

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO PROFISSIONAL
EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

**Aplicação de LEDs de Luminescência Branca para
Iluminação**

Daniel Zaroni Pinto

Orientador: Rero Marques Rubinger – UNIFEI

Itajubá/MG, Dezembro de 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO PROFISSIONAL
EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Aplicação de LEDs de Luminescência Branca para Iluminação

Daniel Zaroni Pinto

Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em Engenharia de Materiais como requisito para obtenção do título de ***Mestre em Engenharia de Materiais.***

Orientador: **Prof. Dr. Rero Marques Rubinger**

Curso: **Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais**

Área de Concentração: **DESENVOLVIMENTO, PROCESSAMENTO E
CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.**

Itajubá, Dezembro de 2013.
MG – Brasil

Agradecimentos

Ao SENHOR Jesus Cristo, Luz do mundo!

A minha Esposa Sílvia, pelo apoio que se renova a cada dia. E aos meus filhos que tem nos dado alegrias.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Rero Marques Rubinger pela luta em construir um laboratório com equipamentos e infraestrutura adequada.

A Professora Edna Raimunda da Silva e a Suelen de Castro pelo apoio na organização e no desenvolvimento do trabalho.

Aos Professores da Universidade Federal de Itajubá, pelo apoio e valiosas sugestões, que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao Instituto de Física e Química da UNIFEI, representado pelos seus dedicados Professores e Funcionários, pela oportunidade que me concedeu na realização deste trabalho, e aos amigos desse Instituto, pelo convívio profissional.

A toda a minha família pelo incentivo e pelas palavras de ânimo e estímulo que muitas vezes me auxiliaram para dar continuidade ao trabalho.

A SISVOO pela parceria e doação de LEDs para realização do trabalho.

Aos amigos André Chaves, Vânia Junqueira, Luiz Henrique e demais colegas de pós-graduação pelo permanente incentivo, colaboração, amizade, momentos de lazer e inesquecível convívio profissional.

E a FAPEMIG, através do Programa de bolsas, pelo apoio financeiro.

Resumo

ZARONI PINTO, D. *Aplicação de LEDs de luminescência branca para iluminação.* Itajubá, 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto de Física e Química, Universidade Federal de Itajubá.

Neste estudo foram analisados espectros de luminescências de LEDs (Light Emitting Diodes), que são diodos emissores de luz branca, utilizados para a iluminação. Este trabalho se refere a dois modelos de LEDs brancos disponíveis no mercado: i) associação de LEDs de baixa potência em grande número, ou ii) alguns LEDs de maior potência, e comparação com a iluminação convencional. O processo produtivo de placas de circuito impresso PCI (*Peripheral Component Interconnect*) com muitos LEDs exige automação, por outro lado, o processo com LEDs de alta potência, necessita de aprimoramento da tecnologia de dissipação de calor. A fim de comparar as opções de iluminação, as medições do espectro de cada fonte de luz, a energia, fluxo de fótons, brilho espectral por comprimento de onda e a temperatura da cor, foram investigados. Como serão mostrados, estes parâmetros permitem comparação entre os modelos de iluminação de modo que o LED e seu emprego na iluminação é opção que vem atender a redução no consumo de energia e ao impacto ambiental, com um agravante que são os custos iniciais mais altos. Para avaliar os diversos modelos de LEDs, é usado o programa Spectraviz, desenvolvido em LabVIEW, o espectroradiômetro Modelo - Black_Comet C-SR 50-StellarNet, fonte modelo Keithley 2400, multímetro digital Keithley modelo 2100, além de componentes ópticos.

Palavras-chave: LED, luminescência, eletroluminescência, espectro, junção *p-n*.

Abstract

ZARONI PINTO, D. *Application of LEDs, white luminance for illumination. Itajubá, 93p. Dissertation (Master in Materials Engineering) - Institute of Physics and Chemistry, Federal University of Itajubá*

In this study was analyzed luminescence of white light emitting diodes or LEDs (Light Emitting Diodes) used for illumination. This work considers white LEDs available in the market: i) Association of low power LEDs in large numbers, or ii) A few higher power LEDs. The production process of PCI (Peripheral Component Interconnect) boards with LEDs requires automation, on the other hand the process with high power LEDs need to improve the technology of heat dissipation. In order to compare the lighting options, measurements of the spectrum of each light source, energy photon flux, spectral brightness wavelength and color temperature were investigated. As will be shown, these parameters allow comparison between lighting models so that the LED and its employment in lighting option is coming to meet and environmental impact, with an aggravating factor that the initial costs are higher. To measure these LEDs, is used a program Spectraviz developed in LabVIEW, the spectroradiometer Model - Black_Comet C-50 SR-StellarNet, source Keithley Model 2400 digital multimeter Keithley Model 2100, plus optical components.

Keywords: *LED, luminescence; electroluminescence; spectro; p-n junction.*

Sumário

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	II
ABSTRACT	III
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS	IX
SIMBOLOGIA	XI
LETRAS LATINAS	XI
LETRAS GREGAS	XII
SIGLAS	XII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.2 Antecedentes	4
1.3 Revisão Bibliográfica.....	5
1.4 Lâmpadas de LEDs em Projetos e Informações Internacionais	9
1.4.1 Projetos de Iluminação com LEDs	10
1.4.2 Vida útil de Projetos de Iluminação com LEDs.....	10
1.4.3 Manutenção de Projetos de Iluminação com LEDs	11
1.4.4 Projetos de Iluminação com LEDs Autosuficiente	11
1.5 Estudos de Projetos de Iluminação com LEDs	12
1.6 Objetivos e Motivação	14
1.7 Delineamento do Trabalho	15
CAPÍTULO 2	1
IMPACTO AMBIENTAL	16
2.1 Impacto Ambiental Geral	16
2.2 Impacto Ambiental Específico.....	18
2.3 Eficiência da Iluminação e Impacto Ambiental.....	18
2.3.1 Lâmpadas Incandescentes	19
2.3.2 Lâmpada Fluorescente – Luz branca e Espectro no Campo do Visível.....	20
2.3.3 Lâmpada de LEDs - Luz Branca e Espectro no Campo do Visível	22
CAPÍTULO 3	24
DIODOS EMISSORES DE LUZ	24

3.1	Conceitos	24
3.2	Funcionamento dos LEDs	25
3.3	Grandezas Radiométricas e Fotométricas.....	31
3.4	Materiais Usados na Fabricação de LEDs	33
3.5	Propriedades dos LEDs.....	35
3.5.1	Diagrama de Cromaticidade e Temperatura da Cor (CCT - <i>Correlated Color Temperature</i>)	35
3.5.2	Vida Útil	38
3.5.3	Tipos de LEDs	38
CAPÍTULO 4	40
MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	Processo de Fabricação da Lâmpada de LED na SISVÔO	40
4.1.1	Lâmpada de LEDs	40
4.2	Processo de Montagem dos LEDs para Medições (SISVÔO-LSD)	42
4.2.1	Preparação das Amostras	42
4.3	Montagem do Dispositivo Experimental	43
4.4	Montagem usando o Espectrofotômetro StellarNet Modelo C-SR-50.....	44
4.4.1	Montagem do Equipamento	44
4.4.2	Montagem do LED na Esfera	45
4.4.3	Verificação da Comunicação	45
4.4.4	Montagem da Lâmpada Incandescente e Fluorescente na Esfera	46
4.5	Metodologia de Cálculo de Potência para Lâmpadas Incandescentes	47
CAPÍTULO 5	49
RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1	Resultados e Comparações de Lâmpadas Convencionais com Lâmpadas de LEDs..	49
5.1.1	Resultados para as Lâmpadas Incandescentes	49
5.1.2	Resultados para as Lâmpadas Fluorescentes	56
5.1.3	Resultados para LEDs.....	58
5.2	Resultados das Medições com o Protótipo Desenvolvido.....	69
CAPÍTULO 6	70
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76	

Lista de Figuras

Figura 1.1	Esquema da lâmpada fluorescente. Processo idealizado de geração da luz visível.....	2
Figura 1.2	Lâmpadas bulbo de LEDs, com conector padrão E27.....	4
Figura 1.3	Projeto de iluminação com LED autossuficiente: a) cidade de Recife; b) Universidade de Sevilha (Espanha) (OLIVEIRA, 2012)	12
Figura 1.4	Comparação da iluminação utilizando lâmpadas fluorescentes e de LEDs	14
Figura 2.1	a) Espectro de uma lâmpada incandescente; b) Curva da potência da lâmpada incandescente, c) Espectro do sol capturado às 8hs no Laboratório LSD. Sabe-se que o sol tem um espectro conhecido de $\sim 1000\text{W}/\text{m}^2$; esta figura apenas representa uma pequena parcela luz solar mostrada para comparar o espectro do sol com o das lâmpadas incandescentes e visualizar a similaridade.....	19
Figura 2.2	a) Espectro de uma lâmpada fluorescente - 9W; b) Curva da potência da lâmpada fluorescente.....	21
Figura 2.3	a) Espectro de uma lâmpada de LED; b) Curva da potência da lâmpada de LED	22
Figura 3.1	Diodo de junção $p-n$, símbolo elétrico e estrutura de um LED. Fonte (PAULA <i>et al.</i> , 2011)	25
Figura 3.2	a) junção $p-n$; b) formação da região de depleção, c) região de depleção formada	26
Figura 3.3	a) Tensão em equilíbrio; b) polarização direta; c) Polarização inversa.....	27
Figura 3.4	Curva I-V característica do diodo, em polarização direta: $V > 0$ ocorre a partir de valores de tensão superiores à da barreira de potencial, o diodo efetivamente conduz uma corrente utilizável; em polarização reversa: $V_{BK} < V < 0$, a corrente é formada por duas componentes: uma corrente constante e dependente da temperatura I_s e outra dependente da diferença de potencial aplicada; V_{BK} = tensão de ruptura ou <i>breakdown</i> e Ruptura: $V < V_{BK}$	28
Figura 3.5	Transições de a) gap direto e de b) gap indireto	30
Figura 3.6	Curvas de sensibilidade espectral do olho humano.....	31
Figura 3.7	Diagrama de cromaticidade – CIE 1931. A curva de um corpo negro está	

	indicada e é usada na definição de temperatura de cor	36
Figura 3.8	Aparência da cor correlacionada à sensibilidade do olho humano com valor expresso em Kelvin	37
Figura 4.1	Montagem dos LEDS na PCI, por um robô	41
Figura 4.2	a) Dois modelos de Lâmpada de LEDS; b) Painel de teste da lâmpada de LEDS	41
Figura 4.3	Processo de soldagem dos fios de ligação no anodo e catodo dos LEDS	43
Figura 4.4	Montagem Experimental desenvolvida para a medição de iluminância junto com medições de temperatura e da curva $I \times V$ características para LEDS.....	43
Figura 4.5	Montagem do espectrofotômetro equipado com a esfera integradora, fonte, cabos ópticos e elétricos	44
Figura 4.6	Montagem para Lâmpada incandescente	46
Figura 4.7	Diagrama da Montagem das lâmpadas	47
Figura 4.8	Espectro do corpo negro para várias temperaturas.....	48
Figura 5.1	Espectros de potência para lâmpadas incandescentes de a) 7 W, b) 40 W e c) 60 W e d) de todas elas sob a tensão de 127V.....	50
Figura 5.2	Espectros de fluxo luminoso em lumens para lâmpadas incandescentes de a) 7 W, b) 40 W e c) 60 W e d) todas as lâmpadas sob a tensão de 127 V _{rms}	51
Figura 5.3	Espectros de intensidade para lâmpadas incandescentes de a) 7 W, b) 40 W e c) 60 W e d) de todas elas sob tensão 127 V _{rms}	52
Figura 5.4	Ajuste do espectro de potência das lâmpadas incandescentes de (a) e (b) 40 W e de (c) e (d) 60 W para as tensões de 80 e 127 V _{rms} , com o respectivo espectro do corpo negro	55
Figura 5.5	Temperatura da cor para lâmpadas incandescentes.....	56
Figura 5.6	Espectros em (a) intensidade, (b) do fluxo luminoso e (c) da potência irradiada para a lâmpada fluorescente de 9 W.....	58
Figura 5.7	Espectros em (a) intensidade, (b) do fluxo luminoso e (c) da potência irradiada para o modelo 1- Amostra 1.....	59
Figura 5.8	Espectros em (a) intensidade, (b) fluxo luminoso e (c) da potência irradiada para o modelo 2 – LED 1	61
Figura 5.9	Espectros em (a) intensidade, (b) fluxo luminoso e (c) da potência irradiada para o modelo 3 – LED 1	62

Figura 5.10	Espectros em (a) intensidade, (b) do fluxo luminoso e (c) da potência irradiada para o modelo 4 – Média de 29 LEDs.....	64
Figura 5.11	Temperatura da cor para LEDs – Modelo 1 (NICHIA)	67
Figura 5.12	Temperatura da cor para LEDs – Modelo 2 (NICHIA)	67
Figura 5.13	Temperatura da cor para LEDs – Modelo 3 (NICHIA)	68
Figura 5.14	Temperatura da cor para LEDs – Modelo 4 (BRIGHT LED ELECTRONICS CORP.)	68
Figura 5.15	Variação de temperatura de um LED tipo SMD para diversas correntes	69

Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Comparação das lâmpadas incandescentes, fluorescentes e LEDs	3
Tabela 1.2	Resultado do trabalho da LESIP na UNESP	13
Tabela 3.1	Unidade de medidas radiométricas e fotométricas	33
Tabela 3.2	LEDs de diversas cores, faixa de comprimento de onda, tensão e respectivos materiais semicondutores	34
Tabela 4.1	Variação de corrente para 4 modelos de LEDs escolhidos	42
Tabela 5.1	Distribuição da emissão de luz na região UV-VIS-IR para a lâmpada de 7W	53
Tabela 5.2	Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para a lâmpada de 40W.....	53
Tabela 5.3	Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para a lâmpada de 60W	54
Tabela 5.4	Comparação das medidas de potência para lâmpadas incandescentes e respectivas temperaturas de ajuste	55
Tabela 5.5	Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR	57
Tabela 5.6	Coordenadas cromáticas e temperatura da cor para lâmpada fluorescente	57
Tabela 5.7	Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para lâmpadas de LEDs Modelo1 para duas amostras	60
Tabela 5.8	Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para lâmpadas de LEDs Modelo 2 para duas amostras	61
Tabela 5.9	Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para lâmpadas de LEDs Modelo 3 para duas amostras	63
Tabela 5.10	Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para lâmpadas de LEDs Modelo 4 BLHZD32XN da BRIGHT LED ELECTRONICS CORP. Utilizado pela SISVÔO para fabricação das lâmpadas de LEDs (Amostra com 29 LEDs , I = 20mA)	65
Tabela 6.1	Eficiência calculada a partir da divisão da potência irradiada no visível pela potência entregue a lâmpada ($P=V \times I$)	72
Tabela 6.2	Comparação da emissão na região do visível para 4 modelos de LEDs	73

Tabela 6.3	Comparação da potência média, para os 4 modelos de LED s.....	74
Tabela 6.3	Comparação do fluxo luminoso, para os 4 modelos de LEDs e a quantidade equivalente em lm/W.....	74

Simbologia

Letras Latinas

Ga	Gálio	
GaAs	Arseneto de gálio	
AlGaAs	Arseneto de alumínio e gálio	
AlGaInP	Fosfeto de índio, gálio e alumínio	
AlGaP	Fosfeto de alumínio e gálio	
AlN	Nitreto de alumínio	
GaAsP	Fosfeto e arseneto de gálio	
GaN	Nitreto de gálio	
GaP	Fosfeto de gálio	
Ge	Germânio	
InGaN	Nitreto de gálio e índio	
N	Nitrogênio	
S	Enxofre	
SiC	Carbeto de silício	
ZnSe	Seleneto de zinco	
A	Área da Esfera	
k_B	Constante de Boltzmann	J/k
H	Constante de Planck	J s
I	Corrente	mA
V_0	Diferença de Potencial	
eV	Eletron-volt	
E_g	Energia do <i>gap</i>	
E	Energia de um fóton	
ν	Frequência	
I	Intensidade Luminosa	lm/Sr = cd
E	Iluminância	lux= lm/m ²
L	Luminância	cd/m ²
P	Material dopado ou concentração de portadores tipo p	
N	Material dopado ou concentração de portadores tipo n	

P	Potência	Watts
T_j	Temperatura da junção	°C
T	Temperatura absoluta	K
T	Tempo	
V	Tensão	Volts
C	Velocidade da luz	m/s
H	Dureza de um material	Mohs

Letras Gregas

λ	Comprimento de Onda	nm
η	Eficiência luminosa	lm/W
ϕ	Fluxo luminoso	lm
μm	Micrometro	μm
ρ	Resistividade	$\Omega\cdot\text{cm}$
R	Refletância	

Siglas

CCT	<i>Correlated Color Temperature</i>
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
DOE	Departamento de Energia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LESIP	Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas de Iluminação Pública
MOCVD	<i>Metalic Organic Chemical Vapor Deposition</i>
MQW	<i>Multi Quantum Wells</i>
PCI	Placa de circuito impresso
PGIRPBL	Plano de gerenciamento integrado de resíduos, pilhas, baterias e lâmpadas.

PTH	<i>Pin Through Hole</i>
QCSE	<i>Quantum Confined Stark Effect</i>
RGB	<i>Red, green e blue</i>
<i>rms</i>	<i>Root means square</i>
SMD	<i>Surface mount device</i>
IR	Infravermelho (i.e. $\lambda > 760\text{nm}$)
UV	Ultravioleta (i.e. $\lambda < 390\text{nm}$)
VIS	Visível (i.e. $390\text{nm} < \lambda < 760\text{nm}$)

Capítulo 1

Introdução

A tecnologia de iluminação atravessa dois séculos de existência culminando no intenso uso das lâmpadas incandescentes (GOEKING, 2011). Este tipo de iluminação artificial tem inicialmente, espectro muito próximo ao espectro do sol e os antecedentes foram o fogo, lamparinas a óleo, lampiões a gás e em seguida, a lâmpada incandescente, inventada por Thomas Alva Edison, constituída de um fio fino de bambu carbonizado que tinha durabilidade muito baixa, mas que pôde ser produzida em grande escala. Atualmente, essas lâmpadas incandescentes são constituídas de um bulbo de vidro, que contém em seu interior um gás inerte, e de um filamento de tungstênio.

O bulbo é importante para evitar que o filamento ao ser aquecido reaja com o oxigênio, oxide e se rompa. Esse filamento é fino e tem alto ponto de fusão, fino para aumentar a resistência à passagem de corrente elétrica e assim aquecer, mais um alto ponto de fusão, para não derreter ao ser aquecido, o suficiente para emitir radiação na região visível do espectro. O meio gasoso utilizado atualmente dentro do bulbo é uma mistura de argônio e nitrogênio e em alguns casos o criptônio. A função desse gás inerte é reduzir o efeito de sublimação do filamento e aumentar a resistência da lâmpada, pois essa, ao ser evacuada, poderia se quebrar facilmente devido à pressão atmosférica.

Esse aquecimento ocorre porque os elétrons da corrente elétrica colidem com os átomos do filamento e os fazem vibrar. Essas cargas atômicas em movimento emitem radiação eletromagnética que pode se estender do infravermelho ao ultravioleta.

Uma lâmpada incandescente, segundo a tabela do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), pode ter um tempo de vida mediano de 1000 horas se operada em 220 V e de 750 horas em 127 V (BASTOS, 2011). Apesar de iluminar bem os ambientes esse tipo de lâmpada tem a desvantagem de possuir um baixo rendimento, pois cerca de 13% da energia elétrica consumida é transformada em luz e os outros 87%, dissipados na forma de calor.

A lâmpada incandescente serviu como base para o desenvolvimento da válvula elétrica o que fez com que o homem progredisse tecnologicamente. Além disso, proporciona mais conforto e segurança a humanidade.

Outros tipos de iluminação artificial, que se seguiram, possuem luminescência fora dos padrões do sol, como por exemplo, a luz branca das lâmpadas fluorescentes, amarelada como a de vapor de sódio, entre outras.

As lâmpadas fluorescentes tubulares ou compactas são uma das principais alternativas para substituir as lâmpadas incandescentes, pois geram a mesma intensidade luminosa consumindo quatro vezes menos energia. De acordo com a tabela do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica a lâmpada fluorescente compacta tem um tempo de vida média de 8000 horas, ou seja, oito vezes maior que a lâmpada incandescente.

Essa lâmpada também é chamada de lâmpada de mercúrio de baixa pressão, foi inventada por Nikola Tesla, bem como o bipino, usado na mesma, e introduzida no mercado em 1938. Desde então tem sido muito utilizada em residências, indústrias, comércio, dentre tantas outras. Existem vários tipos de lâmpadas fluorescentes, mas todas possuem basicamente o mesmo funcionamento. Seus elementos básicos são: mercúrio, fósforo, filamento, gás, bulbo (figura 1.1). Quando essa lâmpada é ligada uma corrente elétrica passa pelo seu filamento causando um aquecimento e conseqüentemente uma liberação de elétrons, além desses há os que saem do material por emissão termiônica. Esses elétrons colidem com os átomos de mercúrio que liberam a energia que absorveram, devido à colisão, principalmente na forma de radiação ultravioleta. Essa radiação é convertida, por uma camada de fósforo depositada sobre a face interior do vidro da lâmpada, em luz de vários comprimentos de onda que podem ser percebidas como luz visível.

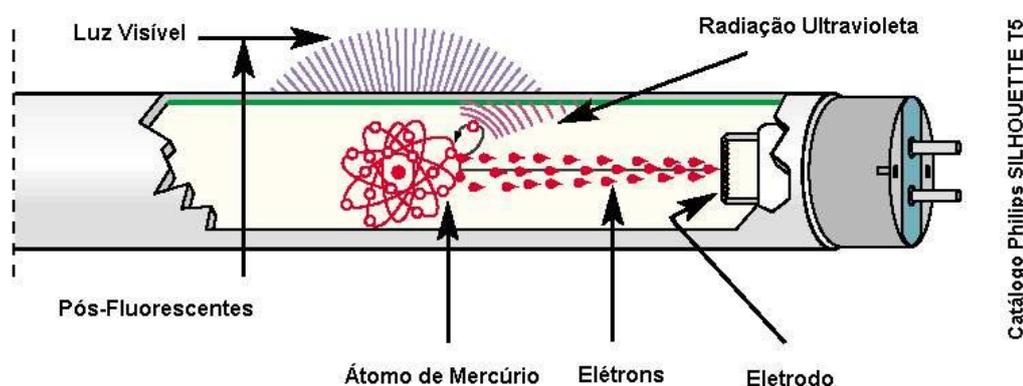


Figura 1.1- Esquema da lâmpada fluorescente. Processo idealizado de geração da luz visível. (Bastos,2011)

Apesar de ser uma lâmpada mais econômica do que as lâmpadas incandescentes e as lâmpadas fluorescentes contém em seu interior um metal altamente volátil, o mercúrio. Com sua quebra, esse metal pode contaminar a atmosfera, ser inalado por usuários ou contaminar os solos e a água.

Em 1993 Nakamura apresenta uma nova possibilidade, LED de luminescência branca a partir do azul e ultravioleta mais o fósforo, em processo similar ao da lâmpada fluorescente, com indicadores de ser econômica, eficiente, de qualidade e com menores impactos ambientais. O seu emprego na iluminação de ambientes e até mesmo na iluminação pública tem sido amplamente estudado.

A tecnologia de LEDs indica várias vantagens como: alta durabilidade; redução dos custos de manutenção; alta eficiência energética e maior segurança devido a sua potência de entrada ser muito baixa (BASTOS, 2011).

As lâmpadas bulbo de LEDs, com conector padrão E27 (figura 1.2), são produzidas com custo cada vez menor, porém, o preço ainda é maior que o das lâmpadas incandescentes e fluorescentes. No entanto, o tempo de vida médio pode chegar a 50.000 horas, ou seja, 50 vezes mais durável que uma lâmpada incandescente e 6 vezes mais que a fluorescente (BASTOS,2011). A tabela 1.1 demonstra que seu alto preço, pode ser compensado pela sua durabilidade, além de uma alta economia na conta de luz. Especialistas estimam que em 15 anos a tecnologia LED esteja mais eficiente e com preços competitivos em todo mundo.



Figura 1.2- Lâmpadas bulbo de LEDs, com conector padrão E27 (Melich LED, 2013)

Tabela 1.1: Comparação das lâmpadas incandescentes, fluorescentes e LEDs

Tipo de lâmpada	Potência (watts)	Vida útil (horas)	Preço médio (reais)
Incandescente	60	1000	1,50
Fluorescente	18	8000	10,00
LED	3	50000	80,00

1.2 Antecedentes

O LED é uma tecnologia recente, que depois de dominar os aparelhos eletrônicos nas últimas décadas, e ser o atrativo para as telas de televisores e celulares surge, atualmente, como uma das alternativas para iluminação.

