

Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Gabriel Zanuto

Iluminação aeroportuária: estudo do LED em comparação às tecnologias  
convencionais

Uberaba

2016

Gabriel Zanuto

Iluminação aeroportuária: estudo do LED em comparação às tecnologias  
convencionais

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, área de concentração de Processos Tecnológicos, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do título de Mestre em Inovação Tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. David Calhau Jorge.

Uberaba

2016

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro**

Z36i      Zanuto, Gabriel  
            Iluminação aeroportuária: estudo do LED em comparação às tecno-  
logias convencionais / Gabriel Zanuto. -- 2016.  
            64 f. : il., fig., graf., tab.

            Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) --  
            Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2016  
            Orientador: Prof. Dr. David Calhau Jorge

            1. Iluminação elétrica. 2. Aeroportos. 3. Lâmpadas de LED. I. Jorge,  
            David Calhau. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 628.9

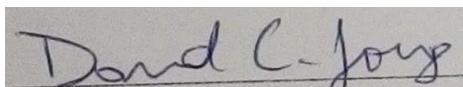
Gabriel Zanuto

Iluminação aeroportuária: estudo do LED em comparação às tecnologias  
convencionais

Trabalho de conclusão apresentado ao  
Programa de Mestrado Profissional em  
Inovação Tecnológica da Universidade  
Federal do Triângulo Mineiro, como requisito  
para obtenção do título de mestre.

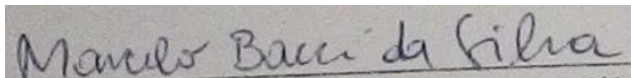
Uberaba, 06 de abril de 2016.

Banca Examinadora:



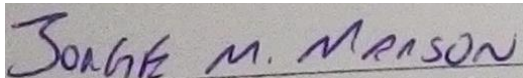
---

Prof. Dr. David Calhau Jorge  
Orientador – PMPIT – UFTM



---

Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva  
Membro Titular - UFTM



---

Prof. Dr. Jorge Marcelo Marson  
Membro Titular - UNIUBE

Dedico este trabalho ao meu filho, Bernardo. Que o meu esforço e busca pelo conhecimento sejam exemplos para sua vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Dr. David Calhau Jorge por ter me orientado neste trabalho. Agradeço por ter dividido comigo suas reflexões sobre a situação socioeconômica do Brasil e do campo acadêmico nos momentos em que nos reunimos e agradeço pela orientação para além deste trabalho.

Agradeço ao Engenheiro Simão Haroldo de Avelar, meu chefe, por permitir-me cursar as disciplinas do programa de mestrado.

Agradeço ao Professor Antônio Carlos Lemos Júnior pela ajuda na pesquisa e pela bibliografia que me forneceu.

Agradeço aos colegas Potiguá Varjão Alves e Belchior Reis da Silva pelo apoio na implantação realizada no Aeroporto C deste trabalho.

Agradeço à minha Mãe por ajudar a cuidar do meu filho nos últimos dias em que eu escrevia a dissertação.

Agradeço à minha esposa, Roberta, pelo apoio e preocupação, também, nos últimos dias em que me dedicava à escrita deste trabalho.

Finalmente, agradeço a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

“A existência precede a essência.”

Jean-Paul Sartre

## RESUMO

Diversas tecnologias modernas têm sido aplicadas em sistemas de iluminação. Em infraestrutura aeroportuária no Brasil, o advento do LED tem ganhado aceitação em substituição aos tradicionais sistemas de iluminação que utilizam lâmpadas incandescentes ou lâmpadas de descarga e de vapores metálicos. Contudo, poucas pesquisas têm sido realizadas no sentido de comparar a tecnologia LED com outras formas de iluminação, por meio de medições de grandezas elétricas e luminotécnicas, especialmente, em implantações efetivas fora dos ambientes controlados de laboratório, como por exemplo, em aeroportos. O presente trabalho aborda questões relativas ao desempenho elétrico e luminotécnico de sistemas de iluminação modernos que utilizam tecnologia LED aplicados à infraestrutura aeroportuária. Foram estudadas três implantações reais de tecnologias modernas de iluminação em aeroportos distintos do país. Em cada aeroporto avaliou-se, dentro das disponibilidades físicas e instrumentais, grandezas elétricas como a tensão, corrente, potência, bem como a iluminância destes equipamentos em comparação aos convencionais. Instrumentos como o luxímetro e o analisador de energia foram utilizados antes e após a substituição de sistemas convencionais por tecnologias modernas. Os resultados obtidos, apresentados e discutidos neste trabalho, mostraram que a tecnologia LED oferece ganho de iluminância e redução de corrente e potências elétricas; contudo, há restrições no emprego da tecnologia no que diz respeito às distorções harmônicas de corrente, principalmente.

Palavras-chave: Iluminação aeroportuária. Iluminação LED. Qualidade da energia



## **ABSTRACT**

Modern technologies have been applied in lighting systems. In Brazilian airport infrastructure in Brazil, the advent of LED has gained acceptance in replacement to traditional lighting systems that use incandescent lamps or discharge lamps and metal vapor. However, some research has been conducted to compare the LED technology with other forms of lighting, by measurements of electrical and photometric quantities, especially in effective deployments outside of controlled laboratory environments, such as at airports. This paper discusses issues related to electric and photometric performance of modern lighting systems using LED technology applied to airport infrastructure. They studied three actual deployments of modern lighting technologies at different airports of the country. In each airport are evaluated within the physical and instrumental availability, electrical quantities such as voltage, current, power and illuminance of these devices compared to conventional. Instruments such as the luxmeter and the power analyzer were used before and after the replacement of conventional systems by modern technologies. The results presented and discussed in this work showed that LED technology offers illuminance gain and reduction of current and electric power. However, there are restrictions in use of the technology with respect to the harmonic current distortions, mainly.

Keywords: Airport lighting. LED. Energy quality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Iluminação de terminal de passageiros.....	15
Figura 2 - Torres de iluminação de pátio de aeronaves .....	16
Figura 3 - Circuito do balizamento de pista .....	17
Figura 4 - Curva da banheira.....	25
Figura 5 - Espectro da radiação eletromagnética.....	27
Figura 6 - Eficácia luminosa relativa.....	27
Figura 7 - Principais distúrbios da qualidade da energia elétrica .....	34
Figura 8 - Ilustração do conceito de intensidade luminosa.....	38
Figura 9 - Analogia entre o fluxo de água e o fluxo de luz .....	39
Figura 10 - Iluminância.....	40
Figura 11 - Corte Tridimensional da luz .....	41
Figura 12 - Curvas fotométricas .....	42
Figura 13 - Matriz de medições sobre a planta do terminal do aeroporto C .....	50
Figura 14 - Balizamento LED do Aeroporto A .....	53
Figura 15 - Matriz de medições no pátio de aeronaves do aeroporto B .....	54
Figura 16 - Componentes harmônicas de tensão (V) em percentuais .....	57
Figura 17 - Componentes harmônicas de corrente (A) em percentuais .....	57
Figura 18 - Iluminação do TPS antes e depois da instalação dos LEDs .....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espectro da radiação eletromagnética .....	26
Tabela 2 - Comparativo entre tecnologias de fontes de luz .....	30
Tabela 3 - Vantagens do LED sobre as lâmpadas de descarga .....	31
Tabela 4 - Comparativo entre lâmpadas LED e lâmpada fluorescente 16W .....	43
Tabela 5 - Comparativo entre lâmpadas LED e lâmpada fluorescente 32W .....	44
Tabela 6 - Avaliação econômica das lâmpadas de menor potência.....	45
Tabela 7 - Avaliação econômica das lâmpadas de maior potência.....	45
Tabela 8 - Comparação entre o balizamento convencional e LED.....	52
Tabela 9 - Dados obtidos pelo analisador de energia no Aeroporto C .....	56
Tabela 10 - Medições com o luxímetro no terminal de passageiros.....	59

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CA – Corrente Alternada  
CC – Corrente Contínua  
CUASO – Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira  
FP – Fator de Potência  
ICAO – Organização Internacional de Aviação Civil (International Civil Aviation Organization)  
IP – Índice de Proteção  
IRC – Índice de Reprodução de Cores  
LED – Diodo Emissor de Luz (Light Emitting Diode)  
MVM – Multivapores Metálicos  
NBR – Norma Brasileira  
PAC – Ponto de Acoplamento Comum  
RCC – Retificador de Corrente Constante  
SI – Sistema Internacional de Unidades  
TCC – Transformador de Corrente Constante  
TECA – Terminal de Carga  
TPS – Terminal de Passageiros  
TWR – Torre de Controle de Tráfego Aéreo (Tower)  
UV – Ultravioleta  
VM – Vapor de Mercúrio  
VSAP – Vapor de Sódio de Alta Pressão  
VSBP – Vapor de Sódio de Baixa Pressão

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	ILUMINAÇÃO AEROPORTUÁRIA .....	14
1.1.1	<b>Iluminação de terminal de passageiros</b> .....	<b>14</b>
1.1.2	<b>Iluminação de pátio de aeronaves</b> .....	<b>15</b>
1.1.3	<b>Balizamento de pista</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>19</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
3.1	EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ILUMINAÇÃO .....	20
3.2	LED APLICADO À ILUMINAÇÃO .....	23
3.2.1	<b>As tecnologias mais aplicadas</b> .....	<b>24</b>
3.2.2	<b>Rendimento óptico da luminária</b> .....	<b>24</b>
3.2.3	<b>Tempo de partida a frio e tempo de partida a quente</b> .....	<b>24</b>
3.2.4	<b>Vida mediana e vida útil (depreciação do fluxo luminoso)</b> .....	<b>25</b>
3.2.5	<b>Espectro de Luz</b> .....	<b>26</b>
3.2.6	<b>Índice de reprodução de cor</b> .....	<b>27</b>
3.2.7	<b>Modo de falha</b> .....	<b>28</b>
3.2.8	<b>Manutenção e operação</b> .....	<b>28</b>
3.2.9	<b>Meio ambiente</b> .....	<b>29</b>
3.2.10	<b>Aspectos econômicos</b> .....	<b>29</b>
3.2.11	<b>Controle do fecho luminoso</b> .....	<b>31</b>
3.3	PROBLEMAS NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA .....	32
3.3.1	<b>Transitórios</b> .....	<b>34</b>
3.3.2	<b>Variações de tensão de curta e de longa duração</b> .....	<b>34</b>
3.3.3	<b>Desequilíbrios</b> .....	<b>35</b>
3.3.4	<b>Distorções da forma de onda</b> .....	<b>35</b>
3.3.5	<b>Flutuações de tensão</b> .....	<b>37</b>
3.3.6	<b>Variações de frequência</b> .....	<b>37</b>
3.4	FOTOMETRIA .....	37
3.4.1	<b>Curvas fotométricas</b> .....	<b>41</b>
3.4.2	<b>Iluminação ambiente por lâmpadas tubulares</b> .....	<b>42</b>

<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>47</b>
4.1	AEROPORTO A .....	48
4.2	AEROPORTO B .....	48
4.3	AEROPORTO C .....	49
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>52</b>
5.1	AEROPORTO A .....	52
5.2	AEROPORTO B .....	54
5.3	AEROPORTO C .....	55
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A iluminação representa o terceiro maior uso de energia elétrica no Brasil, sendo cerca de 17% da matriz de energia elétrica no país. A iluminação é responsável por aproximadamente 23% do consumo de energia elétrica no setor residencial, 44% no setor comercial e serviços públicos e 1% no setor industrial (IWASHITA, 2004).

Com o advento da crise hídrica e, conseqüentemente, crise energética em 2014, diversos mecanismos preventivos para redução do consumo de energia tem sido empregados pelos setores consumidores no país.

Durante décadas os chamados auxílios visuais aeroportuários têm empregado lâmpadas incandescentes e lâmpadas de descarga. Além disso, a infraestrutura aeroportuária aplica lâmpadas convencionais na iluminação ambiente e iluminação viária. Tais lâmpadas incandescentes e de descarga, para atingir sua alta eficiência luminosa, apresentam alto consumo de energia elétrica. Tendo em vista, as grandes potências instaladas em balizamentos de pista e o tempo em que estes permanecem ligados, os aeroportos brasileiros empregam grande parte da sua energia elétrica consumida em sistemas de iluminação e auxílios visuais.

Não obstante, os profissionais de Engenharia Aeroportuária têm adotado tecnologias que visam aumentar a eficiência energética de seus sistemas e promover a redução no consumo de energia elétrica.

Dentro das tecnologias que estão despontando, as lâmpadas a LED oferecem um grande potencial de aplicação devido a sua alta eficiência aliada ao bom desempenho luminotécnico e ao impacto positivo em relação ao meio ambiente, constituindo-se como uma tendência em inovação tecnológica (RYCAERT et al, 2012). É de se esperar, portanto que sistemas de iluminação a LED sejam aplicados em infraestrutura aeroportuária, promovendo iluminação ambiente e constituindo equipamentos de auxílio visual à navegação aérea.

