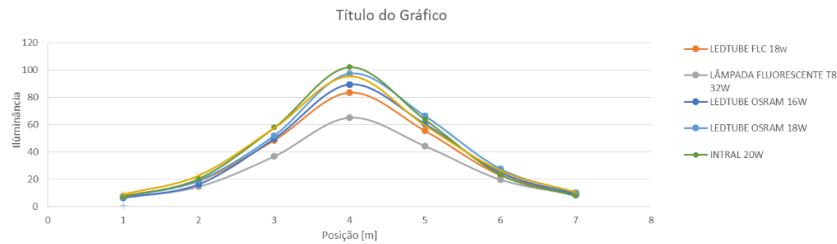
Figura 20: Medição lâmpadas tubular LED.



Fonte: Autoria própria

No teste realizado, as lâmpadas estavam localizadas a um pé direito de 1,2 metros e a malha com 1 metro de lado. Com a média dos valores obtidos em cada coluna da figura 20, dividiu-se o resultado por sua potência de forma a encontrar a eficiência luminosa de cada lâmpada, como mostrada na figura 21.

Figura 21: Comparação entre fluxo luminoso lâmpadas LED.



Fonte: Autoria própria.

Já no teste de potência e parâmetros elétricos, as lâmpadas foram alimentadas através da fonte de tensão senoidal Califória Instruments 1501ix, com uma tensão fixada em 127 volts e 60 Hz. Os resultados da medição estão no quadro 4 e comprovam a diferença entre parâmetros elétricos entre diferentes lâmpadas disponíveis no mercado.

Quadro 4: Comparação potência LEDtubes.

Modelo	Tensão	Potencia declarada	Potencia real	Corrente RMS	Corrente de Pico	FP	THD
Osram Substitube Basic	127	18	18,9	0,154	0,284	0,96	11,87%
Osram Substitube Basic	127	16	15,4	0,124	0,205	0,97	20,93%
Lampada FSL	127	18	19,1	0,254	0,758	0,59	78.3%
DBTEC	127	18	18,1	0,146	0,23	0,97	21.89%
Original LED	127	18	18.2	0,15	0,256	0,96	27,47%

Fonte: Autoria própria

### 5.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Com o catálogo eletrônico disponibilizado por fabricantes de luminárias, foram simulados diversos modelos através do *software* Relux de modo a encontrar a melhor relação entre distribuição espacial e consumo elétrico. Dentre as simulações realizadas, o trabalho destaca as 10 alternativas que obtiveram menor consumo ou se mostraram tecnicamente interessante, divididos em:

- Cenário 1: Simulação com Lâmpadas Fluorescentes.
- Cenário 2: Simulação com Lâmpadas LED.

- Cenário 3: Simulação com Luminárias LED.

### 5.3.1 Simulação com Lâmpadas Fluorescentes

Para a simulação com lâmpadas fluorescentes T5, foram selecionadas apenas armaduras com refletor interno, pois seu uso proporciona maior aproveitamento do fluxo de saída das lâmpadas tubulares e, conseqüentemente, maior eficiência do sistema de iluminação. As figuras 22, 23, 24 e 25 apresentam a disposição física das luminárias no ambiente de modo a otimizar a uniformidade da luz.

Figura 22: Refletor 95% com aleta simples 1 lâmpada T5 de 54W.

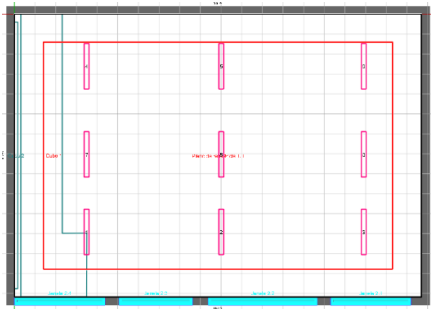


Figura 223: Refletor 85% com aleta simples 1 lâmpada T5 de 54 W.

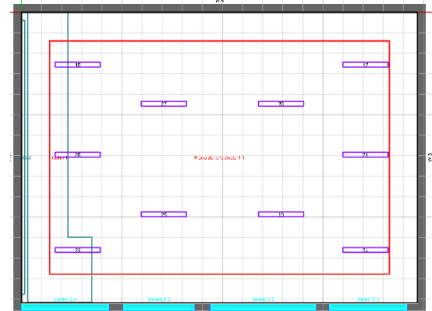


Figura 24: Armadura com Refletor 85% com controle rigoroso de ofuscamento e 2 lâmpadas T5 de 28W

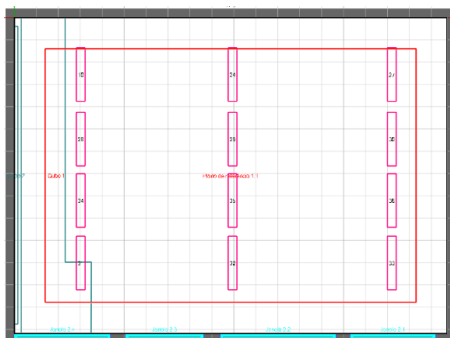
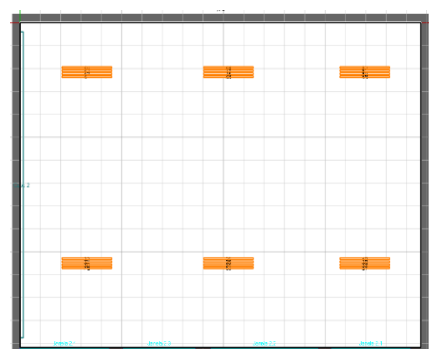


Figura 25: Armadura original sem controle de ofuscamento e refletor com 4 lâmpadas T8 de 36W



A fim de analisar os níveis de iluminância atingidos conforme cada solução de lâmpadas fluorescente exposta, as figuras 26, 27, 28, 29 apresentam o gráfico de cores falsas, onde observam-se a predominância da cor verde e laranja, que equivalem respectivamente a faixa entre 300 lux - 500 lux e 500 lux - 700 lux.

Figura 26: Refletor 95% com aleta simples 1 lâmpada T5 de 54W.

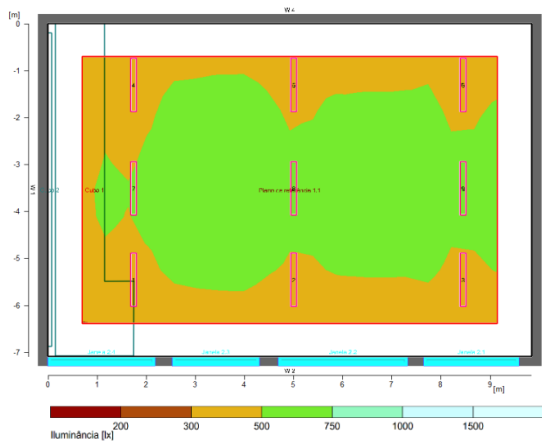


Figura 27: Refletor 85% com aleta simples 1 lâmpada T5 de 54 W.

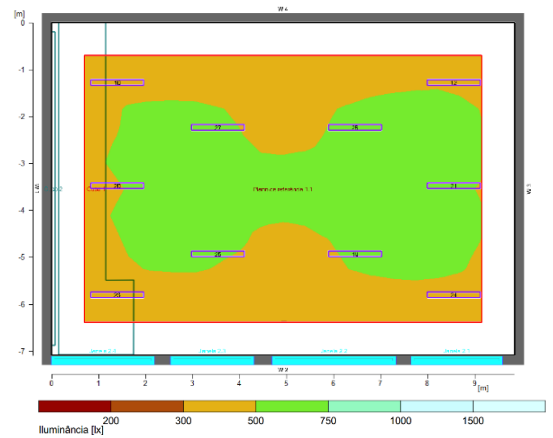


Figura 28: Armadura com Refletor 85% com controle rigoroso de ofuscamento e 2 lâmpadas T5 de 28W

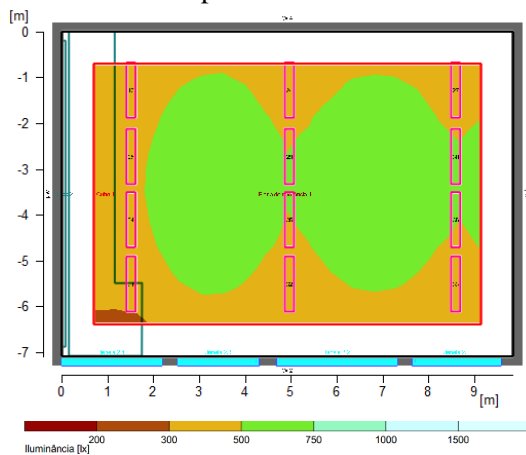
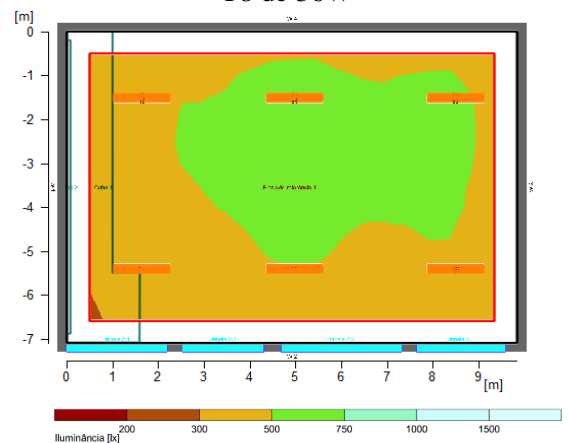


Figura 29: Armadura original sem controle de ofuscamento e refletor com 4 lâmpadas T8 de 36W



### 5.3.2 Simulação com Lâmpadas LED

Para opção com lâmpadas de LED tubular, por serem facilmente encontradas no mercado, é apresentada soluções para o uso de lâmpadas de 1700 lúmens, 1900 lúmens, 2000 lúmens e 2500 lúmens. Assim, a escolha não estará limitada ao fluxo de saída e poderá ser adotada conforme condições de negociação com fornecedores.