Desde 1993, com os trabalhos desenvolvidos por Shuji Nakamura, para viabilizar o seu uso, estão sendo feitos por governos, indústrias e pesquisadores devido à alta eficiência de iluminação comparada as convencionais (SCHUBERT, 2006).

Um histórico detalhado do desenvolvimento dos LEDs pode ser encontrado em SCHUBERT, (2006). Um evento importante que ocorreu no início do século XX foi à observação do fenômeno da eletroluminescência, luz emitida por um material do estado sólido como resposta a uma corrente elétrica que o atravessa ou quando um campo elétrico é aplicado, a temperatura ambiente. Por outro lado, sabe-se que a lâmpada incandescente emite luz acima do 750°C por aquecimento.

A produção em série do primeiro diodo emissor de luz de cor vermelha, se deu em 1962, outras cores como verde, amarelo e laranja em 1971 e azul em 1993, chegando ao desenvolvimento do LED de luz branca em 1995. Desde então o desempenho dos LEDs vêm continuamente crescendo, devido à evolução da tecnologia de fabricação de semicondutores. Pode-se dimensionar a importância do LED na iluminação, com as aplicação em edifícios, pontes, parques industriais já existentes.

O surgimento do LED tem seu precedente em 1891, quando Eugene A. Acheson iniciou o processo comercial do *Carburundum*, carbeto de silício, um composto químico de silício e carbono (SiC). Assim como os semicondutores III-V, o SiC não ocorre na natureza e tem a dureza de 9.0 Mohs, enquanto a diamante 10.0 Mohs e devido a esta dureza e ao baixo custo foi escolhido pela indústria de abrasivos.

Em 1907, circulou a notícia que uma luz era emitida pelo cristal SiC, quando se fazia teste de contato entre metal e cristal. Este fenômeno levaria ao nascimento do LED, e esta notícia foi dada pelo *Electrical World* em 1907, por A.J. Round, como um fenômeno ainda não compreendido (SCHUBERT, 2006).

Os LEDs de SiC não evoluíram ao longo dos anos e a eficiência da conversão de energia em luz não passou de 0,005% (PETTER et al., 1969) e com o desenvolvimento de LEDs com semicondutores III-V fez-se com que o uso desse material tornar-se obsoleto.

A era dos semicondutores III-V começou em 1950, e foram apresentados por Henrich Welker (1952,1953). Esses materiais não ocorrem na natureza e demonstraram ser ópticamente muito ativos (SCHUBERT, 2006).

A partir da década de 1960 os LEDs evoluíram como indicadores, podendo então definir a fase de 1961 a 1995 como a fase dos LEDs como indicadores eletrônicos. A partir de então se inicia os estudos da viabilidade do uso de LEDs em iluminação.

1.3 Revisão Bibliográfica

O uso de LEDs na iluminação exige o que se chamaria de luminotécnica, ou seja, uma engenharia de iluminação, devido a várias possibilidades de configuração e processos envolvidos, como: emissão da luz na forma de cone, possibilidade de definição da iluminação pelo comprimento de onda emitido, vulnerabilidade do LED a temperatura e a umidade, processos quânticos envolvidos que afetam a vida do mesmo, que é sensível à temperatura da junção.

A temperatura da junção pode afetar diretamente o resultado na emissão da luz do LED. É considerada um dos parâmetros de difícil controle, sendo que o controle inadequado pode fazer com que a luz do LED esmaieça mais rapidamente com o tempo. Nesse sentido, tornou um assunto de importância relevante que vem sendo pesquisada por muitos autores, no sentido de obter maior controle deste parâmetro para garantir a não degradação da cor e vida útil do LED.

Discussões sobre a importância da temperatura da junção e do fósforo, responsável pela luminescência branca pode ser encontrada no trabalho de BOHAN YAN *et al.*, (2011). O estudo térmico é de fundamental importância em LEDs de alta

potência. Mais de 60% da energia recebida pela junção são transformadas em calor, devido à parte da recombinação de pares elétron-buraco não gerar luz. Nos LEDs de luminescência branca a base de fósforo, no processo de extração da luz, foi percebido que o fósforo não só reduz a eficiência da óptica, mas também deteriora com o desempenho térmico. A luminescência azul emitida pelo LED é parcialmente absorvida, parcialmente convertida em luminescência amarela, e parcialmente espalhada sobre o fósforo. A importância deste estudo mostrou que não só a temperatura da junção, mas a concentração e localização do fósforo é crítica na avaliação do desempenho do LED e, o tempo de vida do mesmo.

DAL LAGO *et al.*, (2011) pôde confirmar através de seus estudos, o impacto do mecanismo da degradação de um modelo de LED de luminescência branca de 1 W ativado por corrente e temperatura com objetivo de avaliar a confiabilidade dos LEDs comerciais. O trabalho enfatizou que é fundamental conhecer profundamente os mecanismos que afetam a vida útil, degradação da luminescência, a cromaticidade do LED, devido à demanda crescente do seu emprego em iluminação. Os testes aplicados foram de desgaste puramente térmico e isotérmico (temperatura constante). O desgaste puramente térmico foi aplicado à temperatura da junção maior que a recomendada pelo fabricante 160°C, isto é, foi a 180°C e 200°C, com medições de tensão (V) x corrente (I) e lúmens (lm) x corrente (I). O desgaste isotérmico foi aplicado variando a corrente de 500mA a 1500 mA com a temperatura da junção a 160°C. O resultado mostra que a alta temperatura é um dos parâmetros responsável pela rápida degradação do LED enquanto a corrente é responsável pela degradação ao longo do tempo.

A temperatura da junção é um dos fatores importantes nos estudos dos LEDs, e apesar de não ser o foco deste estudo, existem diferentes métodos para medir a temperatura da junção, dentre os quais Schubert informa:

- Espectroscopia de Raman (TODOROKI *et al.*, 1985),
- Tensão de entrada (ABDELKADER *et al.*, 1992),
- Resistência térmica (MURATA e NAKADA, 1992),
- Microscopia de reflectância fototérmica (EPPERLEIN, 1990),
- Luminescência (EPPERLEIN e BONA, 1993),
- Fotoluminescência (HALL *et al.*, 1992)
- Métodos de não-contato com base na razão de pico de uma fonte dicromática (GU e NARENDRAN, 2003).

Para LEDs de baixa potência, o aumento da temperatura não é tão crítico, devido as suas dimensões e o próprio eletrodo agir como dissipador de calor. Para LEDs de alta potência, o sistema de dissipação de calor é mais importante e requer estudo mais aprofundado, para evitar o superaquecimento. De acordo com os estudos de YUNG et al., (2012), foi identificada degradação, para um tipo específico de LED (InGaN / GaN), como sendo o aquecimento. Eles identificaram através da análise da corrente-voltagem e da eletroluminescência, o mecanismo de degradação envolvido nesses LEDs.

Ainda para complementar e solidificar a importância de se estudar os fenômenos que prejudicam o desempenho do LEDs, têm-se o trabalho de CRAWFORD (2009) em que faz referência a dois fenômenos como fortes candidatos a impactos de forma negativa para o desempenho do LED InGaN, a recombinação de Auger e a perda no mecanismo de injeção e discute o desempenho dos LEDs de luminescência branca mais comuns, fabricados de InGaN que emite luz azul e usa o fósforo YAG:Ce³⁺, chegando a conclusão de que são deficientes. Enfatiza o drama dos novos caminhos e possibilidades do uso do LED na iluminação e toda a tecnologia necessária em materiais, processos e aplicação.

Nota-se que é necessário dar importância relevante no estudo dos processos de fabricação e aplicação dos LEDs, para fins de iluminação, residencial e pública. O controle adequado da temperatura, e a aplicação específica, devem ser considerados, assim como os materiais envolvidos na fabricação. No trabalho de YUKIO NARUKAWA et al., (2010) são descritos a fabricação de três tipos de LEDs de luminescência branca, bem como a estrutura, os materiais utilizados e o desempenho. O primeiro LED estudado possuía uma eficácia luminosa de 249 lm/W e fluxo luminoso de 14,4 lm a 20 mA. O LED azul utilizado como fonte de excitação neste LED tinha uma potência de saída de 47,1 mW. A característica elétrica foi de desempenho três vezes maior do que uma lâmpada fluorescente tri-fósforo (90 lm/W). O segundo LED testado foi um LED branco de alta potência fabricado a partir do LED azul de alta potência, o qual teve um fluxo luminoso de 203 lm à 350 mA e eficácia luminosa de 183 lm/W. O terceiro foi um LED branco de alta potência fabricado a partir de quatro LEDs azuis que alcançou um fluxo luminoso de 1,913 lm com eficácia luminosa de 135lm/W à 1A.

Conclui-se que o LED de luminescência branca teve um fluxo luminoso tão eficiente quanto uma lâmpada fluorescente de 20W, e possui 1,5 vezes a capacidade luminosa de

uma lâmpada fluorescente de 90 lm/W. Portanto, LEDs brancos podem ser usados em faróis de automóveis, em grande escala na iluminação doméstica e iluminação pública.

A maioria dos LEDs de luminescência branca são fabricados em um estrutura de InGaN-GaN e nas pesquisas para se melhorar o desempenho, são observados vários mecanismos, que podem enfraquecer os processos e fenômenos que geram a eletroluminescência desejada, calor por efeito joule, eficiência da injeção. Para reduzir vários destes efeitos indesejados, a construção de LEDs de multicamadas apresentou ser uma alternativa e esses LEDs, que melhoraram muito quando, as barreiras de GaN foram substituídos por barreiras InGaN-AlGaIn-InGaIn (YEN-KUANG, 2012).

Um dos trabalhos de GRUNDMANN (2002) teve por objetivo mostrar as teorias envolvidas e necessárias para se conhecer melhor sobre o processamento e caracterização de LEDs Azuis de nitreto de gálio-índio (InGaIn) em *Multi Quantum Well* (MQW), que são heteroestruturas com diferentes sequências de planos (*layers*). Esta estrutura MQW foi escolhido por aumentar a eficiência quântica interna e foi fabricada por MOCVD (*Metal-Organic Chemical Vapor Deposition*) utilizando um substrato de SiC.

SYÄJÄRVI et al., (2012) propôs utilizar o material com que foi feito o primeiro LED, o SiC (*Silicon Carbide*) como um novo material para fabricação de LEDs de luminescência branca, com novas tecnologias que possibilitam obter SiC com alto grau de pureza e custo muito mais baixo que dos atuais usados na fabricação de LEDs. Discute-se que o material In, usado nos LEDs atuais é raro e seu uso dificulta atingir baixo custo, e o fósforo, usado nos LEDs de luminescência branca, é fator que degrada o desempenho e vida dos mesmos, pois os materiais mais comuns são a combinação do InGaIn e AlInGaP. No trabalho apresentam o crescimento de um material fluorescente de carboneto de silício, que é obtido pela dopagem de boro e nitrogênio e que funciona como um conversor usando um semiconductor. A luminescência é obtida à temperatura ambiente, e mostra uma banda larga de luminescência característica da recombinação.

A evolução de tecnologias permitiu o aumento substancial da eficiência dos LEDs, visto que estão disponíveis no mercado LEDs com eficiência superior a 120 lm/W (PHILIPS, 2012). Um fator limitante é ainda a potência característica da cada LED. Os LEDs disponíveis possuem uma potência de 1 a 3 watts. Isso significa que mesmo com uma grande eficiência, o fluxo luminoso do LED é bastante limitado. Sendo assim, necessário incorporar vários LEDs para fabricar uma lâmpada e conseguir uma quantidade de luz que seja adequada para a aplicação dos LEDs em iluminação.

Ainda assim a distribuição de luz deve ser feita de forma eficiente, ou seja, deve existir uma uniformidade na distribuição da luz. O número de LEDs depende de uma série de fatores como tecnologia, configuração de montagem, potência, eficiência e área de dissipação de calor, etc. (NASCIMENTO, 2012).

SCHUBERT (2006) lista características que precisam ser atendidas, para que a aplicação do LED em iluminação se torne cada vez mais viável.

- Alta eficiência;
- Alta emissão de fluxo luminoso;
- Boa reprodução de cores;
- Confiabilidade;
- Baixo custo de produção;
- Benefícios ambientais;
- Longa vida útil;
- Variedade de temperatura de cor;
- Ausência de radiação infravermelha.

Devido à dificuldade de especificação da garantia de vida dos LEDs, alguns fabricantes estimam o tempo de vida conhecido como L50 e L70, que representa 50% e 70% da emissão inicial de luz, respectivamente, conforme o programa - *Building Technologies Program* de 2008. Apesar desta peculiaridade, este programa cita que em 2012 cerca de 49 milhões de lâmpadas de LED e luminárias foram instaladas, e que os LEDs, neste mercado, resultaram na economia de \$675 milhões de dólares, de acordo com (*U.S. Department of Energy*, 2012).

Com os avanços na tecnologia de fabricação de LEDs, componentes mais eficientes e mais resistentes a variação de temperatura podem ser obtidos.

1.4 Lâmpadas de LEDs em Projetos e Informações Internacionais

O LED de luminescência branca incentivou investimentos na escala de milhões de dólares dedicados a incentivos e pesquisa na área de iluminação com LEDs. No Brasil, projetos piloto de iluminação, podem ser vistos na cidade de Guaratinguetá, a principal ponte de transposição do Rio Paraíba, iluminação na Universidade Federal de Juiz de Fora, Lagoa da Pampulha em Belo Horizonte, entre outros.

1.4.1 Projetos de Iluminação com LEDs

Iluminação usando LEDs não é tão simples como a iluminação usada correntemente, onde já existem várias padronizações sugeridas por normas nacionais e internacionais, que são usadas em projetos de iluminação.

A eficiência energética do sistema de iluminação com LEDs está relacionada com a capacidade de iluminação por um longo período de tempo e baixo consumo de energia. Existem os fatores óticos e térmicos que determinam a eficiência final dos sistemas de iluminação. Para as lâmpadas tradicionais a eficiência da fonte de luz é expressa por lm/W medida na temperatura ambiente de 25°C, mas não pode ser medida para LEDs.

LEDs aquecem quando operados de modo contínuo, o que pode gerar grande perda de sua capacidade de iluminação. Para avaliar o desempenho dos LEDs, alguns fabricantes informam os dados de saída de luminescência para Tj (Temperatura da Junção), Tj de 25°C e Tj de 75°C, mas este é um indicador genérico e não substitui uma avaliação individual dos produtos de LEDs (*Building Technologies Program - U.S. Department of Energy*, 2012).

A luz produzida por uma lâmpada incandescente, além de ser similar a do sol, se espalha de forma uniforme e circular, já a fluorescente, se espalha ao longo do tubo. O LED produz a luminescência de forma cônica, isto é, foco de luz direcionado, que na iluminação decorativa já é usado. No entanto, para ambientes que necessitam de uma iluminação uniforme, como, por exemplo, ambientes de estudos e domésticos, seriam necessárias análises acerca do posicionamento, espalhamento por lentes. Por isso, projetos de iluminação com LED são mais complexos e exigem maior conhecimento.

1.4.2 Vida útil de Projetos de Iluminação com LEDs

A vida útil dos projetos de iluminação com LEDs está relacionada à sua aplicação, cujo padrão é complexo e exige conhecimento mais abrangente para controlar fatores importantes, como: corrente de funcionamento, temperatura e umidade. De acordo com GRUNDMANN (2006) 50000 mil horas de durabilidade podem ser atingidas usando iluminação com LEDs, no entanto, o investimento inicial deve ser alto.

1.4.3 Manutenção de Projetos de Iluminação com LEDs

A manutenção de projetos de iluminação com LED é menor devido à vida útil dos mesmos. A luminescência do LED esmaece ao longo do tempo, possibilitando uma manutenção menos frequente e com menos interrupções bruscas, o que difere de uma lâmpada incandescente e fluorescente.

1.4.4 Projetos de Iluminação com LEDs Autosuficiente

Como os LEDs operam em baixa corrente para produzir a luz, pode ser usado em iluminação com painéis solares e pequenos geradores eólicos. Projetos pilotos no nordeste mostram postes alimentados por energia eólica e solar, construído por Fernando Alves Ximenes, construtor de postes eólicos para iluminação pública, figura 1.3a (OLIVEIRA, 2012), e projeto da Universidade de Sevilha, figura 1.3b (Redação CicloVivo, 2012).



(a)



(b)

Figura 1.3- Projeto de iluminação com LED autosuficiente; a) cidade de Recife; b) Universidade de Sevilha (Espanha) (OLIVEIRA, 2012)

1.5 Estudos de Projetos de Iluminação com LEDs

Segundo o artigo da revista Exame (O Bairro do Futuro, 2010), as iluminações de ruas serão com LEDs, de forma a possibilitar a redução do consumo de energia em 80%, em relação às lâmpadas convencionais.

Os resultados do trabalho realizado no Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas de Iluminação Pública – LESIP, da UNESP – Universidade Estadual Paulista são apresentados na tabela 1.2, foram substituídas 8 lâmpadas fluorescentes distribuídas em quatro luminárias espelhadas de alta eficiência. Verificou-se que a melhor alternativa foi a utilização de um conjunto de doze lâmpadas de LEDs, com a finalidade

de manter os mesmos níveis de iluminação, ou seja, uma melhor uniformidade na distribuição da luz.

Em relação à energia consumida pelos dois conjuntos, as lâmpadas de LED mostraram um consumo de 208,80 W, enquanto que as fluorescentes tinham um consumo de 376 W. A despesa com energia destas últimas foi de aproximadamente 44% maior do que com lâmpadas de LEDs, ou seja, nesta aplicação, onde a uniformidade é um fator importante, estas lâmpadas de LEDs testadas não são tão eficientes como poderiam ser.

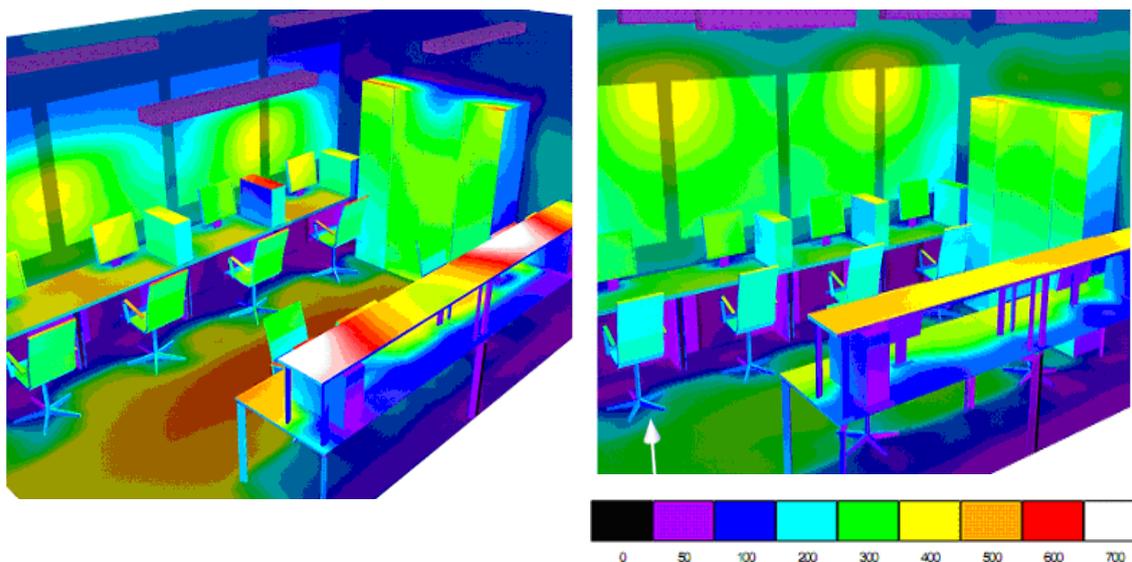
Se fosse utilizada a mesma quantidade de lâmpadas de LEDs, com um consumo de 139,2 W, a redução seria de 64%, porém com uma menor uniformidade na distribuição da iluminação.

Tabela 1.2 – Resultado do trabalho da LESIP da UNESP

Conjunto de Iluminação	Potência Total	Fluxo Luminoso Total	Iluminância Máxima	Uniformidade E_{min}/E_{med}^*	Iluminância Média
8 lâmpadas Fluorescentes	376,0 W	12,527 lm	770 lux	0,343	560 lux
8 lâmpadas de LEDs	139,2 W	11,887 lm	468 lux	0,529	399 lux
12 lâmpadas de LEDs	208,8 W	17,831 lm	683 lux	0,540	577 lux

* $E_{min}/E_{med} = \text{Emissão mínima pela emissão média}$

A figura 1.4 é parte do estudo feito para análise da iluminação, pode se perceber que obter uma iluminação uniforme de LED, exige um estudo mais detalhado do que o uso da lâmpada fluorescente, porém, nota-se que se obtêm melhores resultados.



(a) Iluminação com lâmpada fluorescente

(b) Iluminação com lâmpada de LED

Figura 1.4- Comparação da iluminação utilizando lâmpadas fluorescentes e de LEDs.

1.6 Motivação e Objetivos

As lâmpadas incandescentes, desde sua invenção, são usadas para iluminação, pois a radiação emitida por essas lâmpadas é muito similar a do sol e por isso, propiciam conforto. Com o crescimento do consumo de energia pela humanidade, sobretudo do uso de fontes de energia não renováveis, fez-se necessário uma racionalização de seu uso.

Outra lâmpada muito utilizada atualmente são as lâmpadas fluorescentes e apesar de serem bem mais eficientes que as incandescentes, têm o inconveniente de possuírem mercúrio em sua composição, que é um metal pesado e de alta toxicidade ao meio ambiente. A própria indústria de fabricação de lâmpadas está sensível a essa tendência mundial e tem tentado eliminar as lâmpadas poluentes e ineficientes. Além disso, os novos produtos já vêm com um novo parâmetro de eficiência que correlaciona as grandezas fotométricas e radiométricas, que é a medida em lumens por watt, isto é a medida de quanto se obtém de luz pelo consumo de cada watt de potencia.

Estudos evidenciam que os LEDs são fontes de luz muito mais eficientes do que as convencionais lâmpadas incandescentes e fluorescentes, o seu emprego na iluminação de ambientes e até mesmo na iluminação pública é um fator motivador, que evidencia vantagens como: redução do consumo de energia que leva a uma economia em torno de 80%, baixo impacto ambiental, pode não emitir raios infravermelhos e

ultravioletas que agridem produtos estocados ou expostos e, além disso, possibilitam várias formas de iluminação.

Tendo em vista as limitações das lâmpadas incandescentes e fluorescentes os objetivos principais dessa dissertação são:

- Levantar dados consistentes sobre as características de lâmpadas de LEDs;
- Comparar com as duas outras fontes de iluminação, já bem difundidas no mercado: lâmpadas incandescentes e fluorescentes.

1.7 Delineamento do Trabalho

Este primeiro capítulo apresenta como os LEDs foram paulatinamente surgindo no mercado como uma alternativa as lâmpadas já existentes, as vantagens de seu uso e o que ainda precisa ser melhorado para que essa tecnologia atinja o mercado de forma mais abrangente. Os objetivos e as motivações que deram origem à pesquisa em questão, bem como a estrutura do trabalho são também apresentados.

No capítulo 2 é apresentada uma discussão sobre os impactos ambientais causados pelo uso dos diferentes tipos de iluminação.

No capítulo 3 são apresentados os conceitos fundamentais, as aplicações de LEDs, e uma classificação de alguns modelos de LEDs, os quais são objeto principal desta pesquisa, mostrando características e aplicações importantes, bem como um estudo técnico envolvendo sua constituição e princípio de funcionamento.

O capítulo 4 faz se um estudo de duas metodologias de trabalho: *i*) construção de um equipamento para medição dos diversos modelos de LEDs; *ii*) o uso de espectrofotômetro, software *SpectraWiz*® e componentes ópticos, tais como fibra óptica.

No capítulo 5 são apresentados os resultados das medições e análises para fins de comparação com as lâmpadas convencionais.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e como o presente trabalho pode contribuir para a pesquisa científica neste tema.

Capítulo 2

Impacto Ambiental

2.1 Impacto Ambiental Geral

O impacto ambiental do uso das lâmpadas de LEDs está mais relacionado ao custo de produção dos LEDs, que não será tratado neste trabalho, porém um exemplo de foco amplo neste assunto é tratado no programa: *Solid-State Lighting Research and Development, Manufacturing Roadmap August 2012 Prepared for Lighting Research and Development Building Technologies Program Office of Energy Efficiency and Renewable Energy - U.S. Department of Energy*. Onde o custo previsto de 6.00 \$/klm em 2012 para o LED branco frio está previsto para chegar a 0.7 \$/klm em 2020.

O impacto ambiental aqui tratado tem como objetivo dar uma visão geral das possibilidades de redução usando LEDs. Porém, também indicar aspectos que precisarão ser analisados, por exemplo, quando se menciona LEDs alimentados por painéis solares e baterias, o impacto ambiental deverá considerar o custo de produção de todas as partes, isto é, LEDs, painel solar e baterias, que exigem estudo amplo e análise considerando a vida dos mesmos.