Nesta pesquisa, serão analisadas tecnologias LED em comparação com tecnologias convencionais incandescentes e fluorescentes aplicadas à iluminação aeroportuária, uma vez que há grandes lacunas de conhecimento sobre o tema em virtude da escassez de pesquisas que avaliem parâmetros elétricos e luminotécnicos destas tecnologias.

A pesquisa foi contextualizada em três implementações LED em aeroportos brasileiros. Dentro das limitações instrumentais e infraestruturais foi possível avaliar corrente, tensão, potência e fator de potência elétricos, bem como se analisou o espectro harmônico e a iluminância, haja visto que são parâmetros mensuráveis por instrumentos portáteis e permitem análises amplas dentro da Engenharia Elétrica.

## 1.1 ILUMINAÇÃO AEROPORTUÁRIA

De acordo com Magalhães (2015), são considerados sistemas de iluminação típicos existentes em um aeroporto:

- a) Iluminação comercial - Terminais de Passageiros.
- b) Iluminação industrial - Terminais de Carga.
- c) Iluminação Pública Vias de acesso.
- d) Iluminação Específica - Balizamento Noturno e Sinalização vertical
- e) Iluminação Específica - Iluminação de Pátio de Aeronaves.

Neste trabalho analisou-se a iluminação de terminais de passageiros, pátio de aeronaves e balizamento de pista.

### 1.1.1 Iluminação de terminal de passageiros

Terminais de passageiros são edificações de um aeroporto compostos pelas salas de embarque, sanitários, áreas comuns de circulação, lojas comerciais e saguões.

Nestes ambientes são utilizadas, quase em sua totalidade, luminárias do tipo comercial como calhas de embutir, de sobrepor ou até pendentes com lâmpadas fluorescentes tubulares (FIG. 1). Em menor escala são utilizadas luminárias decorativas de embutir, de sobrepor com lâmpadas fluorescentes compactas ou halógenas nas lojas comerciais.



Figura 1 - Iluminação de terminal de passageiros



Fonte: Do autor, 2015

### 1.1.2 Iluminação de pátio de aeronaves

Em aeroportos, os chamados pátios de aeronaves são áreas dedicadas ao estacionamento e manobras de aviões. Tais pátios são revestidos por pavimentos flexíveis (asfalto) ou rígidos (concreto). A iluminação destes pátios é realizada por torres de iluminação com altura média de 24 metros (FIG. 2). Nestas torres instalam-se, segundo Magalhães (2015), simultaneamente dois tipos de projetores consagrados pelo seu alcance luminoso: projetores com lâmpadas de descarga a vapor de sódio ou de multivapores metálicos e projetores com lâmpadas incandescentes halógenas. Em caso de falta de energia, são ligados os projetores com lâmpadas halógenas até o restabelecimento do fluxo nominal dos projetores com lâmpadas de descarga.

Figura 2 – Torres de iluminação de pátio de aeronaves



Fonte: MAGALHÃES, 2015

### 1.1.3 Balizamento de pista

O Sistema de Balizamento de Pista é um auxílio visual à navegação aérea. Magalhães (2015) o definiu como um conjunto de luzes dos tipos composto por: luzes de borda de pista de pouso, luzes de eixo de pista de pouso, luzes de borda de pista de rolamento, luzes de eixo de pista de rolamento, luzes de final de pista, as luzes de cabeceira de pista, luzes de zona de contato e demais luzes destinadas a prestar auxílio visual aos pilotos e aeronaves quando estão pousando.

Além disso, o balizamento de pista é dotado de um sistema integrado de controle capaz de operá-lo remotamente pela Torre de Controle de Tráfego Aéreo (TWR).



feito com o uso de um autotransformador com derivações. A principal desvantagem do TCC é o baixo fator de potência com cargas inferiores à nominal.

Em balizamentos a LED as fontes são Retificadores de Corrente Constante (RCC), os quais são dotados de transistores de potência e possuem microprocessadores e microcontroladores para regular sua operação. São equipamentos essencialmente eletrônicos que possuem diversas proteções contra surtos de tensão e corrente, além de circuitos especiais capazes de filtrar distorções harmônicas e corrigir o fator de potência.

A redução de potência oriunda do emprego da tecnologia LED tem como consequência a redução das dimensões das fontes de tensão e corrente envolvidas em seus circuitos.

## 2 OBJETIVO

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo geral analisar comparativamente o emprego de tecnologias de iluminação LED em ambiente aeroportuário em relação às tecnologias convencionais de iluminação, tais como lâmpadas de descarga e lâmpadas fluorescentes no que se refere ao desempenho elétrico e luminotécnico.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Analisar alguns aspectos luminotécnicos de equipamentos de iluminação LED aplicados em infraestrutura aeroportuária possíveis de serem medidos com instrumentos portáteis em campo;
- b) Analisar alguns aspectos elétricos, especialmente a geração de componentes harmônicas, de equipamentos de iluminação LED aplicados em infraestrutura aeroportuária;
- c) Comparar os aspectos luminotécnicos e elétricos de equipamentos LED aplicados em infraestrutura aeroportuária;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ILUMINAÇÃO

Do surgimento da lâmpada de filamento às lâmpadas modernas que utilizam LED em sua confecção estão, pelo menos, 200 anos de desenvolvimento tecnológico. As pesquisas que buscaram desenvolver o que chamamos hoje de lâmpada datam desde o século XVIII com resultados notáveis alcançados pelo então químico da Royal Institution, Humphry Davy já em 1802. Essa lâmpada consistia em dois eletrodos de carbono, os quais ao serem colocados em contato produziam um ponto luminoso intenso devido à passagem da corrente elétrica, conforme explica (GOEKING, 2009).

Em 1860 o então físico e químico Joseph Swan desenvolveu uma lâmpada que se tornaria fonte de inspiração para que o então inventor e empresário Thomas Alva Edison criasse sua lâmpada incandescente em outubro de 1879. A lâmpada incandescente inventada por Thomas Alva Edison era constituída por um filamento de algodão carbonizado e esse filamento podia funcionar por até dois dias. A principal vantagem do invento de Thomas Alva Edison foi sua característica comercial se comparada aos inventos anteriores. Isso se mostrou verdadeiro, uma vez que já, em 1880, as lâmpadas incandescentes inventadas por Thomas Alva Edison já eram comercializadas em pequena escala.

O próximo passo para o invento de Thomas Alva Edison foi o desenvolvimento de um novo filamento, que permitisse que sua lâmpada durasse mais tempo. Assim, em conjunto com outros pesquisadores, chegou-se ao filamento de Tungstênio. Esse novo filamento apresentava o inconveniente de partículas desse material se desprenderem do filamento quando esse fosse submetido a baixa pressão ou ao vácuo. A solução encontrada pelos pesquisadores da época foi utilizar um gás inerte para que essas partículas não se desprendessem da lâmpada tornando-a mais resistente (GOEKING, 2009).

As lâmpadas incandescentes apresentam uma baixa eficiência energética pois, em alguns casos, apenas 10% da energia consumida é efetivamente convertida em luz, o restante da energia é dissipado em forma de calor. Visando uma melhor eficiência energética, o governo brasileiro através da portaria Interministerial 1.007 dos Ministérios de Minas e Energia, da Ciência, Tecnologia e

Inovação e do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior, de dezembro de 2010 estabeleceu datas para que os fabricantes se adequem a eficiência mínima exigida na portaria (BRASIL, 2010).

Com o passar dos anos, novas lâmpadas foram sendo desenvolvidas e as lâmpadas Halógenas foram o próximo passo na evolução da tecnologia da iluminação. Possuem Índice de Reprodução de Cor - IRC de 100 e são elas, juntamente com as lâmpadas incandescentes, as lâmpadas que mais se aproximam da cor da luz emitida pelo sol. As lâmpadas Halógenas conseguem trabalhar em temperaturas mais elevadas, com isso conseguem produzir mais luz e maior temperatura de cor por volta de 3000K. Possuem ainda uma vida útil de 2000 a 5000 horas (GOEKING, 2009).

Na linha do tempo da evolução da tecnologia da iluminação, chegamos as lâmpadas fluorescentes, sendo a primeira datada de 1926 quando o cientista Edmund Germer utilizou uma lâmpada de vapor de mercúrio tendo um vidro revestido com um pó fosforescente para obter uma luz branca mais homogênea. As lâmpadas fluorescentes comerciais datam de 1930, tendo seu auge em 1970. A eficiência energética das lâmpadas fluorescentes é de 60 lúmens por watt, produzindo temperaturas de cor que variam de 2700 K a 8000 K, tendo ainda um IRC que pode variar de 70 a 90 e podem durar em média de 7500 horas, dependendo da quantidade de acionamentos que são feitos durante sua utilização. Devido à sua popularização e aos diferentes formatos e tamanhos, hoje pode-se encontrar as lâmpadas fluorescente em residências, comércios, indústrias e até na iluminação pública em geral. Já em 1980 houve a criação de um novo tipo de lâmpada fluorescente que se utiliza da indução eletromagnética para fazer a vaporização do mercúrio ou do amálgama pela indução dos elétrons. A principal vantagem desse novo tipo de lâmpada é sua alta vida útil, podendo chegar até 100 mil horas, ainda tendo um IRC por volta de 80 e um rendimento de 80 lúmens por watt (GOEKING, 2009).

Ainda na década de 1930, foram criadas lâmpadas de vapor de mercúrio e vapor de sódio. As lâmpadas de vapor de mercúrio tiveram seu auge com a expansão do mercado norte americano de automóveis, sendo que, no Brasil, foram mais populares em 1980 quando foram utilizadas para a iluminação pública. As principais características das lâmpadas de vapor de mercúrio são seu IRC de 22 a no máximo 70 quando utilizando pintura de fósforo especial, sua baixa eficiência de

40 a 60 lúmens por watt, temperatura de cor de 4000 K e uma vida útil média de 10 mil a 15 mil horas. As lâmpadas de vapor de sódio também surgem como uma tentativa para melhorar a iluminação pública. O desenvolvimento da lâmpada de vapor de sódio de baixa pressão foi feito por Artur Holly Compton, da Westinghouse, levava cerca de 10 minutos para entrar em regime nominal de funcionamento, porém apresentava um rendimento de 180 lúmens por watt o que a tornou um sucesso nos anos 1950 sendo somente substituída em 1960 pela lâmpada de vapor de sódio de alta pressão.

Além disso, houve as lâmpadas de *Stand By*, que foram projetadas para permitir um retorno mais rápido da iluminação quando ocorressem quedas rápidas de energia. As lâmpadas de *Stand By* têm uma durabilidade de 36 mil a 64 mil horas. Essas lâmpadas foram desenvolvidas especialmente para serem utilizadas em túneis. A evolução das lâmpadas de vapor de sódio são as lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão. Essas lâmpadas podem ser encontradas em diversos formatos e potência, levando cerca de dois minutos para seu acendimento. Possuem um rendimento de 120 lúmens por watt, temperatura de cor de 2000 K e um IRC de 30, com uma estimativa de durabilidade de 18 mil a 32 mil horas (GOEKING, 2009).

No início do Século XX, Charles Steinmetz patenteou a lâmpada de multivapores metálicos, também conhecida como lâmpada a vapor de mercúrio, com iodetos metálicos. Seu funcionamento é semelhante às lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão, mas com a possibilidade de trocar a sua cor, dependendo dos metais nobres vaporizados. Também, podem ser encontradas em diferentes formatos, tendo IRC de 90, rendimento de 100 lúmens por watt, temperatura de cor entre 3000 K e 5200 K, com uma durabilidade de 12 mil horas.

Segundo Malvino (2007), os LEDs que podem irradiar luzes vermelha, verde, amarela, azul, laranja ou mesmo infravermelha (luz invisível), são componentes eletrônicos produzidos utilizando elementos como o Gálio, Arsênio e Fósforo. Segundo Boylestad (1999), o diodo emissor de luz (LED) é um diodo que emite luz quando energizado. Além disso, Boylestad (1999), explica que em uma junção p-n ocorre recombinações elétrons lacunas recombinações essas que exigem que a energia do elétron livre não ligado seja transferida para outro estado, assim, em todas as junções p-n de um semicondutor teremos uma parte dessa energia dissipada em forma de calor e outra parte em forma de fótons. Para Goeking (2009), os LEDs inicialmente foram utilizados como luz de sinalização em aparelhos



eletrônicos. Enquanto o desenvolvimento de melhores LEDs seguiram em ritmo acelerado, a data da criação dos diodos ainda gera controversas. Uma das versões diz que em 1907 o engenheiro Henry Joseph Round havia descoberto o efeito da eletroluminescência, no entanto, o engenheiro não publicou nada a respeito. A outra versão diz que em 1927 o então técnico de rádio Oleg Vladimir Losev conseguiu fazer o primeiro LED utilizando óxido de zinco e carboneto de silício. Sua descoberta foi publicada em jornal russo e em revistas inglesas e alemãs, mas ainda não chamava a atenção da indústria luminotécnica. Nick Holonyak Jr. desenvolveu em 1962 o primeiro LED de luz vermelha de 10 microcandelas.