As figuras abaixo apresentam a disposição física das luminárias no ambiente de modo a otimizar a uniformidade da luz, sendo a figura 30 - 4 lâmpadas de 1700 lúmens por armadura; Figura 31 -4 lâmpadas de 1900 lúmens por armadura; figura 33 - 3 lâmpadas de 2200 lúmens por armadura e figura 32 - 4 lâmpadas de 2500 lúmens por armadura.

Figura 30: 3 lâmpadas LED tubular 1700 lúmens

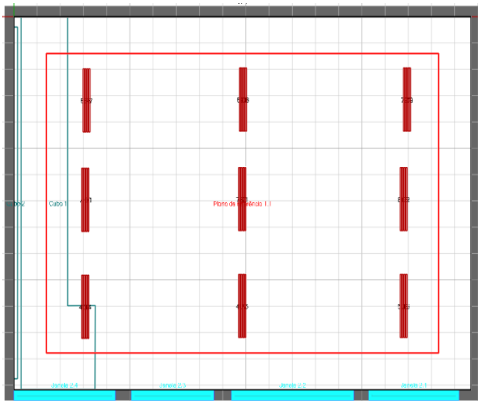


Figura 31: 4 lâmpadas LED tubular 1900 lúmens

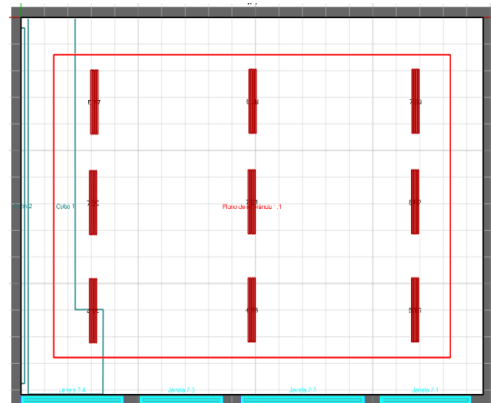


Figura 32: 4 lâmpadas LED tubular 2500 lúmens

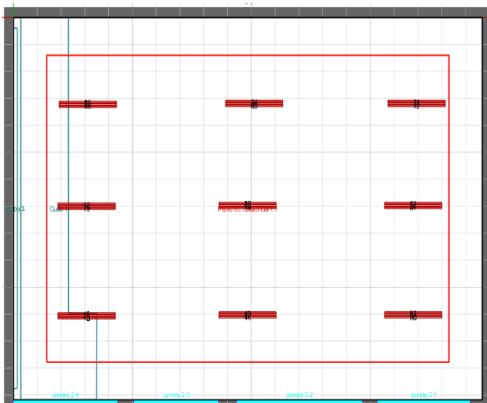
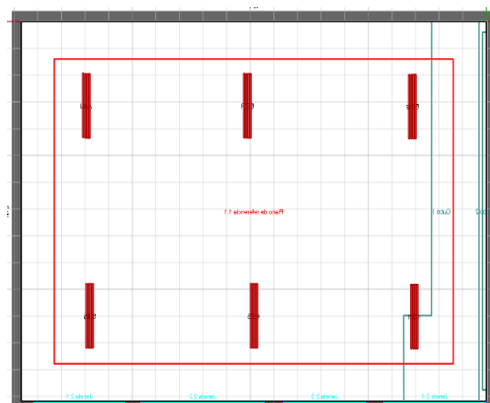


Figura 33: 4 lâmpadas LED tubular 2500 lúmens



A fim de analisar os níveis de iluminância atingidos conforme cada solução de lâmpadas fluorescente exposta, as figuras 34, 35, 36, 37 apresentam o gráfico de cores falsas, onde observa-se a predominância da cor verde e laranja, que equivalem respectivamente a faixa entre 300 lux - 500 lux e 500 lux - 700 lux.

Figura 34: 3 lâmpadas LED tubular 1700 lúmens

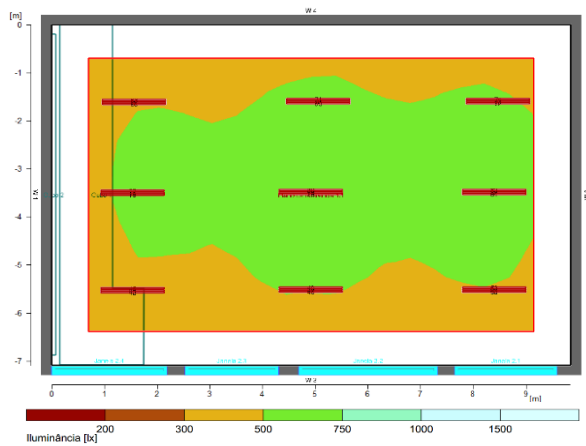


Figura 35: 4 lâmpadas LED tubular 1900 lúmens

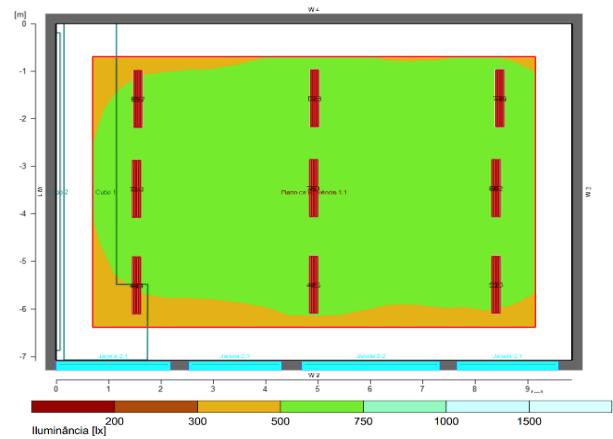


Figura 23: 4 lâmpadas LED tubular 2200 lúmens

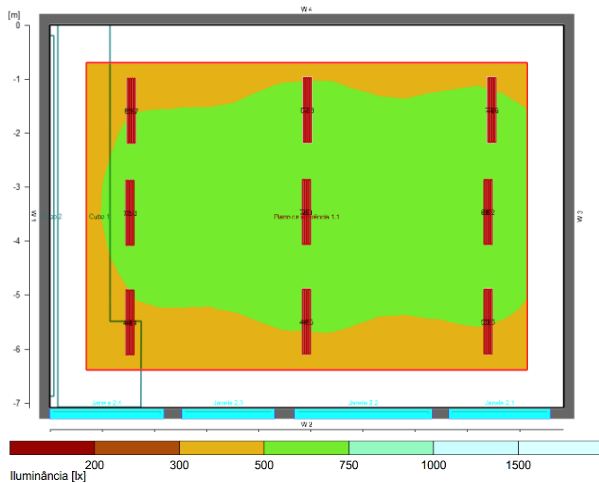
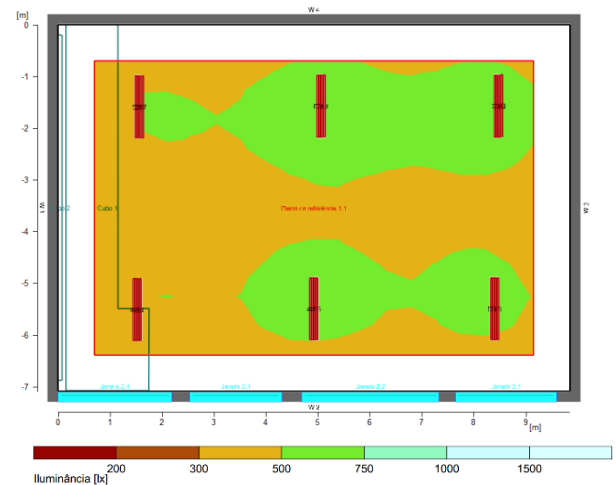


Figura 24: 4 lâmpadas LED tubular 2500 lúmens



Conforme demonstrado na fundamentação teórica, é indiscutível que a iluminação por LED já é uma tecnologia bem estabelecida e seus níveis de confiabilidade e eficiência justificam seu uso.

A partir do catálogo de duas empresas nacionais fabricantes de luminárias de LED, foi simulado situação com o uso de tais luminárias. As figuras 38 e 39 apresentam a disposição das armaduras a fim de atingir o melhor aproveitamento possível da iluminação. Devido à falta de disponibilidade de arquivos .IES, foram realizados apenas uma simulação de cada fabricante.