A lâmpada incandescente, devido à baixa eficiência por converter apenas 13% da energia elétrica em luz, já tem seu uso restrito em vários países e deve sair do mercado ainda nesta década. Na União Europeia, por exemplo, as lâmpadas incandescentes serão banidas progressivamente, no Brasil essas lâmpadas serão retiradas do mercado com previsão de até 2016 ser substituídas por versões mais econômicas como as lâmpadas fluorescentes e as de LEDs. A lâmpada fluorescente, a mais usada atualmente, usa mercúrio, que é um elemento poluente e, apesar disso, ainda não possui descarte controlado, provocando impacto ambiental.

O LED para iluminação é um elemento que, a princípio, provoca a redução no consumo de energia e, como resultados serão necessárias menos usinas, barragens, movimento de veículos e pessoas e menos gasto com manutenção. Gastando-se menos energia pode-se alcançar um maior número de pessoas. Outro motivo é a possibilidade do uso do LED na iluminação ser autônomo, isto é, se tem uma região onde existe vento

regular e sol, como o LED usa corrente baixa para gerar luz, podem-se usar geradores eólicos, solares. Assim sendo, pode-se ter iluminação necessária para um determinado projeto, local ou área, reduzindo desta forma a linha de transmissão para iluminação. Porém, o uso de painéis solares, baterias, circuitos eletrônicos nas iluminações precisa ser mais bem avaliado, pois vem somar ao lixo eletrônico e seu impacto ambiental já se encontra em larga escala em todo o mundo.

A indústria brasileira de iluminação com LEDs se torna dependente de importação de LEDs e precisarão investir bilhões de reais em tecnologia e inovação para desenvolver e produzir lâmpadas de LED, competir internacionalmente e não necessitar importar toda essa tecnologia tão importante. Em termos de pesquisa, os Estados Unidos estão mais bem adiantados que o Brasil apoiando e investindo em pesquisas. Em 2010, por exemplo, o Departamento de Energia (DOE) do governo dos Estados Unidos investiu 62 milhões de dólares em pesquisa de LED. Apesar dessa tecnologia ainda não ser produzida pelo Brasil algumas iniciativas já estão sendo tomadas para substituir as lâmpadas convencionais pelas de LED, uma delas é a da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em parceria com a prefeitura de Belo Horizonte, onde a região da Pampulha está sendo preparada para a Copa do Mundo em 2014 com uma tecnologia de iluminação mais eficiente e econômica, o LED.

A substituição das lâmpadas convencionais pelas de LED tem muitas vantagens em países onde a energia é gerada pela queima de combustíveis fósseis. Sendo assim, teria pelo menos nove vezes menos gases que causam efeito estufa, além do mais se metade da iluminação mundial for substituída por LEDs até 2025, seria possível economizar 120 GW de eletricidade (GRUNDMANN, 2006).

Portanto as lâmpadas de LEDs além de economizarem energia para o consumidor ajudam a combater o efeito estufa, pois permitirão diminuir a emissão de CO₂, e por fim a preservar o meio ambiente, pois não contêm mercúrio. Porém, essas lâmpadas, fluorescentes e de LEDs, não podem ser descartadas normalmente nos lixos, mas deverá ser elaborado um sistema de entrega em uma das lojas que as vendem ou em um ecocentro.

2.2 Impacto Ambiental Específico

A iluminação tem impacto sobre a vida dos insetos e, apesar de existirem divergências sobre este impacto, existem pontos comuns, em que a iluminação atrai ou afasta os insetos. Em alguns casos, os insetos atraem doenças, como ocorreu quando se usou iluminação na Amazônia, cita-se o caso da doença de Chagas, que, além da picada do barbeiro pode ser contraída pela ingestão do açaí e caldo de cana de açúcar com barbeiros triturados ou esmagados. O barbeiro é atraído pela luz durante a noite e se esconde nos alimentos disponíveis GIANELLI et al., (2009).

Com o uso da lâmpada de LED, pode-se trabalhar a emissão em vários espectros e comprimentos de ondas diferentes, possibilitando o uso de iluminação que não interfere no ambiente. Isso pode ser usado para afastar os insetos ou mesmo para criar amardilhas. No último caso deve-se ter o cuidado de não interferir na cadeia de polenização do meio ambiente.

2.3 Eficiência da Iluminação e Impacto Ambiental

A lâmpada incandescente tem o impacto ambiental causado principalmente pela sua baixa eficiência luminosa, previsão de saída de mercado nos próximos anos.

A lâmpada fluorescente, compacta ou não, que tem rendimento até seis vezes superior à incandescente, faz uso do mercúrio, elemento tóxico, e o descarte das mesmas não é controlado, embora existam programas como o PGIRPBL (Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos, Pilhas, Baterias e Lâmpada) do Governo de Minas Gerais. Este programa define pontos de recolhimento e firmas credenciadas para reciclagem, que é feita em câmaras fechadas onde se faz a separação do vidro, metais e vapor de mercúrio, sendo este é filtrado de forma que o mercúrio retorna para o estado líquido. Outras fontes de luz, como a de vapor de sódio, usada na iluminação pública, têm aplicação muito específica.

Os indicadores de que a lâmpada de LED tem um menor impacto ambiental do que as fontes de luz atuais, também é um atrativo no uso da tecnologia de LED, bem como as possibilidades de várias formas de iluminação, desde a funcional até a artística, decorativa e a relacionada com arquitetura. Porém ainda não é prioridade de usuários privados ou públicos a realização da troca. Portanto, o impacto ambiental positivo, no uso da tecnologia de LEDs é consequência e não o foco de muitos empreendimentos.

2.3.1 Lâmpadas Incandescentes

Com o espectrorradiômetro, podemos ver que espectro da lâmpada incandescente concentra sua parte visível entre 400nm a 700nm (comprimento de onda) aproximadamente (figura 2.1a), o restante é perda em forma de calor e ineficiência do sistema (figura 2.1b).

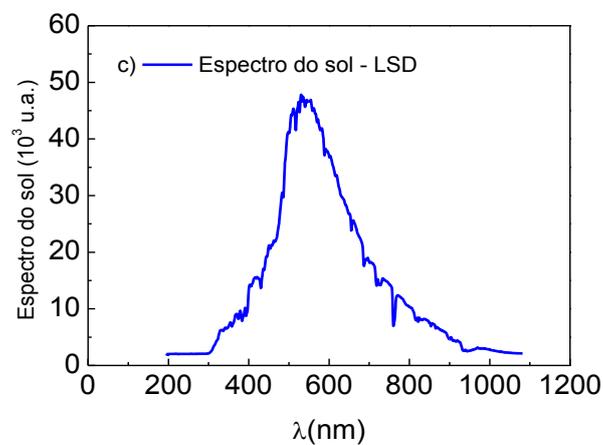
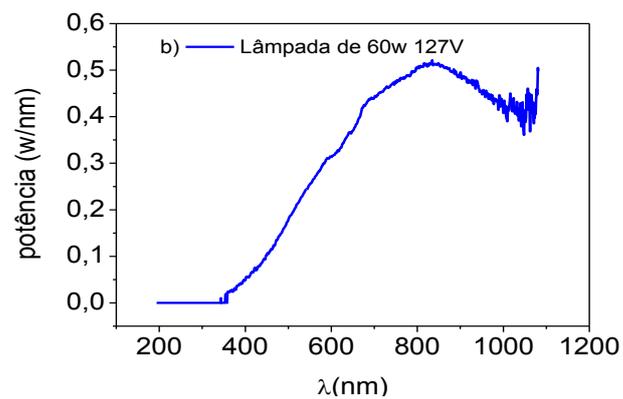
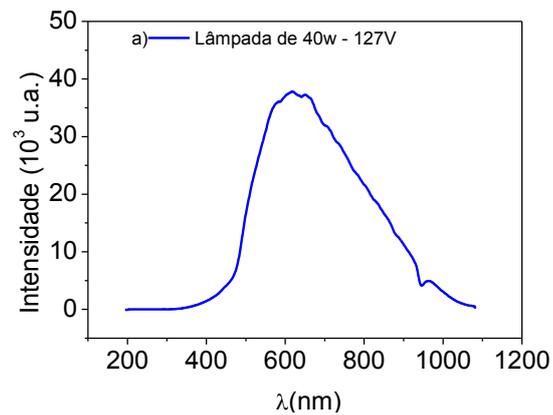


Figura 2.1- a) Espectro de uma lâmpada incandescente de 40 W; b) Curva da potência da lâmpada incandescente de 60 W, c) Espectro do sol capturado às 10hs de 26/07/2013 Na Unifei.

Sabe-se que o sol tem um espectro conhecido que integrado fornece $\sim 1000\text{W/m}^2$; a figura 2.1 c) apenas representa uma pequena parcela da luz solar mostrada para comparar o espectro do sol com o das lâmpadas incandescentes e visualizar a similaridade.

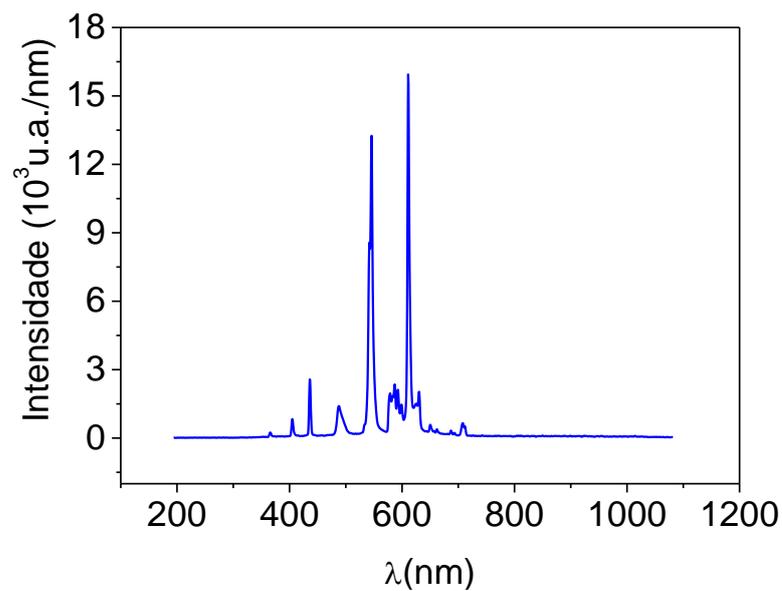
Os materiais utilizados na fabricação das lâmpadas incandescentes são: vidro, tungstênio no filamento e aço no bocal. Materiais estes que podem ser reciclados e, portanto o impacto ambiental não é causado de forma direta, mas sim indireta, devido aos processos de extração dos materiais e fabricação pela indústria, que tem o controle do impacto ambiental regularizado por normas e procedimentos privados e governamentais. Portanto, o impacto ambiental mais diretamente causado pela lâmpada incandescente é decorrente de sua baixa eficiência e necessidade de energia para funcionamento, por exemplo, usinas hidrelétricas, usinas atômicas e parques eólicos.

2.3.2 Lâmpada Fluorescente – Luz branca e Espectro no Campo do Visível

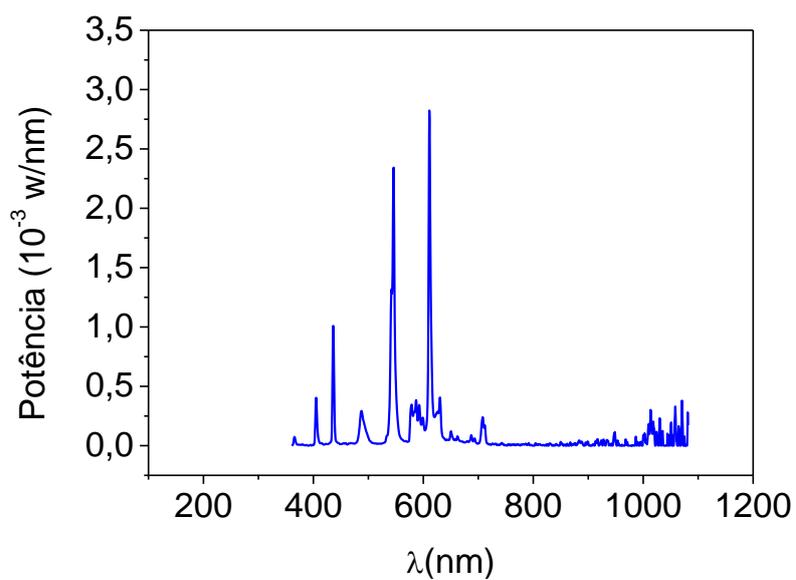
Embora a eficiência da lâmpada fluorescente seja maior que a da incandescente, a poluição pelo mercúrio está tornando seu uso inviável, pelo fato de não ser possível garantir um descarte adequado.

Os materiais usados em diferentes modelos são: Vidro, mercúrio, fósforo, alumínio, aço, cerâmica e circuitos eletrônicos, que com exceção do mercúrio, podem ser reciclados. Como não existe ainda uma alternativa para a reciclagem do mercúrio usado nestas lâmpadas, o impacto causado pelo mesmo é um processo contínuo e cumulativo. Portanto, o descarte das lâmpadas fluorescentes é crítico e sua regulamentação é de difícil implantação devido à abrangência de seu uso, diversidade quanto a regiões e ambientes onde a mesma é usada.

As figuras 2.2a e b mostram o espectro e a potência de uma lâmpada fluorescente:



(a)



(b)

Figura 2.2 a) Espectro de uma lâmpada fluorescente - 9 W; b) Curva da potência da lâmpada fluorescente.

2.3.3 Lâmpada de LEDs - Luz Branca e Espectro no Campo do Visível

Segundo (GRUNDMANN, 2006, p. 670), LEDs com 50.000h de vida são uma realidade, isto é, cinco vezes maior que a vida de uma lâmpada fluorescente. Com apenas 80% da energia, o uso de LEDs de luminescência branca pode economizar, globalmente, 120 GW de energia ou reduzir substancialmente o custo na iluminação.

As figuras 2.3a e b mostram os espectro da lâmpada de LED usado em iluminação:

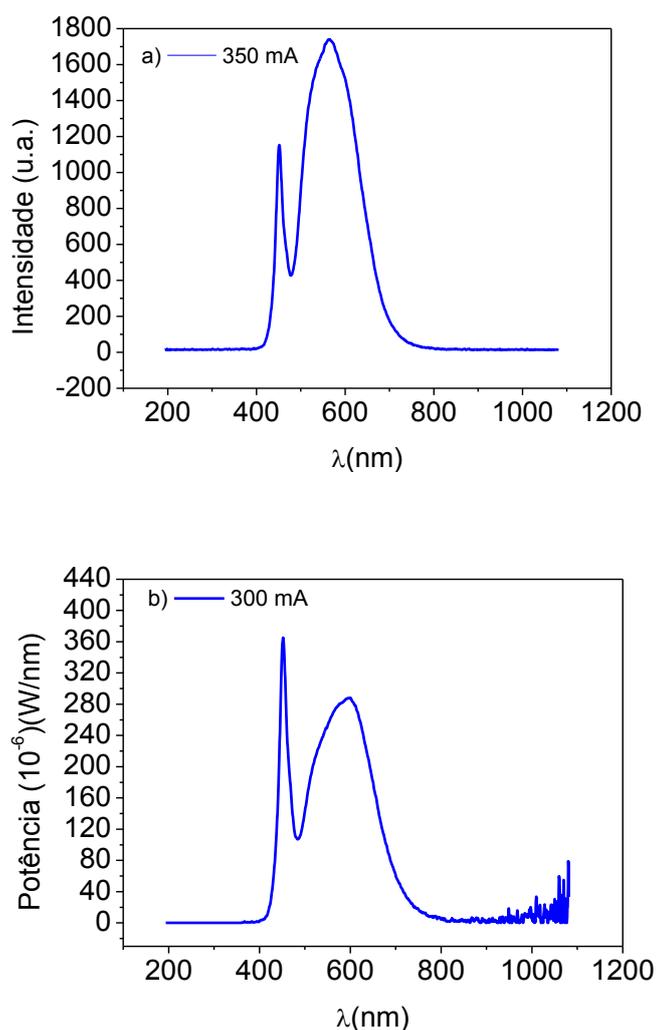


Figura 2.3 a) Espectro de uma lâmpada de LED; b) Curva da potência da lâmpada de LED

O LED, que produz luminescência branca, nada mais é que o LED azul com uma camada de fósforo. Esse material, depositado sobre o semicondutor, converte a luz azul em luz branca através do mesmo processo utilizado na lâmpada fluorescente. O impacto ambiental a princípio, tem dois focos, o positivo, pois com apenas 20% da

energia pode-se ter a mesma iluminação hoje feita pelas lâmpadas fluorescentes ou de sódio. O impacto negativo, não é visível a princípio, consiste no acréscimo do lixo eletrônico. Como as lâmpadas de LED fazem uso de uma maior diversidade de materiais, com base no InGaN, mais o fósforo e o circuito eletrônico de controle de corrente, onde existe diversos processos industriais envolvidos, sendo que cada um destes processos tem o impacto ambiental inerente. Porém, considerando que o LED consome 80% menos energia, o impacto ambiental decorrente da menor necessidade de energia é o resultado secundário mais positivo, pois o objetivo primeiro é a redução no custo da iluminação e manutenção da mesma. Para fabricar LEDs, atualmente o sistema mais usado é MOVPE (*Metalorganic Vapor Phase Epitaxy*), um sistema complexo, usa elementos altamente tóxicos, exige um controle sofisticado, que já é aplicado na indústria de muitos países.

Capítulo 3

Diodos Emissores de Luz

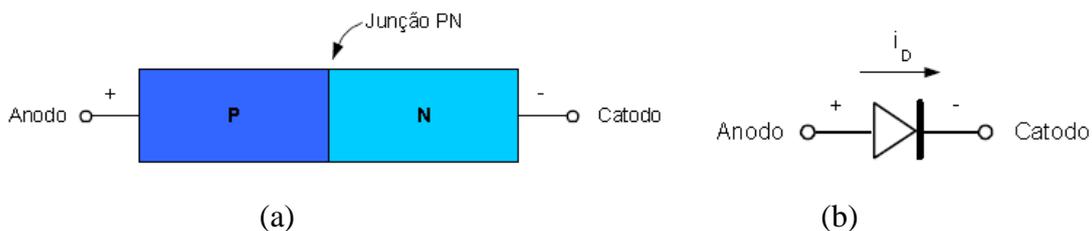
3.1 Conceitos

Os semicondutores são materiais que se caracterizam por se comportarem como condutores ou como isolantes elétricos, em contraste com os metais e com os isolantes, as propriedades desse dispositivo são afetadas pela variação de temperatura, exposição à luz e acréscimos de impurezas.

Os LEDs são diodos semicondutores que emitem luz quando polarizados diretamente. O estímulo causado pela corrente elétrica nos diodos é unidirecional, isto é, praticamente só é produzido luz, se a corrente passar pelo diodo na direção “certa”, ou seja, do anodo (polo positivo) para o catodo (polo negativo) (figura 3.1b). Uma de suas aplicações mais tradicionais, dos diodos, é a retificação de tensão alternada em fontes de alimentação, usadas para fornecer tensão contínua para a operação de equipamentos eletrônicos (REZENDE, 2004).

Os LEDs são constituídos, na sua maioria, pela junção de dois materiais semicondutores, um do tipo p , aqueles que possuem maior concentração de buracos, e outro do tipo n , que possuem excesso de elétrons (figura 3.1a).

A luz é produzida pela recombinação de elétrons e buracos que resultam na emissão de fótons e fônons, luz e vibrações de átomos, respectivamente.



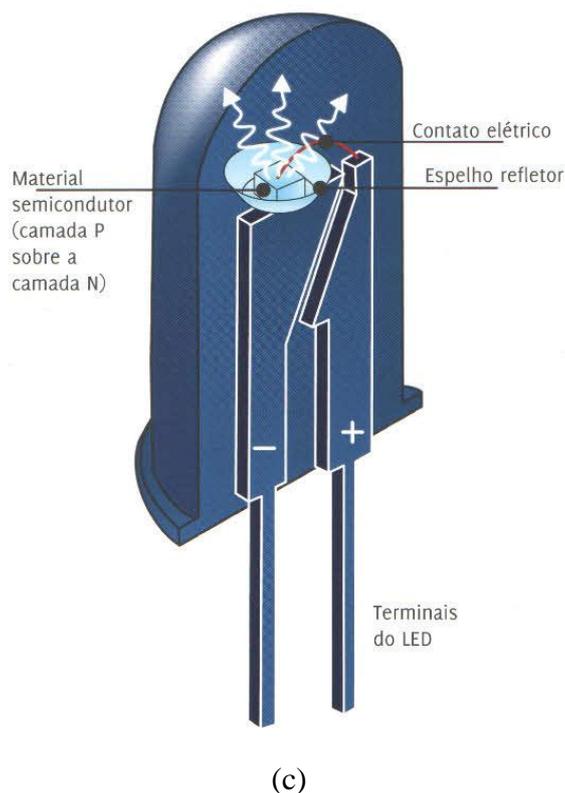


Figura 3.1 – a) Diodo de junção $p-n$, b) símbolo elétrico e c) estrutura de um LED.
Fonte (PAULA et al., 2011).

3.2 Funcionamento dos LEDs

A junção $p-n$ é o elemento básico na construção de quase todos os dispositivos da eletrônica tais como diodos, transistores, células solares, LEDs, dentre outros. Um mesmo material semicondutor dopado em diversas regiões com impurezas permite a fabricação destes vários dispositivos.

Como o LED tem o comportamento ligado à junção $p-n$, é necessário, conhecer o processo de formação dessa junção. Essa junção consiste de uma fina camada, na faixa de 10^{-2} μm a 1 μm . É característica dos materiais semicondutores, isto é, materiais que na temperatura 0 K ou zero absoluto são isolantes e na temperatura ambiente possuem cargas elétricas e podem conduzir sob a ação de um campo elétrico, positiva devido aos buracos na banda de valência e negativa devido aos elétrons livres na banda de condução.

Para entender a junção $p-n$, imagine uma superfície entre duas regiões de um monocristal semicondutor que foi dopado, isto é, processo que adiciona impurezas a um

crystal, sendo que em um dos lados há maior concentração de elétrons e no outro, maior concentração de buracos (figura 3.2a).

Neste monocristal ocorrerá o fenômeno de difusão dos elétrons e buracos, que se movem (figura 3.2b), para a região de menor concentração dos mesmos produzindo duas camadas de cargas. Estas duas camadas criam um campo elétrico dirigido do lado n para o lado p . Esta região, nas proximidades da junção, é chamada de depleção ou transição com cargas negativas do lado p e positivas do lado n (figura 3.2c).

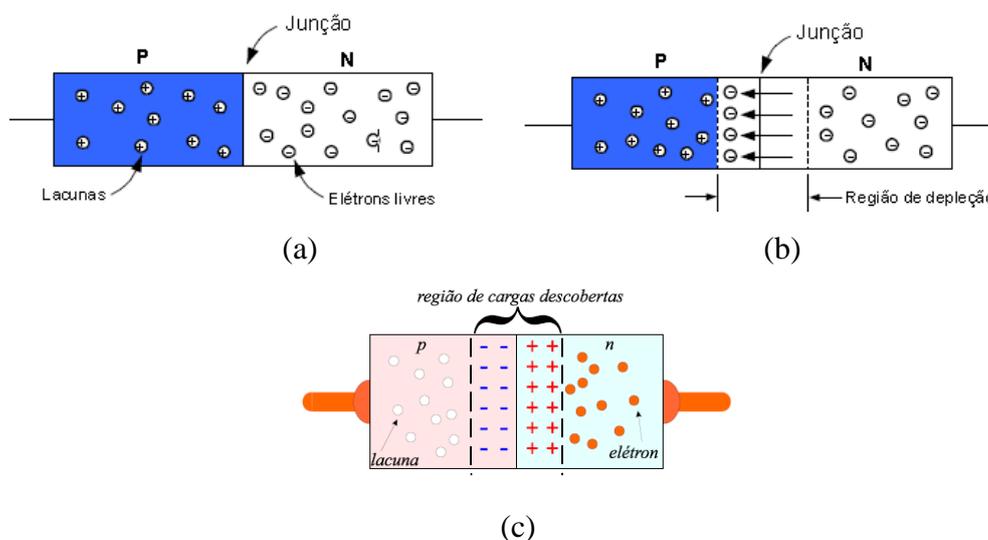


Figura 3.2 – a) junção p-n; b) formação da região de depleção, c) região de depleção formada.

Com o aparecimento da região de depleção, o transporte de elétrons para o lado p é bloqueado, pois estes são repelidos pela região negativamente carregada do lado p . O mesmo se aplica para os buracos, que são repelidos pelas cargas positivas existentes no lado n da junção. O campo elétrico criado nessa região corresponde a uma diferença de potencial positiva, V_0 (MELLO, 1978). Essa barreira de potencial previne a continuação do transporte de portadores através da junção $p-n$ não polarizada.