A partir de 1971 houve o desenvolvimento das primeiras tonalidades de cores verde, amarelo e laranja e em 1993 surgiu o primeiro LED de luz azul viável comercialmente. Em 1995, a descoberta do LED que produz luz branca pelo pesquisador japonês Shuji Nakamura é um marco na evolução desse dispositivo, tendo uma temperatura de cor entre 2700 K e 6500 K. A eficiência dos LEDs está em torno de 90 lúmens por watt tendo uma vida útil de 50 mil horas e hoje é possível encontrar potências de 5 W a 300 W no mercado.

### 3.2 LED APLICADO À ILUMINAÇÃO

De acordo com Aguillera (2015), o LED tem sido alvo de interesse tanto de administradores públicos, da comunidade científica, da mídia e da população seja por seu apelo energético, estético, ambiental ou, simplesmente, por ser considerada uma tecnologia de ponta. Além disso, grandes prefeituras do estado de São Paulo, em suas recentes iniciativas para licitações de parcerias público privadas para a administração da iluminação pública, já estão exigindo como requisito básico o uso de luminárias a LED de última geração.

A modernização do parque de luminárias já é uma realidade e em muitas cidades do mundo a substituição para luminárias LED já acontece, como exemplo as cidades de Los Angeles e Las Vegas nos Estados Unidos bem como grandes projetos na Índia e na Europa. No Brasil, podemos destacar as cidades de São Paulo, São Bernardo do Campo e Rio de Janeiro que modernizarão em 100% seus parques de luminárias, (AGUILLERA, 2015).

### **3.2.1 As tecnologias mais aplicadas**

Segundo Aguilera (2015), as lâmpadas que são tecnicamente e economicamente viáveis para o uso de iluminação são as lâmpadas de descarga e atualmente, as lâmpadas LED. As lâmpadas de descarga são lâmpadas que utilizam gases pelos quais ocorrerá a passagem de corrente elétrica e, assim, fazendo com que emitam radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda do ultravioleta ao infravermelho. Já em relação ao LED, Aguilera (2015) explica que esse dispositivo eletrônico semicondutor é formado por duas partes as quais chamamos de anodo e catodo. Quando polarizado diretamente, esse dispositivo funciona como um condutor permitindo a passagem da corrente elétrica, internamente no dispositivo ocorre a chamada recombinação elétron lacuna. Essa recombinação é responsável pela liberação de energia em forma de luz e outra parte em forma de calor que é dissipada na junção do dispositivo.

### **3.2.2 Rendimento óptico da luminária**

Uma observação que Aguilera (2015) faz em relação ao LED é que o LED pode ser considerado uma fonte de luz pontual, permitindo assim uma versatilidade e facilidade para trabalhar com o direcionamento de seu feixe. Devido a essa característica pontual do LED isso permite termos luminárias com altos rendimentos quando comparadas às lâmpadas de descarga. Além disso, a perda do fluxo luminoso nas luminárias de lâmpadas de descarga devido à absorção nos refletores e lentes, bem como a própria lâmpada que funcionaria como um obstáculo a luz rebatida pelo refletor.

### **3.2.3 Tempo de partida a frio e tempo de partida a quente**

Outro tópico de interesse ao falar sobre iluminação é o tempo de partida a frio e a quente das lâmpadas. As lâmpadas de descarga necessitam de um tempo médio de 3 a 5 minutos para poderem dar a partida a frio e atingir até 90% do fluxo luminoso. Isso se deve, principalmente, à rigidez dielétrica dos gases que são utilizados nessas lâmpadas. No entanto, a situação é mais complicada quando ocorre o religamento da lâmpada. Caso ocorra uma queda de energia que perdure

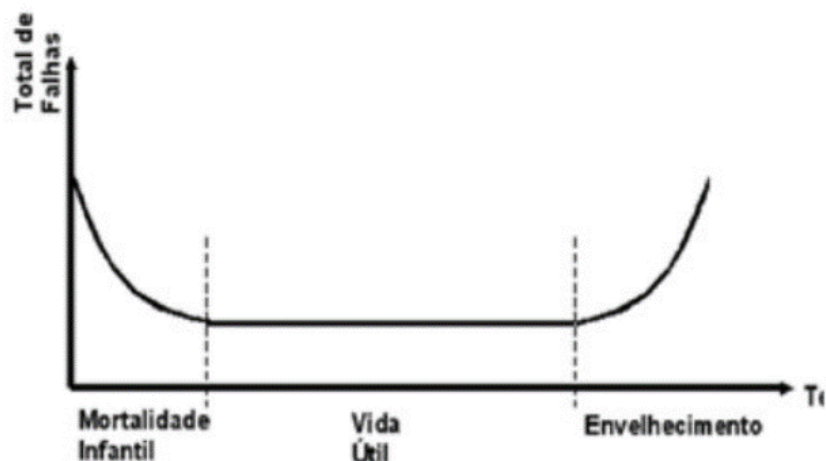
por mais de 30 segundos, é necessário aguardar mais 10 minutos para que ocorra a diminuição da pressão interna e fazer o religamento a quente.

Em comparação com as lâmpadas de descarga, os LEDs não necessitam de tempo para partida a frio ou a quente. Para que os mesmos funcionem basta que ocorra o reestabelecimento da alimentação elétrica.

### 3.2.4 Vida mediana e vida útil (depreciação do fluxo luminoso)

Os equipamentos eletrônicos apresentam um comportamento de falhas que se assemelham a um gráfico de uma banheira. No início os equipamentos eletrônicos podem falhar devido a diversos problemas: transporte, fabricação, manuseio e, mesmo, à instalação. Após esse período inicial de falhas, os equipamentos tendem a funcionar normalmente até que a taxa de falhas aumenta novamente, sendo que agora este índice de falhas está associado ao envelhecimento dos equipamentos eletrônicos. Esse comportamento pode ser visto na Figura 4, o gráfico de banheira (AGUILLERA, 2015).

Figura 4 – Curva da banheira



Fonte: AGUILLERA, 2015

### 3.2.5 Espectro de Luz

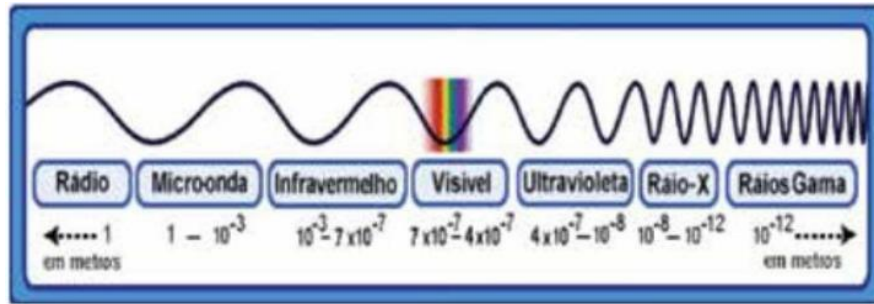
Na Tabela 1 e na Figura 5 são apresentados os comprimentos de onda, frequência e energia para o espectro eletromagnético. Aguilera (2015) ainda explica que a faixa de luz visível é bem estreita quando comparadas às demais ondas eletromagnéticas. Segundo aquele autor, a visão mesópica inicia-se em níveis de iluminação a partir de 0,034 cd/m<sup>2</sup>. Iwashita (2004) explica que a região de luminância mesópica (entre 0,005 cd/m<sup>2</sup> e 5 cd/m<sup>2</sup>) está entre a condição escotópica e a fotópica. Isto é, retrata a condição de brilho em uma região intermediária entre uma condição sem luz e com luz, respectivamente. Normalmente essas condições são encontradas em iluminação pública, iluminação de áreas ao ar livre, iluminação de túneis e iluminação de emergência.

Tabela 1 – Espectro da radiação eletromagnética

Região	Comp. Onda (Angstroms)	Comp. Onda (Centímetros)	Frequência (Hz)	Energia (eV)
Rádio	$> 10^9$	$> 10$	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Micro-ondas	$10^9 - 10^6$	$10 - 0,01$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0,01$
Infra-vermelho	$10^6 - 7000$	$0,01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4,3 \times 10^{14}$	$0,01 - 2$
Visível	$7000 - 4000$	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4,3 \times 10^{14} - 7,5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Ultravioleta	$4000 - 10$	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7,5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
Raios – X	$10 - 0,1$	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Raios Gama	$< 0,1$	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Fonte: AGUILLERA, 2015

Figura 5- Espectro da radiação eletromagnética

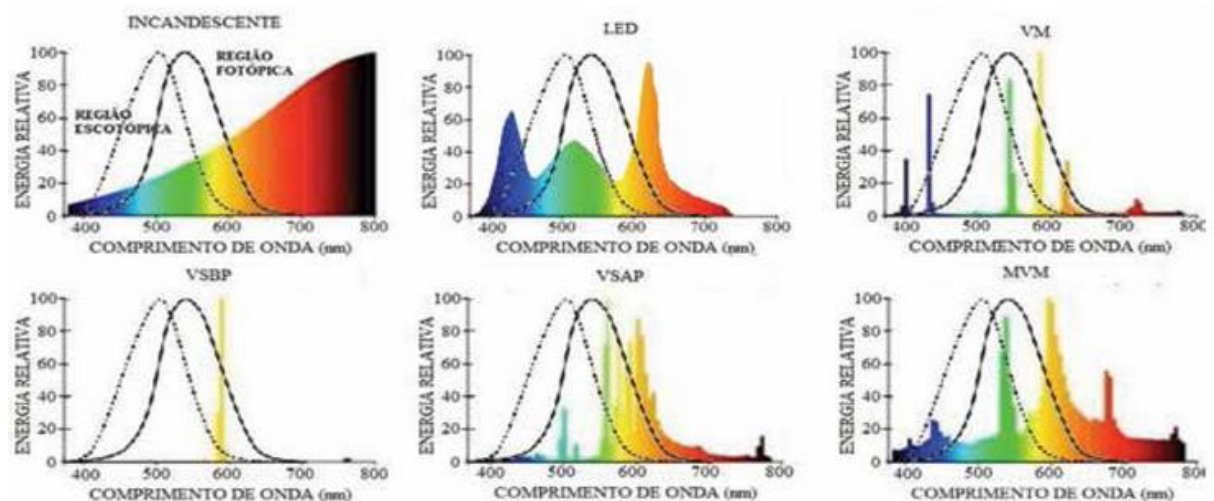


Fonte: AGUILLERA, 2015

### 3.2.6 Índice de reprodução de cor

Observando a Figura 6, pode-se ver que os índices de IRC das fontes de luz branca de alguns tipos de LED e de lâmpadas a multivapores metálicos. As lâmpadas de LED podem ser encontradas com IRC de 70 a 80 em média e as lâmpadas de vapores metálicos com IRC de 60 a 85, (AGUILLERA, 2015). Além disso, é possível encontrar LEDs de alta potência com IRC de 98 sendo, nesse caso, não muito usual (AGUILLERA, 2015).

Figura 6 – Eficácia luminosa relativa



Fonte: AGUILLERA, 2015

VM = vapor de mercúrio; VSBP = vapor de sódio baixa pressão; MVM = multivapores metálicos  
 VSAP = vapor de sódio alta pressão; LED = exemplo de espectro, uma vez que o Led pode produzir inúmeros espectros diferentes.

### **3.2.7 Modo de falha**

Ainda de acordo com Aguilera (2015) as luminárias LED são feitas por agrupamentos de LED e quando ocorre uma falha devido ao arranjo dos mesmos, ocorrerá uma diminuição do fluxo de luz proporcional aos LED com defeito, diferentemente do que ocorre com as lâmpadas descarga, que caso venham a falhar, terá o fluxo luminoso total interrompido. Contudo, não foram levados em consideração para essa análise os outros componentes das luminárias tais como reatores e drivers.

### **3.2.8 Manutenção e operação**

Em relação à manutenção e operação, o parque de iluminação da cidade de São Paulo possui cerca de 505 mil unidades. Dessas 50% são lâmpadas a vapor de mercúrio, 49% a vapor de sódio e os outros 1% de outras tecnologias (AGUILLERA, 2015). Cabe ainda ressaltar que os valores dos custos de manutenção englobam ainda os custos operacionais da logística para atender os requisitos mínimos de iluminação. Dentre elas, destacam-se: pessoal operacional e técnico, materiais, ferramentas, depósitos e veículos, pessoal técnico e administrativo, sistemas computacionais, centrais de atendimento telefônico, escritórios para recebimento de reclamações da população e para despacho de serviços operacionais, recursos estes que têm seu dimensionamento diretamente dependente do porte do parque de iluminação e da vida útil da tecnologia aplicada (AGUILLERA, 2015). O contrato atual da cidade de São Paulo para a manutenção do parque de iluminação tem um custo aproximado 9,00 R\$/ponto/mês (vapor de sódio) e 15,00R\$/ponto/mês (multivapores metálicos). Como São Paulo possui 505 mil unidades, a parcela do contrato referente à manutenção das unidades é superior a R\$ 54 milhões anuais (AGUILLERA, 2015).