Figura 38: Luminária LED 2725 ITAIM

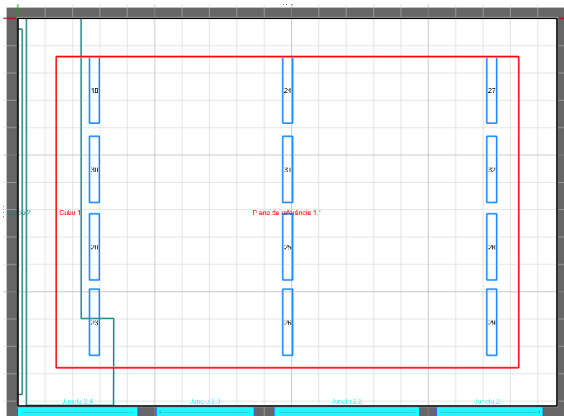
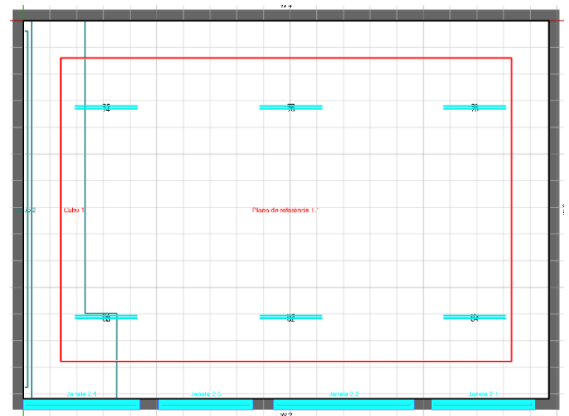


Figura 39: Luminária LED Retangular de Alta Eficiência



As figuras 40 e 41 apresentam o gráfico de cores falsas, na qual cada linha representa a divisão de uma área com valores de iluminância semelhantes.

Figura 40: Luminária LED 2725 ITAIM

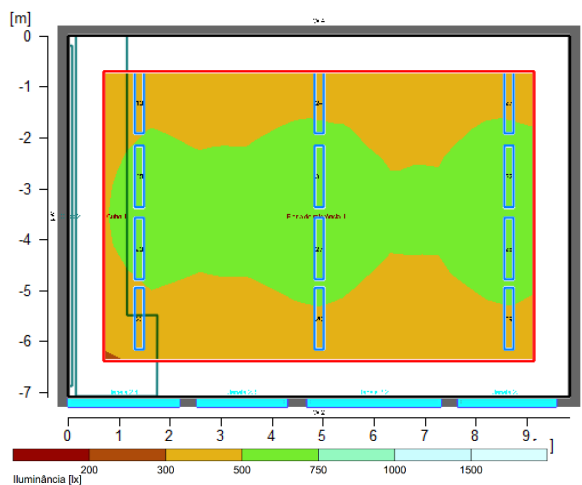
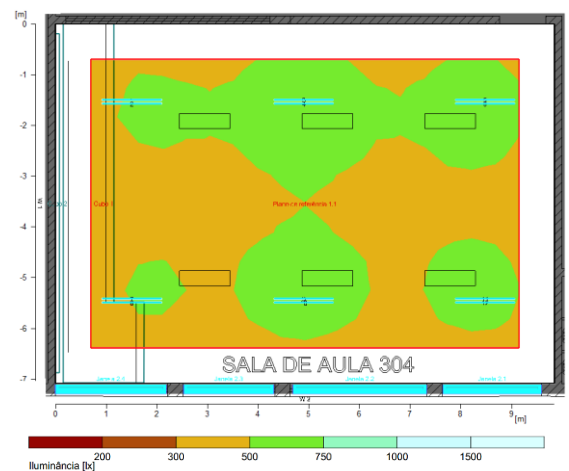


Figura 41: Lâmpada LED Retangular Alta Eficiência



A fim de melhor comparar os resultados obtidos, no quadro 5 são apresentadas informações essenciais para a avaliação do desempenho luminotécnico e performance elétrica de todas as soluções estudadas.

Quadro 5: Comparativo das simulações

		Iluminância Média	Uniformidade (U <sub>o</sub> )	UGR	Potência por área	Potência Total	Quantidade Luminárias	Quantidade Lâmpadas
Lâmpada Florescente	Luminária 2 x T5 28W e espelho 85% de reflexão	463 lx	0,56	<=18,8	11,16 W/m <sup>2</sup>	672 [W]	12	24
	Luminária 1xT5 54W com espelho de 95% de reflexão	480 lx	0,61	<=21,7	7,06 W/m <sup>2</sup>	486 [W]	9	9
	Luminária 1xT5 54W com espelho de 86% de reflexão	460 lx	0,65	<=23,7	7,84 W/m <sup>2</sup>	540 [W]	10	10
	Situação com armadura original e 4 lâmpadas de 36W	458	0,59	<=27,4	12,54 W/m <sup>2</sup>	864 [W]	6	24
Lâmpada LED tubular	Lâmpada LED tubular com 1700 lm	499 lx	0,61	<=26,0	9,41 W/m <sup>2</sup>	648 [W]	9	36
	Lâmpada LED tubular com 1900 lm	558 lx	0,61	<=26,4	7,84 W/m <sup>2</sup>	648 [W]	9	36
	Lâmpada LED tubular com 2200 lm	481 lx	0,63	<=26,9	7,06 W/m <sup>2</sup>	540 [W]	9	27
	Lâmpada LED tubular com 2500 lm	475 lx	0,72	<=27,4	4,36 W/m <sup>2</sup>	300 [W]	6	24
Luminária LED	Luminária LED com espelho 86% de refletância e controle de ofuscamento	451	0,6	<=18,4	5,40 W/m <sup>2</sup>	372 [W]	12	12
	Lâmpada Retangular LED de alta eficiência e	479 lx	0,72	<=32,4	3,86 W/m <sup>2</sup>	270 [W]	6	12

Fonte: Autoria própria.

#### 5.4 APROVEITAMENTO DE LUZ SOLAR

Conforme os artigos descritos na revisão da literatura, o sensor de luz solar pode reduzir de forma significativa o consumo de energia elétrica sem comprometer o conforto visual dos usuários.

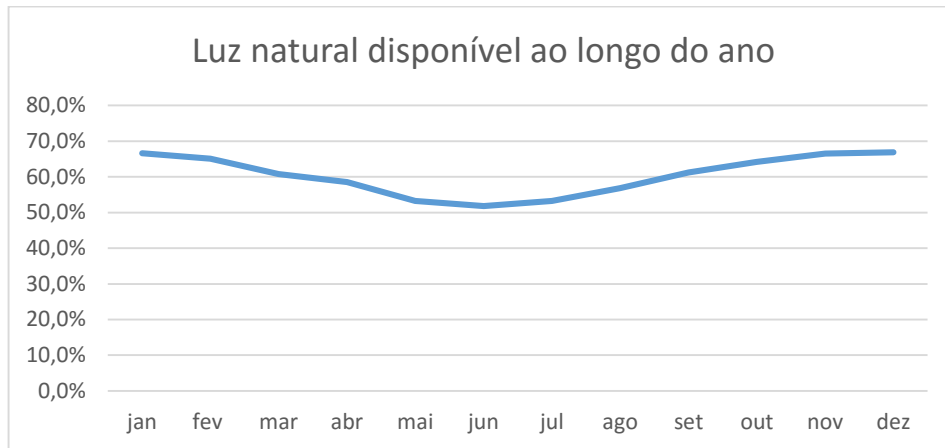
A fim de estudar de forma prática a influência do sensor de luz solar sobre a variação da demanda, foi implementado na sala de aula 304 do prédio 6 um dispositivo de controle que varia a tensão de saída conforme a incidência de luz natural. Para efeitos de cálculo, o campus está localizado próximo ao Trópico de Capricórnio, na Latitude 23°32'54.09"S e Longitude 46°39'26.54"W.

Como já citado na revisão da literatura, Roisin *et al.* (2007) afirma que a orientação e a localização geográfica exercem grande influência sobre o resultado final na economia do aproveitamento da luz solar.

A fim de estimar a disponibilidade anual de luz natural, o software Relux dispõe de um aplicativo que, através do horário de operação do edifício, orientação e coordenadas geográficas, calcula a porcentagem de luz natural no ambiente aproveitável ao longo do ano. O

gráfico gerado pelo aplicativo de cálculo de disponibilidade de luz solar, conforme a figura 42, a localização do campus mostrou-se muito favorável a implementação de controle devido a constante incidência de luz solar ao longo do ano.

Figura 42: Disponibilidade da luz solar ao longo do ano.