Diz-se que a junção $p-n$ está diretamente polarizada quando o potencial negativo da alimentação está ligado ao semiconductor n e o potencial positivo da alimentação está ligado ao semiconductor p (figura 3.3b). E está inversamente polarizada quando o potencial negativo da alimentação está ligado ao semiconductor p e o potencial positivo da alimentação está ligado ao semiconductor n (figura 3.3 c).

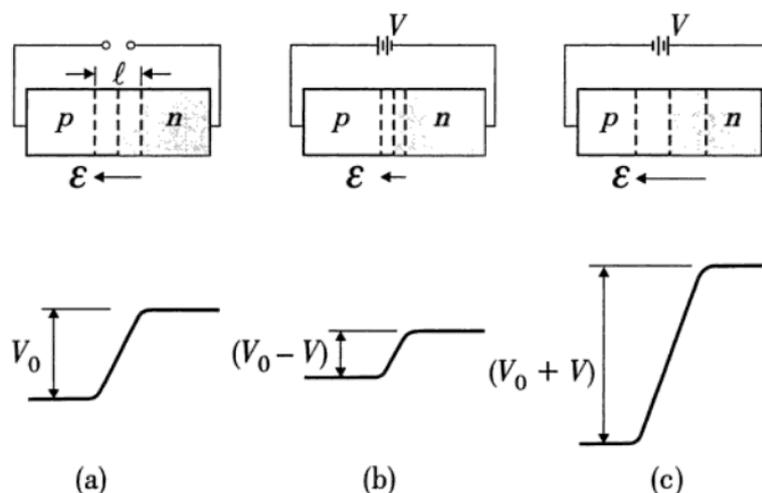


Figura 3.3 - a) Tensão em equilíbrio; b) Polarização direta; c) Polarização inversa.

Quando uma junção é polarizada no sentido direto os elétrons do lado n e os buracos do lado p movem-se em sentidos opostos em direção à região de depleção. Portanto, os buracos injetados do lado n recombinaem com os elétrons que estão chegando à região de depleção, enquanto os elétrons injetados no lado p recombinaem com os buracos que lá se encontram.

Para operarem, os LEDs, em geral, necessitam de tensão de 1,6 a 3,3 V. Os LEDs infravermelhos funcionam com menos de 1,5 V, os vermelhos com tensão de 1,7 V, os amarelos com tensão entre 1,7V e 2,0V, e os verdes com tensão entre 2,0V e 3,0V, enquanto os LEDs azuis, violeta e ultravioleta precisam de mais de 3V. A maioria dos modelos LEDs coloridos utilizados para indicação operam com apenas de 20 mA. A potência necessária está na faixa típica de 10 a 150 mW, com um tempo de vida útil de 100.000 horas, ou mais.

A tensão proporcionada pela barreira de potencial no interior do diodo depende do material utilizado na sua fabricação, germânio $V = 0,3$ V e silício = 0,7 V. Não é possível medir diretamente o valor de tensão aplicando um voltímetro conectado aos terminais do diodo, porque essa tensão existe apenas em uma pequena região próxima a junção. No todo, o componente é eletricamente neutro, uma vez que não foram acrescentados nem retirados portadores do cristal.

A aplicação da tensão sobre o diodo estabelece a forma como o componente se comporta eletricamente. Pode ser aplicada ao diodo pela polarização direta ou inversa do componente.

Como já visto na polarização direta o valor da tensão aplicada ao diodo é inferior ao valor da barreira de potencial ($V < V_0$). Nessa condição a maior parte dos elétrons e buracos não tem energia suficiente para atravessar a junção. Resultando em que apenas alguns elétrons e buracos tem energia suficiente para penetrar a barreira de potencial produzindo uma pequena corrente elétrica ao diodo. Se a tensão aplicada excede o valor da barreira de potencial, elétrons e buracos adquirem energia suficiente para superar a barreira de potencial, produzindo como resultado um grande aumento de corrente elétrica através do diodo.

O estudo da característica tensão-corrente, que expressa a relação entre a corrente conduzida pelo dispositivo, em função da diferença de potencial aplicada em seus terminais pode ser ilustrada através da figura 3.4.

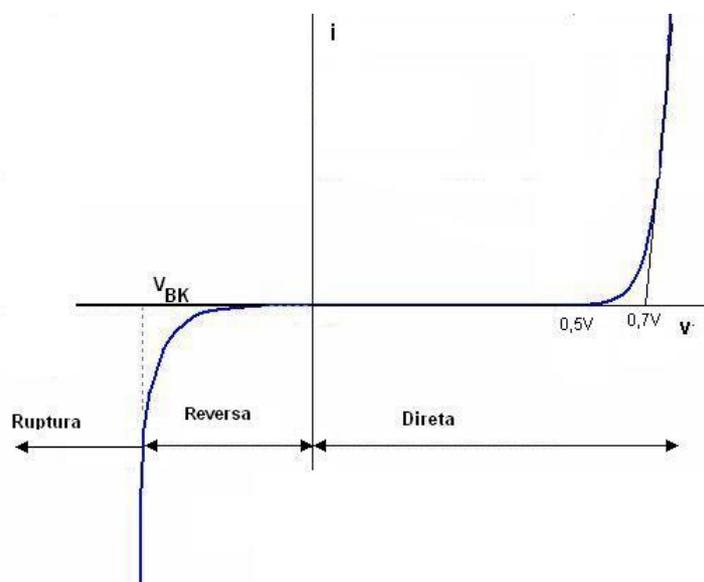


Figura 3.4 – Curva I-V característica do diodo, em polarização direta: $V > 0$, ocorre a partir de valores de tensão superiores à da barreira de potencial, o diodo efetivamente conduz uma corrente utilizável; em polarização reversa: $V_{BK} < V < 0$, a corrente é formada por duas componentes: uma corrente constante e dependente da temperatura I_s e outra dependente da diferença de potencial aplicada; V_{BK} = tensão de ruptura ou breakdown e Ruptura: $V < V_{BK}$.

A junção *p-n* fornece uma equação que expressa o comportamento da característica I-V do diodo nas regiões de condução e não-condução chamada equação de Shockley, e dada por (RESENDE, 2004):

$$I = I_s \left(e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (3.6)$$

Onde,

$$I_s = eA \left(\frac{D_p}{L_p} p_{n0} + \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right) \quad (3.7)$$

Onde os termos das equações 3.7 e 3.8 serão definidos a seguir: a corrente reversa de saturação I_s é calculada a partir dos parâmetros dos semicondutores que formam a junção. O valor de corrente de saturação I_s varia muito com a temperatura T . Pode-se dizer que I_s duplica por cada 10 °C de aumento da temperatura, para uma temperatura de 25 °C o valor de $e/(k_B T)$ é de aproximadamente 25mV. E, eV é a tensão externa aplicada, k_B é a constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K).

O termo D_p corresponde ao coeficiente de difusão dos buracos e D_n ao coeficiente de difusão dos elétrons; os termos p_{n0} e n_{p0} significam a variação da concentração de buracos e elétrons, respectivamente. E, L_p e L_n são o comprimento de difusão de buracos e o comprimento de difusão de elétrons, respectivamente. Tais comprimentos dependem do tipo de portadores do semicondutor e da concentração de impurezas. O termo A compreende a área da seção transversal da junção.

A recombinação dos portadores pode ser de dois tipos: i) *gap* direto (figura 3.5a); ii) *gap* indireto (figura 3.5b).

O semicondutor que apresenta *gap* direto à recombinação entre cada par elétron-buraco resultará na emissão de um fóton. Por essa razão é necessário utilizar semicondutores de *gap* direto para fabricar LEDs. Agora se a junção apresentar *gap* indireto à recombinação, além de produzir fótons produz fônons, ou seja, calor, o que torna a emissão de luz em semicondutores de *gap* indireto menos eficiente em relação aos semicondutores de *gap* direto.

Os semicondutores de *gap* direto, por apresentarem as características citadas anteriormente, são os mais utilizados para fabricar LEDs. Os mais utilizados são: GaAs, InSb, InP e CdTe. E para a fabricação de LEDs azuis usados para luminescência branca são: GaN (azul), InGaN (azul e verde), GaN (violeta), AlGaN (ultravioleta) (vide tabela 3.1) (GRUNDMANN, 2010).

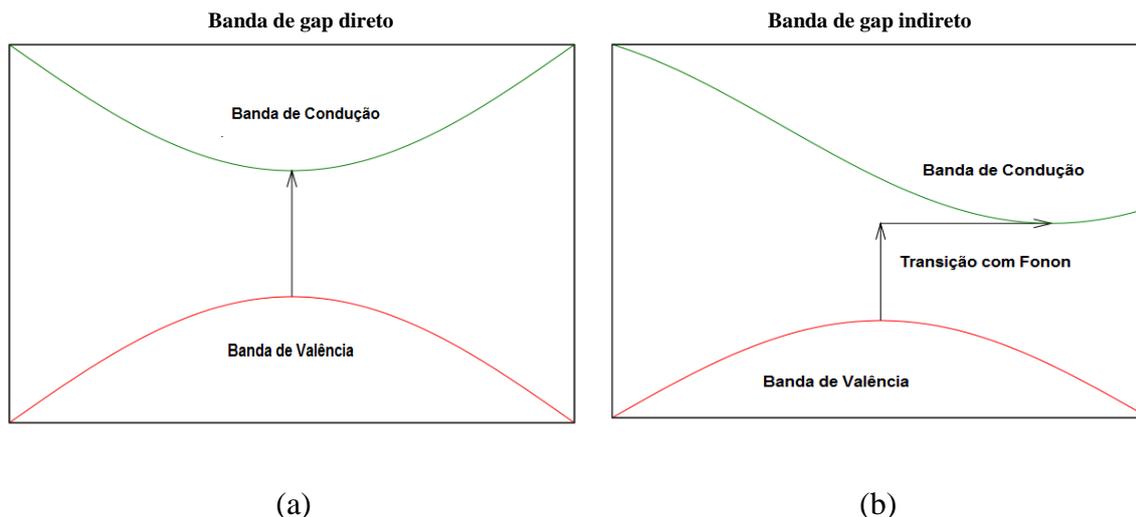


Figura 3.5 – Transições de a) gap direto e de b) gap indireto.

O comprimento de onda da luz emitida e conseqüentemente a cor dependem da energia do *gap* dos materiais que formam a junção *p-n* e estão relacionados pela seguinte equação:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1)$$

Em que ν e λ são a frequência e o comprimento de onda, respectivamente, da luz emitida, h (6.626×10^{-34} Js) é a constante de Plank, c (2.998×10^8 m/s) é a velocidade da luz e E é energia do fóton. A principal diferença entre um isolante e um semiconductor é a energia do *gap*. O semiconductor com $E_g = 2$ eV emite luz vermelha com comprimento de onda de pico em 620 nm.

A dinâmica da recombinação de elétrons-buracos ocorre por influência de carga elétrica e temperatura. Essa dinâmica gera energia sob a forma de vibrações mecânicas na rede cristalina, resultando em calor, isso acontece devido à resistividade do material, no caso dos LEDs, tem se a luz (GRUNDMANN, 2006). Embora não existe um limite claro entre os condutores e semicondutores, segundo (MELLO, 1978) a resistividade típica dos semicondutores varia de 10^{-2} Ωcm a 10^6 Ωcm .

3.3 Grandezas Radiométricas e Fotométricas

As medidas óticas relevantes para LEDs são definidas pela radiometria e pela fotometria. A radiometria se refere às propriedades e medidas considerando a radiação física e a fotometria se refere às propriedades e medidas para os efeitos no olho humano, ou seja, se refere ao que é útil a visão.

Os valores radiométricos se referem à potência ou radiação ótica para uma dada geometria de propagação e cobrem os comprimentos de onda da região ultravioleta ao infravermelho e não dependem da sensibilidade do olho humano, do brilho ou da cor (HANDBOOK, 1997).

Usando unidades radiométricas, podem-se caracterizar as quantidades da luz em termos físicos, por exemplo, energia do fóton, potencia ótica (fluxo luminoso). Entretanto, as unidades radiométricas não são uma boa opção no que se refere à percepção do olho humano. Por exemplo, o infravermelho não causa sensação luminosa para o olho. Para caracterizar a luz e a sensação da cor pelo olho humano, diferentes tipos de unidades são necessários, chamadas unidades fotométricas.

As grandezas fotométricas combinam as grandezas radiométricas com a sensibilidade espectral do olho humano. A curva da figura 3.6 descreve o espectro considerando o olho humano, que é de 380nm a 780nm.

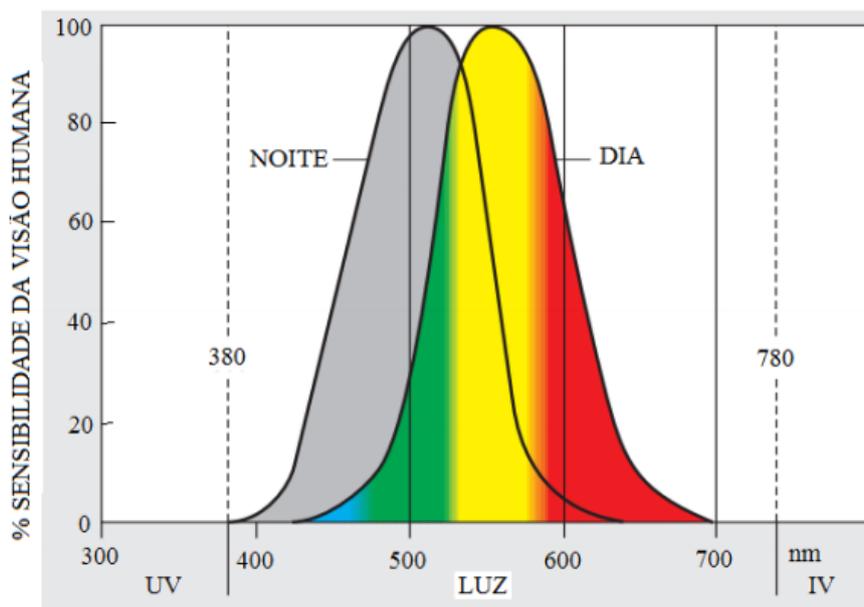


Figura 3.6 – Curvas de sensibilidade espectral do olho humano Fonte: Osram (2009).

O fluxo luminoso ϕ é a quantidade de energia capaz de sensibilizar o olho humano, a unidade de medida é definida em lumen (lm). Lumen é a unidade de potência correspondente a 1/680 W emitidos no comprimento de onda de 555 nm, no qual a sensibilidade do olho humano é máxima. Para medir o fluxo luminoso é utilizado um equipamento chamado esfera integradora.

Para obter a eficiência luminosa η de fonte de luz, é necessário obter a razão entre o fluxo emitido pela fonte de luz e a potência elétrica W consumida no processo, conforme equação 3.2. A maior eficiência luminosa significa mais luz com menor consumo de energia, como por exemplo, o LED. A unidade de medida é o lm/W.

Considerando que o desempenho dos LEDs depende de muitos fatores, como a refrigeração, o controlador, a densidade de potência, o fator calor/frio (nível de declínio do fluxo luminoso quando a temperatura sobe), dentre outros, quanto mais favoráveis o fatores, maior será o fluxo luminoso para a mesma potência.

$$\eta = \frac{\phi}{W} \quad (3.2)$$

A intensidade luminosa I , que é uma quantidade fotométrica, representa a intensidade da luz emitida por uma fonte ótica como percebida pelo olho humano. A intensidade luminosa é medida em unidade de candela (cd), ou lm/sr.

$$I = \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \quad (3.3)$$

Em que ω é o ângulo sólido através do qual o fluxo de luz de uma fonte pontual é irradiada.

A iluminância E é o fluxo luminoso incidente por unidade de área. A iluminância medida em lux (lx), ($\text{lux} = \text{lm}/\text{m}^2$). Para medir a iluminância utiliza-se o luxímetro.

$$E = \frac{\partial \phi}{\partial A} \quad (3.4)$$

A luminância L é a razão entre a intensidade luminosa emitida numa certa direção dividida por uma área projetada (medida em cd/m^2) (SCHUBERT, 2006).

$$L = \frac{RE}{\pi} \quad (3.5)$$

Em que R é a refletância, ou seja, a fração do fluxo de energia radiante que, ao incidir sobre uma superfície, é refletida. A luminância será máxima quando o olho estiver na direção normal à superfície luminosa. Ela produz a sensação de claridade.

A Tabela 3.1 relaciona as unidades de medidas para as grandezas radiométricas e fotométricas.

Tabela 3.1 – Unidade de medidas radiométricas e fotométricas

Unidades Radiométricas			Unidades Fotométricas		
Potência Radiante	Φ_e	W	Fluxo Luminoso	ϕ	Lm
Intensidade Radiante	I_e	W/sr	Eficiência luminosa	η	lm/W
Irradiância (Potência)	E_e	W/m ²	Intensidade Luminosa	I	cd=lm/Sr
Radiância	L_e	W/m ² .sr	Iluminância	E	lux=lm/m ²
Radiância spectral	L_λ	W/m ² .sr.μm	Luminância	L	cd/m ²

3.4 Materiais Usados na Fabricação de LEDs

O processo mais usado atualmente para se fabricar LEDs é o MOVPE (*metal-organic vapor phase epitaxy*). Para gerar luminescência branca em LEDs, dois modos são conhecidos, um deles é a combinação de espectro RGB (*Red, Green e Blue*) que pode produzir muitas cores dependendo da intensidade de cada cor individual; outro é o LED azul mais fósforo (cintilador amarelo), sendo este considerado o melhor modo de se obter o LED de luz branca (GRUNDMANN, 2006).

Para os LEDs que emitem luminescência vermelha, laranja e amarelo o material semiconductor básico é AlInGaP (Al – Alumínio; In – Índio; Ga – Gálio e Fósforo). O LEDs que emitem luminescências azuis e verdes são produzidos utilizando o InGaN.

Tabela 3.2 – LEDs de diversas cores, faixa de comprimento de onda, tensão. e respectivos materiais semicondutores

Cor	Comprimento de Onda (nm)	Tensão (V)	Material Semicondutor
Infravermelho	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.9$	- Arseneto de gálio (GaAs) - Arseneto de alumínio e gálio (AlGaAs)
Vermelho	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	- Arseneto de alumínio e gálio (AlGaAs) - Fosfeto e arseneto de gálio (GaAsP) - Fosfeto de índio e gálio e alumínio (AlGaInP) - fosfeto de gálio (GaP)
Laranja	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	- Fosfeto de arseneto de gálio (GaAsP) - Fosfeto de índio e gálio e alumínio (AlGaInP) - fosfeto de gálio (GaP)
Amarelo	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	- Fosfeto e arseneto de gálio (GaAsP) - Fosfeto de índio e gálio e alumínio (AlGaInP) - fosfeto de gálio (GaP)
Verde	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta V < 4.0$	- Nitreto de índio e gálio (InGaN)/ nitreto de gálio (GaN) - fosfeto de gálio (GaP) - Fosfeto de índio e gálio e alumínio (AlGaInP) - Fosfeto de gálio e alumínio (AlGaP)
Azul	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	- Seleneto de zinco (ZnSe) - Nitreto de gálio e índio (InGaN)
Violeta	$390 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	- Nitreto de gálio e índio (InGaN)
Púrpura	Multiplos tipos	$2.48 < \Delta V < 3.7$	- Azul/Vermelho LEDs duplos - Azul com fóforo vermelho, ou branco com plástico púrpura.
Ultravioleta	$\lambda < 390$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	- Diamante (235 nm) - Nitreto de Boro (215 nm) - Nitreto de Alumínio (AlN) (210nm) - Nitreto de alumínio e gálio (AlGaN) - Nitreto de índio e gálio e alumínio (AlGaInN) – abaixo de 210 nm
Branco	Espectro amplo	$\Delta V \sim 3.5$	- Diodo Azul/UV com fósforo amarelo

3.5 Propriedades dos LEDs

3.5.1 Diagrama de Cromaticidade e Temperatura da Cor (CCT - *Correlated Color Temperature*) e IRC (Índice de Reprodução da COR)

A temperatura da cor não está associada diretamente ao calor ou ao frio que uma lâmpada pode fornecer a um ambiente. O termo é originário da radiação de um corpo negro.

Um corpo negro é um objeto que absorve toda a radiação eletromagnética que nele incide em todos os comprimentos de onda, de forma que toda a radiação incidente é completamente absorvida e emite em todas as direções a máxima radiação possível para a temperatura do corpo.

À medida que o corpo negro aquece, a luz que emite passa por uma sequência de cores, que vai do vermelho ao laranja e depois vai do amarelo ao branco e azul, e é expressa em Kelvin (K). A luz azulada tem uma temperatura da cor mais elevada e é percebida como sendo “mais fria” do que a luz com uma temperatura da cor mais baixa. Essa sequência de cores foi organizada graficamente pela comissão internacional de iluminação, CIE em 1931. Este diagrama gráfico, ou diagrama de cromaticidade, é representado na figura 3.7. O comportamento do corpo negro está indicado e é usado na definição de temperaturas de cor.

Com relação ao espaço XY da CIE é importante destacar (LIMA, 2010):

- É possível representar qualquer cor perceptível por seres humanos em termos dessas primárias;
- Para produzir o branco, quantidade iguais de X e Y ;
- O espaço está arranjado de modo que um único parâmetro Y determine a luminância da cor;
- A posição das cores está relacionada à sensibilidade do olho humano pelo uso das funções de equiparação de cor.

O índice de reprodução de cor ou IRC é uma medida de como um conjunto de cores é percebido por um observador fotóptico quando iluminado por uma fonte de luz se comparado à percepção das mesmas cores expostas à iluminação natural. Assim, o IRC é definido como 100 para o sol. O IRC foi calculado neste trabalho para uma lâmpada incandescentes de potencia nominal de 60 W resultando em 98,7. Para a lâmpada fluorescente obteve-se 77.6 e, para os LEDs obteve-se valores entre 68,6 e 69,5 para os de fabricação chinesa, incluindo o atualmente utilizado pela SISVÔO e de 85,3

e 74,4 para os fabricados pela Nichia. Obter índice próximo a 100 com os LEDs é a atual fronteira do desenvolvimento desta tecnologia. (Revista Ciências do Ambiente On-Line Junho, 2010 Volume 6,Número 1; Boyce, P. R. 2003. Human Factors in Lighting - 2nd Edition. London; New York: Taylor & Francis.)

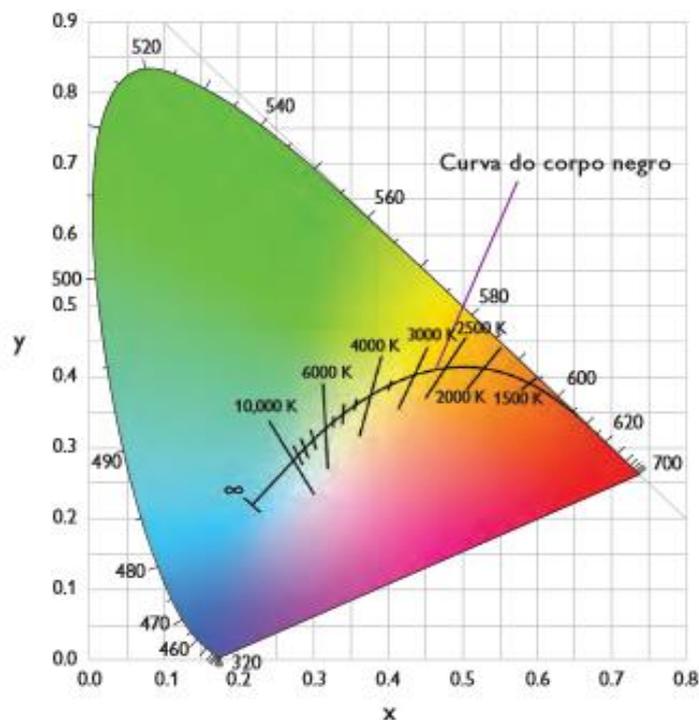


Figura 3.7 – Diagrama de cromaticidade – CIE 1931 . A curva de um corpo negro está indicada e é usada na definição de temperatura da cor.

A consistência de cor é um índice da qualidade da luz que se aplica tanto a LEDs de luz branca quanto aos coloridos. Sempre que se trata de luz branca, a temperatura da cor (ou a aparência de cor) é descrita tendo uma aparência “quente” (branco tendendo ao alaranjado), neutra ou “fria” (branco tendendo ao azulado), conforme figura 3.8.

Uma lâmpada incandescente emite luz com uma cor de aproximadamente 2700 K, que está perto da extremidade quente ou avermelhada da escala. Como a lâmpada incandescente contém um filamento que é aquecido até emitir luz, a temperatura do filamento corresponde à temperatura da cor da luz.

A análise espectral da luz visível possibilita a definição das temperaturas de cor de fontes de luz brancas não incandescentes, como as lâmpadas fluorescentes tubulares e os LEDs.

As definições dos padrões de temperatura da cor possibilitam uma grande variação na tonalidade da cor que pode ser facilmente distinguida até mesmo em casos que temos a mesma temperatura da cor. Sendo assim, garantir a consistência da cor é a maior preocupação dos fabricantes de LEDs, que elaboram métodos para manter sob-rígido controle essas variações.