Um comparativo realizado por Aguilera (2015) entre o contrato atual da cidade de São Paulo, para manutenção do parque de iluminação e o atual contrato para instalação e manutenção do parque de iluminação da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira (CUASO), da Universidade de São Paulo, demonstrou que para um contrato de manutenção por dez anos para mais de 6.100 unidades

LED, o valor seria de R\$ 117 mil e R\$ 0,23 ponto/mês para uma tecnologia com vida útil mínima de 60 mil horas.

Para completar o comparativo, Aguilera (2015) diz que os custos da tecnologia LED são 39 vezes menor do que as lâmpadas de descarga, sendo que com o avanço da tecnologia e o aumento da vida útil das lâmpadas LED, esse custo pode diminuir ainda mais. Por fim, Aguilera (2015) salienta que se o parque de iluminação da capital paulista fosse trocado pela iluminação a LED os custos com a iluminação seriam de apenas R\$ 1,4 milhão anuais.

### **3.2.9 Meio ambiente**

Em relação ao meio ambiente, devido às características das lâmpadas a LED, dentre elas a alta eficiência energética e sua alta vida útil, possibilitam a diminuição de emissão de CO<sub>2</sub>, tanto pelo consumo energético quanto pela fabricação, manutenção e descarte desses equipamentos. Outro ponto muito importante em relação as lâmpadas de descarga é que as lâmpadas a LED não possuem substâncias altamente tóxicas, como no caso das lâmpadas de descarte que utilizam mercúrio em seu funcionamento. Aguilera (2015) destaca que o mercúrio é altamente poluidor do solo e da água, prejudicando animais, plantas e peixes.

### **3.2.10 Aspectos econômicos**

De acordo com o comparativo realizado por Aguilera (2015) entre o parque de iluminação instalado na Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira (CUASO) para uma instalação de 100% de LED comparado com um sistema hipotético utilizando lâmpadas de descarga, ele chegou à conclusão que o custo global (investimento inicial, manutenção e consumo de energia) é menor.

A Tabela 2 (AGUILLERA, 2015) permite ter uma visão geral e clara da superioridade das lâmpadas LED. Ainda de acordo com a Tabela 2, pode-se observar o alto custo para o investimento inicial para essa tecnologia, mas quando comparado com o custo global verifica-se a superioridade para essa tecnologia.

Tabela 2 - Comparativo entre tecnologias de fontes de luz

<b>Parâmetros</b>	<b>Vapor de sódio</b>	<b>Multivapores</b>	<b>LED</b>
Eficiência luminosa (lm/W)	Dimerização parcial 150 (no limite)	Dimerização parcial 105 (no limite)	Dimerização total 150 (em franca ascensão)
Índice de Reprodução de Cor (%)	20 a 25	70 a 85	70 a 98
Vida útil (mil horas)	24 a 36	12 a 20 (no limite)	15 a 100 (em ascensão)
Temperatura da cor	Branca amarelada	Branca azulada	Branca quente, neutra ou fria
Automação	Parcialmente controlável e parcialmente monitorável a distância.	Parcialmente controlável e parcialmente monitorável a distância.	Totalmente controlável e monitorável a distância.
Resistência mecânica	Sensível a impactos e vibrações	Sensível a impactos e vibrações	Resistente a impactos e vibrações
Implicações ambientais	Contém mercúrio, poluente de elevado risco à saúde. Emite radiação infravermelha e ultravioleta	Contém mercúrio, poluente de elevado risco à saúde. Emite radiação infravermelha e ultravioleta	Não apresenta riscos ao meio ambiente nem ao operador. Não emite radiação infravermelha e ultravioleta

Fonte: AGUILLERA, 2015



### 3.2.11 Controle do fecho luminoso

Na Tabela 3 têm-se as características vantajosas do LED sobre as lâmpadas de descarga com relação ao controle do fecho luminoso.

Tabela 3 – Vantajosas do LED sobre as lâmpadas de descarga

<b>Característica</b>	<b>Descrição</b>
Nível de iluminação	O nível de iluminação útil, para a mesma quantidade de energia consumida, é a maior do que das lâmpadas de descarga.
Uniformidade	A distribuição da luz no plano pode ser mais equilibrada, diminuindo os usuais excessos de luz sob as luminárias elevando a iluminância nos vãos entre luminárias. A fotometria das luminárias a LED é muito mais versáteis e de uso muito mais abrangente.
Conforto Visual	O LED possibilita maior controle do fecho, maior versatilidade do design das luminárias e maior controle do ofuscamento. Tal controle, aliado à maior uniformidade e ao maior iluminamento, possibilita um maior espaçamento entre luminárias.
Poluição Luminosa	O maior controle do fecho do LED, possibilita a redução da poluição luminosa que é a emissão de luz em direção ao céu, efeito de evidente desperdício de energia e de clareamento do céu sobre as cidades, que diminui a visibilidade de estrelas e outros astros, prejudicando a qualidade de vida da população e da fauna local.

### 3.3 PROBLEMAS NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Em um artigo para a revista o Setor Elétrico, Paulilo (2013) apresenta as principais características que se devem observar quando se trabalha com o conceito de qualidade da energia elétrica. Dessa forma, nesse tópico serão abordadas as principais características técnicas que se deve levar em consideração quando se destaca a qualidade da energia elétrica.

No que se refere ao conceito de problemas na qualidade da energia elétrica, Paulilo (2013) informa que especialistas na área sugerem uma definição como a seguir:

“qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica, que resulte em falha ou operação indevida de equipamentos elétricos”

Os problemas associados a qualidade de energia elétrica são amplos e podem causar distúrbios tanto nos sistemas elétricos, como em sistema de comunicação de dados. Martinho (2012) salienta que deve haver uma sinergia entre as diferentes áreas de consumo, transmissão e geração de energia elétrica para que se possam resolver os diferentes problemas encontrados quando se lida com a qualidade da energia elétrica. Esses problemas podem ocorrer em pontos de acoplamento comum (PACs), bem como internamente no lado da instalação do consumidor.

Paulilo (2013) ainda relaciona esses problemas com a correção de fator de potência, racionalização da energia e aumento na produtividade.

O baixo fator de potência de instalações pode advir de várias causas sendo as que mais se destacam são:

- a) Motores de indução operando em vazio ou sobrecarregados: nesse caso a explicação se deve ao consumo de energia reativa que para os motores de indução é o mesmo tanto quando ele opera a vazio ou mesmo quando ele opera em plena carga, porém a energia ativa irá depender diretamente da carga aplicada ao eixo do motor e quando menor a carga aplicada ao eixo do motor menor será o fator de potência associado;
- b) Transformadores operando em vazio ou com pouca carga: pode-se fazer uma analogia com os motores de indução operando com pouca carga,

nesse caso um transformador superdimensionado para a carga que irá alimentar terá um fator de potência baixo;

- c) Lâmpadas de descarga: nesse caso lâmpadas de vapor de mercúrio, vapor de sódio, fluorescentes, por exemplo, necessitam de um reator para funcionarem. Os reatores são feitos de bobinas as quais necessitam de energia reativa o que pode contribuir para um baixo fator de potência. Uma solução seria o uso de reatores compensados estes podem apresentar fatores de potência próximos a 100% desde que tenham boa procedência e especificação.

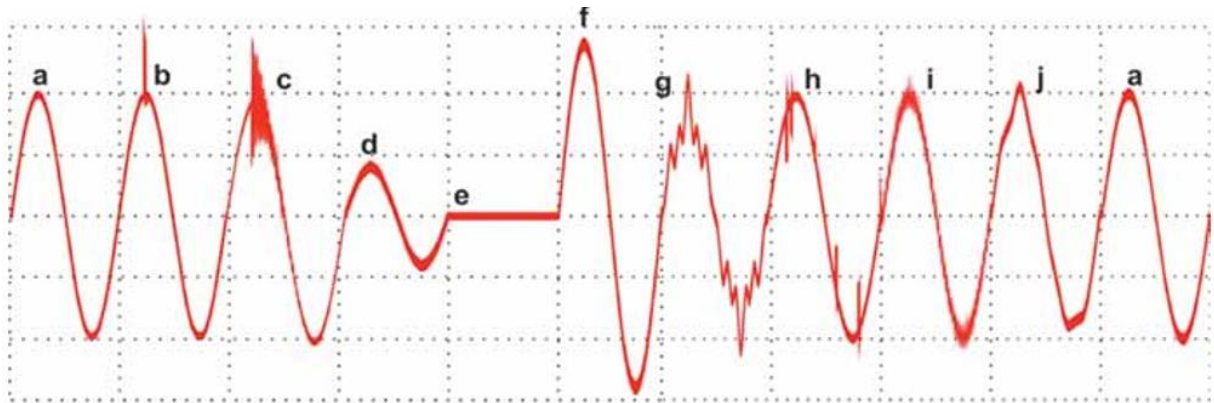
Martinho (2012) define o conceito de boa qualidade de energia elétrica como sendo o fornecimento, a custo viáveis, funcionamento seguro e confiável de equipamentos e processos, sem afetar o meio ambiente e o bem-estar das pessoas. Essa análise de qualidade de energia ainda pode ser mais ampla abrangendo aspectos sociais, ambientais, técnicos e econômicos. Outro ponto importante é o aspecto relacionado a parte comercial entre concessionária e cliente além dos atendimentos de emergência que surgem no dia a dia das instalações elétricas. Dessa forma, do ponto de vista ideal a qualidade de serviço deveria oferecer continuidade plena e oferta ilimitada da energia elétrica.

No quesito qualidade de produto, Paulilo (2013) ressalta que a qualidade da energia elétrica está relacionada na capacidade de o sistema entregar ao cliente uma energia com tensões equilibradas e sem deformações nas formas de onda, idealmente, ele ainda ressalta que deveriam ser disponíveis tensões senoidais equilibradas e com amplitude e frequência constantes.

Martinho (2012) ainda destaca que um sistema de avaliação ou mesmo indicadores para mensurar a qualidade de energia elétrica é bem complexa e apresenta peculiaridades técnicas que dificultam tratar o tema de uma forma mais simples.

Paulilo (2013) ressalta que os distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica normalmente estão associados a uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos dos quais irão caracterizar a tensão e a corrente elétrica em um dado tempo e local do sistema elétrico. Os principais distúrbios encontrados podem ser ilustrados na Figura 7.

Figura 7 – Principais distúrbios da qualidade da energia elétrica



Fonte: PAULILO, 2013

- a) tensão senoidal, b) transitório impulsivo, c) transitório oscilatório, d) afundamento de tensão  
e) interrupção, f) salto de tensão, g) harmônico, h) corte de tensão, i) ruídos, j) inter-harmônicos

### 3.3.1 Transitórios

Os transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que submetem equipamentos a grandes solicitações de tensão e/ ou corrente. Existem dois tipos de transitórios: os impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e os oscilatórios, causados por chaveamentos. Mamede Filho (2007) completa dizendo que as descargas atmosféricas podem induzir tensões que chegam a centenas de kiloVolts tanto nas redes de transmissão quanto de distribuição o que obriga as concessionárias a utilizarem cabos-guarda ao longo das linhas de transmissão e de para raios com resistores não lineares para proteção de equipamentos utilizados nesses sistemas.

### 3.3.2 Variações de tensão de curta e de longa duração

As variações de tensão de curta duração podem ser caracterizadas por alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias. Tais variações de tensão são, geralmente, causadas pela energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos de sistema. Dependendo do local da falha e das condições do sistema, o resultado pode ser um afundamento momentâneo de tensão (*sag*), uma elevação

momentânea de tensão (*swell*), ou mesmo uma interrupção completa do sistema elétrico. Cotrim (2008) acrescenta que as sobretensões de manobra não dependem, em geral, da corrente seccionada e sim da velocidade de seccionamento (se brusco) em um circuito altamente indutivo. Essas sobretensões serão tanto maior quanto menor for o tempo de seccionamento podendo ocorrer sobretensões de quatro a cinco vezes a tensão nominal para tempos menores que 1 ms.

As variações de tensão de longa duração são fenômenos semelhantes aos fenômenos de curta duração, porém, com a característica de se manterem no sistema elétrico por tempos superiores a três minutos. São causadas por saídas de grandes blocos de carga, perdas de fase, dentre outras.

### **3.3.3 Desequilíbrios**

Os desequilíbrios podem ser definidos como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, divididos pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressados em percentual. As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. Alexander e Sadiku (2013) corroboram com a definição de sistemas desequilibrados. Para eles existem duas situações possíveis: tensões da fonte não são iguais em magnitude e/ou diferem em fase por ângulos desiguais ou ainda as impedâncias das cargas são desiguais. O que permite dizer que um sistema desequilibrado se deve a fontes de tensão desequilibradas ou a uma carga desequilibrada.