Fonte: Retirado do software Relux

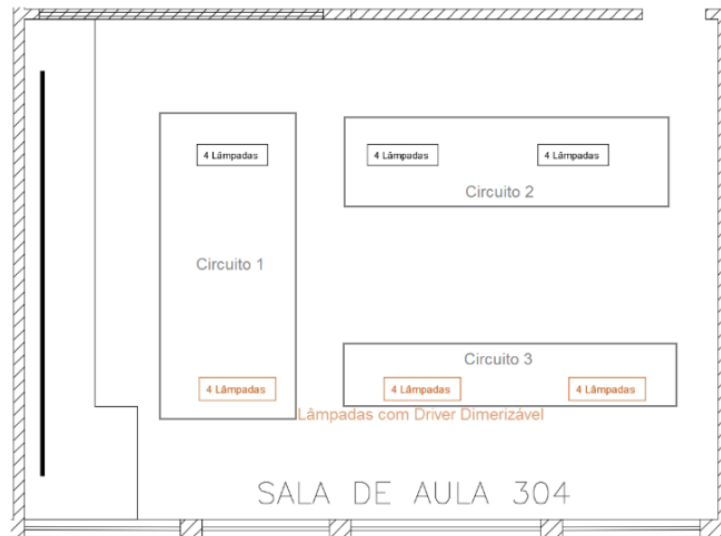
Apesar do resultado apresentado pelo gráfico, este valor é somente uma estimativa e não considera fatores externos, como sombras de outros edifícios e árvores à frente da janela. É importante destacar o ofuscamento direto do sol e, portanto, maiores estudos sobre a influência com o uso de *brise-soleil*, (quebra-sol, traduzido do francês).

#### 5.4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO SENSOR DE LUZ DO DIA

Segundo recomendação presente no Manual para Aplicação do RTQ-C Procel Edifica, é primordial o controle de luz solar apenas para as primeiras luminárias paralelas à janela.

A fim de manter o padrão de controle de luz já existente no Mackenzie, controle independente para as primeiras de frente a lousa, e cumprir determinação do Procel Edifica, o sistema de iluminação da sala foi dividido em 3 circuitos independentes, com controle das duas primeiras luminárias junto à lousa, luminárias junto à janela e luminárias paralelas à parede, conforme ilustrado na figura 43.

Figura 43: Circuito de iluminação.



Fonte: Autoria própria.

Para a fonte de luz, foi adaptado à luminária original o conjunto de 2 lâmpadas LED retangulares de alta eficiência da marca Luminae alimentadas por dois modelos de driver: Osram OTe50 e Spark ST 140w, este último com capacidade de dimerização. De modo a registrar a variação do consumo do consumo de energia, foi utilizado o analisador de energia EM24 e o registrador de eventos VMU-C da Carlo Gavazzi. A figura 44 ilustra o momento da instalação do novo sistema de iluminação, no caso, soldado os conectores das lâmpadas retangulares de LED para sua adaptação à luminária atual.

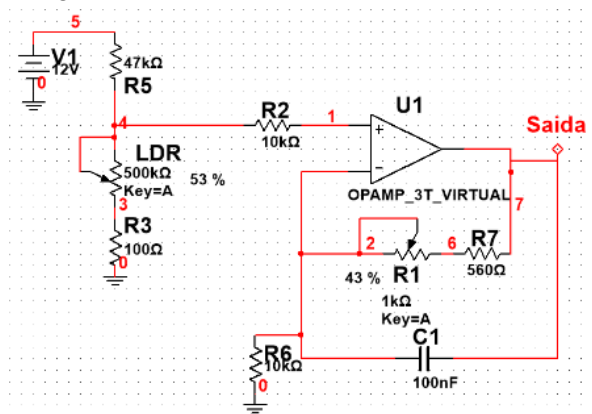
Figura 44: Adaptação da lâmpada de LED à armadura original



Fonte: Autoria própria

O controle de luz solar foi desenvolvido por minha própria autoria, sendo um sensor baseado no uso de LDR (*Light Dependent Resistor*, em inglês) e um amplificador operacional. Para fins de controle, o sensor varia sua tensão de saída entre 0 e 10 volts, conforme a incidência da luz solar. Uma vez que o LED *driver* varia sua potência de saída proporcional ao nível de tensão de entrada, o consumo elétrico será menor nos períodos de luz natural. A figura 40 apresenta o esquema elétrico do sensor.

Figura 45: Circuito de controle



Fonte: Autoria própria.

Uma vez que não é desejável comprometer o nível de conforto ao usuário, é necessário certificar-se que os níveis de iluminação permaneçam constantes durante o período de atividades no local. Para isso, foram realizadas duas medições dos níveis de iluminância: uma no período diurno, às 16h00, de e outra no noturno, às 21h00. Os resultados estão expostos no quadro 6.

Quadro 6: Nível de iluminância com sensor.

	Iluminância média	Uniformidade Emin/Emax
Período noturno	488 lux	0,68
Período diurno	460 lux	0,64

Fonte: Autoria própria

Conforme esperado, o analisador de energia apresentou significantes diferenças entre o consumo durante o horário de maior incidência solar e o período noturno. Apesar de haver variações de comportamento em diferentes dias da semana, a figura 46 ilustra o registro típico da curva de carga da iluminação após implementação do controle de luz solar ao longo de um dia, sendo a linha azul escura equivalente ao consumo em kW e a linha azul clara, o

consumo em kvar. De acordo com os dados adquiridos, verifica-se uma redução de 33% entre consumo máximo e mínimo durante a operação.

Figura 26: Interface do analisador de energia.



Fonte: Autoria própria

Através da memória de registro do analisador de energia, ao integralizar a curva de carga da figura 46 obtém-se o consumo de 3,6 kWh. Para fins de comparação, caso o sistema de iluminação funcionasse com sua potência máxima ao longo do dia, seu consumo seria o equivalente a 4,32 kWh evidenciando uma economia de energia de aproximadamente 17%.

Considerando que as estratégias escritas neste capítulo melhoram significativamente a qualidade da iluminação e reduzem o consumo energético e são tecnicamente viáveis, antes de implementá-las é necessário verificar a viabilidade econômica de tais soluções.

## 6 ANÁLISE ECONÔMICA

No capítulo 5, constatou-se a possibilidade do aumento da eficiência e qualidade de iluminação por meio de diferentes técnicas, sendo algumas mais eficientes que outras.

A fim de ponderar a viabilidade econômica de tais soluções, no presente capítulo é apresentado um resumo da tarifação do sistema elétrico no Brasil e métodos de cálculo do retorno de investimento, considerando custos de manutenção e valor da aquisição de novas lâmpadas e luminárias.

Como critério de cálculo, os resultados foram baseados na planilha de *payback* em concordância com a equipe de *Facilities Services* do Mackenzie.

### 6.1 CUSTOS E TARIFAS

A fim de clarificar os valores adotados para o cálculo do retorno de investimento, o presente subcapítulo traz uma introdução sobre o método tarifário da energia elétrica no Brasil e, posteriormente, a modalidade adotada no *Campus* da UPM.

#### 6.1.1 Sistema de tarifação de energia elétrica no Brasil

No Brasil, as unidades consumidoras são classificadas em dois grupos tarifários: Grupo A, que tem tarifa binômia e Grupo B, que tem tarifa monômia. O agrupamento é definido, principalmente, em função do nível de tensão em que são atendidos e também em função da demanda (kW). (PROCEL, 2011).

Atualmente são adotadas três modalidades de tarifas para alta tensão: tarifa horossazonal azul, tarifa horossazonal verde e tarifa convencional, sendo esta última sem sinal horário ou sazonal.

A diferença decorre da aplicação de postos tarifários e cobranças dos custos relativos ao uso da rede (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição - TUSD) no horário de maior utilização do sistema, ou horário de ponta. Na tarifa azul os custos de rede são cobrados em demanda (R\$/kW). Na verde, estes custos são cobrados em energia (R\$/MWh), convertidos por meio de um fator de carga definido em 66%. Este valor poderá ser alterado com base nas propostas da distribuidora e da sociedade para adequá-lo à realidade da concessão na busca de minimizar a necessidade de expansão da rede e a inibição de uso de geradores diesel no horário de ponta (ANEEL, 2011).

Outra característica do método de tarifação brasileiro é a criação das bandeiras tarifárias que funcionarão como um semáforo de trânsito e se refletirão em diferença de tarifa para o consumidor. A Bandeira Verde significa custos mais baixos para a compra de energia. A Bandeira Amarela indicará um sinal de atenção, pois os custos de compra de energia estão aumentando. Por sua vez, a Bandeira Vermelha indicará que a situação anterior está se agravando e a oferta de energia para atender a demanda dos consumidores ocorre com maiores custos de compra, como por exemplo, o acionamento de grande quantidade de termelétricas para gerar energia, que é uma fonte mais cara do que as usinas hidrelétricas (ANEEL, 2011).

### 6.1.2 Modalidade tarifária aplicada no *Campus* UPM

Para adotar um modelo de cálculo de *payback*, acordou-se juntamente com a equipe de *Facilities Service* da UPM uma planilha para cálculos de retorno de investimento em projetos de efficientização no *Campus*. Portanto, sua formatação foi utilizada como base para o estudo econômico deste trabalho.

Considerando o reajuste da tarifa elétrica, os valores dos custos de energia considerados pela *Facilities Service* estavam desatualizados. Com os dados obtidos no site da empresa fornecedora de energia do *Campus*, AES Eletropaulo, os valores da tarifação elétrica foram corrigidos e constam no quadro 7.

Quadro 7: Tarifa de energia vigente.

Informações da AES Eletropaulo			Bandeiras		
Descrição	Ponta	Fora Ponta	Verde	Amarela	Vermelha
Consumo	0,36 R\$/ k[Wh]	0,23 R\$/ k[Wh]	1,00	Acréscimo de R\$ 1,50 para cada 100 k[Wh]	Acréscimo de R\$ 3,00 para cada 100 k[Wh]
Demanda	12,46 R\$/ k[W]	7,82 R\$/ k[W]			
Horário de Ponta	17:30	à 20:30			

Fonte: AES Eletropaulo.