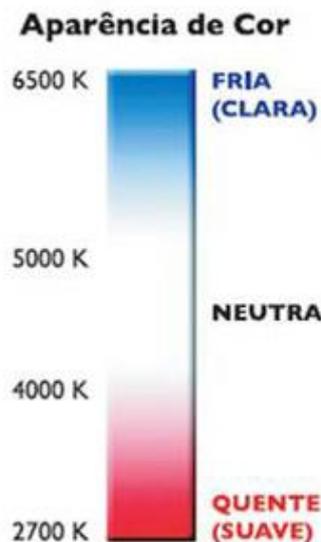


Figura 3.8 – Aparência da cor correlacionada à sensibilidade do olho humano com valor expresso em Kelvin.

Os LEDs com elevada temperatura da cor e, portanto, com luz mais fria, têm um nível de eficiência superior ao dos mesmos LEDs com temperaturas de cor mais baixa. O material luminescente utilizado para criar o branco quente contém mais vermelho e a eficiência desse componente vermelho é inferior à do amarelo. Razão pela qual se estuda o LED de luminescência branca.

Na luz branca dos LEDs RGB (que incluem vermelho, verde e azul), são possíveis todas as temperaturas de cor, mas o controle ao longo do tempo é complexo, pois as três cores têm um tipo diferente de dependência com a temperatura da junção $p-n$ do LED. Por esse motivo, essa opção não é utilizada com tanta frequência para fins de iluminação.

A maioria dos LEDs proporciona uma ampla distribuição da luz e emite luz a um ângulo entre 80 a 140°. É importante uma distribuição de luz adequada para reduzir ao máximo a potência específica e, portanto, o consumo de energia em cada aplicação.

As lâmpadas fluorescentes, quando são ligadas não atingem o fluxo luminoso máximo. Os LEDs, por sua vez, reagem imediatamente às alterações na fonte de alimentação no instante em que são ligados. São, portanto, altamente indicados para aplicações em que a luz é ligada/desligada com frequência e permanece ligada apenas por breves períodos de tempo. Isto se aplica também aos ambientes com temperaturas mais baixas, e neste, o funcionamento é ainda melhor (*Dossier LED*, 2010).

3.5.2 Vida Útil

O tempo de vida útil dos LEDs é fortemente afetado por condições específicas de utilização, das quais a potência e a temperatura interna (e, portanto, também a temperatura ambiente) são os fatores mais importantes. Atualmente, pode-se assumir que o tempo de vida útil dos LEDs de boa qualidade é de 50.000 horas. Isto se refere ao tempo que o fluxo luminoso leva, em média, para cair para 70% do seu valor inicial. Essa vida útil concretiza-se desde que o LED seja utilizado dentro dos limites de temperatura estabelecidos (tipicamente, 80 a 85°C).

É importante saber que a vida útil dos LED depende, em larga medida, dos requisitos impostos pela sua aplicação. Por exemplo, em aplicações arquitetônicas ou residenciais específicas, é aceitável uma redução de luz igual ou superior a 30%, e a vida útil poderá exceder às 50.000 horas. Em aplicações profissionais, uma falha de 50% com uma redução de luz de 30% não são aceitáveis e a vida útil é mais curta.

3.5.3 Tipos de LEDs

De acordo com o *Dossier LED* de 2010, há muitas formas de classificar os LEDs. No entanto, pode-se definir entre tantas, os seguintes tipos:

1) LED com ópticas primárias: O fabricante de iluminação adquire componentes LED, produz placas de circuitos impressos (PCI) personalizadas e combina-os com ópticas secundárias, o que proporciona uma excelente flexibilidade em termos de projeto, pois o formato do módulo de iluminação pode ser plenamente integrado no projeto da luminária.

Atualmente são utilizados apenas LED SMD (Dispositivo de Montagem Superficial), que são diretamente soldados na superfície de uma placa de circuitos e beneficiam de uma extração de calor muito mais eficaz. Esse tipo é mais recente e especificamente aprimorado para lidar com cargas e fluxos luminosos mais elevados. A

sua vida útil e eficácia melhoraram consideravelmente. Em termos de potência, está disponível uma gama completa que vai dos LED de Baixa Potência (entre 70 mW e 0,5 W) aos *Power LED* (entre 1 W e 3 W) e aos *HighPower LED* (até 90 W). A quantidade de lúmen por LED varia de 4 a 6000 lm, nos LED de capacidade mais elevada.

2) PCI pré-montadas: O fabricante de iluminação compra de um fornecedor de LED, as PCI pré-montadas, que são circuitos onde se encontram montados um ou mais LEDs. Os sistemas eletrônicos necessários ao funcionamento também se encontram nos circuitos, o que permite ligar facilmente os módulos a uma fonte de alimentação. São vantajosos nos sentido de serem módulos de luz prontos a serem utilizados. Essas PCI pré-montadas integram várias versões (redonda, linear ou de faixas, substratos flexíveis, etc.) e podem ser equipados com LED SMD, quer de baixa potência, quer de potência elevada. Como exemplo, podemos citar as fitas LED Osram e Philips.

3) Módulos LED (lâmpadas completas): Neste caso, as PCI pré-montadas são integradas nas interfaces elétricas e térmicas necessárias que se encontram no interior da respectiva caixa. Podem ser integradas também ópticas secundárias.

A fim de projetar lâmpadas com LEDs, várias formas são possíveis, podem-se ligar vários LEDs em conjuntos, paralelos ou em série. Quando se escolhe utilizar LEDs de uma única cor, e se for usar bateria de baixa tensão, é adequado montar o circuito em paralelo. Se a escolha for de projetos que necessitam o uso de LEDs de várias cores e/ou possam usar uma bateria com maior tensão, é melhor optar pela montagem em série, pois pode-se construir um circuito mais consistente. Os LEDs estudados e as lâmpadas de LEDs fabricadas pela SISVÔO se classificam de acordo com o primeiro tipo de LED.

Na Figura 4.3 pode-se ver dois modelos de lâmpadas de LEDs montadas na SISVÔO e na Figura 1.4 lâmpadas disponíveis no mercado, sendo que para cada modelo é necessário uma fonte e circuito elétrico específico.

Outro dado importante é quanto a dependência de importação. Como exemplo, a porcentagem dos itens importados em uma das lâmpadas mais produzidas na SISVÔO é de 67%, sendo 38% relativos aos LEDs, 24% relativos aos demais itens eletrônicos e o restante de 33% refere-se aos itens nacionais, plástico, metal e embalagem.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Neste capítulo apresenta-se, o processo de fabricação de lâmpadas de LEDs na SISVÔO. Descreve-se também a montagem de um protótipo experimental e o processo de montagem e medição de vários modelos de LEDs, utilizando espectrofotômetro e *software* marca *StellarNet Inc.*

4.1 Processo de Fabricação da Lâmpada de LED na SISVÔO

Como informado anteriormente e, por se tratar de um mestrado profissionalizante, este trabalho foi desenvolvido em parceria com a empresa SISVÔO.

A SISVÔO atua na montagem de placas eletrônicas para diversos produtos, entre eles, as lâmpadas de LEDs.

A SISVÔO teve seus primeiros protótipos fabricados com LEDs PTH (*Pin Through Hole*), com encapsulamento de resina plástica. Este tipo de montagem foi abandonado após a realização de um teste experimental, em que, a lâmpada de LED foi submetida a 2 anos de funcionamento, acesa nos dias úteis das 7 h as 19 hs aproximadamente. Foi observado que a luz branca teve a tendência de amarelar, supõe-se devido à degradação da resina plástica devido aos raios UV e calor, além do fato de a montagem ser um processo manual, o que encarece o produto.

Tendo em vista estes problemas, este projeto foi substituído pelo das lâmpadas de LEDs comerciais baseadas em LEDs com encapsulamento SMD. Os LEDs escolhidos operam com corrente e tensão da ordem de 23mA e 3V respectivamente. A dissipação de calor se dá pelos próprios eletrodos e o sistema de montagem usando tubo de alumínio. Outra vantagem também é o custo reduzido da montagem por robôs, quando comparado com os LEDs PTH, montados de forma manual.

4.1.1 Lâmpada de LEDs

A lâmpada tubular da SISVÔO consiste basicamente de 4 partes distintas: A placa (PCI) com os LEDs soldados, uma fonte controladora de corrente, um suporte de

alumínio que age como suporte mecânico e dissipador de calor (figura 4.2a), e uma lente que tem a função de proteção dos LEDs e que pode ajudar na distribuição da luz.

A PCI recebe os LEDs por meio de um robô que os posiciona e solda de forma automática, conforme figura 4.1. A fonte controladora de corrente também é montada pelos robôs e finalmente testada em uma bancada de testes (figura 4.2b).

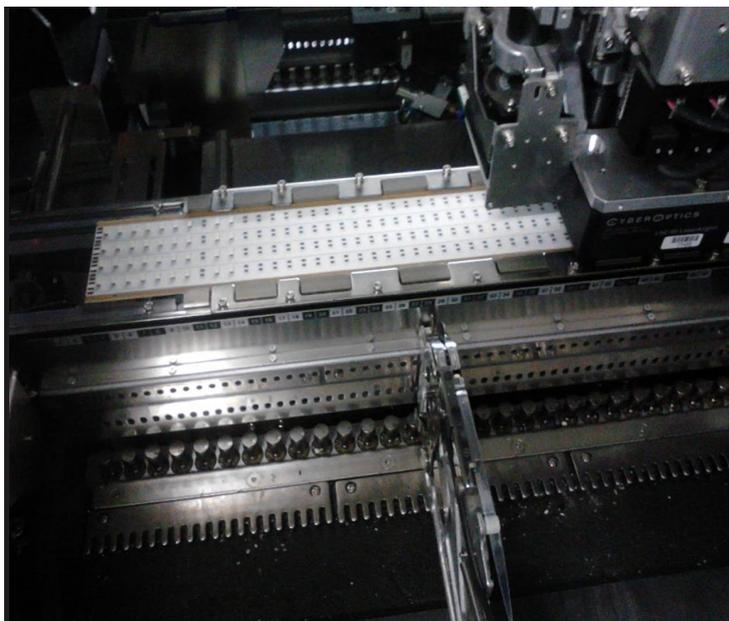


Figura 4.1- Montagem dos LEDs na PCI, por um robô.

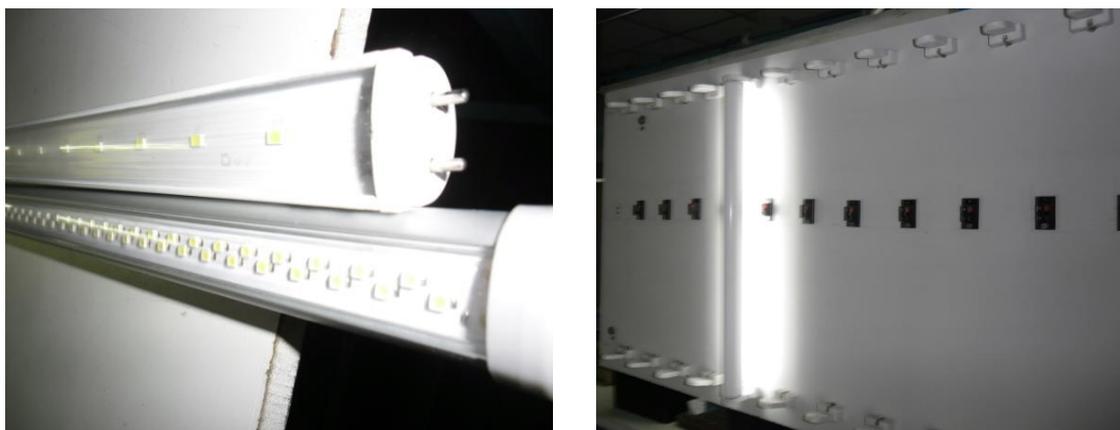


Figura 4.2 - a) Dois modelos de Lâmpada de LEDs; b) Painel de teste da lâmpada de LEDs.

4.2 Processo de Montagem dos LEDs para Medições (SISVÔO-LSD)

O trabalho de pesquisa desta dissertação foi desenvolvido no LSD (laboratório de sensores e dispositivos) da UNIFEI. A SISVÔO trabalhou em cooperação com o LSD, no sentido de orientar o processo de montagem e medição dos mesmos para alcançar os objetivos propostos na pesquisa em questão.

4.2.1 Preparação das Amostras

Após análises de alguns modelos de LEDs (i.e. Modelos 1 a 4 da tabela 4.1), optou-se por escolher o modelo mais amplamente utilizado na fabricação de lâmpadas na SISVÔO para a realização de estatísticas. Para o modelo 4, foram utilizados 29 LEDs, para serem testados e avaliados a fim de se realizarem estatísticas.

Tabela 4.1 – Variação de corrente para 4 modelos de LEDs escolhidos

Modelos de LEDs testados e variação de corrente em mA								
NVSL219AJH3E (modelo 1)	20	50	100	150	200	250	300	350
NVSW119A (modelo 2)	20	50	100	150	200	250	300	350
NS2W757A (modelo 3)	20	50	65					
BLHZD32XN (modelo 4)	20	30						

Nos testes, alguns cuidados foram tomados, devido à fragilidade dos LEDs com encapsulamento SMD à variações de temperatura. Fios de ligação foram soldados no anodo e catodo dos LEDs sempre com uma estação de soldagem com controle de temperatura na temperatura mínima necessária para derreter a solda, conforme figura 4.3.

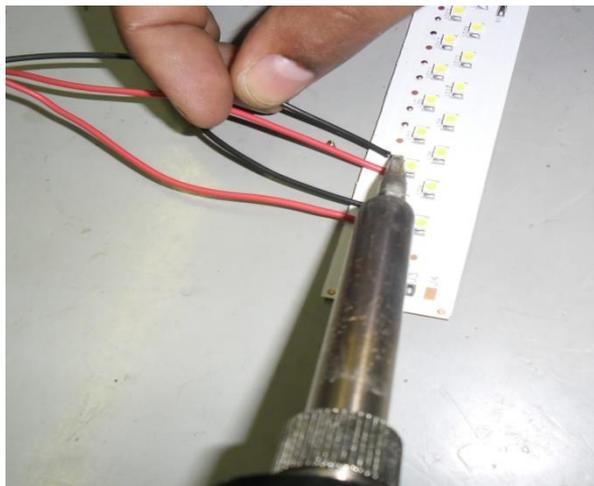


Figura 4.3 - Processo de soldagem dos fios de ligação no anodo e catodo dos LEDs.

4.3 Montagem do Dispositivo Experimental

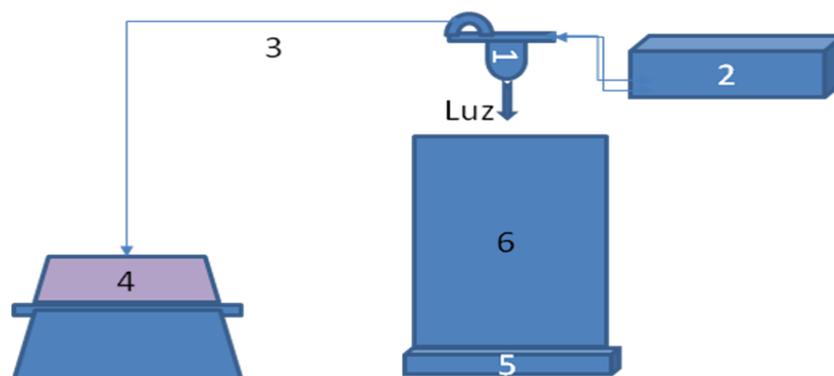
Foi construída uma montagem experimental de um dispositivo (figura 4.4) que mantém os LEDs na mesma posição e ângulo de 90° relativos aos sensores de temperatura e luminosidade (i.e. termopar e luxímetro). A colocação de dois contatos elétricos foi utilizada para obter a respectiva curva I x V característica com medida de luminosidade e temperatura simultâneas. A curva I x V foi levantada utilizando-se uma fonte Keithley 2400, e um programa desenvolvido em LabVIEW para registro dos dados.



Figura 4.4 – Foto da montagem Experimental desenvolvida para a medição de iluminância junto com medições de temperatura e da curva IxV características para LEDs.

4.4 Montagem usando o Espectrofotômetro StellarNet Modelo C-SR-50

O equipamento consiste basicamente de uma esfera, revestida internamente de material sensível a luz, onde é montada a fonte de luz como o LED, ou as lâmpadas mais o espectrofotômetro (Black-Comet C-SR-50), um computador, um programa (*SpectraWiz*) que mede o espectro da lâmpada em função do comprimento de onda, fonte de alimentação marca Keithley modelo 2400, cabos óticos de ligação e de transmissão de dados conforme figura 4.5.



- 1 – LED na PCI
- 2 – Fonte
- 3 – Termopar
- 4 – PC - LabView
- 5 – Luxímetro
- 6 – Câmara escura

Figura 4.5 – Esquema da montagem do espectrofotômetro equipado com a esfera integradora, fonte, cabos óticos e elétricos.

4.4.1 Montagem do Equipamento

Para a montagem do equipamento, os seguintes passos foram seguidos:

- 1- Escolher um local adequado para a esfera integradora, ou seja, uma superfície plana e sem vibração, com a entrada de luz em posição adequada;

2- Conectar o cabo de fibra óptica modelo F600-UV-VIS-SR com a extremidade identificada pelo espectrofotômetro, e a outra extremidade conectar na esfera integradora, tomando o cuidado de não dobrar o cabo;

3- Conectar o no espectrofotômetro com o computador onde está instalado o programa *SpectraWiz*, com cabo USB;

4- Ajustar a Fonte Keithley modelo 2400 com os cabos de ligação de alimentação dos LEDs.

4.4.2 Montagem do LED na Esfera

Para posicionar o LED adequadamente, ou seja, na entrada de luz da esfera, foi feito um suporte plástico com o diâmetro de 50mm.

A seguir são enumerados os passos para a preparação da montagem para medições dos LEDs (figura 4.4):

1- Identificar o LED previamente numerado e conectar os cabos nos terminais anodo (+) e catodo (-), tensão (V) máxima de alimentação e corrente (I) conforme definido na Tabela 4.1, de acordo com as especificações do LED;

2- Posicionar o LED no centro do suporte;

3- Preparar a fonte de acordo com a especificação do LED para alimentação do mesmo. Fixar um valor máximo para tensão (V) ou corrente (I) pela Tabela 4.1 e respeitando os limites de suas especificações, para garantir a integridade do mesmo;

4- Fixar o suporte, já com o LED montado na esfera, de forma a não permitir a entrada de luminosidade externa.

4.4.3 Verificação da Comunicação

A seguir são enumerados os passos para a verificação da comunicação entre os equipamentos e o programa *SpectraWiz*.

1- Abrir o programa *SpectraWiz*, com o LED desligado e salvar o espectro escuro (*dark-spectrum/zero dark*);

2- Acionar a fonte para alimentação, com os parâmetros previamente definidos;

3- Na tela do *SpectraWiz* tem-se um gráfico com a intensidade no eixo vertical e Comprimento de Onda λ (nm) no eixo horizontal onde será apresentado o espectro do LED;

4- Para a obtenção de um bom resultado deve-se ajustar faixa de valores do espectro, dentro do campo de visão usando o cursor na barra e os parâmetros de aquisição que são: o tempo de integração (*Integration Time*), e o número de medidas para média (*scans*).

4.4.4 Montagem da Lâmpada Incandescente e Fluorescente na Esfera

No processo de montagem da lâmpada na esfera, foi utilizado um reostato para variar-se a tensão. Para as medições, foram utilizadas três lâmpadas incandescentes de potência nominal de 7 W, 40 W e 60 W e uma lâmpada fluorescente de potencia nominal de 9 W. Para as lâmpadas incandescentes, utilizaram-se quatro valores de tensão diferentes e que foram medidas com o auxílio de um multímetro digital e portátil de 3 e ½ dígitos, sendo elas: 20 V_{rms}, 60 V_{rms}, 80 V_{rms} e 127 V_{rms}. Para a lâmpada fluorescente, adotou somente a tensão de 127 V_{rms}, pois o comportamento da curva do espectro é similar, para uma ampla faixa de valores da tensão aplicada. Um segundo multímetro, em série com a lâmpada foi empregado para medir-se a corrente rms que circula pela lâmpada.

As figuras 4.6 e 4.7 mostram a montagem para lâmpadas incandescentes, fluorescentes e diagrama.



Figura 4.6- Montagem para a lâmpada incandescente e fluorescente.

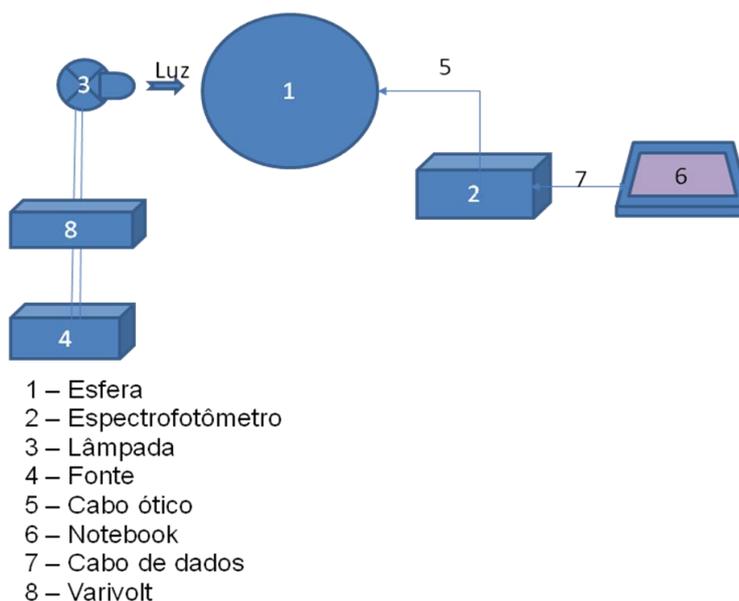


Figura 4.7- Foto e diagrama esquemático da montagem experimental para caracterização das lâmpadas.

4.5 Metodologia de Cálculo de Potência para Lâmpadas

Incandescentes

Para o cálculo da potência das lâmpadas incandescentes, o *software SpectraWiz* fornece resultados que podem ser analisados de forma parcial, isto pode ser devido a que a eficiência da lâmpada incandescente, no que diz respeito a iluminação ser muito baixa em comparação com os demais tipos abordados nesta dissertação. A lâmpada incandescente gera a maior parte de sua radiação no espectro IR em valores de λ muito maiores que o limite de 1080 nm do espectrofotômetro BLACK COMET SR da Stellarnet.

Neste sentido, um ajuste com um modelo de radiação de corpo negro, baseado na equação 4.1 é utilizado, para recuperar as informações acerca da quantidade de energia que é emitida na região do infravermelho. Faz-se necessário um ajuste das curvas de potência para uma ampla faixa de comprimento de onda, utilizando a equação do corpo negro, representada conforme a equação de Lambertian, e assim, pode-se calcular a radiância espectral, M_λ (DEWOLF, 1992):

$$M_\lambda = \frac{2c^2 \pi h}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_B T} - 1)} \quad (W m^{-2} m^{-1}) \quad (4.1)$$

Em que,

λ = comprimento de onda (m);

h = constante de Planck (J s);

c = velocidade da luz no vácuo (m s^{-1});

k_B = constante de Boltzmann (J K^{-1});

T = Temperatura absoluta (K);

A equação 4.1 está representada graficamente na figura 4.8, para algumas temperaturas selecionadas.

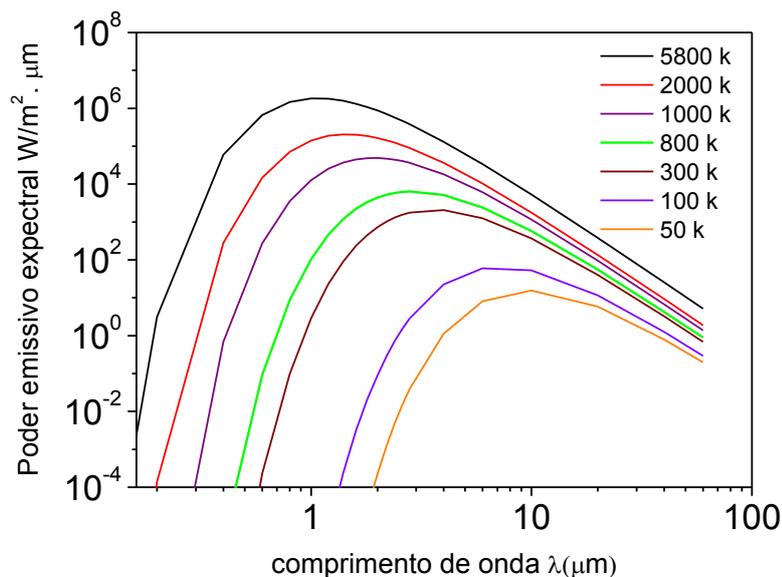


Figura 4.8- Espectro do corpo negro para várias temperaturas.