### **3.3.4 Distorções da forma de onda**

A distorção da forma de onda é definida como um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na frequência fundamental, e é caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral. Existem cinco tipos principais de distorções da forma de onda:

- a) Harmônicos: tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (50 Hz ou 60 Hz) na qual opera o sistema de energia elétrica. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e são oriundos de equipamentos e cargas com características não lineares instalados no sistema de energia.
- b) Inter-harmônicos: componentes de frequência, em tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema supridor (50 Hz ou 60 Hz). Elas podem aparecer como frequências discretas ou como uma larga faixa espectral. Os inter-harmônicos podem ser encontrados em redes de diferentes classes de tensão. As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, ciclo-conversores, motores de indução e equipamentos a arco. Sinais *Carrier* em linhas de potência também podem ser considerados como inter-harmônicos. Os efeitos deste fenômeno não são bem conhecidos, mas admite-se que podem afetar a transmissão de sinais *carrier* e induzir *flicker* visual no display de equipamentos como tubos de raios catódicos.
- c) Nível CC: a presença de tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA é denominado *DC offset*. Este fenômeno pode ocorrer como o resultado da operação ideal de retificadores de meia-onda. O nível CC em redes de corrente alternada pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da vida útil.
- d) *Notching*: distúrbio de tensão causado pela operação normal de equipamentos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Este fenômeno pode ser detectado pelo conteúdo harmônico da tensão afetada. As componentes de frequência associadas com os *notchings* são de alto valor e, desta forma, não podem ser medidas pelos equipamentos normalmente utilizados para análise harmônica.
- e) Ruído: definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 kHz, as quais são superpostas às tensões ou correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro. Os ruídos em sistemas de potência podem ser causados por equipamentos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores a estado sólido e fontes chaveadas que, normalmente, estão relacionados com aterramentos impróprios.

### 3.3.5 Flutuações de tensão

Segundo Martinho (2012), as flutuações de tensão são variações dos valores eficazes de tensão que compreendem os valores entre 0,95 pu a 1,05 pu e geralmente suas causas estão associadas a cargas industriais das quais podemos destacar três tipos de flutuações:

- a) Flutuações aleatórias: Associadas a fornos a arco e que dependem diretamente da fusão do material, bem como o nível de curto circuito da instalação;
- b) Flutuações repetitivas: Associadas por máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas e ferrovias;
- c) Flutuações esporádicas: Associadas a partida de grandes motores.

Ainda de acordo com Martinho (2012), os principais efeitos para as máquinas que estão em uma instalação com flutuações de tensão são variações de potência e torque, quedas de rendimentos de equipamentos elétricos, interferência nos sistemas de proteção e oscilações nos sistemas de iluminação efeito também conhecido como efeito *flicker*. Starosta (2012) ainda completa dizendo que as ocorrências de *flicker* estão diretamente associadas a grandes cargas que consomem grande volume de energia reativa e caso essas cargas sejam instaladas em redes que não as suportem adequadamente, o efeito desse mal dimensionamento são seguidos afundamentos de tensão de alimentação.

Outro destaque feito por Starosta (2012) diz respeito à mudança da fonte de alimentação mantendo-se a carga idêntica situação observada normalmente quando geradores de backup que possuem impedâncias menores e potências de curto circuito também menores quando comparados com os transformadores os quais eles substituem em regime de geração de emergência.

### 3.3.6 Variações de frequência

Outra característica destacada por Martinho (2012) é a variação da frequência fundamental (50 Hz ou 60 Hz) de um sistema elétrico. A velocidade de rotação dos geradores e a variação da frequência fundamental estão diretamente associadas.

Como a geração de energia e o consumo de energia são dinâmicos tendo cargas acionadas e desacionadas no decorrer desse processo alguma alteração pode ser constatada na frequência.

### 3.4 FOTOMETRIA

De acordo com Godoy (2015) a forma como a luz se propaga no espaço é representada por curvas e diagramas fotométricos. Esses diagramas fornecem informações de direção e intensidade luminosa. Com o advento do LED, uma gama de possibilidades se abre em relação a novos projetos, que podem ou não levar a soluções boas para o projeto em questão.

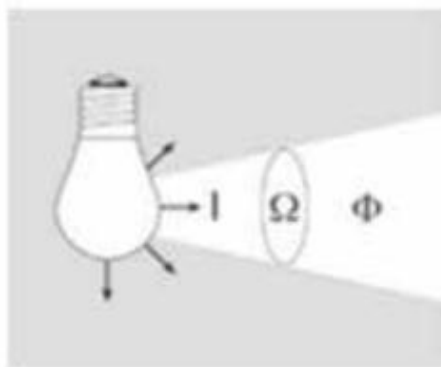
Por definição: intensidade luminosa ( $I$ ) é a luz que se propaga em uma dada direção, dentro de um ângulo sólido unitário e sua unidade é lúmen / esferorradiano ou candela (cd).

Na Figura 8 tem se a representação da intensidade luminosa e de um diagrama fotométrico.

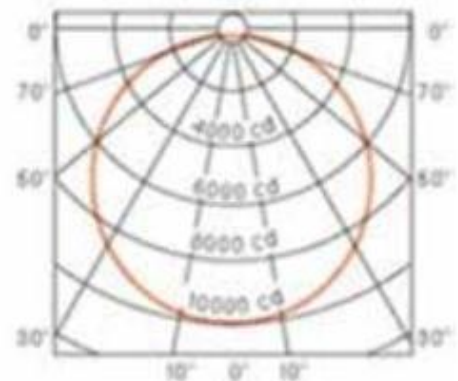
De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), tem se para a intensidade luminosa:

- a) Unidade de medida: candela
- b) Abreviação: cd
- c) Símbolo:  $I$

Figura 8 – Ilustração do conceito de intensidade luminosa



$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$



Fonte: GODOY, 2015



A candela é a intensidade luminosa, medida em uma dada direção de uma fonte, que emite uma radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  hertz e cuja intensidade energética nessa direção é  $1/683$  watt por esferorradiano. O ângulo sólido ( $w$ ) é uma medida do espaço tridimensional, assim como o radiano é para o espaço bidimensional. O esferorradiano é a unidade de um ângulo sólido, ou seja, um ângulo no espaço tridimensional.

O conceito de intensidade luminosa pode ser descrito pela unidade de luz, que, quando somada, resulta no fluxo luminoso da fonte. Dessa forma, a integral de todas as intensidades luminosas emitidas por uma fonte resulta no fluxo luminoso da fonte. Para explicar melhor essa definição, Godoy (2015) compara o fluxo luminoso total da lâmpada com o fluxo de água de um chuveiro, conforme pode ser visto na Figura 9, onde foi elaborada uma analogia entre o fluxo de água total que sai do chuveiro ao fluxo de luz total que sai da luminária. A intensidade luminosa seria o jato de água que sai de cada furinho do chuveiro. O fluxo luminoso é a soma das intensidades luminosas em uma superfície esférica que abrange o chuveiro (esferorradiano).

No Sistema Internacional de Unidades, tem-se para o fluxo luminoso:

- a) Unidade de medida: lúmen
- b) Abreviação: lm
- c) Símbolo:  $\phi$
- d) Fluxo luminoso emitido por uma fonte puntiforme e invariável de 1 candela, de mesmo valor em todas as direções, no interior de um ângulo sólido de 1 esferorradiano.

Figura 9 – Analogia entre o fluxo de água e o fluxo de luz



Na prática, contudo, a grandeza luminotécnica de maior interesse é a Iluminância, que é definida como sendo a densidade de fluxo luminoso na superfície sobre a qual este fluxo incide. A unidade de medida da iluminância é o Lux, o qual é compreendido como a incidência de 1 lúmen em uma superfície com área de 1 m<sup>2</sup> a 1 m de distância da fonte geradora de luz (IWASHITA, 2004).

O instrumento de medida utilizado para determinar a iluminância é o Luxímetro, o qual foi utilizado nas avaliações luminotécnicas deste trabalho.

No Sistema Internacional de Unidades, tem-se para a iluminância:

- a) Unidade de medida: lux = lm / m<sup>2</sup>
- b) Abreviação: lx
- c) Símbolo: E

A Figura 10 ilustra o conceito de Iluminância.

Figura 10 – Iluminância



Fonte: GODOY, 2015

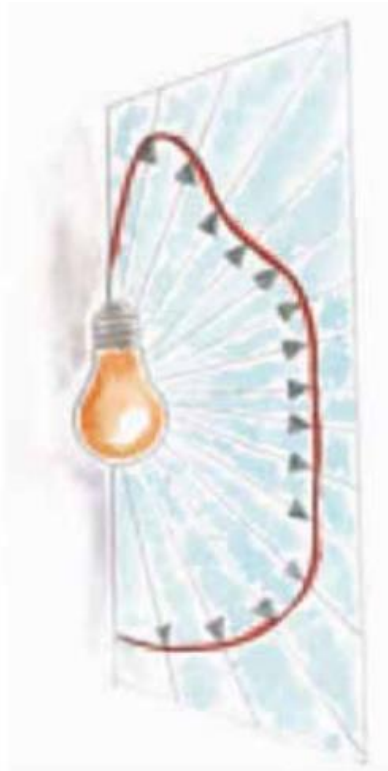
Um dia ensolarado de verão apresenta iluminância aproximada de 100.000 lux. Uma boa iluminação de rua, 20 a 40 lux. Uma noite de lua cheia, aproximadamente, 0,25 lux. Estes números ajudam a formar parâmetros sobre a iluminância.

A norma NBR 8995-1 (2013) apresenta valores de iluminância para diversos ambientes internos. Para aeroportos a norma adota os valores de 150, 200 e 500 lux, respectivamente para áreas de conexão, saguões de terminal de passageiros e balcões de *check in*.

### 3.4.1 Curvas fotométricas

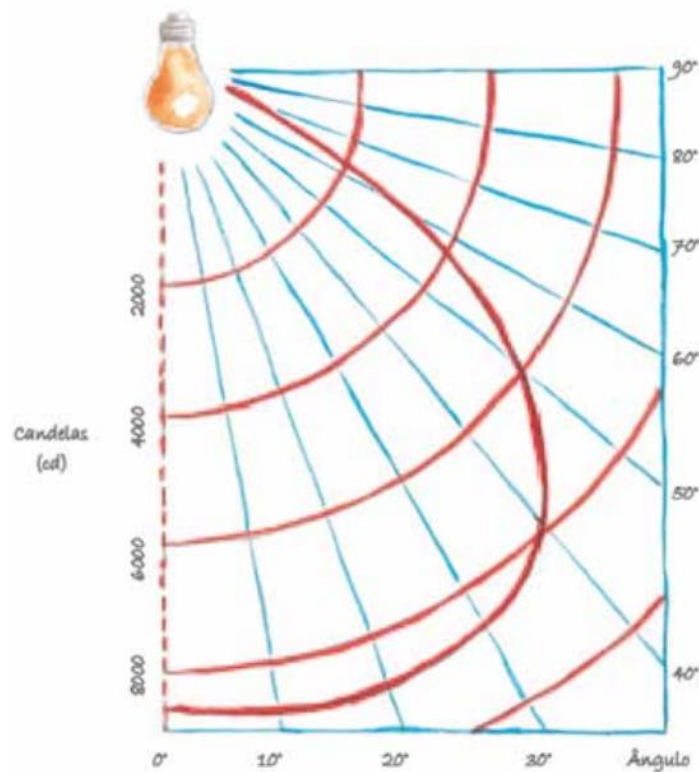
A luz de uma lâmpada se distribui tridimensionalmente no espaço. Ao se cortar esta distribuição tridimensional por planos e, adotar um plano específico, temos a distribuição de luz da Figura 11. Entende-se então que se um plano for adotado, somente tem-se uma quantidade de informação suficiente da emissão da luz da lâmpada “se” esta emissão for simétrica, ou seja, emissão igual em qualquer plano de análise. Porém, na vida real, a simetria ocorre em poucos casos, o que, normalmente, acontece são curvas assimétricas que precisam então de muitos planos de corte para expressar a distribuição da luz no espaço de maneira fidedigna. Aproveitando a imagem, nota-se que, ao criar uma curva que conecte todas as intensidades para cada ângulo no plano, obtém-se uma curva de intensidade luminosa (GODOY, 2015). A Figura 12 mostra uma curva de uma lâmpada incandescente refletora. Este tipo de curva também é chamado de curva de distribuição polar ou curvas fotométricas.

Figura 11 – Corte Tridimensional da luz



Fonte: Godoy, 2015

Figura 12 – Curvas fotométricas



Fonte: GODOY, 2015

Com o advento do LED, as curvas fotométricas utilizam o conceito de fotometria absoluta, ou seja, cada curva fotométrica é utilizada para um conjunto de led, lentes e luminária, ou seja, somente expressa aquela montagem específica, não podendo ser equivalente a nenhuma outra medição.

### 3.4.2 Iluminação ambiente por lâmpadas tubulares

De acordo com Barbosa (2014) a iluminação é responsável por cerca de 20% do consumo total de energia em residências, comércio e setor público. Devido a esse percentual significativo de consumo de energia elétrica em iluminação houve um aumento da busca por melhores eficiências dos equipamentos utilizados nessa área. Além dessa busca por eficiência energética, também, procurou-se estabelecer uma melhor qualidade da luz emitida, da vida útil do equipamento bem como a diminuição do uso de produtos tóxicos no processo de fabricação desses equipamentos.