Para a estimativa do consumo de carga com a iluminação, o tempo de aula e tempo para manutenção / limpeza constam no quadro 8.

Quadro 8: Tempo de operação

	Com aula	Sem aula
Período Ponta	3 horas	-
Período F. Ponta	14,25 horas	3 horas
Dias por mês	22 dias	8 dias
Meses por ano	10 meses	2 meses
Total de horas mensais	403,5 horas	90 horas
Total de horas / ano	<b>4.215 horas</b>	

## 6.2 RETORNO DE INVESTIMENTO

Segundo Costa (2005), a análise de investimentos é imprescindível para tomada de decisões na alteração de sistemas de iluminação. O método de análise pode variar de acordo com o porte do edifício a ser planejado, sendo que em pequenos projetos, considera-se apenas a economia imediata, advindas dos custos de implementação e seu retorno simples. Já em projetos de grande porte, aonde é necessário a alocação de grandes investimentos, é recomendável considerar também o custo do dinheiro no tempo, ou juros.

Dentre as técnicas de avaliação em pequenos projetos, a mais comum é o “cálculo de *payback simples*”, ou o Tempo de Retorno Simples. Este método representa o tempo necessário para ter um retorno sobre o investimento em um projeto. Apesar de simples, esta análise serve como um grande conceito para definir diretrizes e auxílio na escolha de um determinado sistema. Seu cálculo é definido pela equação 1:

$$\text{Tempo de retorno simples} = \frac{\text{Custo de Investimento}}{\text{Economia Gerada}} \quad (1)$$

Como desvantagem, o método citado não considera o custo do investimento ao longo do tempo, o que poderá distorcer a escolha do investimento mais adequado.

Ao estudar alternativas de investimento, é importante observar os custos iniciais e futuros que podem intervir no processo. Para uma análise mais completa, o cálculo do Valor Presente Líquido permite analisar a viabilidade econômica de um projeto, a partir de estimativas do investimento inicial e retorno financeiro. Em outras palavras, é utilizado para determinar qual deverá ser a quantia investida para resultar em um determinado retorno financeiro em uma data futura. Para o cálculo do VPL, será utilizada a equação 2:

$$VPL = -I + R * \left[ \frac{(1+a)^n - 1}{a * (1+a)^n} \right] \quad (2)$$

Sendo:

$I$  = investimento

$R$  = retorno financeiro

$a$  = taxa de juros

$n$  = vida útil

### 6.3 ESTUDO FINANCEIRO

No capítulo 5 foram analisadas diversas soluções de reformulação do sistema de iluminação utilizando diferentes tecnologias, diferenciando-as pelo preço, eficiência e conforto visual. Uma vez que existem soluções com custos menores, porém menos eficientes, é necessária uma análise individual sobre cada luminária a fim de assegurar o retorno financeiro através da economia de energia.

Para realização desse estudo, a seção presente traz um resumo com os estudos econômicos separados pelas diferentes tecnologias: lâmpadas fluorescentes T5, lâmpadas tubulares de LED e luminárias LED.

Uma vez que o nível de iluminância original não está em conformidade com a ABNT/ISSO 8995, foi considerada a troca das lâmpadas atuais por uma de maior luminosidade de modo a ajustar a iluminação conforme a norma técnica, sendo a nova potência o parâmetro de base para os cálculos financeiros.

#### 6.3.1 Lâmpada fluorescente

Para os resultados com a iluminação fluorescente, foram comparados três modelos de luminárias, o primeiro com controle rigoroso de ofuscamento e os demais voltados à eficiência. O quadro 9 apresenta o comparativo entre os tipos de luminárias.

Quadro 9: Comparativo econômico lâmpada fluorescente.

Lâmpada Fluorescente		Potencia	Quant.	Pot. Total	Vida útil	Preço un.	Preço total	Custo da energia mês com aula			Custo da energia sem mês com aula		
Descrição	Verde							Amarela	Vermelha	Verde	Amarela	Vermelha	
SITUAÇÃO REFERENCIAL	Lâmpada Fluorescente T8	36 [W]	24 [un.]	864 [W]	10.000 horas	R\$ 7,80	R\$ 187,20	-	-	-	-	-	-
	Reator - 2 x 72 [W]	10 [W]	12 [un.]	120 [W]	20.000 horas	R\$ 30,00	R\$ 360,00	-	-	-	-	-	-
	Luminária	-	-	-	20 anos	-	-	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>984 [W]</b>			<b>R\$ 547,20</b>	<b>R\$ 118,39</b>	<b>R\$ 124,35</b>	<b>R\$ 130,48</b>	<b>R\$ 27,70</b>	<b>R\$ 29,03</b>	<b>R\$ 30,36</b>
Opção 1	Lâmpada Fluorescente T5	28 [W]	24 [un.]	672 [W]	10.000 horas	R\$ 7,80	R\$ 187,20	-	-	-	-	-	-
	Reator - 2 x 72 [W]	6 [W]	12 [un.]	72 [W]	20.000 horas	R\$ 30,00	R\$ 360,00	-	-	-	-	-	-
	Luminária espelho + controle ofuscamento rigoroso	-	12 [un.]	-	20 anos	R\$ 130,00	R\$ 1.560,00	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>744 [W]</b>			<b>R\$ 2.107,20</b>	<b>R\$ 89,51</b>	<b>R\$ 95,40</b>	<b>R\$ 101,43</b>	<b>R\$ 20,95</b>	<b>R\$ 21,95</b>	<b>R\$ 22,96</b>
Opção 2	Lâmpada Fluorescente T5 e luminária com espelho de 95% de reflexão.	54 [W]	9 [un.]	486 [W]	10.000 horas	R\$ 15,00	R\$ 135,00	-	-	-	-	-	-
	Reator - 1 x 54 [W]	6 [W]	9 [un.]	54 [W]	20.000 horas	R\$ 30,00	R\$ 270,00	-	-	-	-	-	-
	Luminária aleta + espelho	-	9 [un.]	-	15 anos	R\$ 150,00	R\$ 1.350,00	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>540 [W]</b>			<b>R\$ 1.755,00</b>	<b>R\$ 64,97</b>	<b>R\$ 70,88</b>	<b>R\$ 76,74</b>	<b>R\$ 15,20</b>	<b>R\$ 15,93</b>	<b>R\$ 16,66</b>
Opção 3	Lâmpada Fluorescente T5 e luminária com espelho de 86% de reflexão.	54 [W]	10 [un.]	540 [W]	10.000 horas	R\$ 15,00	R\$ 150,00	-	-	-	-	-	-
	Reator - 1 x 54 [W]	6 [W]	10 [un.]	60 [W]	20.000 horas	R\$ 30,00	R\$ 300,00	-	-	-	-	-	-
	Luminária aleta + espelho	-	10 [un.]	-	15 anos	R\$ 135,00	R\$ 1.350,00	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>600 [W]</b>			<b>R\$ 1.800,00</b>	<b>R\$ 72,19</b>	<b>R\$ 77,88</b>	<b>R\$ 84,00</b>	<b>R\$ 16,89</b>	<b>R\$ 17,70</b>	<b>R\$ 18,51</b>

Fonte: Autoria própria.

Uma vez estimado o gasto com o consumo elétrico e despesas com a manutenção, o quadro 10 apresenta o resultado de *payback* e VPL de cada solução.

Quadro 10: Estudo financeiro lâmpada fluorescente.

Descrição	Estimativa de Custo de energia anual			Implantação	Tempo para manutenção		Custo de material por ano (intervalo na base de 8 anos)	Diferença do custo de man. por ano	Diferença do custo de energia por ano	Diferença do custo de implantação	Tempo do <i>Payback</i>	VPL
	Verde	Amarelo	Vermelho		Lâmpada	Reator						
					a cada 2,00 anos	a cada 4,00 anos						
REFERENCIAL	R\$ 1.239,28	R\$ 1.301,54	R\$ 1.365,53	R\$ 547,20	a cada 2,00 anos	a cada 4,00 anos	R\$ 115,20					
Opção 1	R\$ 937,02	R\$ 997,90	R\$ 1.060,24	R\$ 2.107,20	a cada 2,00 anos	a cada 4,00 anos	R\$ 115,20	R\$ 0,00	R\$ 305,29	R\$ 1.560,00	5,11 anos	R\$ 1.405,04
Opção 2	R\$ 680,09	R\$ 740,64	R\$ 800,75	R\$ 1.755,00	a cada 2,00 anos	a cada 4,00 anos	R\$ 84,38	R\$ 30,83	R\$ 564,78	R\$ 1.207,80	2,03 anos	R\$ 4.576,90
Opção 3	R\$ 755,66	R\$ 814,21	R\$ 877,07	R\$ 1.800,00	a cada 2,00 anos	a cada 4,00 anos	R\$ 93,75	R\$ 21,45	R\$ 488,46	R\$ 1.252,80	2,46 anos	R\$ 3.699,59

Fonte: Autoria própria

### 6.3.2 Lâmpada tubular de LED

Uma vez que o LED é uma tecnologia em constante desenvolvimento e seus custos cada vez menores, conforme especificado na fundamentação teórica, as simulações decorreram com base em diferentes fluxos luminosos, comumente encontrados no mercado. Para estimativa do consumo, quadro 11 apresenta o gasto energético com lâmpadas de 1700 lúmens, 1900 lúmens, 2200 lúmens e 2500 lúmens.