Na figura 4.8 a radiância espectral de um corpo negro que está a uma temperatura absoluta T , e é mostrada em cada curva. Observa-se que a distribuição espectral tem um máximo e que o comprimento de onda correspondente, λ_{max} , dependente da temperatura do corpo negro. Essa dependência pode ser obtida por diferenciação da equação 4.1 em relação a λ e igualando o resultado a zero, obtêm-se a equação 4.2 que é conhecida como a *lei de deslocamento de Wien*. Em que C é uma constante de radiação.

$$\lambda_{max}T = C \quad 4.2$$

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos da medição dos parâmetros necessários para caracterizar a eficiência dos diodos emissores de luz em comparação com as lâmpadas incandescente e fluorescente comerciais. Serão apresentadas as análises acerca de potência, temperatura da cor e eficiência.

5.1 Resultados e Comparações de Lâmpadas Convencionais com Lâmpadas de LEDs

5.1.1 Resultados para as Lâmpadas Incandescentes

Todos os resultados foram obtidos com base no *software SpectraWiz* e no conjunto de equipamentos adquirido da empresa StellarNet Inc. mostrado na figura 4.5. A partir do número de contagens de fótons (fotons/ $\mu\text{mol.m}^2$) nos detetores do equipamento, o programa *SpectraWiz* calcula a potência e o fluxo luminoso. Os resultados são obtidos para comprimentos de onda, λ , na faixa de 380,5 a 1080,0 nm. O tempo t considerado foi 10^{-3} s, e $A= 0.0729\text{m}^2$, definida como a área da esfera.

As figuras de 5.1a) a 5.1c) representam o espectro da potência de três lâmpadas incandescente de potência nominal de 7 W, 40 W e 60 W para quatro valores de tensão alternada aplicada. Para efeito de comparação entre as lâmpadas, o gráfico da figura 5.1d mostra o espectro de potência das lâmpadas para a tensão de operação definida comercialmente como $127 V_{\text{rms}}$.

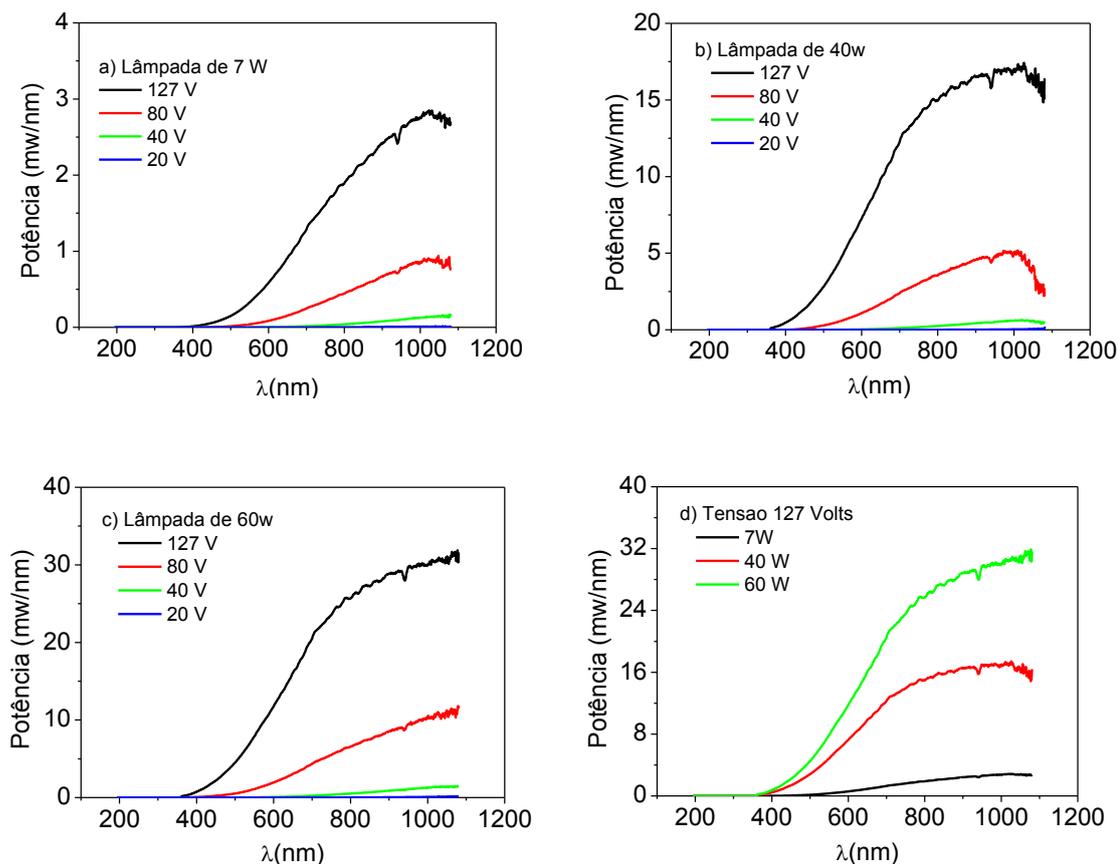


Figura 5.1– Espectros de potência para lâmpadas incandescentes de a) 7 W, b) 40 W, c) 60 W e d) de todas elas sob a tensão de $127V_{rms}$.

As figuras de 5.2a) à 5.2c) apresentam o espectro de fluxo luminoso ϕ das três lâmpadas incandescentes que estão sendo analisados. Novamente para efeito de comparação, o gráfico da figura 5.2d) foi utilizado, mostrando o espectro de ϕ das lâmpadas para uma única tensão escolhida ($127 V_{rms}$). Considera-se que o olho humano é sensível o espectro de luz que compreende de 380 a 700 nm.

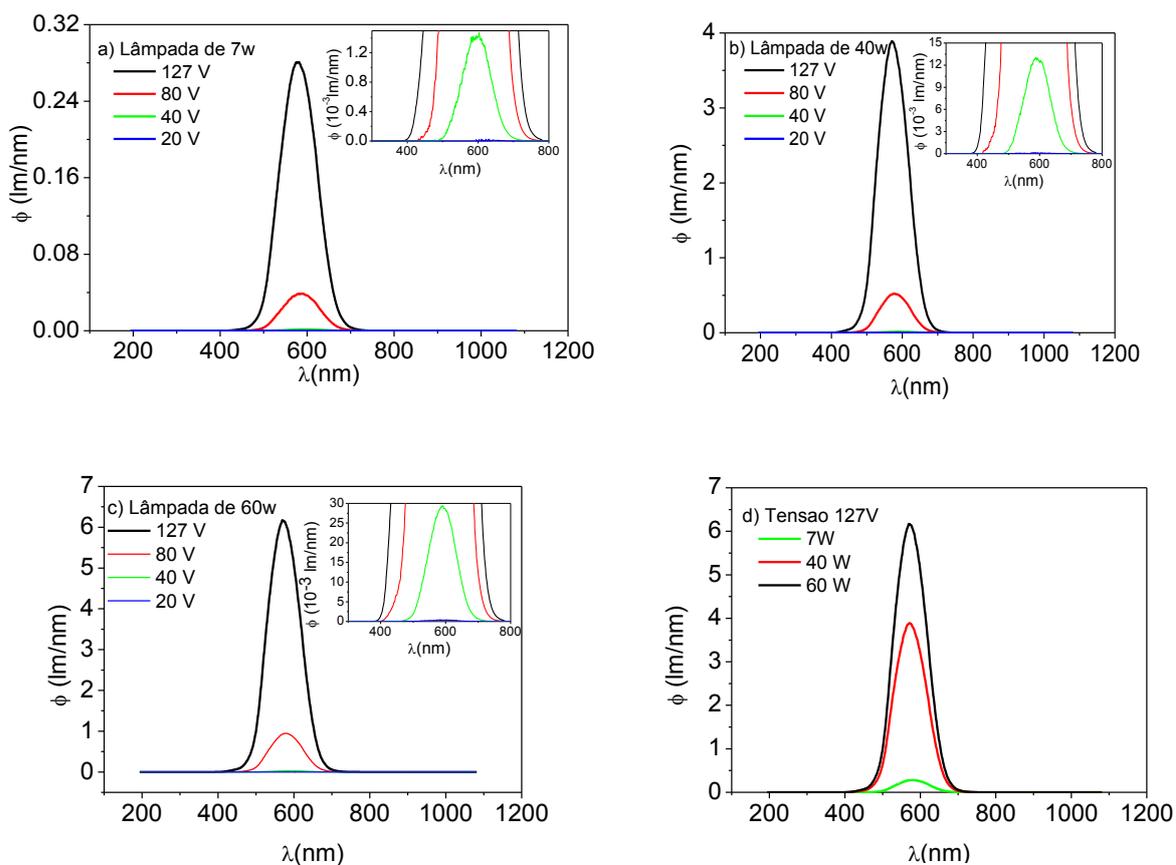


Figura 5.2– Espectros de fluxo luminoso para lâmpadas incandescentes de a) 7 W, b) 40 W e c) 60 W e d) todas as lâmpadas sob a tensão de 127 V_{rms} .

As figuras de 5.3a) à 5.3c) apresentam o espectro em intensidade das três lâmpadas incandescentes que estão sendo analisadas. Novamente, para efeito de comparação, o gráfico da figura 5.3d) foi utilizado, mostrando o espectro em intensidade das lâmpadas para a tensão de 127 V_{rms}.

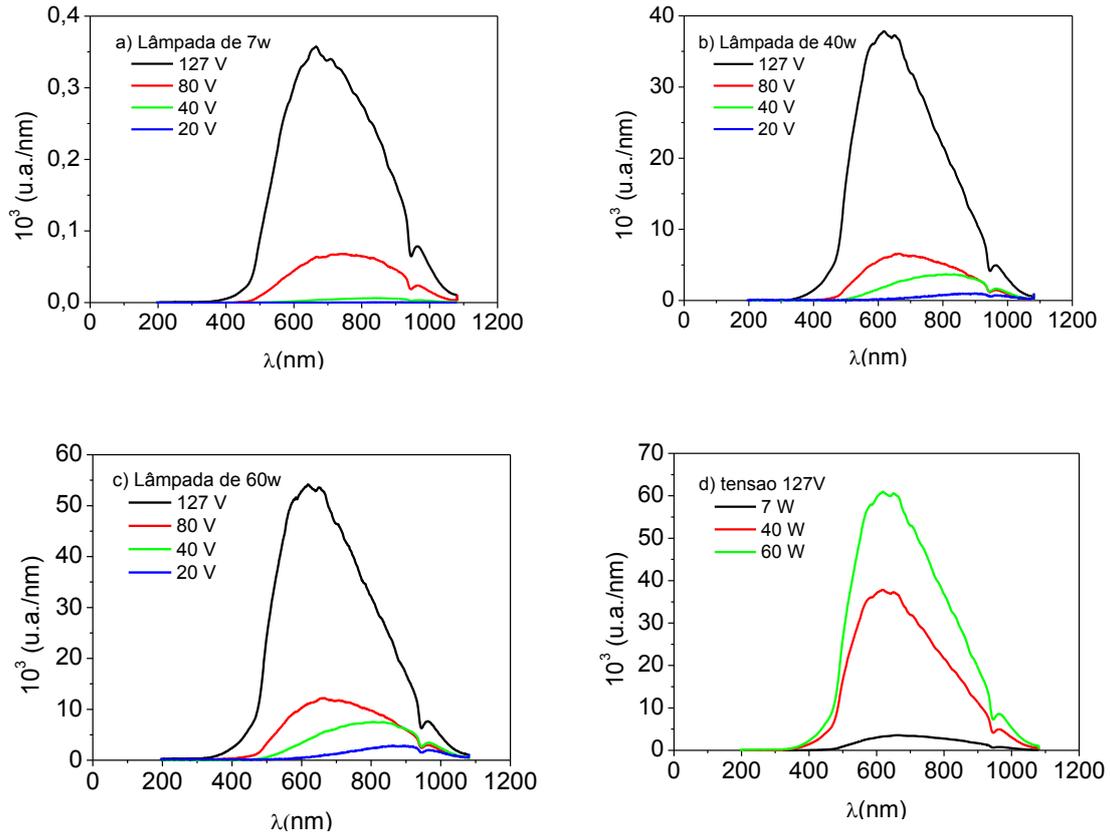


Figura 5.3– Espectros de intensidade para lâmpadas incandescentes de a) 7 W, b) 40 W e c) 60 W e d) de todas elas sob tensão 127 V_{rms}.

As tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 mostram a porcentagem de emissão de luz em vários comprimentos de onda para as lâmpadas incandescentes. Essa porcentagem foi distribuída conforme as regiões UV-VIS-IR. Em que UV é a região ultravioleta, VIS é a região do visível e IR é a região do infravermelho. Para obter a quantidade de emissão em potência P_r (potência por região) foi definida a seguinte equação:

$$P_r = \int_x^{x'} F(x) dx \quad (5.1)$$

Em que, x e x' compreendem cada uma das regiões espectrais UV-VIS-IR, e $F(x)$ é o valor da potência em função de λ dado em W/nm.

Tabela 5.1 – Distribuição da emissão de luz na região UV-VIS-IR para a lâmpada de 7W

Lâmpadas Incandescentes - 7W						
	Ultravioleta (UV)	Visível (VIS)	Infravermelho (IR)	Potência luminosa (W)		ϕ (lm)
				P_{medida}	$P = V \times I$	
127V	1,529x10 ⁻⁴ 0,015%	0,241 24,16%	0,755 75,37%	0,993	6,43	29,27
80V	0	0,043 16,66%	0,214 83,34%	0,257	3,06	4,02
40V	1,320x10 ⁻⁸ 4,27E-5%	0,00256 8,28%	0,029 91,72%	0,031	0,992	0,14
20V	0	6,292x10 ⁻⁵ 3,64%	0,0017 95,95%	0,0017	0,324	4,87x10 ⁻⁴

Tabela 5.2 – Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para a lâmpada de 40W

Lâmpadas Incandescentes - 40W						
	Ultravioleta (UV)	Visível (VIS)	Infravermelho (IR)	Potência luminosa (W)		ϕ (lm)
				P_{medida}	$P = V \times I$	
127V	0,0060 0,079%	2,569 33,78%	5,029 66,14%	7,604	33,02	409,32
80V	0	0,444 25,27%	1,315 74,73%	1,759	15,20	54,22
40V	0	0,0186 12,01%	0,137 87,99%	0,155	4,80	1,30
20V	2,495x10 ⁻⁶ 0,037%	2,289x10 ⁻⁴ 3,31%	0,0067 96,65%	0,0069	0,160	0,0095

Tabela 5.3 – Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para a lâmpada de 60W

Lâmpadas Incandescentes - 60W						
	Ultravioleta (UV)	Visível (VIS)	Infravermelho (IR)	Potência luminosa (W)		ϕ (lm)
				P_{medida}	$P = V \times I$	
127V	0,0094 0,072%	4,244 32,24%	8,911 67,69%	13,164	50,80	644,65
80V	$8,983 \times 10^{-4}$ 0,025%	0,8099 22,78%	2,745 77,20%	3,556	24,80	98,85
40V	0	0,0397 11,61%	0,302 88,40%	0,342	8,00	3,002
20V	$9,826 \times 10^{-8}$ 5,07E-4%	$8,549 \times 10^{-4}$ 4,81%	0,0184 95,15%	0,019	2,60	0,043

Dos resultados pode-se fazer uma análise sobre a média das porcentagens de cada medida de tensão; Para tal, consideraremos o infravermelho como calor. Para a lâmpada de 7 W, nota-se que aproximadamente 13% é luz e 87% é calor; Para a lâmpada de 40 watts, aproximadamente 19% é luz e 81% é calor; Para a de 60 watts, 18% contra 82%.

Observa-se que, apesar das lâmpadas de maior potência nominal consumirem mais energia, elas são menos eficientes que as lâmpadas de menor potência nominal, pois estas têm muito mais energia transformada em forma de calor do que em luz.

Durante o processo de medição foi observado que, para as lâmpadas incandescentes, os resultados não estariam completos, visto que a faixa de comprimento de onda do *SpectraWiz* estende-se a apenas 1080 nm. Como a maior parte da emissão em potência se concentra na região do infravermelho, significando que uma grande quantidade de informação com relação ao consumo de energia, estava sendo perdida. Portanto, para recuperar estas informações, utilizou-se a equação do corpo negro (equação 4.1) para ajustar o espectro da potência para comprimentos de ondas maiores.

As figuras 5.4a) à 5.4d) apresentam o espectro de potência da lâmpada incandescente de 60 watts para a tensão de 20 V_{rms}, 40 V_{rms}, 80 V_{rms} e 127 V_{rms}, compreendendo uma grande faixa de comprimento de onda, de 100 para 25000 nm. Assim pode-se obter a quantidade de energia elétrica consumida pela respectiva lâmpada.

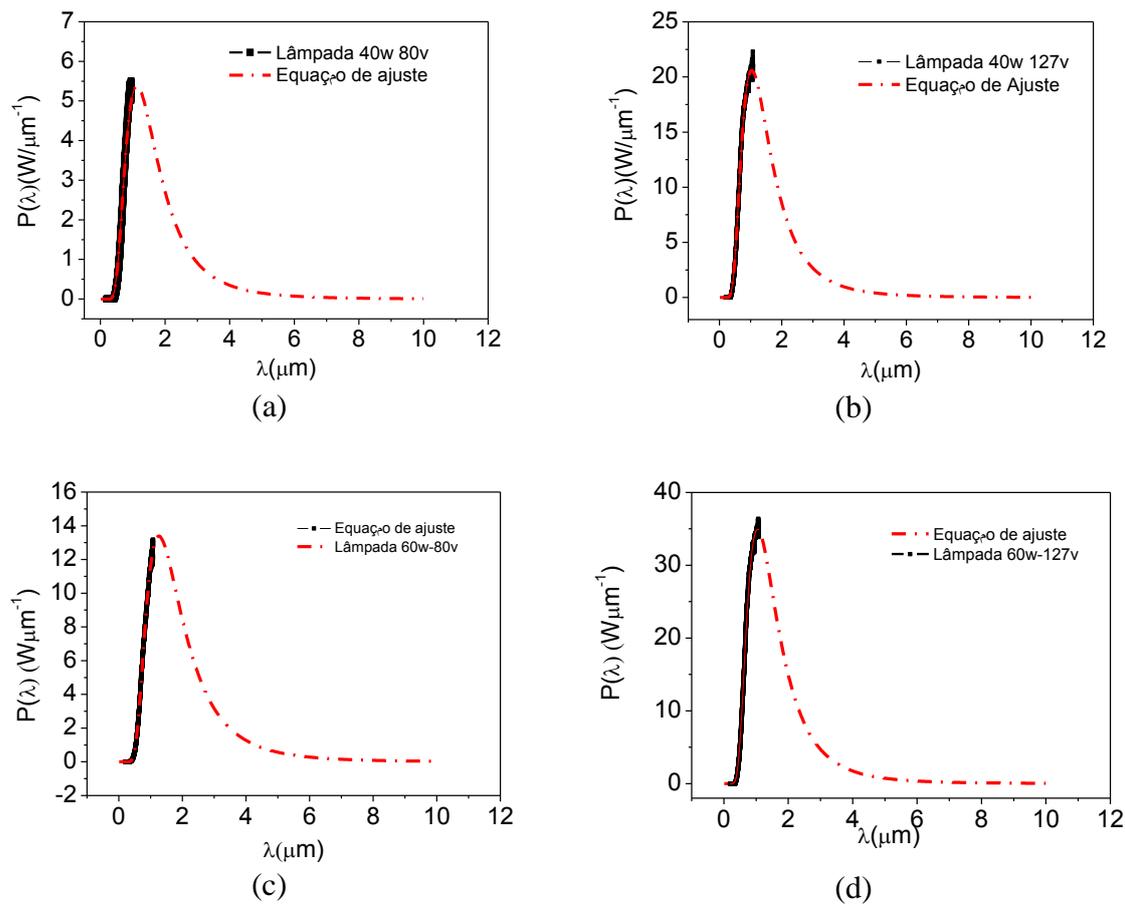


Figura 5.4– Ajuste do espectro de potência das lâmpadas incandescentes de (a) e (b) 40 W e de (c) e (d) 60 W para as tensões de 80 V_{rms} e 127 V_{rms} , com o espectro do corpo negro.

Tabela 5.4 – Comparação das medidas de potência para lâmpadas incandescentes e respectivas temperaturas de ajuste

Lâmpadas Incandescentes	P_{medida} (SpectraWiz)		$P_{calculada}$ (equação 4.1)	$P = V \times I$ W	Emissividade ϵ	Temperatura K
7W – 127V _{rms}	0,99	1,13	6,11	6,44	0,04295	2361,51
40W – 80V _{rms}	1,76	1,98	8,61	15,2	0,04438	2550,78
40W – 127V _{rms}	7,60	8,88	30,29	33,02	0,11105	2776,40
60W – 40V _{rms}	0,34	0,39	6,09	8,0	0,12757	1800,56
60W – 80V _{rms}	3,56	4,0	23,91	24,8	0,19167	2285,45
60W – 127V _{rms}	13,17	14,78	52,05	50,8	0,25051	2740,90

A segunda coluna da tabela 5.4 mostra os valores da potência obtida com as medições usando o software SpectraWiz, em duas colunas. Na segunda coluna, os valores medidos foram trabalhados levando em consideração os dados de transmitância e emissividade da lâmpada incandescente.

A Figura 5.5 mostra o CCT (Temperatura da cor) medida pelo software *SpectraWiz* com relação à tensão aplicada.

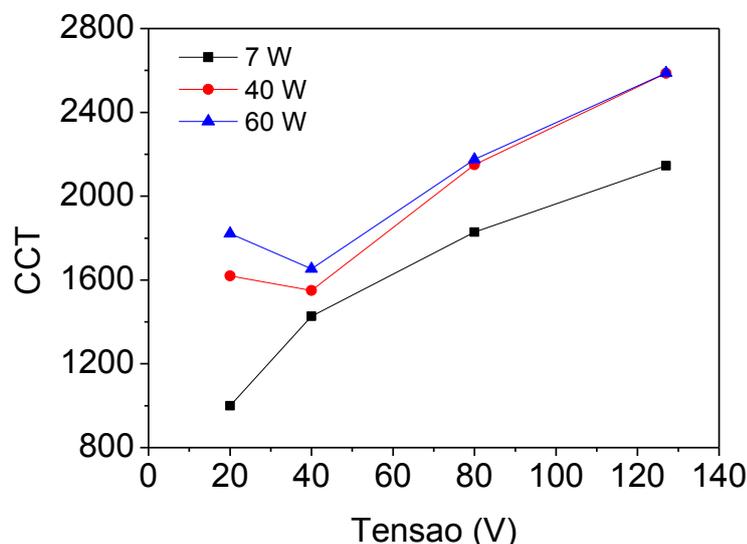


Figura 5.5 – Temperatura da cor para lâmpadas incandescentes

Observa-se na figura 5.5 que a temperatura da cor das lâmpadas incandescentes, não ultrapassa 2850 K, indicando que está próximo da extremidade avermelhada da escala, conforme figura 3.6. Embora haja uma pequena diferença entre a temperatura obtida pelo programa e a ajustada pela equação 4.1 o comportamento delas com a potência e tensão aplicada às lâmpadas é similar e a diferença deve-se principalmente ao fato de não termos muita informação na região do infravermelho, sobretudo acima de 1080 nm. Assim, pode-se inferir que a metodologia empregada reproduziu bem as previsões da teoria de corpo negro da Mecânica Quântica, permitindo, assim, avaliar de forma razoável a distribuição de potência de uma lâmpada incandescente.

5.1.2 Resultados para as Lâmpadas Fluorescentes

Sabe-se que a maior parte de energia fornecida pelas lâmpadas fluorescentes é transformada em luz, diferentemente das lâmpadas incandescentes, onde a maior parte da energia é transformada em calor. Ao medir o espectro de luz das lâmpadas fluorescentes, notou-se que o equipamento utilizado não conseguia medir toda a intensidade de emissão, pois esta saturava para todos os espectros obtidos, assim sendo, foi necessário empregar um dispositivo de atenuação às medidas de espectros das

lâmpadas fluorescentes. Para calcular um fator de correção de intensidade da emissão de luz pelas lâmpadas fluorescentes, utilizamos uma lâmpada incandescente para calibrar o fator de atenuação do dispositivo empregado.

Foram escolhidas, duas lâmpadas fluorescentes para a obtenção do espectro em vários comprimentos de onda (figura 5.6). As medidas foram obtidas com tensão (V_{rms}) de 127 V_{rms} e corrente (I) de 0,054 A_{rms} . No entanto, como não houve diferenças significativas entre os espectros de ambas as lâmpadas, optou-se por apresentar apenas os resultados para uma lâmpada fluorescente de 9 W.