Dessa forma, a tecnologia LED tem se mostrado uma grande tendência uma vez que apresenta esses benefícios citados anteriormente. As lâmpadas tubulares de LED possuem um formato semelhante as lâmpadas fluorescentes e que a quantidade de LED encontrados nessas lâmpadas depende do fluxo luminoso e da potência desejada (RYCAERT et al., 2012). No mercado é possível encontrar lâmpadas com potência de 8 W a 24 W nas cores branca morna, branca fria e luz do dia com temperatura de cor variando de 3000 K a 6500 K. As lâmpadas fluorescentes tubulares podem ser encontradas no mercado com potências variando de 15 W a 110 W nas cores branca morna, branca fria e luz do dia além de possuir uma temperatura de cor variando de 3000 K a 6500 K. A seguir na Tabela 4 temos um comparativo das características elétricas das lâmpadas fluorescente tubulares de 16 W e das lâmpadas LED tubulares e na Tabela 5, temos um comparativo das características elétricas das lâmpadas fluorescente tubulares de 32 W e das lâmpadas LED tubulares.

Tabela 4 – Comparativo entre lâmpadas LED e lâmpada fluorescente 16W

<b>Modelo</b>	<b>16 W Fluorescente</b>	<b>LED-1</b>	<b>LED-2</b>	<b>LED-3</b>
Potência declarada (W)	16	8	8	11
Potência medida (W)	19,3	7,7	7,9	11,3
Corrente (mA)	152,9	68,3	69,4	90,3
Fluxo luminoso (lm)	931	621	676	748
Eficiência luminosa (lm/W)	48,2	80,6	85,6	66,0
IRC	74	68	71	88
Fator de potência	0,992	0,883	0,894	0,985

Fonte: BARBOSA, 2014

Tabela 5 - Comparativo entre lâmpadas LED e lâmpada fluorescente 32W

<b>Modelo</b>	<b>32 W Fluorescente</b>	<b>LED-4</b>	<b>LED-5</b>	<b>LED-6</b>
Potência declarada (W)	32	24	24	22
Potência medida (W)	34,3	19,2	22,8	22,2
Corrente (mA)	273,2	289,4	288,8	176,3
Fluxo luminoso (lm)	1963	1515	1486	1468
Eficiência luminosa (lm/W)	57,2	78,9	65,2	66,2
IRC	65	73	72	88
Fator de potência	0,984	0,520	0,619	0,986

Fonte: BARBOSA, 2014

De acordo com Barbosa (2014) no teste comparativo do fluxo luminoso das lâmpadas tubulares fluorescente com as tubulares LED foi realizada uma medição a cada 1000 horas. Algumas lâmpadas tubulares LED tiveram um fluxo luminoso inicial acima do valor nominal e isso pode ser explicado devido a fase inicial de estabilização das lâmpadas.

Uma constatação feita por Barbosa (2014) em relação as lâmpadas testadas tanto da Tabela 3 quanto da Tabela 4 é que as lâmpadas de menor potência tiveram uma maior depreciação luminosa com exceção das lâmpadas tubulares LED da série LED-3.

Outra constatação importante feita por aquele autor foi a queima de todas as lâmpadas tubulares fluorescentes e de seus respectivos reatores. Para as lâmpadas tubulares fluorescentes de 32 W a queima ocorreu após as 6 mil horas de uso e para as lâmpadas fluorescentes de 16 W a queima ocorreu após as 10 mil horas de uso. Em contrapartida, as lâmpadas tubulares LED apenas 10% se queimaram após as 10 mil horas de uso.

Barbosa (2014) avaliou economicamente as lâmpadas fluorescentes e LED de menor e maior potência. Os dados compilados são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Avaliação econômica das lâmpadas de menor potência

<b>Grandezas Avaliadas</b>	<b>Fluorescente</b>	<b>LED-3</b>
Potência consumida (kW)	0,0193	0,0113
Energia diária consumida (kWh)	0,193	0,113
Custo mensal da energia (R\$)	2,12	1,24
Investimento inicial (R\$)	112,6	145,6
Vida útil (h)	10.000	30.000

Fonte: BARBOSA, 2014

Tabela 7 - Avaliação econômica das lâmpadas de maior potência

<b>Grandezas Avaliadas</b>	<b>Fluorescente</b>	<b>LED</b>
Potência consumida (kW)	0,0343	0,0222
Energia diária consumida (kWh)	0,343	0,222
Custo mensal da energia (R\$)	3,77	2,44
Investimento inicial(R\$)	181,80	228,80
Vida útil (h)	10.000	30.000

Fonte: BARBOSA, 2014

Barbosa (2014) concluiu que:

- a) A substituição das lâmpadas tubulares fluorescentes de 16 W por lâmpadas tubulares a LED de 11 W proporcionou uma economia de 40% no consumo de energia elétrica e um retorno de investimento de 35 meses quando aplicado o método de cálculo anterior;
- b) Quando levado em consideração duas trocas de lâmpadas tubulares fluorescentes (R\$ 62,00, duas lâmpadas e dois reatores) sem considerar o valor da hora do profissional que irá realizar a troca das lâmpadas o tempo de retorno de investimento quando trocado para lâmpadas tubulares de

LED de 11 W é imediato e quando trocado para lâmpadas tubulares de LED de 22 W o retorno foi de 16 meses;

- c) Completando a avaliação econômica constatou-se ainda que os sistemas de LED possuem uma confiabilidade muito alta e que se as lâmpadas tubulares de LED não falharem nas primeiras 1000 horas é provável que chegarão ao final de sua vida útil de 30 mil horas;
- d) Nos testes realizados nenhuma lâmpada tubular de LED falhou nas primeiras 1000 horas, no entanto 5 reatores das lâmpadas tubulares fluorescentes queimaram do total de 24 reatores que foram utilizados nos testes.



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de comparar tecnologias LED com tecnologias convencionais de iluminação aeroportuária, foram estudadas três implantações em aeroportos distintos no país, que visavam à substituição de tecnologias convencionais por LED.

Por questões de segurança da aviação civil a localização e o nome dos aeroportos foram mantidos em sigilo e, estes serão referidos no presente trabalho como A, B e C.

Tais aeroportos foram utilizados como objeto de pesquisa, pois estavam em processo de revitalização tecnológica. Assim, não foram selecionados por critérios de amostragem experimental, mas por questão de disponibilidade para pesquisa e mobilidade geográfica do autor.

No Aeroporto A houve a substituição de luminárias de balizamento com lâmpadas incandescentes por luminárias LED.

No Aeroporto B houve a substituição de refletores de iluminação de pátio de aeronaves por refletores LED.

No Aeroporto C houve a substituição de lâmpadas fluorescentes tubulares por lâmpadas LED tubular.

Para realizar a avaliação fotométrica e elétrica de tais implantações, utilizou-se um luxímetro da marca MINIPA, modelo MLM-1020, dotado de registrador eletrônico de medições. Utilizou-se também, um analisador de qualidade de energia da marca AEMC, modelo 8335 para análise de componentes harmônicas e grandezas elétricas. Além disso, contou-se com um multímetro marca FLUKE, modelo 87 III True RMS.

As grandezas medidas: corrente, tensão, potência, fator de potência, iluminância e espectro harmônico, consagradas na Engenharia Elétrica (MAGALHÃES, 2015), apresentam um panorama geral de avaliação elétrica e luminotécnica e são possíveis de serem apuradas por aplicação direta dos instrumentos listados acima.

#### 4.1 AEROPORTO A

Realizou-se no Aeroporto A substituição das luminárias com lâmpadas incandescentes do balizamento de pista, por luminárias dotadas de tecnologia LED de alta intensidade.

Estas últimas possuíam as seguintes características: luminária elevada com fonte eletrônica de alimentação com grau de proteção IP66, tecnologia Led, emissão de luz na cor branco/branco, 56.000~100.000 horas de funcionamento, lente externa policarbonato translúcido resistente a UV, junta frangível de 2", corpo em alumínio com coluna de acoplamento de 14", pintura amarela epóxi, conexão L-823 style 1 com 500 mm de comprimento (incluso), em conformidade com ICAO (2004).

Foi instalado o analisador de energia AEMC no sistema de balizamento de pista com o intuito de aferir as grandezas elétricas mensuráveis antes e após a implantação da tecnologia LED. Tendo em vista que o circuito de balizamento de pista opera com tensões acima de 1000V, instalou-se o analisador de energia na alimentação do RCC, ou seja, no primário do circuito, onde opera-se com baixa tensão, uma vez que, o citado analisador era limitado a tensões abaixo de 1000V.

#### 4.2 AEROPORTO B

No Aeroporto B foi realizado um projeto piloto de substituição das luminárias convencionais por luminárias LED na Torre de Iluminação de Pátio de Aeronaves, instalado na Torre 1 do Terminal de Passageiros 1 (TPS-1).

Originalmente a torre possuía 8 luminárias com lâmpadas vapor de sódio Philips de 1000 Watts cada, totalizando 8000W, além dos 8 reatores correspondentes. Uma das lâmpadas já se apresentava queimada.

As 10 luminárias LED instaladas em substituição apresentavam potência de 97 Watts, eficiência de 86 lm/W, 8350 lumens e 42 LED por luminária, 30 x 33 x 16 cm, 6,4kg, grau de proteção IP65, bivolt, FP 0,95, temperatura de operação entre - 35°C e 50°C, temperatura de cor 4500K, vida útil de 50.000 horas. Modelo Artemis 90W.

Para medição do resultado da iluminação no pátio foi criada uma matriz de medições no local, espaçada a cada 5 metros e a iluminância medida a 2 metros de altura por meio do luxímetro, seguindo os preceitos de ICAO (2014).

### 4.3 AEROPORTO C

No aeroporto C foi realizada a substituição de 96 lâmpadas fluorescentes tubulares por lâmpadas LED tubulares. Estas lâmpadas estavam distribuídas em 24 luminárias que comportavam 4 lâmpadas cada, ao longo do terminal de passageiros. Sendo assim, tais lâmpadas eram responsáveis por iluminação predial interna em área de circulação de pessoas.

As lâmpadas LED tubulares escolhidas para a aplicação eram do fabricante nacional FLC. A escolha do fabricante se deu pelo atendimento a especificações técnicas em licitação pública do tipo menor preço.

As especificações técnicas das lâmpadas fluorescentes tubulares retiradas eram:

- a) Potência: 32W
- b) Tensão de alimentação: 127
- c) Temperatura de cor: 5000K
- d) Eficiência luminosa: 95lm/W
- e) Intensidade luminosa: 1710lm
- f) Frequência elétrica: 60Hz
- g) Fator de potência: >0,90
- h) Abertura do fecho: 150°
- i) Vida útil: 10000h
- j) Diâmetro: 2,6cm
- k) Comprimento: 120cm
- l) Soquete: GU-13
- m) Tipo de driver: reator externo



Utilizou-se o luxímetro em cada um destes pontos para verificar a iluminância. Tal procedimento foi aplicado antes e após a substituição das lâmpadas fluorescentes tubulares pela LED tubulares, conforme a norma NBR 8995-1 (2013).

Com o intuito de realizar a avaliação das grandezas elétricas do circuito de iluminação do terminal de passageiros, instalou-se o analisador de energia para mensurar a corrente, potência e fator de potência elétricos, bem como gerar o espectro de componentes harmônicas da instalação nos momentos pré e pós substituição.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 AEROPORTO A

A Tabela 8 foi gerada com os dados apurados pelo analisador de energia e mostra o comparativo entre o sistema de balizamento de pista utilizando tecnologia convencional incandescente e tecnologia LED.

Tabela 8 – Comparação entre o balizamento convencional e LED

<b>Parâmetro medido</b>	<b>Convencional</b>	<b>LED</b>
Carga da Luminaria (VA)	45	19,6
Carga do Transformador isolador (VA)	5	7,6
Potência da fonte (KW)	10	2
Eficiência	90	90
Fator de Potência	0,9	0,99
Carga total do sistema (KW)	12,35	2,24

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015

Observou-se que a potência total foi reduzida de 12,35 kW para 2,24 kW, o que representa redução de 82%. Isso implica em redução consequente de 82% do consumo de energia no balizamento LED.

Outro ponto importante observado foi a elevação do fator de potência de 0,90 para 0,99. De certa forma, este aumento contraria o esperado para um sistema LED, pois segundo Martinho (2012), os transistores de potência da fonte causariam injeção de harmônicas no circuito e, em consequência, reduziriam o fator de potência. Entretanto, ao ser realizada a substituição do balizamento de pista convencional por um sistema LED, substituiu-se também, o Transformador de Corrente Constante (TCC) por uma fonte eletrônica, desenvolvida exclusivamente para sistemas LED. Tal fonte possuía como características construtivas o alto fator de potência e atenuação de distorções harmônicas.

As luminárias LED, por sua vez, não possuíam qualquer dispositivo atenuador. Contudo, não foi possível medir o espectro harmônico destes equipamentos, pois eles operam em tensão acima de 1000V e o analisador de energia utilizado neste trabalho não operava nesta faixa de tensão.