Quadro 11: Comparativo econômico lâmpada Tubular LED.

Lâmpada Tubular LED													
SITUAÇÃO REFERÊNCIA	Descrição	Potencia	Quant.	Pot. Total	Vida útil	Preço un.	Preço total	Custo da energia mês com aula			Custo da energia sem mês com aula		
								Verde	Amarela	Vermelha	Verde	Amarela	Vermelha
SITUAÇÃO REFERÊNCIA	Lâmpada Fluorescente T8	36 [W]	24 [un.]	864 [W]	10.000 horas	R\$ 6,35	R\$ 152,40	-	-	-	-	-	-
	Reator - 2 x 72 [W]	10 [W]	12 [un.]	120 [W]	20.000 horas	R\$ 30,00	R\$ 360,00	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>984 [W]</b>			<b>R\$ 512,40</b>	<b>R\$ 118,39</b>	<b>R\$ 124,31</b>	<b>R\$ 130,48</b>	<b>R\$ 27,70</b>	<b>R\$ 29,03</b>	<b>R\$ 30,36</b>
Opção 1	Luminária	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Lâmpada Tubular LED 1700lm	18 [W]	36 [un.]	648 [W]	20.000 horas	R\$ 35,00	R\$ 1.260,00	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>648 [W]</b>			<b>R\$ 1.260,00</b>	<b>R\$ 77,96</b>	<b>R\$ 83,89</b>	<b>R\$ 89,81</b>	<b>R\$ 18,24</b>	<b>R\$ 19,12</b>	<b>R\$ 19,99</b>
Opção 2	Luminária	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Lâmpada Tubular LED 1900lm	18 [W]	36 [un.]	648 [W]	40.000 horas	R\$ 54,00	R\$ 1.944,00	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>648 [W]</b>			<b>R\$ 1.944,00</b>	<b>R\$ 77,96</b>	<b>R\$ 83,89</b>	<b>R\$ 89,81</b>	<b>R\$ 18,24</b>	<b>R\$ 19,12</b>	<b>R\$ 19,99</b>
Opção 3	Luminária	-	9 [un.]	-	20 anos	R\$ 30,00	R\$ 270,00	-	-	-	-	-	-
	Lâmpada tubular LED 2200lm	20 [W]	27 [un.]	540 [W]	40.000 horas	R\$ 75,00	R\$ 2.025,00	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>540 [W]</b>	<b>TOTAL</b>		<b>R\$ 2.295,00</b>	<b>R\$ 64,97</b>	<b>R\$ 70,86</b>	<b>R\$ 76,74</b>	<b>R\$ 15,20</b>	<b>R\$ 15,93</b>	<b>R\$ 16,66</b>
Opção 4	Luminária	-	-	-	20 anos	-	-	-	-	-	-	-	-
	Lâmpada tubular LED 2500lm	22 [W]	24 [un.]	528 [W]	50.000 horas	R\$ 130,00	R\$ 3.120,00	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>528 [W]</b>	<b>TOTAL</b>		<b>R\$ 3.120,00</b>	<b>R\$ 63,53</b>	<b>R\$ 69,41</b>	<b>R\$ 75,29</b>	<b>R\$ 14,87</b>	<b>R\$ 15,58</b>	<b>R\$ 16,29</b>

Fonte: Autoria própria.

Uma vez estimado o gasto com o consumo elétrico e despesas com a manutenção, o quadro 12 apresenta o resultado de *payback* e VPL de cada solução.

Quadro 12: Estudo financeiro lâmpada fluorescente.

Descrição	LEDTUBE											
	Estimativa de Custo de energia anual			Implantação	Tempo para manutenção		Custo de material por ano (intervalo na base de 8	Diferença do custo de man. por ano	Diferença do custo de energia por ano	Diferença do custo de implantação	Tempo do Payback	VPL (durante tempo de vida útil)
Verde	Amarelo	Vermelho	Lâmpada		Reator							
REFERÊNCIA	R\$ 1.239,28	R\$ 1.301,20	R\$ 1.365,53	R\$ 512,40	a cada 2,00 anos	a cada 4,00 anos	R\$ 102,15	-	R\$ 427,40	R\$ 747,60	2,01 anos	R\$ 541,61
Opção 1	R\$ 816,11	R\$ 877,12	R\$ 938,13	R\$ 1.260,00	a cada 4,00 anos		R\$ 157,50	-R\$ 55,35	R\$ 427,40	R\$ 747,60	2,01 anos	R\$ 541,61
Opção 2	R\$ 816,11	R\$ 877,12	R\$ 938,13	R\$ 1.944,00	a cada 9,00 anos		R\$ 0,00	R\$ 102,15	R\$ 427,40	R\$ 1.431,60	2,70 anos	R\$ 2.170,26
Opção 3	R\$ 680,09	R\$ 838,88	R\$ 898,14	R\$ 2.295,00	a cada 9,00 anos		R\$ 0,00	R\$ 102,15	R\$ 467,39	R\$ 1.782,60	3,13 anos	R\$ 2.091,24
Opção 4	R\$ 664,98	R\$ 725,23	R\$ 785,48	R\$ 3.120,00	a cada 11,00 anos		R\$ 0,00	R\$ 102,15	R\$ 580,05	R\$ 2.607,60	3,82 anos	R\$ 2.772,81

Fonte: Autoria própria

### 6.3.3 Luminária LED

Para o cálculo de luminárias LED foram considerados dois modelos, um com controle de ofuscamento, portanto mais cara, e o outro apenas para um eventual *retrofit*, sendo seu formato retangular e com altíssima eficiência, na qual foi utilizado para realização dos testes. Para estimativa do consumo, quadro 13 apresenta gasto energético previsto com os dois tipos de luminárias.

Quadro 13: Comparativo econômico lâmpada Tubular LED.

SITUAÇÃO REFERÊNCIA	Descrição	Potencia	Quant.	Pot. Total	Vida útil	Preço un.	Preço total	Custo da energia mês com aula			Custo da energia sem mês com aula		
								Verde	Amarela	Vermelha	Verde	Amarela	Vermelha
SITUAÇÃO REFERÊNCIA	Lâmpada Fluorescente T8	36 [W]	24 [un.]	864 [W]	10.000 horas	R\$ 6,35	R\$ 152,40	-	-	-	-	-	-
	Reator - 2 x 72 [W]	10 [W]	12 [un.]	120 [W]	20.000 horas	R\$ 30,00	R\$ 360,00	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>984 [W]</b>			<b>R\$ 512,40</b>	<b>R\$ 118,39</b>	<b>R\$ 124,22</b>	<b>R\$ 130,48</b>	<b>R\$ 27,70</b>	<b>R\$ 29,03</b>	<b>R\$ 30,36</b>
Opção 1	Luminária LED com espelho 86%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Lâmpada Tubular LED 1700lm	18 [W]	36 [un.]	648 [W]	20.000 horas	R\$ 35,00	R\$ 1.260,00	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>384 [W]</b>			<b>R\$ 4.320,00</b>	<b>R\$ 46,20</b>	<b>R\$ 52,03</b>	<b>R\$ 57,86</b>	<b>R\$ 10,81</b>	<b>R\$ 11,33</b>	<b>R\$ 11,85</b>
Opção 2	Luminária	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Lâmpada Retangular LED alta eficiência	23 [W]	12 [un.]	270 [W]	50.000 horas	R\$ 150,00	R\$ 1.800,00	-	-	-	-	-	-
	<b>TOTAL</b>			<b>270 [W]</b>			<b>R\$ 1.800,00</b>	<b>R\$ 32,48</b>	<b>R\$ 38,27</b>	<b>R\$ 44,06</b>	<b>R\$ 7,60</b>	<b>R\$ 7,97</b>	<b>R\$ 8,33</b>

Fonte: Autoria própria.

Uma vez estimado o gasto com o consumo elétrico e despesas com a manutenção, o quadro 14 apresenta o resultado de *payback* e VPL de cada solução.

Quadro 14: Estudo financeiro lâmpada fluorescente.

Descrição	Estimativa de Custo de energia anual			Implantação	Tempo para manutenção		Custo de material por ano (intervalo na base de 8 anos)	Diferença do custo de man. por ano	Diferença do custo de energia por ano	Diferença do custo de implantação	Tempo do <i>Payback</i>	VPL (durante tempo de vida útil)
	Verde	Amarelo	Vermelho		Lâmpada	Reator						
REFERÊNCIA	RS 1.239,28	RS 1.300,25	RS 1.365,53	RS 512,40	a cada 2,00 anos	a cada 4,00 anos	RS 102,15					
Opção 1	RS 483,62	RS 542,97	RS 602,31	RS 4.320,00	a cada 11,00 anos		RS 0,00	RS 102,15	RS 763,22	RS 3.807,60	4,40 anos	RS 2.211,83
Opção 2	RS 340,05	RS 398,67	RS 457,30	RS 1.800,00	a cada 11,00 anos		RS 0,00	RS 102,15	RS 908,23	RS 1.287,60	1,27 anos	RS 5.875,52

Fonte: Autoria própria

### 6.3.4 Comparativo

Para efeitos de comparação, o quadro 15 apresenta o resumo com os principais parâmetros financeiros necessários para o estudo da viabilidade econômica das soluções encontradas.