A tabela 5.5 mostra a porcentagem de emissão de luz em vários comprimentos de onda para a lâmpada fluorescente, subdivididas nas regiões UV-VIS-IR. A emissão em potência e ϕ também é apresentada nas duas últimas colunas, respectivamente. E a tabela 5.6 mostra o diagrama de cromaticidade e CCT (Temperatura da cor) para lâmpadas fluorescentes.

Tabela 5.5 – Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR

Lâmpada Fluorescente – 9 W						
	Ultravioleta (UV)	Vísivel (VIS)	Infravermelho (IR)	Potência W		ϕ lm
				P_{medida}	$P = VxI$	
127V	0,044 0,63%	5,99 86,09%	0,93 13,29%	6,97	6,85	312

Tabela 5.6 – Coordenadas cromáticas e temperatura da cor para lâmpada fluorescente

Lâmpada Fluorescente - 9W					
Potência W	Tensão V_{rms}	Corrente A_{rms}	coord. X	coord. y	CCT K
9	127,0	0,054	0,476	0,427	2626

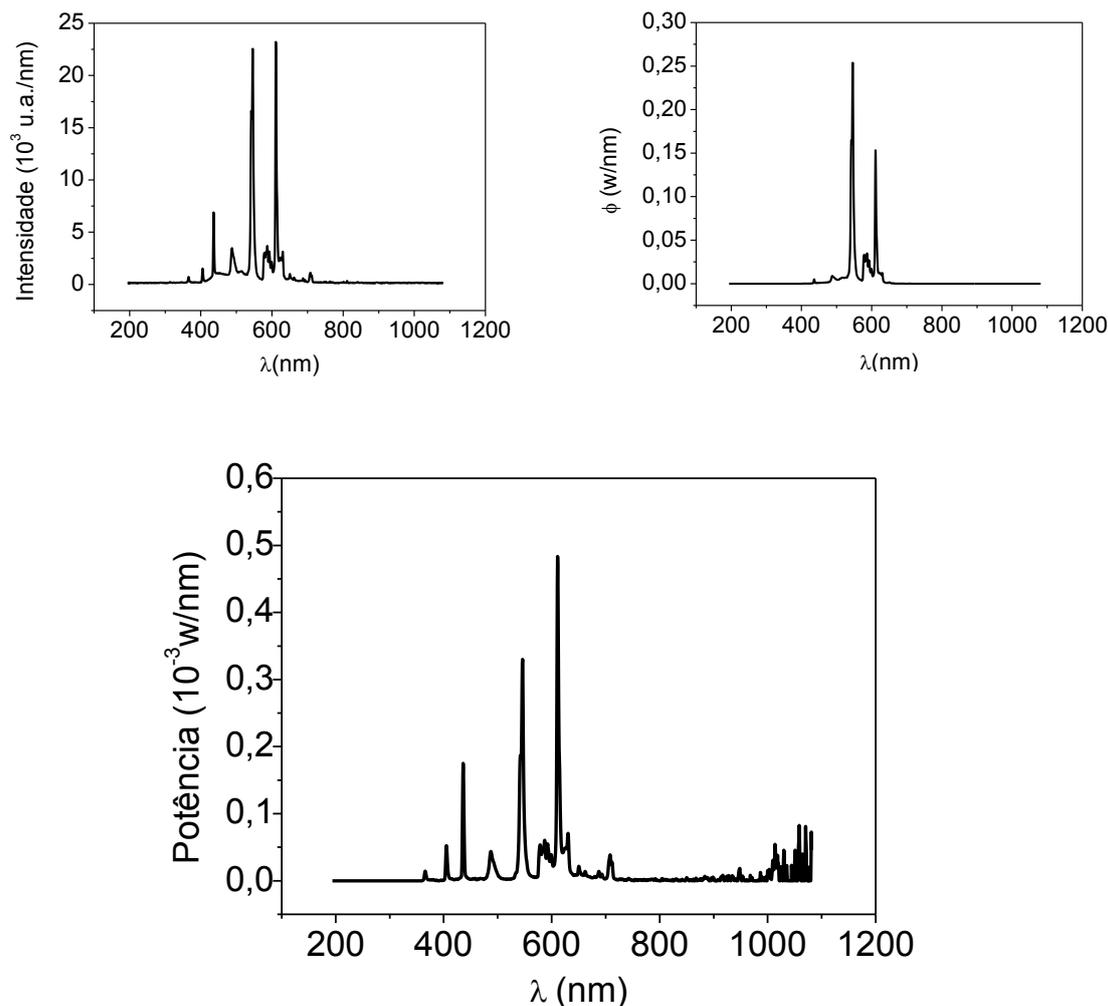


Figura 5.6– Espectros em (a) intensidade, (b) do fluxo luminoso e (c) da potência irradiada para a lâmpada fluorescente de 9 W.

5.1.3 Resultados para LEDs

Os resultados foram obtidos usando 4 modelos de LEDs escolhidos, para cada um dos modelos, dois LEDs foram testados e avaliados, com exceção de um modelo, em que 29 LEDs foram escolhidos de forma a poder realizar estatísticas, visto que uma lâmpada como as fabricadas pela SISVÔO contém dezenas de LEDs. Para cada um dos modelos, foi variada a corrente utilizando-se uma fonte KEITHLEY modelo 2400 e, conforme tabela 4.1, lida a tensão correspondente aplicada pela própria fonte.

As figuras de 5.7 a 5.9 mostram os resultados obtidos para intensidade (u.a.), fluxo luminoso e potência, para cada um dos modelos de LEDs, respectivamente.

Dos modelos de LEDs (com exceção do modelo 4), foram medidas duas amostras, como o espectro das amostras tem similaridades no comportamento, não justifica a necessidade de ilustrar graficamente todas as amostras. Foi adotado ilustrar apenas uma. No entanto, a porcentagem de emissão na região UV-VIS-IR, é mostrada para todas as amostras, conforme as tabelas 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10.

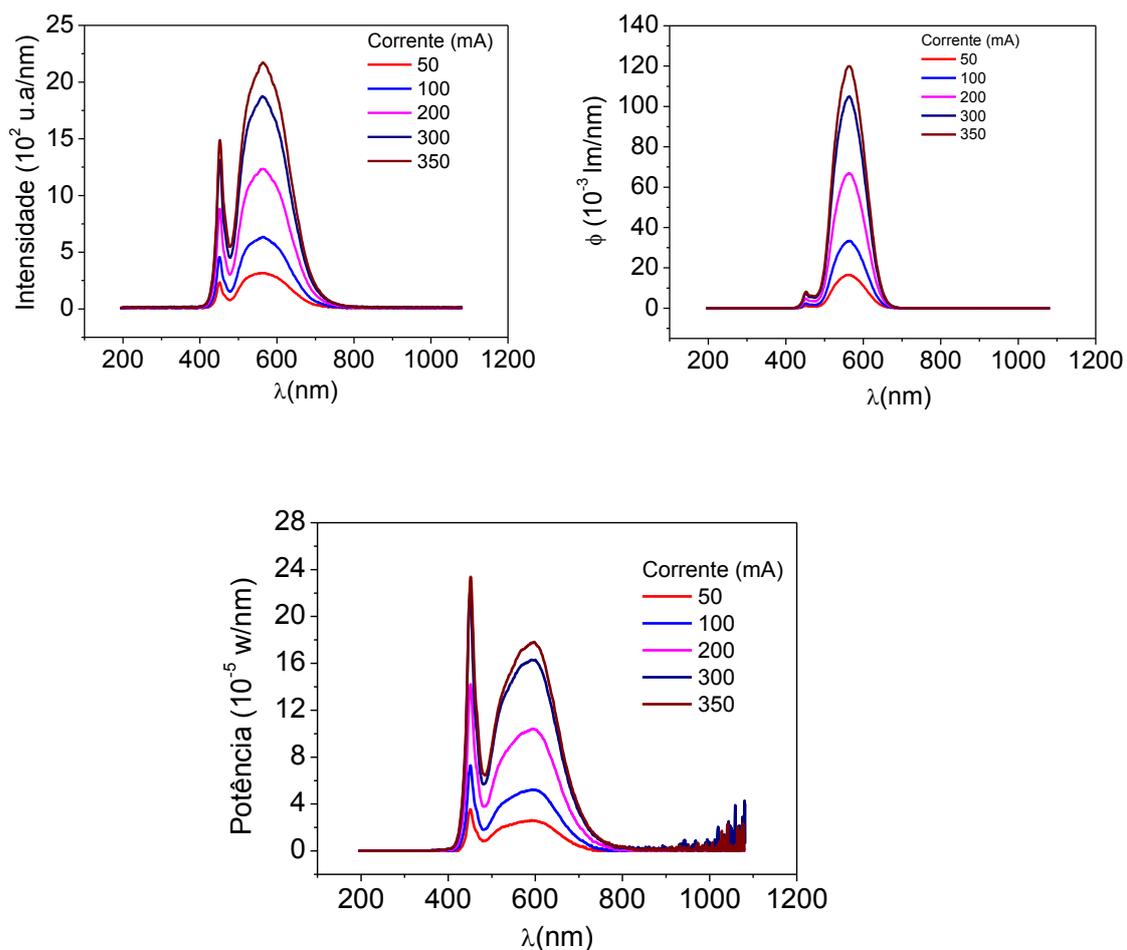


Figura 5.7– Espectros em (a) intensidade, (b) do fluxo luminoso e (c) da potência irradiada para o modelo 1- LED 1

Pode se observar que a variação da corrente não altera a faixa de comprimento de onda e sim a potência irradiada, portanto o LED mantém a sua temperatura da cor.

Tabela 5.7 – Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para lâmpadas de LEDs Modelo 1 para duas amostras.

LEDs – modelo 1 – NVSL219AJH3E (LED 1)								
mA	20	50	100	150	200	250	300	350
UV	0,00	0,00	0,00	$2,88 \times 10^{-6}$	$5,54 \times 10^{-5}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$2,14 \times 10^{-4}$	$1,68 \times 10^{-4}$
	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,03%	0,04%	0,06%	0,05%
VIS	$1,7 \times 10^{-2}$	$4,95 \times 10^{-4}$	0,10286	0,1551	0,20687	0,25999	0,32493	0,35322
	100,00%	100,00%	99,99%	99,83%	99,54%	99,03%	95,71%	97,67%
IR	0,00	0,00	$6,17 \times 10^{-6}$	$2,54 \times 10^{-4}$	$9,09 \times 10^{-4}$	0,00243	0,01435	0,00827
	0,00%	0,00%	0,01%	0,16%	0,44%	0,93%	4,23%	2,29%
W	0,017	$4,95 \times 10^{-2}$	$1,03 \times 10^{-1}$	$1,55 \times 10^{-1}$	$2,08 \times 10^{-1}$	$2,63 \times 10^{-1}$	$3,39 \times 10^{-1}$	$3,62 \times 10^{-1}$
ϕ	5,81	16,08	32,50	48,76	65,24	82,34	101,83	115,91

LEDs – modelo 1 – NVSL219AJH3E (LED 2) - continuação da tabela 5.7								
mA	20	50	100	150	200	250	300	350
UV	$7,64 \times 10^{-6}$	$5,87 \times 10^{-6}$	$6,05 \times 10^{-5}$	$7,96 \times 10^{-5}$	$9,34 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-4}$	$1,71 \times 10^{-4}$	$2,21 \times 10^{-4}$
	0,027%	0,010%	0,047%	0,043%	0,039%	0,052%	0,049%	0,049%
VIS	$2,36 \times 10^{-2}$	$5,94 \times 10^{-2}$	0,12133	0,17751	0,23237	0,28526	0,34104	0,44268
	82,34%	97,82%	94,20%	95,74%	97,39%	97,09%	96,90%	97,81%
IR	$5,06 \times 10^{-3}$	$1,35 \times 10^{-3}$	$7,50 \times 10^{-3}$	0,00776	0,00613	0,00839	0,01073	0,0097
	17,69%	2,22%	5,82%	4,19%	2,57%	2,87%	3,05%	2,14%
W	$2,86 \times 10^{-2}$	$6,07 \times 10^{-2}$	$1,29 \times 10^{-1}$	$1,85 \times 10^{-1}$	$2,39 \times 10^{-1}$	$2,94 \times 10^{-1}$	$3,52 \times 10^{-1}$	$4,53 \times 10^{-1}$
ϕ	7,32	18,86	37,83	55,93	74,60	90,46	105,83	127,61

Pode-se observar na tabela 5.7 que a maior porcentagem de emissão se encontra no campo do visível e corresponde à faixa de aparência da cor para LEDs de luminescência branca, caracterizando uma consistência de cor, isso mostra o LED como base para uma iluminação com qualidade.

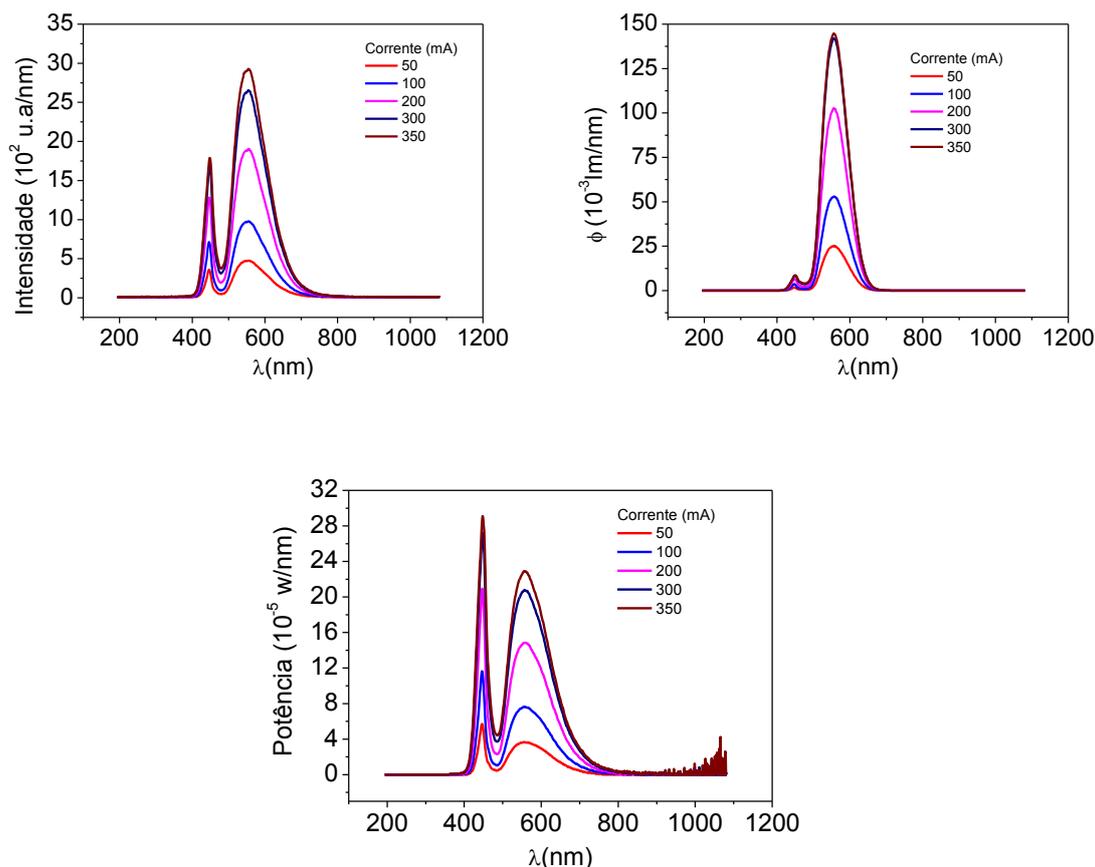


Figura 5.8– Espectros em (a) intensidade, (b) do fluxo luminoso e (c) da potência irradiada para o modelo 2 – LED 1

Tabela 5.8 – Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para lâmpadas de LEDs Modelo 2 para duas amostras.

LEDs – modelo 2 NVSW119A (LED 1)								
mA	20	50	100	150	200	250	300	350
UV	0,0	0,00	$2,16 \times 10^{-5}$	$6,08 \times 10^{-6}$	$5,18 \times 10^{-5}$	$1,61 \times 10^{-4}$	$2,06 \times 10^{-4}$	0,000270
	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,02%	0,05%	0,06%	0,07%
VIS	$2,10 \times 10^{-2}$	$6,12 \times 10^{-2}$	$1,30 \times 10^{-1}$	$1,92 \times 10^{-1}$	$2,53 \times 10^{-1}$	$3,09 \times 10^{-1}$	$3,57 \times 10^{-1}$	0,396490
	100,0%	98,8%	98,3%	99,6%	99,6%	99,0%	98,7%	97,7%
IR	$4,76 \times 10^{-6}$	$4,20 \times 10^{-5}$	$2,56 \times 10^{-3}$	$5,19 \times 10^{-4}$	$1,13 \times 10^{-3}$	$2,48 \times 10^{-3}$	$4,26 \times 10^{-3}$	0,009310
	0,02%	0,07%	1,94%	0,27%	0,44%	0,79%	1,18%	2,29%
W	0,021	0,062	0,132	0,193	0,254	0,312	0,362	0,406
ϕ	7,41	21,15	44,74	66,01	86,22	105,87	119,71	122,15

LEDs – modelo 2 NVSW119A (LED 2) - continuação tabela 5.8								
mA	20	50	100	150	200	250	300	350
UV	$8,49 \times 10^{-7}$	$6,61 \times 10^{-7}$	$2,51 \times 10^{-5}$	$6,53 \times 10^{-5}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-4}$	$2,14 \times 10^{-4}$	$2,70 \times 10^{-4}$
	0,005%	0,001%	0,025%	0,043%	0,057%	0,052%	0,073%	0,077%
VIS	0,01784	0,04814	0,09882	0,14866	0,19983	0,24433	0,28572	0,3388
	99,1%	98,2%	98,8%	97,8%	98,4%	98,5%	97,8%	97,4%
IR	$5,14 \times 10^{-4}$	$8,23 \times 10^{-4}$	0,00154	0,0035	0,00353	0,00379	0,00562	0,0092
	2,86%	1,68%	1,54%	2,30%	1,74%	1,53%	1,93%	2,64%
W	$1,80 \times 10^{-2}$	$4,90 \times 10^{-2}$	$1,00 \times 10^{-1}$	$1,52 \times 10^{-1}$	$2,03 \times 10^{-1}$	$2,48 \times 10^{-1}$	$2,92 \times 10^{-1}$	$3,48 \times 10^{-1}$
ϕ	6,14	16,46	33,46	51,73	68,21	82,29	97,81	115,13

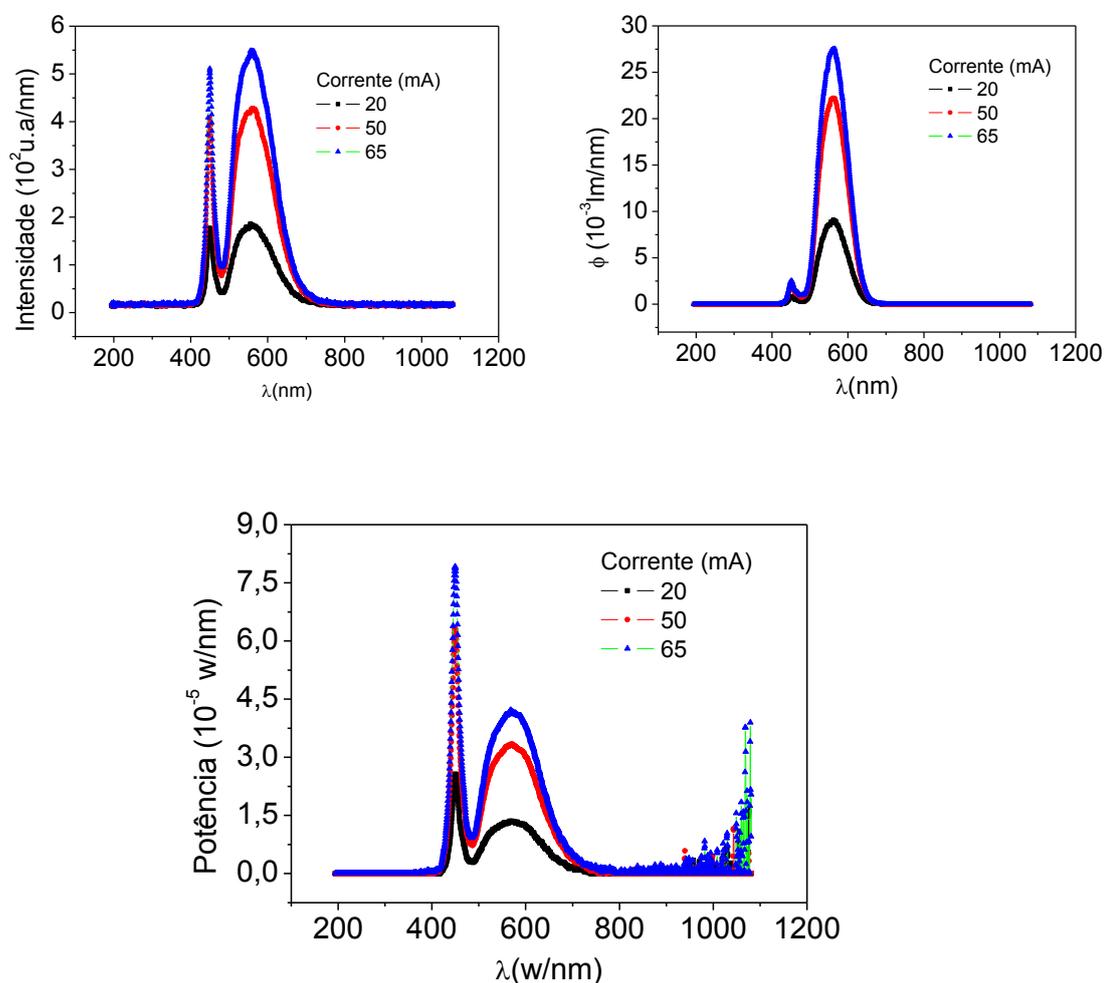


Figura 5.9– Espectros em (a) intensidade, (b) do fluxo luminoso e (c) da potência irradiada para o modelo 3 – LED 1

Tabela 5.9 – Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para lâmpadas de LEDs Modelo 3 para duas amostras.

LEDs – Modelo 3 NS2W757A				
	mA	20	50	65
LED 1	UV	1,22x10 ⁻⁵ 0,05%	2,89x10 ⁻⁶ 0%	6,74x10 ⁻⁵ 0,08%
	VIS	0,02472 95,88%	0,06164 98,86%	0,07822 93,84%
	IR	0,00105 4,07%	7,09 x10 ⁻⁴ 1,14%	0,00507 6,08%
	W	0,0258	0,0624	0,0834
	φ	8,09	20,17	24,98
		mA	20	50
LED 2	UV	6,91x10 ⁻⁶ 0,02%	0 0,0%	0 0,0%
	VIS	0,02836 96,66%	0,06377 100,00%	0,0794 100,00%
	IR	9,73 x10 ⁻⁴ 3,32%	0 0%	0 0%
	W	0,0293	0,0638	0,0879
	φ	9,29	21,7	28,06
		mA	20	50

Pode-se observar na tabela 5.9 que os LEDs têm maior variação da porcentagem de emissão que se encontra no campo do visível. Esta variação é um indicativo de qualidade dos LEDs.

As medições com 29 amostras de LEDs mostradas na figura 5.10 indicam a coerência do desempenho dos LEDs para garantir uma iluminação homogênea e com qualidade.