Houve relatos informais de pilotos de aeronaves que perceberam substancial melhora na intensidade luminosa do balizamento de pista LED em relação ao convencional, o que implica em melhores condições visuais para pouso.

A Figura 14 mostra uma imagem do balizamento de pista LED implantado no Aeroporto A.

Figura 14 – Balizamento LED do Aeroporto A



Fonte: Do autor, 2015

a) Luminária do balizamento LED acesa; b) Luminária do balizamento convencional acesa; c) Luminária do balizamento LED; d) Medições realizadas em luminárias do balizamento LED.

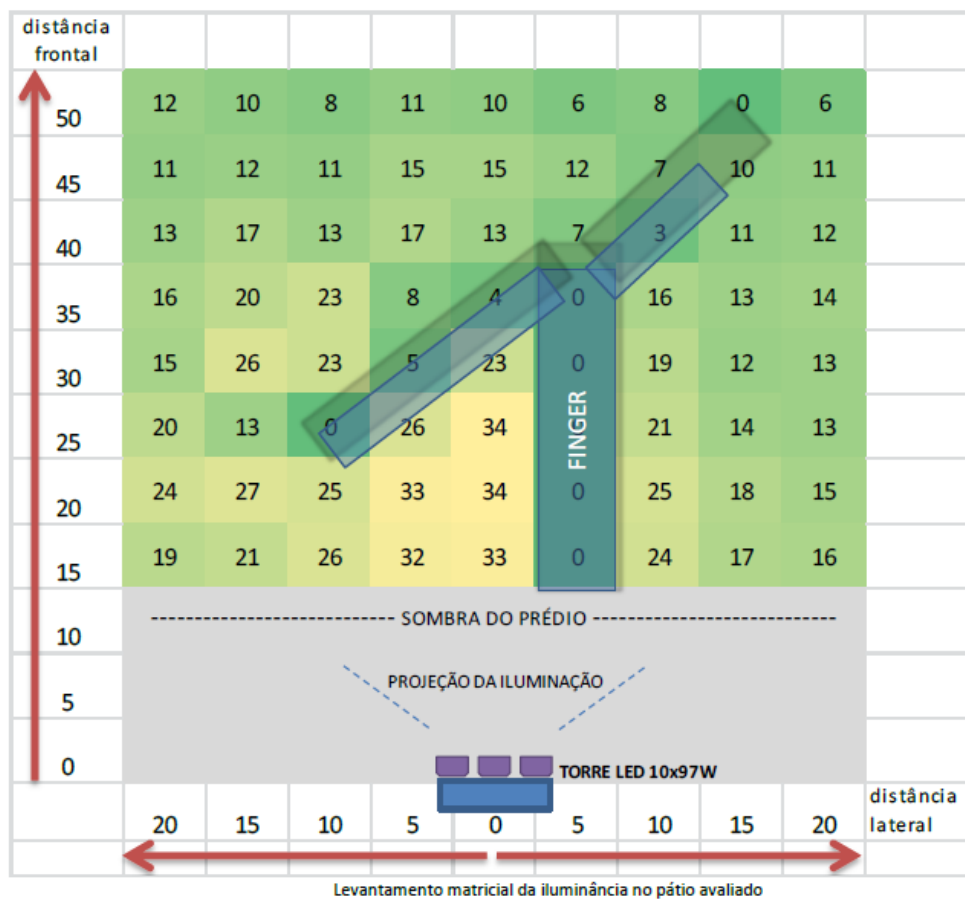
### 5.2 AEROPORTO B

As medições realizadas por meio do luxímetro no pátio de aeronaves do aeroporto B foram indicadas na matriz da Figura 15.

A existência de um *finger* (ponte de embarque) causou sombras em alguns pontos conforme demarcado na figura, assim como a própria estrutura do TPS-1 que causou sombra na parte próxima à base da torre. Desconsiderados esses pontos de interferência do *finger* e da sombra do prédio, a iluminância média foi de 17,4 lux.

Essas interferências causaram a redução da iluminância média, pois os locais de maior intensidade estão situados próximos à base da torre.

Figura 15 – Matriz de medições no pátio de aeronaves do aeroporto B



Fonte: Do autor, 2015

Ao lado da torre LED encontrava-se uma outra torre com 4 luminárias vapor de sódio 1000W cada, totalizando 4000W, projetados no mesmo sentido daquela. Percebe-se intensidade da iluminância em ambos locais muito semelhantes,



diferindo não mais que 20% da torre sódio em relação à torre LED. A temperatura de cor do LED era de 4500K, e a diferença para as luminárias atuais era visível, sendo a LED mais branca que a vapor de sódio.

Desta forma, conclui-se que uma torre vapor de sódio com 4,0 kW de potência poderia ser substituída por uma torre LED com 0,97 kW de potência sem prejuízo da operação aeroportuária e atendendo à ICAO (2004), atingindo-se assim uma equiparação ideal entre o existente e o LED.

A emissão de ondas na frequência infravermelho, que é atrativo de insetos (BARGHINI; URBINATTI; NATAL, 2004), ocorre em menor intensidade nas lâmpadas LED. Os insetos, por sua vez, são atrativos de fauna, que é um risco para a aviação.

A redução potência de 8,0 kW do para 0,97 kW deverá trazer economia de R\$8.000,00 ao ano, considerando-se neste cálculo os custos tarifários do ano de 2015. Não foram considerados o consumo dos reatores antigos, que seriam ainda mais vantajosos à substituição.

Caso haja substituição das demais torres de iluminação de pátio do Aeroporto C, pode-se realizar redução da demanda de energia contratada junto a concessionária, o que implicaria redução dos custos de energia para além da redução do consumo, simplesmente.

Conforme observado no momento da instalação, muitas luminárias careciam de manutenção, por estarem queimadas a lâmpada ou o reator. Os equipamentos antigos são dispositivos elétricos e eletrônicos com alto índice de falhas, portanto a manutenção se torna cara pelo volume de trocas e pelo peso inconveniente para manipulação a 30 metros de altura do solo, além da exposição do vento e do sol sobre os técnicos, o que torna elevado o tempo da operação.

O ângulo de projeção do LED era menor do que nas lâmpadas convencionais, portanto a área útil da iluminação é melhor aproveitada. A projeção da iluminação pode ser planejada de forma a reduzir o ofuscamento ao piloto das aeronaves.

### 5.3 AEROPORTO C

Os dados obtidos pelo analisador de energia mostraram redução significativa nos níveis de corrente e potência ativa. A corrente foi reduzida em 33,20% e a potência em 34,24%, o que implica a mesma redução no consumo de energia.

Todavia, houve substanciais incrementos na distorção harmônica total de corrente e tensão, respectivamente, 15,57% e 202,30%, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Dados obtidos pelo analisador de energia no Aeroporto C

<b>Parâmetro medido</b>	<b>Unidade</b>	<b>Fluorescente</b>	<b>LED</b>	<b>Variação %</b>
Tensão RMS	V	124,43	125,55	0,90%
THD de Tensão	%	1,90	2,20	15,57%
Corrente RMS	A	21,16	14,14	-33,20%
THD de Corrente	%	8,38	25,34	202,30%
Potência ativa	W	2590,71	1703,60	-34,24%
Potência reativa	Var	473,15	494,01	4,41%
Potência aparente	VA	2633,63	1773,85	-32,65%
Fator de Potência		0,98	0,96	-2,37%
Tensão RMS Máxima	V	125,04	126,06	0,82%
Tensão RMS Mínima	V	123,73	124,98	1,01%
Corrente RMS Máxima	A	22,41	14,48	-35,40%
Corrente RMS Mínima	A	17,36	12,00	-30,87%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015

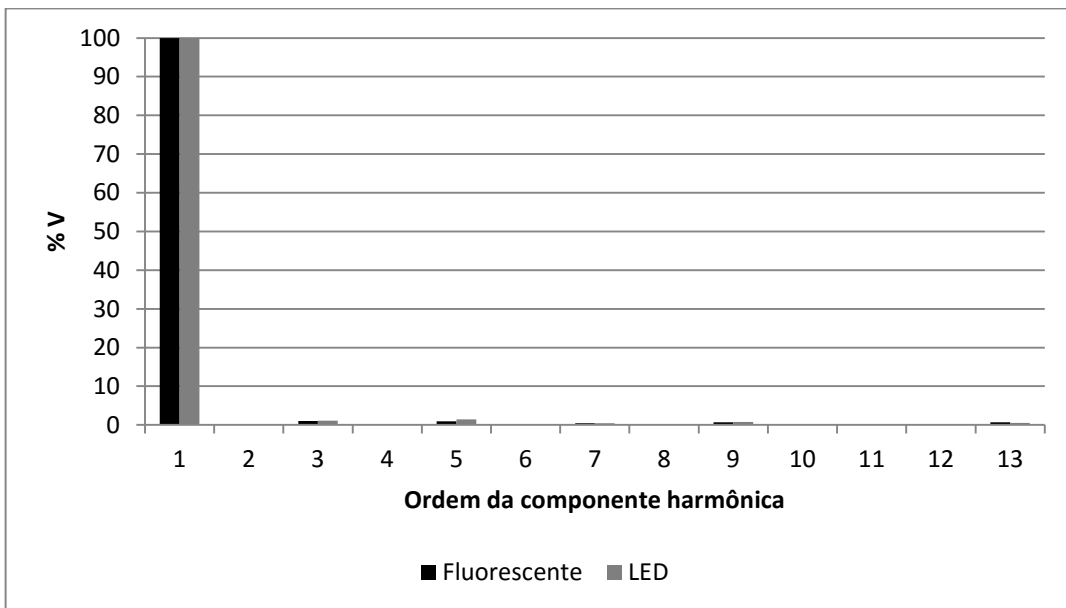
Observou-se também, uma pequena redução no fator de potência de 0,98 para 0,96, em virtude do aumento da potência reativa, como consequência do chaveamento da fonte de tensão das lâmpadas LED, o chamado *Drive*.

A análise das Figuras 16 e 17, as quais apresentam os valores percentuais para as componentes harmônicas de tensão e de corrente, até a décima terceira ordem, mostrou que não houve significativa modificação no espectro harmônico de tensão, quando consideradas componentes a componentes.

Entretanto, no que diz respeito ao espectro harmônico de corrente, houve grande incremento nas componentes de ordem ímpar. Segundo Martinho (2012), elevados níveis de componentes harmônicas de ordem ímpar, em circuitos fase-neutro, promovem aquecimento do neutro, quando este não possui dimensionamento adequado para suportar tais correntes.

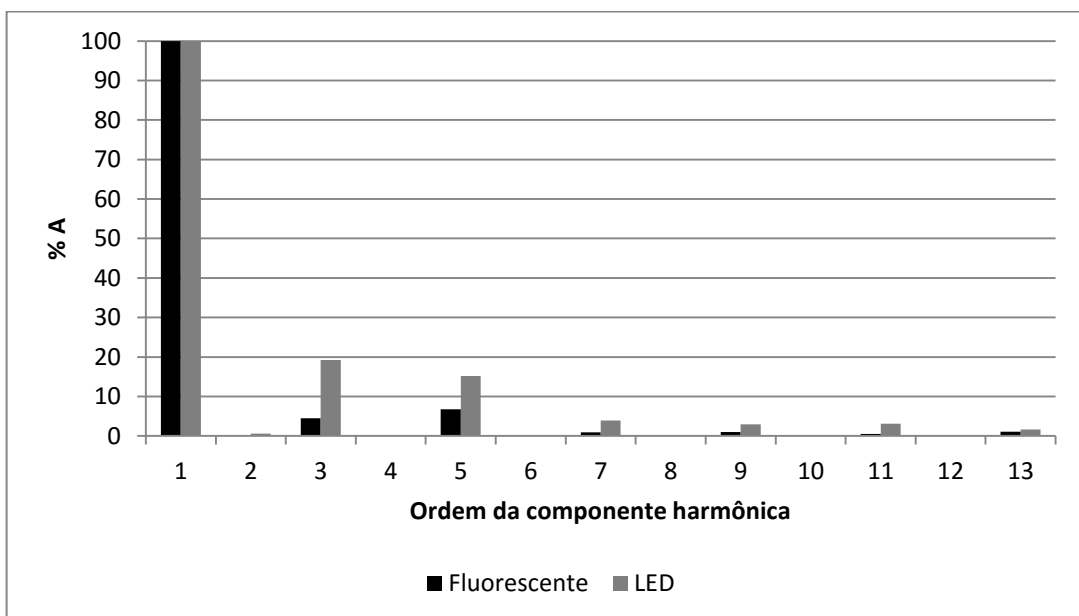
Contudo, foi observado que a corrente no circuito com lâmpadas LED era 14,14 A e que o condutor de neutro possuía seção transversal de 2,5 mm<sup>2</sup>, o qual suportaria corrente de 26 A. Sendo assim, o incremento do nível de correntes harmônicas de ordem ímpar não afetaria o condutor de neutro e, conseqüentemente, o sistema elétrico de iluminação do terminal de passageiros do aeroporto C.