Quadro 15: Comparação entre soluções.

		Custo Total (lâmpadas + luminária)	Custo da Energia Anual			Custo de reposição de material anual	<i>Payback</i>	VPL (durante tempo de vida útil)
			Verde	Amarela	Vermelha			
Lâmpada Fluorescente	Luminária 1xT5 54W com espelho de 86% de reflexão	RS 1.800,00	RS 755,66	RS 814,21	RS 877,07	RS 93,75	2,46 anos	RS 3.699,59
	Luminária 1xT5 54W com espelho de 95% de reflexão	RS 1.755,00	RS 680,09	RS 740,64	RS 800,75	RS 84,38	2,03 anos	RS 4.576,90
	Luminária 2 x T5 28W e espelho 85% de reflexão	RS 2.107,20	RS 937,02	RS 997,90	RS 1.060,24	RS 115,20	5,11 anos	RS 1.405,04
	SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA (4 lâmpadas de 36W)	RS 547,20	RS 1.239,28	RS 1.301,54	RS 1.365,53	RS 115,20	-	-
Lâmpada LED tubular	Lâmpada LED tubular com 1700 lm	RS 1.260,00	RS 816,11	RS 877,12	RS 938,13	RS 157,50	2,01 anos	RS 541,61
	Lâmpada LED tubular com 1900 lm	RS 1.944,00	RS 816,11	RS 877,12	RS 938,13	RS 0,00	2,70 anos	RS 2.170,26
	Lâmpada LED tubular com 2200 lm	RS 2.295,00	RS 680,09	RS 898,14	RS 898,14	RS 0,00	3,13 anos	RS 2.091,24
	Lâmpada LED tubular com 2500 lm	RS 997,90	RS 664,98	RS 725,23	RS 785,48	RS 0,00	3,82 anos	RS 2.772,81
Luminária LED	Luminária LED com proteção ofuscamento	RS 4.320,00	RS 483,62	RS 542,97	RS 602,31	RS 0,00	4,40 anos	RS 2.211,83
	Lampada LED retangular Alta Eficiência	RS 1.800,00	RS 340,05	RS 398,67	RS 457,30	RS 0,00	1,27 anos	RS 5.875,52

Pelos resultados observados no quadro 15, a solução com lâmpadas T5 apresenta uma ótima alternativa para substituição do atual sistema de iluminação, tanto em termos de *payback* quanto de conforto ambiental.

Porém, uma vez que ocorrem constantes avanços na tecnologia LED (HAWKS, 2014) recomenda-se a reavaliação dos produtos disponíveis para certificar-se de uma alternativa mais eficiente.

Para maiores considerações sobre este trabalho, o capítulo 7 apresenta uma análise mais específica para cada solução.

## 7 CONCLUSÃO

Com medições reais e simulações computacionais, este trabalho buscou alternativas mais eficientes para iluminação em ambientes de ensino. Sob o ponto de vista prático, abordou-se de forma abrangente as principais questões levantadas pela equipe de *Facilities Service* da UPM a respeito da eficientização do atual sistema de iluminação.

A partir do modelo computacional, foram realizadas simulações entre diversos tipos de lâmpadas e luminárias, sendo apresentadas as soluções mais viáveis; selecionados 10 modelos, realizaram-se uma análise luminotécnica e o estudo financeiro de cada solução, sendo seus resultados apresentados de acordo com a tecnologia.

Entre as lâmpadas fluorescentes tubulares, a tecnologia T5 mostrou ótimos resultados sob o ponto de vista de *payback* e conforto visual, principalmente quando aliadas a luminárias com espelho refletor de alto desempenho. Apesar de apresentar um grau de ofuscamento acima do recomendado pela norma, continua visualmente mais confortável que a solução atual com as lâmpadas T8.

Já com a tecnologia LED, existem grandes ressalvas a respeito de sua qualidade e, por isso, foram considerados apenas modelos aparentemente confiáveis e custos condizentes com a qualidade esperada. Quando avaliados pelo tempo de *payback*, as lâmpadas de 1700 lúmens apresentaram os melhores resultados. Porém, ao considerar seu tempo de vida útil e a necessidade da redistribuição da disposição física das armaduras, esta escolha pode não ser a mais indicada. Para a hipótese de substituição da iluminação atual por lâmpadas de LED tubulares, o estudo de caso mostrou que as lâmpadas de 2500 lúmens conseguem suprir a iluminância prevista na norma, sem a necessidade de alteração do layout das luminárias, mostrando-se atraente sob o ponto de vista de instalação. Porém, ainda que similar a iluminação atual, apresenta índices de ofuscamento acima do nível recomendado pela ABNT/ISSO 8995.

Com relação as luminárias de LED, foram avaliadas com abordagens com base no conforto visual e na eficiência, proporcionando os requisitos de iluminância recomendados pela norma e excelentes níveis de economia energética; ambas as luminárias obtiveram retorno de investimento, porém com níveis diferentes. Caso o foco do trabalho de *retrofit* seja voltado ao conforto ambiental, é recomendado o uso da luminária com o controle de ofuscamento. Porém, uma vez que no caso prático fora instalado a luminária LED mais eficiente e os níveis de ofuscamento teórico acima do recomendado, este fator não apresentou grande impacto ao conforto visual.

Observam-se então pelas características técnicas e as estratégias utilizadas neste estudo que:

- É importante destacar que os resultados levaram em conta apenas a iluminação ambiente, excluindo a iluminância incidente sobre o quadro negro. Desta forma, antes de qualquer decisão baseada neste trabalho, é necessário maior estudo sobre os índices de iluminação nesses quadros.

- Para o estudo do aproveitamento da luz natural, tanto o circuito eletrônico do sensor quanto o driver de potência, não apresentam custos de aquisição significativos, o que torna viável sua aplicação face à economia gerada. Entretanto, é necessário considerar que tal aplicação deve ser feita com componentes de qualidade de modo a garantir seu completo funcionamento durante o tempo de vida útil esperado. Sendo assim, é necessário maior estudo sobre sua aplicação.

- Com a instalação do registrador de consumo de energia, verificou-se que ao longo do dia há variações do consumo elétrico, apresentando diferenças significantes entre o consumo esperado e o consumo medido de fato. Deste modo, a fim de melhor compreender a necessidade energética do *campus*, é interessante o registro de consumo elétrico proveniente da iluminação geral do prédio 6.

- Devido a instalação do sistema de ar condicionado, todas as janelas foram parafusadas de modo a impossibilitar sua abertura, o que impede o controle manual das persianas, prejudicando assim o aproveitamento da luz solar. Uma vez que já existem controles de automação de persianas, mostra-se necessário um estudo de integração entre elas e o sistema de aproveitamento de luz natural.

- Conforme os requisitos de DPI presentes no RAC do Procel Edifica, com exceção da solução com lâmpadas T8 de 36W e 2 x T5 de 28W, todas as alternativas neste trabalho apresentadas estão aptas à certificação A no quesito iluminação. Caso a UPM tenha interesse na certificação completa do edifício, é recomendado maiores estudos em relação à envoltória e o sistema de condicionamento de ar.

De forma a integrar a teoria com a prática, a execução do trabalho proporcionou o contato com profissionais em situações reais, nas quais permitiram validar o estudo através de desafios e competências indispensáveis para a formação e crescimento de um engenheiro.

## REFERÊNCIAS

- ABED, Nagy Y.; BRAVO, Richard J.. Experimental evaluation of the harmonic behavior of LED light bulb. **2013 Ieee Power & Energy Society General Meeting**. Vancouver, Bc, p. 1-4. jul. 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6672991&newsearch=true&queryText=Bravo+Abed+2013>>. Acesso em: 05 mar. 2016
- A.D. Galasiu, M.R. Atif, R.A. MacDonald, Impact of window blinds on daylight-linked dimming and automatic on/off lighting controls, *Solar Energy* 76 (2003) 523–544
- AGHEMO, C.; BLASO, L.; PELLEGRINO, A.. Building automation and control systems: A case study to evaluate the energy and environmental performances of a lighting control system in offices. **Automation In Construction**. Torino, Itália, p. 10-22. mar. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580514000405>>. Acesso em: 06 jan. 2016.
- ALBUQUERQUE, Marconi Edson Esmeraldo. **AVALIAÇÃO ERGONÔMICA DE AMBIENTES INFORMATIZADOS: UM ESTUDO DE CASO**. 1998. 8 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 1998. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep1998\\_art252.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep1998_art252.pdf)>. Acesso em: 28 abr. 2016.
- ALMEIDA, Aníbal de et al. Solid state lighting review: Potential and challenges in Europe. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. [s. l.], p. 30-48. mar. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001506>>. Acesso em: 10 dez. 2015.
- ANEEL. **ANEEL altera estrutura tarifária para consumidores de alta tensão**. 2011. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticias.cfm?Identidade=4922&id\\_ara=90](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=4922&id_ara=90)>. Acesso em: 20 abr. 2016.
- ANSES (Org.). Response to the internally-solicited request entitled “**Health effects of lighting systems using light-emitting diodes (LEDs)**”. Maisons-alfort Cedex: French Agency For Food, Environmental And Occupational Health & Safety, 2010. Disponível em: <<https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2008sa0408EN.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2016.
- A RENDÓN, Manuel. **Instalações Elétricas**. [s.i.]: Ufjf, 2012. 33 slides, color. Disponível em: <[http://www.ufjf.br/manuel\\_rendon/files/2012/11/Aula18.pdf](http://www.ufjf.br/manuel_rendon/files/2012/11/Aula18.pdf)>. Acesso em: 02 maio 2016.
- ARAÚJO, Lucínio Preza de. **Tipos e Características de Lâmpadas**. [s.i.]: Independente, 2016. 24 slides, color. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/cerejn/tipos-e-caracteristicasdelampadas>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

A ROOM, Ayse Durak Et. Al (2006) Impact Of Lighting Arrangements And Illuminances On Different Impressions Of et al. Impact of lighting arrangements and illuminances on different impressions of a room. **Building And Environment**. Ankara, Turkey, p. 3476-3482. jul. 2006. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306003830>>. Acesso em: 20 dez. 2015.

B. Brekke, E.H. Hansen, Energy saving in lighting installations by the utilization of daylight, in: Proceedings of the Right Light, vol. 3, 1995, pp. 875–886

BEHAR-COHEN, F. et al. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye?. **Progress In Retinal And Eye Research**. [s. I.], p. 239-257. maio 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350946211000267>>. Acesso em: 04 jan. 2016.

BELLIA, L.; BISEGNA, F.; SPADA, G.. Lighting in indoor environments: Visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions. **Building And Environment**. [s. I.], p. 1984-1992. abr. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311001004>>. Acesso em: 04 jan. 2015.

BODART, Magali; HERDE, André de. Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting. **Energy And Buildings**. [s. I.], p. 421-429. jun. 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778801001177>>. Acesso em: 5 out. 2015.

COOK, G.k.. Artificial lighting in classrooms: results of a lighting survey. **Building And Environment**, [s. I.], v. 25, n. 4, p.329-311, fev. 1990. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/036013239090006D>>. Acesso em: 20 dez. 2015.

COSTA, Gilberto José Corrêa da. **ILUMINAÇÃO ECONÔMICA CÁLCULO E AVALIAÇÃO ED. 4 1ª REIMPRESSÃO**. [s.i.]: Edipucrs, 2013.

Danny et al. An analysis of energy-efficient light fittings and lighting controls. **Applied Energy**. [s. I.], p. 558-567. jul. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/03062619>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

DIB, Wanderley Mauro. **GONIOFOTÔMETRO INTELIGENTE ASSOCIADO AO TRAÇAMENTO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS CLÁSSICAS DE LUMINOTÉCNICA**. 2005. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Unicamp, Campinas, 2005. Disponível em: <[http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Pesquisa/goniofotometro\\_inteligente\\_associado\\_ao\\_tracamento\\_de\\_curvas\\_caracteristicas\\_classicas\\_de\\_luminotecnica.pdf](http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Pesquisa/goniofotometro_inteligente_associado_ao_tracamento_de_curvas_caracteristicas_classicas_de_luminotecnica.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2015.

FASSARELA, Jose Ernesto Viqueti et al. Analysis and suggested solution of Power quality problems in Lighting Laboratory. **Ieee Latin America Transactions**. Niteroi, Rj, p. 1019-1026. set. 2014. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6893995&queryText=fassarela2014&newsearch=true>>. Acesso em: 05 fev. 2016.

FLOYD et al. **Energy Efficiency Technology Demonstation Project for Florida Educational Facilities:Occupancy Sensors**. Florida: Florida Department Of Education Office Of Educational Facilities, 1995. 28 p.

GAN, Chin Kim et al. Techno-Economic Analysis of LED Lighting: A Case Study in UTeM's Faculty Building. **Procedia Engineering**. Melaka, Malaysia, p. 208-2016. mar. 2013.

Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813001471>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

Ghisi *et al.* **PROPOSTA DE RETROFIT PARA O SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL DA UFSC**. Foz do Iguaçu: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2002. 10 p. Disponível em:

<[http://www.infohab.org.br/entac2014/2002/Artigos/ENTAC2002\\_0287\\_296.pdf](http://www.infohab.org.br/entac2014/2002/Artigos/ENTAC2002_0287_296.pdf)>. Acesso em: 11 mar. 2016.

GHISI, Enedir. **Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit em sistemas de iluminação**: estudo de caso na Universidade Federal de Santa Catarina. 1997. 305 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997. Disponível em:

<[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERTACAO\\_Ene\\_dir\\_Ghisi.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERTACAO_Ene_dir_Ghisi.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2015.

HAWKS, Sean. **Solid State Lighting**: The Past, Present and Future of LED Technology. 2014. Disponível em: <<http://www.ieci.org/newsroom-and-insights/solid-state-lighting-the-past-present-and-future-of-led-technology>>. Acesso em: 28 abr. 2016.

KENEZ, Igor. Effects of Office Lighting on Mood and Cognition. **Journal Of Enviromental Psychology**. Suécia, p. 39-51. mar. 1995.

LI, Youran et al. Study of healthy light-color parameters for LED lighting. **Optik**. Dalian, China, p. 4887-4889. out. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402615012930>>. Acesso em: 07 jan. 2016.

LINHART, Friedrich; SCARTEZZINI, Jean-louis. Evening office lighting: visual comfort vs. energy efficiency vs. performance?. **Building And Environment**. Lausanne, Switzerland, p. 981-989. out. 2010. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310002945>>. Acesso em: 05 dez. 2015.

MILLS; SCHALEG; TOMKINS. The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. **The Journal Of Circadian Rhythms**. [s. I.], p. 5-2. jan. 2007. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1779263/>>. Acesso em: 04 jan. 2016.

MINOLTA, Konica. **Luminância vs. Iluminância**. 2015. Disponível em: <<http://sensing.konicaminolta.com.br/2015/09/luminancia-vs-iluminancia/>>. Acesso em: 28 abr. 2016.

PANDHARIPANDE, Ashish; CAICEDO, David. Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches. **Energy And Buildings**. Eindhoven, Holanda, p. 369-377. jun. 2015. Disponível em: <<http://www.journals.elsevier.com/energy-and-buildings>>. Acesso em: 06 jan. 2016

PASSOLD, Fernando. **Luminotecnica: Parte 1) Conforto Ambiental**. [s.i.]: Fernando Passold, 2014. 48 slides, color. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/fpassold/luminotecnica-parte-1-fator-conforto-e-outras-definies-35229524>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

PROCEL. **Manual de Tarifação Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2011. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual de Tarif En El - Procel\\_EPP - Agosto-2011.pdf](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual+de+Tarif+En+El+-+Procel_EPP+-+Agosto-2011.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2016.

SHABBIR, Hassan et al. Assessment of harmonic pollution by LED lamps in power systems. **Power Systems Conference (psc), 2014 Clemson University**. Clemson, Sc, p. 1-7. mar. 2014. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6808099&queryText=shabbir lighting 2014&newsearch=true](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6808099&queryText=shabbir+lighting+2014&newsearch=true)>. Acesso em: 03 mar. 2016.

S. Onaygil, O Guller, Determination of the energy saving by daylight responsive lighting control systems with an example from Istanbul, *Building and Environment* 38 (2003) 973–977.

ROISIN, B. et al. Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption. **Energy And Buildings**. [s. I.], p. 514-523. jul. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880700134X>>. Acesso em: 05 jan. 2016.

ROSADO, Rubens. **A questão da reprodução das cores na iluminação a LED**. 2014. Disponível em: <<http://www.realcenter.com.br/noticias/a-questao-da-reproducao-das-cores-na-iluminacao-a-led>>. Acesso em: 28 abr. 2016.

SIVAJI, Ashok et al. Lighting does Matter: Preliminary Assessment on Office Workers. **Procedia: Social and Behavioral Sciences**. Kuala Lumpur, Malaysia, p. 638-647. nov. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042813037282>>. Acesso em: 06 dez. 2015.

STEFANO, Julian di. Energy efficiency and the environment. **Energy: the potential for energy efficient lighting to save energy and reduce carbon dioxide emissions at Melbourne University, Australia**. [s. I.], p. 823-839. jun. 1999. Disponível em: <<http://www.journals.elsevier.com/energy>>. Acesso em: 25 nov. 2015.

TIMÓTEO, Luís F. M. **Lâmpadas de Descarga**. [s.i.]: Luís Timóteo, 2011. 116 slides, color. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/MarioTimotius/iluminao3-lampadas-fluorescentes>>. Acesso em: 05 mar. 2016.

WANG, Qing et al. Investigation of visual fatigue under LED lighting based on reading task. **Optik: International Journal for Light and Electron Optics**. Beijin, China, p. 15-16. maio 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402615002430>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

WINTERBOTTOM, Mark; WILKINS, Arnold. Lighting and discomfort in the classroom. **Journal Of Environmental Psychology**. Colchester, p. 63-75. dez. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272494408001011>>. Acesso em: 04 mar. 2016.