Figura 16 – Componentes harmônicas de tensão (V) em percentuais



Fonte: Do autor, 2015

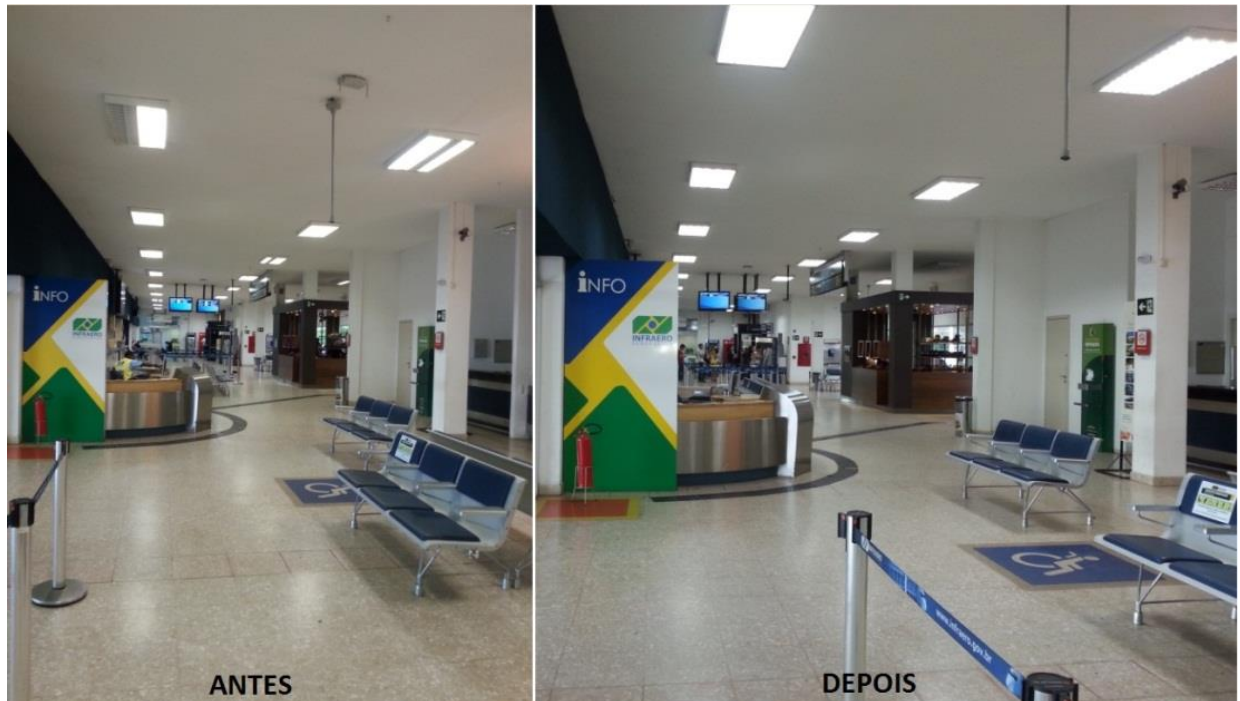
Figura 17 – Componentes harmônicas de corrente (A) em percentuais



Fonte: Do autor, 2015

As medições realizadas com luxímetro nos pontos da matriz da Figura 13 (Matriz de medições indicadas sobre a planta do terminal do aeroporto C antes e após a substituição das lâmpadas fluorescentes tubulares por LEDs tubulares (FIG. 18) resultaram na Tabela 10, onde se compara o nível de iluminância medido a 0,80 m do solo ponto a ponto nos dois casos.

Figura 18 – Iluminação do TPS antes e depois da instalação dos LEDs



Fonte: Do autor, 2015

A análise da tabela mostra um incremento médio de 22 lux a favor da iluminação LED. Observa-se que a homogeneidade da intensidade e temperatura de cor da iluminação aumentou (FIG. 18).

Tabela 10 – Medições com o luxímetro no terminal de passageiros

<b>Ponto</b>	<b>Fluorescente (lux)</b>	<b>LED (lux)</b>
1	473	511
2	485	503
3	487	503
4	437	454
5	436	456
6	428	459
7	451	479
8	443	466
9	422	438
10	458	478
11	456	501
12	469	505
13	477	504
14	521	545
15	485	498
16	485	507
17	528	544
18	432	439
19	441	458
20	452	469
21	489	511
22	485	509
23	514	536
24	528	541

Fonte: Elaborado pelo autor, 2015

Alguns pontos apresentaram iluminância em torno de 500 lux, pois sofreram influência da iluminação de outros ambientes, tais como salas de embarque, desembarque e área externa ao TPS, uma vez que tais ambientes possuem divisórias de vidro.

Os valores de iluminância, de maneira geral, estão acima do que preconiza a norma NBR 8995-1 (2013). Para aeroportos a norma adota os valores de 150, 200 e

500 lux, respectivamente para áreas de conexão, saguões de terminal de passageiros e balcões de *check in*.

Os funcionários do Aeroporto C declararam, informalmente, ter apreciado a iluminação LED. Observaram que a iluminação estava mais intensa e as cores iluminadas pelo LED estavam mais “vivas”. Esta declaração corrobora empiricamente a superioridade do índice de reprodução de cores apontado por Rycaert et al. (2012).

Um aspecto importante a ser considerado em um terminal de passageiros aeroportuário é o impacto de manutenções realizadas neste ambiente. Como trata-se de área de circulação de pessoas, manutenções nas luminárias do TPS exigem que a área seja isolada, o que implica em transtorno para os que ali trafegam. Além disso, as luminárias do Aeroporto C encontram-se a 4m do solo. Sendo assim, sua manutenção é considerada trabalho em altura e, para tanto, demanda o uso de escada, a qual coloca os técnicos de manutenção em risco de queda.

Foi então, realizada uma simulação de manutenção com os técnicos locais do Aeroporto C, por meio da qual, apuraram-se os tempos de 25 minutos para a substituição das lâmpadas e reator que compunham o sistema fluorescente e 6 minutos para a substituição das lâmpadas LED. Isto demonstra que, o fato da lâmpada LED não dispor de reator externo, reduz substancialmente os tempos de substituição em atividades de manutenção. Desta forma, os custos de manutenção são reduzidos.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisados alguns aspectos elétricos e luminotécnicos da aplicação de modernos equipamentos LED em sistemas de iluminação aeroportuária em comparação com sistemas convencionais de iluminação.

Pode-se concluir, por meio das três implantações nos aeroportos estudados que os equipamentos de iluminação LED possuem superioridade luminotécnica em relação aos demais equipamentos existentes na base instalada. Isto ficou claro diante dos resultados de medição de iluminância nos aeroportos B e C e, empiricamente, com o relato do piloto de aeronaves a respeito do balizamento de pista do Aeroporto A. Sendo assim, com os instrumentos disponíveis para medições em campo, onde não se dispõe de condições controladas como as de um laboratório de fotometria, a tecnologia de iluminação LED é recomendada para aplicação em infraestrutura aeroportuária.

Do ponto de vista eletrotécnico, os níveis de distorção harmônica de corrente apresentados pelas medições no Aeroporto C, os quais de certa forma eram previstos pelos referenciais teóricos, apontam para a necessidade de cuidados especiais com o uso indiscriminado de lâmpadas LED, quando o conjunto destas apresentar correntes limites à capacidade de condução de corrente dos condutores, especialmente condutores neutros, os quais deverão ser redimensionados em conformidade com a norma ABNT NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Em casos de sistemas eletrônicos sensíveis a perturbações eletromagnéticas, torna-se adequado o uso de dispositivos mitigadores de distorções harmônicas.

Uma observação importante feita durante a implantação da tecnologia LED em balizamentos de pista é que há sistemas mistos sendo instalados. Ou seja, em alguns sistemas de balizamento de pistas, luminárias LED estão sendo instaladas mantendo-se a fonte (Transformador de Corrente Constante) dos sistemas convencionais. Esta prática pode ser prejudicial às instalações aeroportuárias, pois não há circuitos ou dispositivos para filtragem de componentes harmônicas. A investigação desta situação e suas consequências pode ser tema de futuros estudos em Engenharia Elétrica.

No aspecto técnico-econômico, a reduzida potência do LED implica em proporcional redução no consumo de energia e equivalente redução nos custos

deste consumo. A maior vida útil do sistema LED deverá resultar em maior tempo de disponibilidade da iluminação. As frequentes queimas de lâmpadas e reatores dos sistemas convencionais resultam em perdas econômicas, as quais serão reduzidas com a utilização do LED. Os custos de manutenção, por sua vez, serão reduzidos em função da maior vida útil e da isenção de reatores externos às lâmpadas.

No início do desenvolvimento da tecnologia LED os custos de aquisição eram extremamente elevados. Atualmente, é possível elaborar e executar projetos com lâmpadas LED a custos viáveis, especialmente, no tocante a iluminação ambiente, a qual conta com lâmpadas no mercado de preço equivalente às convencionais.

Contudo, os técnicos envolvidos nos projetos devem ser cautelosos ao especificarem sistemas de iluminação LED. Características como o fator de potência e a taxa de distorção harmônica devem ser bem dimensionadas com o intuito de minimizar os impactos negativos do LED nestes aspectos.

Sugere-se, então, que fator de potência maior que 0,90, taxa de distorção harmônica total de corrente menor que 10%, índice de reprodução de cores maior que 75 e vida útil maior que 30.000 horas são especificações adequadas e razoáveis a uma implantação de tecnologia LED.



## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: norma brasileira para instalações elétricas em baixa tensão. Rio de Janeiro. 2004. 209p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO/CIE 8995-1: norma brasileira para iluminação de ambientes de trabalho: Parte 1 - Interior. Rio de Janeiro. 2013. 46p.
- AGUILLERA, M. A. Revista O Setor Elétrico. 110 ed. São Paulo: Atitude Editorial Publicações Técnicas, 2015, Março 2015. ISSN 1983 – 0912
- ALEXANDER, C. K. ; SADIKU, M. N. O. Circuitos elétricos. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 894 p.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 641/2014, vigente a partir 01/01/2015.
- BARGHINI, A.; URBINATTI, P.; NATAL, D. Atração de mosquitos (Diptera: Culicidae) por lâmpadas incandescentes e fluorescentes. Entomol. vectores, Rio de Janeiro, v. 11, n. 4, p. 611-622, Dec. 2004 . Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0328-03812004000400005&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0328-03812004000400005&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 02out. 2015.
- BARBOSA, A. ; SIRIACO, M. Revista Eletricidade Moderna. Edição 486. São Paulo: Aranda Editora Técnica e Cultural, 2014, Setembro 2014. ISSN 0100 – 2104
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 649 p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Da Ciência e Tecnologia e do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Regulamentação específica que define níveis mínimos de eficiência energética de lâmpadas incandescentes. Portaria n. 1.007, de 31 de dezembro de 2010.
- COTRIM, A. A. M. B. Instalações elétricas. 5 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008. 496 p.
- GODOY, P. Fotometria Básica. Revista O Setor Elétrico. 110 ed. São Paulo: Atitude Editorial Publicações Técnicas, 2015, Março 2015. ISSN 1983 – 0912
- GOEKING, W. Lâmpadas e LEDs. Revista O Setor Elétrico. 46 ed. São Paulo: Atitude Editorial Publicações Técnicas, 2009, Novembro 2009. ISSN 1983 – 0912
- ICAO - INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Aerodrome Design Manual: Part 4 Visual Aids. Quebec, Canadá, 2004

IWASHITA, J. Eficiência energética em sistemas de iluminação de interiores: análise de luminárias comerciais. 2004. 205f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

IWASHITA, J. Revista O Setor Elétrico. 68 ed. São Paulo: Atitude Editorial Publicações Técnicas, 2011, Setembro 2011. ISSN 1983 – 0912.

MAGALHÃES, L. A. P. Análise técnica da utilização de luminárias com tecnologia LED em sistemas de iluminação de aeroportos. 2015. 157f. Dissertação (Mestrado Profissional em Energia) – Universidade de Salvador, Bahia, 2015.

MALVINO, A. P. Eletrônica. 4 ed. São Paulo: Pearson Education, 2007. 747 p.

MAMEDE FILHO, J. Instalações elétricas industriais. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 914 p.

MARTINHO, E. Distúrbios da Energia Elétrica. 2 ed. São Paulo: Érica, 2012. 140p.

PAULILO, G. Conceitos gerais sobre qualidade de energia. Revista O Setor Elétrico. Edição 84. São Paulo: Atitude Editorial Publicações Técnicas, 2013, Janeiro 2013. ISSN 1983 – 0912

RYCKAERT, W.R.; SMET, K.A.G.; ROELANDTS, I.A.A.; VAN GILS, M.; HANSELAER, P. Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation. Energy and Buildings, v. 49, p.429-436, 2012.

STAROSTA, J. Flutuação de tensão (Flicker). Revista O Setor Elétrico. 72 ed. São Paulo: Atitude Editorial Publicações Técnicas, 2012, Janeiro 2012. ISSN 1983 – 0912