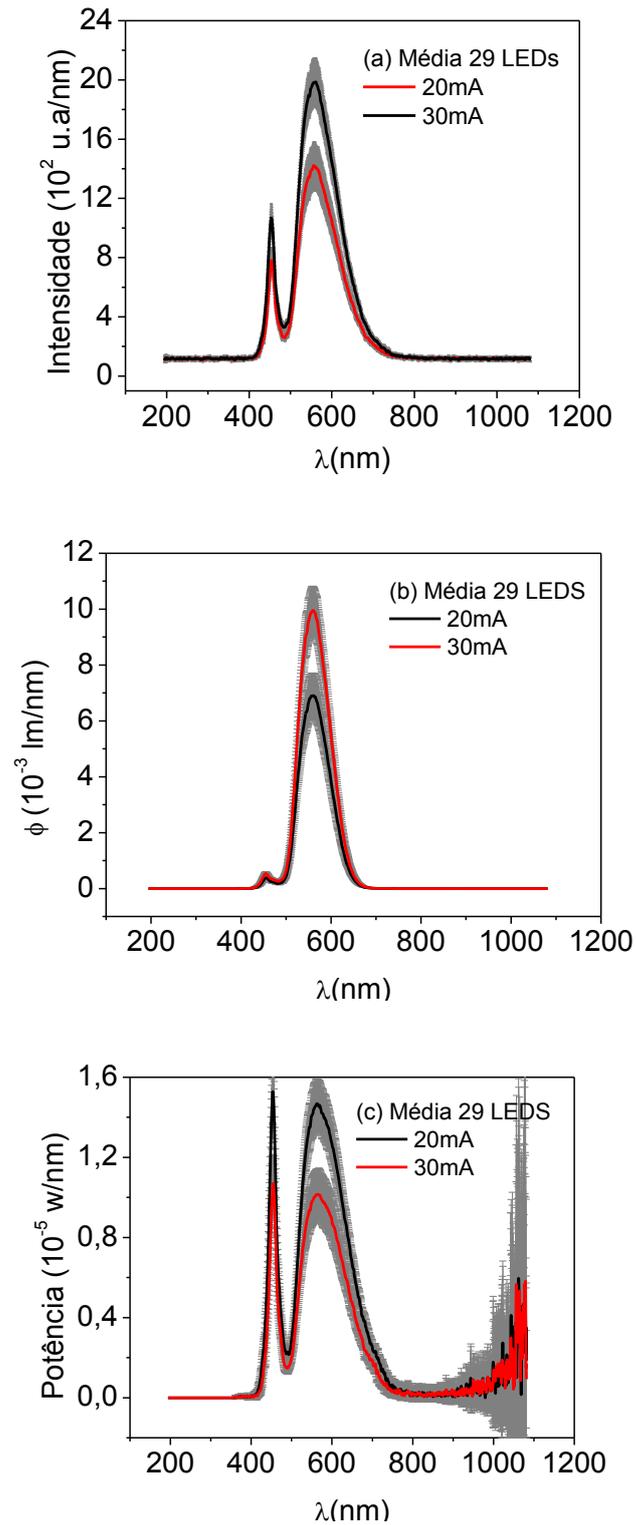


Figura 5.10 – Espectros em (a) intensidade, (b) do fluxo luminoso e (c) da potência irradiada para o modelo 4 – Média de 29 LEDs

Tabela 5.10 – Porcentagem de emissão de luz na região UV-VIS-IR para lâmpadas de LEDs Modelo 4 BLHZD32XN da BRIGHT LED

ELECTRONICS CORP. utilizado pela SISVÔO para fabricação das lâmpadas de LEDs

(Amostra com 29 LEDs , I = 20mA)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
UV	2,14x10 ⁻⁵	2,06x10 ⁻⁵	2,1x10 ⁻⁵	8,39x10 ⁻⁶	1,28x10 ⁻⁵	8,02x10 ⁻⁶	3,05x10 ⁻⁶	2,70x10 ⁻⁵	1,25x10 ⁻⁵	2,19x10 ⁻⁵	1,56x10 ⁻⁵	3,29x10 ⁻⁵	1,11x10 ⁻⁵	2,64x10 ⁻⁵	1,11x10 ⁻⁵
	0,11%	0,06%	0,10%	0,04%	0,06%	0,04%	0,02%	0,12%	0,06%	0,10%	0,08%	0,16%	0,06%	0,13%	0,06%
VIS	0,0175	0,03514	0,01792	0,01807	0,0183	0,01717	0,01579	0,01809	0,01799	0,01687	0,01602	0,01708	0,01699	0,01705	0,01699
	86,39%	96,27%	83,35%	91,26%	92,42%	91,82%	98,69%	82,60%	87,33%	80,33%	87,07%	83,32%	85,38%	84,41%	85,38%
IR	0,00292	0,00175	0,00363	0,00167	0,00436	0,00151	1,67 x10 ⁻⁴	0,00373	0,00258	0,00407	0,00238	0,00333	0,00299	0,00316	0,00299
	14,46%	4,79%	16,88%	8,43%	22,02%	8,07%	1,04%	17,03%	12,52%	19,38%	12,93%	16,24%	15,03%	15,64%	15,03%
W	0,0202	0,0365	0,0215	0,0198	0,0198	0,0187	0,016	0,0219	0,0206	0,021	0,0184	0,0205	0,0199	0,0202	0,0199
φ	6,15	2,65	6,34	6,45	6,2	5,89	5,6	5,93	6,09	6,25	5,95	5,89	5,89	5,99	5,89
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
UV	1,72x10 ⁻⁵	1,34x10 ⁻⁵	1,72x10 ⁻⁵	4,99x10 ⁻⁷	4,90x10 ⁻⁶	2,37x10 ⁻⁴	4,90x10 ⁻⁶	1,82x10 ⁻⁶	1,85x10 ⁻⁶	2,38x10 ⁻⁶	1,89x10 ⁻⁵	2,88x10 ⁻⁵	1,89x10 ⁻⁵	2,13x10 ⁻⁵	
	0,09%	0,06%	0,09%	0,00%	0,03%	1,41%	0,03%	0,01%	0,01%	0,12%	0,11%	0,16%	0,11%	0,11%	
VIS	0,01632	0,0178	0,01632	0,01592	0,01619	0,0162	0,01619	0,01681	0,0162	0,01691	0,01394	0,01325	0,01394	0,01702	
	85,45%	81,28%	85,45%	97,67%	98,12%	96,43%	98,12%	91,36%	98,78%	88,07%	79,66%	74,36%	79,66%	84,68%	
IR	0,00281	0,00392	0,00281	3,86x10 ⁻⁴	3,25x10 ⁻⁴	2,37x10 ⁻⁴	3,25x10 ⁻⁴	1,68 x10 ⁻³	2,37x10 ⁻⁴	0,00223	0,00348	0,00454	0,00348	0,00299	
	14,71%	17,90%	14,71%	2,37%	1,97%	1,41%	1,97%	9,13%	1,45%	11,61%	19,89%	74,36%	19,89%	14,88%	
W	0,0191	0,0219	0,0191	0,0163	0,0165	0,0168	0,0165	0,0184	0,0164	0,0192	0,0175	0,0178	0,0172	0,0201	
φ	5,66	6,25	5,66	5,86	5,72	5,8	5,72	5,85	5,78	5,75	5,64	6,09	6,14	5,84	

(Amostra com 29 LEDs , I = 30mA)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
UV	2,37x10 ⁻⁵	1,60 x10 ⁻⁵	1,93x10 ⁻⁵	5,91x10 ⁻⁶	5,50x10 ⁻⁶	4,87x10 ⁻⁶	1,34x10 ⁻⁵	6,38x10 ⁻⁶	1,35x10 ⁻⁵	2,22x10 ⁻⁵	1,09x10 ⁻⁵	2,03x10 ⁻⁵	7,35x10 ⁻⁶	4,27x10 ⁻⁵	7,35x10 ⁻⁶
	0,09%	0,09%	0,07%	0,02%	0,02%	0,02%	0,05%	0,02%	0,05%	0,08%	0,04%	0,07%	0,03%	0,15%	0,03%
VIS	0,02429	0,01444	0,024	0,02587	0,02511	0,02439	0,02561	0,02502	0,02596	0,025	0,02346	0,02438	0,02349	0,02479	0,02349
	91,66%	82,99%	86,64%	95,46%	85,41%	83,81%	94,15%	93,71%	90,14%	88,65%	92,73%	85,24%	88,98%	89,82%	88,98%
IR	0,00226	0,00305	0,00364	0,00123	4,28x10 ⁻³	0,00465	0,00152	0,00163	0,00277	0,00307	0,00183	0,00409	0,00291	0,00279	0,00291
	8,53%	17,53%	13,14%	4,54%	14,56%	15,98%	5,59%	6,10%	9,62%	10,89%	7,23%	14,30%	11,02%	10,11%	11,02%
W	0,0265	0,0174	0,0277	0,0271	0,0294	0,0291	0,0272	0,0267	0,0288	0,0282	0,0253	0,0286	0,0264	0,0276	0,0264
φ	8,48	5,16	8,68	8,98	8,85	8,45	8,74	8,61	8,99	8,49	8,76	8,31	8,25	8,66	8,25
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
UV	0,00279	1,60x10 ⁻⁵	0,00279	8,72 x10 ⁻⁶	9,76 x10 ⁻⁸	0,00	8,72 x10 ⁻⁶	1,22x10 ⁻⁵	1,18x10 ⁻⁵	2,68x10 ⁻⁵	6,91x10 ⁻⁶	5,42x10 ⁻⁶	7,66x10 ⁻⁶	1,07x10 ⁻⁵	
	10,61%	0,06%	10,61%	0,03%	0,00%	0,00%	0,03%	0,05%	0,05%	0,10%	0,03%	0,02%	0,03%	0,04%	
VIS	0,02238	0,02578	0,02238	0,02523	0,02333	0,02465	0,02523	0,02484	0,02442	0,02365	0,02374	0,02439	0,02456	0,02386	
	85,10%	89,83%	85,10%	89,47%	98,86%	99,00%	89,47%	95,17%	97,29%	86,31%	94,21%	95,65%	95,19%	96,60%	
IR	0,00383	0,00285	0,00383	0,00299	2,71x10 ⁻⁴	2,44x10 ⁻⁴	0,00299	0,0012	7,01x10 ⁻⁴	0,00364	0,00134	0,00113	0,00119	8,79 x10 ⁻⁴	
	14,56%	9,93%	14,56%	10,60%	1,15%	0,98%	10,60%	4,60%	2,79%	13,28%	5,32%	4,43%	4,61%	3,56%	
W	0,0263	0,0287	0,0263	0,0282	0,0236	0,0249	0,0282	0,0261	0,0251	0,0274	0,0252	0,0255	0,0258	0,0247	
φ	7,93	8,88	8,66	8,79	8,06	8,46	8,79	8,53	8,51	8,23	7,64	8,38	8,43	8,72	

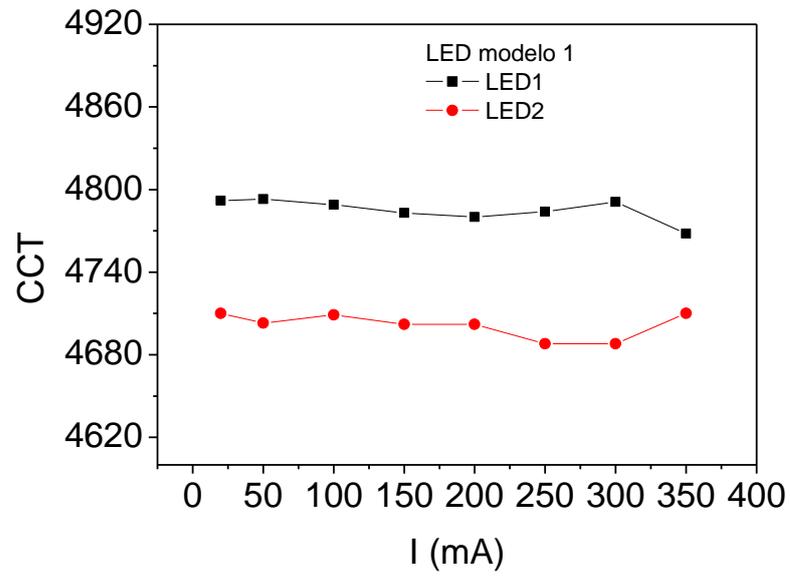


Figura 5.11 – Temperatura da cor para LEDs – Modelo 1 (NICHIA)

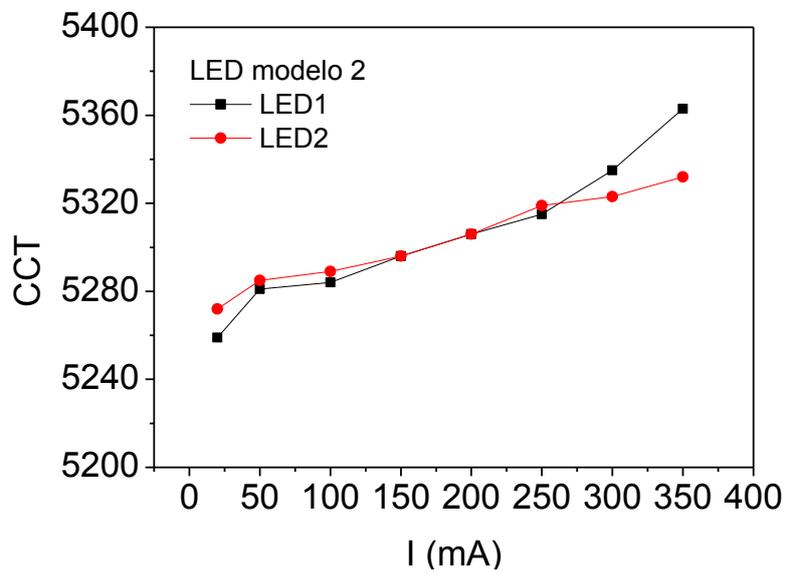


Figura 5.12 – Temperatura da cor para LEDs – Modelo 2 (NICHIA)

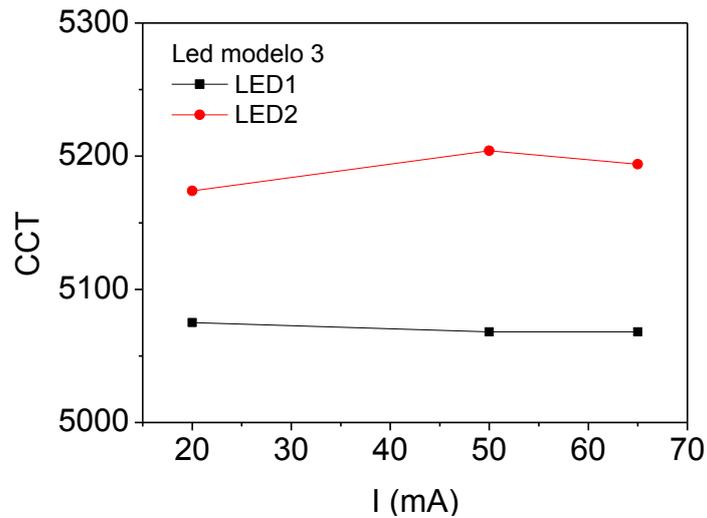


Figura 5.13 – Temperatura da cor para LEDs – Modelo 3 (NICHIA)

Analisando-se a temperatura da cor dos LEDs nas figuras 5.11, 5.12 e 5.13, pode-se constatar que os dados estão dentro da faixa neutra de 4500 K a 5500 K. A consistência da cor é uniforme, se comparado com a lâmpada incandescente, proporcionando assim iluminação com qualidade.

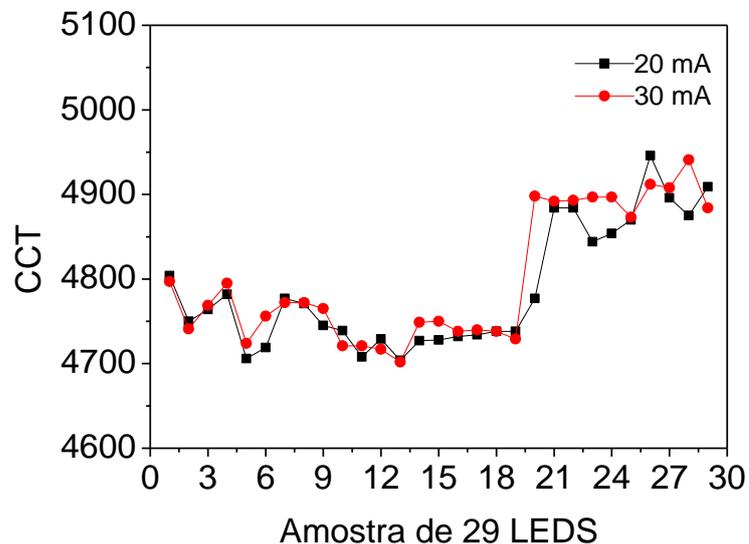


Figura 5.14 – Temperatura da cor para LEDs – Modelo 4 (BRIGHT LED ELECTRONICS CORP.)

Na figura 5.12, nota-se tanto para o LED1 como para o LED2, que para correntes mais altas, a temperatura da cor tem uma tendência ao azulado, portanto são caracterizados como LEDs de alta eficiência.

5.2 Resultados das Medições com o Protótipo Desenvolvido

Para efeito de comparação, um LED do modelo 2 foi analisado quanto as suas propriedades em uma montagem experimental apresentada na figura 4.4. A partir desses experimentos podemos determinar a iluminância em função da corrente aplicada que é uma medida prática da eficiência, além de estudar o efeito de aquecimento dos dispositivos em função da corrente aplicada.

Na figura 5.15 apresentamos uma representação gráfica da iluminância deste LED em função da corrente que flui por ele (ordenadas à esquerda) e a temperatura obtida com um termopar sobre o catodo do LED (ordenadas à direita). Na faixa de corrente analisada, observa-se a característica de linearidade da luminosidade até 200mA com a corrente aplicada que é comum aos LEDs. Acima de 200mA ocorre um efeito sublinear que deve estar associado com a influência da temperatura na corrente através do LED (vide equações 3.6 e 3.7). Para este LED, utilizamos um dissipador calor de alumínio comercialmente indicado. Caso o dissipador não tivesse sido utilizado a temperatura poderia ser ainda maior.

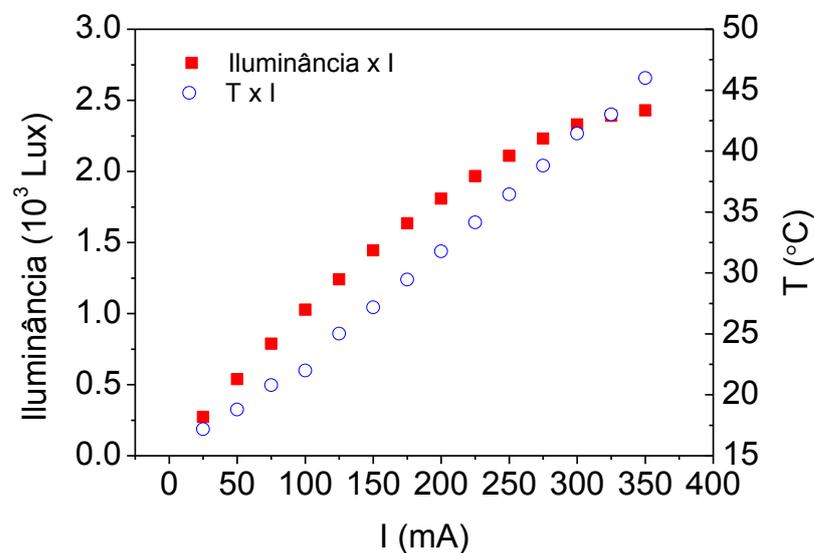


Figura 5.15– Variação de temperatura de um LED tipo SMD para diversas correntes.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

O objetivo principal deste trabalho foi o de levantar dados consistentes sobre as características de lâmpadas de LEDs e comparar com os dois outros modelos de lâmpadas mais difundidos no mercado que são as lâmpadas incandescentes e fluorescentes. A principal ferramenta para a realização desta dissertação foi um espectrofotômetro munido de esfera integradora. Também foi importante o uso de fontes de tensão/corrente e termopar para medição de temperatura.

A realização de medições tanto de grandezas radiométricas quanto fotométricas é uma das mais importantes contribuições deste trabalho. As grandezas fotométricas foram desenvolvidas para se quantificar a luz emitida multiplicada pelo fator de sensibilidade do olho humano há várias décadas, quando a maior preocupação da sociedade era com o conforto propiciado pela lâmpada, sem se preocupar com o custo e o consumo de energia. Nesse aspecto, a lâmpada incandescente é imbatível, pois é uma fonte de radiação eletromagnética semelhante ao sol. O sol emite luz e calor da mesma forma que um corpo negro aquecido, porém a uma temperatura bem maior que a temperatura típica de uma lâmpada incandescente. Com o crescimento do consumo de energia pela humanidade, sobretudo do uso de fontes de energia não renováveis é importante uma racionalização de seu uso. Isto se torna necessário tanto para minimizar os impactos ambientais quanto para tornar mais eficiente o consumo de energia de forma a garantir o acesso universal à energia e conseqüentemente ao conforto propiciado por ela. As lâmpadas fluorescentes, apesar de serem bem mais eficientes que as incandescentes, têm o inconveniente de possuírem um metal pesado de alta toxicidade ao meio ambiente que é o mercúrio. A própria indústria de fabricação de lâmpadas está sensível a essa tendência mundial e tem tentado eliminar as lâmpadas poluentes e ineficientes. Além disso, os novos produtos já vêm com um novo parâmetro de eficiência que correlaciona as grandezas fotométricas e radiométricas, isto é a medida em lumens por watt, ou a medida de quanto se obtém de luz pelo consumo de cada watt de potência.

Os LEDs surgem como uma solução por vários aspectos que foram abordados ao longo desta dissertação. Porém cabe aqui apresentar as conclusões que consistem numa

importante contribuição para o tema da iluminação. Através das análises, foi-se além da simples indicação da eficiência em lumens por watt.

Primeiramente, os espectros de cada fonte de luz foram medidos com resolução de 0,5nm. Observando-se os espectros das três fontes de luz podemos concluir que:

- i) As lâmpadas incandescentes, por operarem a temperaturas muito inferiores à do sol geram quase toda sua radiação no espectro do infravermelho, ou de forma simples dissipam em torno de 90% da energia na forma de calor;
- ii) As lâmpadas fluorescentes geram um espectro de radiação muito discretizado, apresentando alguns picos muito intensos com destaque para os comprimentos de onda de 611,5 nm e 545,5 nm correspondendo ao vermelho e verde respectivamente;
- iii) Os LEDs de luminescência branca analisados neste trabalho, além de gerarem a maior parte da radiação no espectro visível tem uma curva espectral muito semelhante a da resposta do olho humano.

Outro aspecto importante das análises apresentadas refere-se ao fracionamento do espectro em três regiões, isto é em ultravioleta (UV), visível (VIS) e infravermelho (IR). A partir dessa divisão, as três fontes de luz foram comparadas. A análise destes dados revela algumas características que podem ser preocupantes no que se refere a relação da radiação UV e a saúde humana.

- i) As lâmpadas incandescentes emitem mais radiação UV quanto maior for sua temperatura, como era de se esperar devido ao conhecido comportamento de um corpo negro (equações 4.1 e 4.2). Tal radiação foi medida e identificou-se que cresce o percentual relativo com a tensão aplicada e potência, chegando a atingir 0,08% do total da radiação emitida pela lâmpada. O mesmo efeito se observa para a radiação visível que chega a quase 34% do total. A medida de fluxo luminoso é correspondente a este efeito e chega a 644,65 lm para a lâmpada de potência nominal de 60W na tensão de 127 V_{rms} ou, considerando-se a potência real de 50,80 W a 12,69 lm/W. Finalmente, considerando-se a emissão no IR, esta reduz quando aumenta-se a tensão aplicada e potência, representando 67,69% do total da radiação para a lâmpada de potência nominal de 60W na tensão de 127 V_{rms};

- ii) As lâmpadas fluorescentes emitem mais radiação UV que as lâmpadas incandescentes. Esta radiação corresponde a 0,63% do total da radiação emitida por este tipo de lâmpada. Este resultado é um alerta para que seja feita uma análise dos impactos desta radiação na saúde humana. Tal empreitada fica como sugestão para um trabalho futuro. Já a radiação visível apresenta uma melhora significativa comparada ao desempenho das lâmpadas incandescentes. Para a lâmpada analisada, observou-se que 86,09% da radiação é emitida no espectro VIS. A medida de fluxo luminoso chega a 312 lm considerando uma potência consumida de 6,85 W na tensão de 127 V_{rms} ou seja 45,55 lm/W. Finalmente, considerando-se a emissão no IR, esta representa 13,29% do total da radiação para a lâmpada de potência nominal de 9 W na tensão de 127 V_{rms};
- iii) Neste trabalho considerou-se 4 modelos de LED diferentes e vários valores de corrente de excitação. Assim, será apresentado uma consideração do modelo 4 que é usado atualmente na SISVÔO. A comparação entre os 4 modelos de LED será feita em separado. Considerando a corrente de excitação aplicada de 20 mA, a radiação é distribuída em (0,06±0,02)% em UV, (94,1±2,4)% em VIS e (5,9±2,4)% em IR. A potência média foi de (39±4) mw e o fluxo luminoso de (5,84±0,65) lm o que equivale a (0,93±0,11)x10² lm/W.

. Uma forma mais interessante de definir-se eficiência consiste na integral da potência irradiada no visível dividida pela potência entregue a lâmpada ($P=V \times I$). Realizando esse cálculo foi obtido:

Tabela 6.1 – Eficiência calculada a partir da divisão da potência irradiada no visível pela potência entregue a lâmpada ($P=V \times I$).

Corrente (mA)	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
20	39.60%	36.58%	48.88%	28.60%
50	40.19%	39.84%	44.08%	-
350	36.10%	33.56%	-	-
Tensão (V)	Incandescente		Fluorescente	
127	40 W	60W	9 W	
	7.78 %	8.35%	15.96%	

Na tabela 6.1 nota-se que as lâmpadas incandescentes de potência nominal de 60 W têm melhor eficiência do que a lâmpada de 40 W. A lâmpada fluorescente é aproximadamente 2 vezes mais eficiente que a incandescente. Os LEDs do modelo 3 são mais eficientes que os outros modelos, sendo o modelo 4 o menos eficiente.

Comparando-se os LEDs de modelos 1 a 4, para a emissão na região do visível, e considerando várias correntes de excitação aplicada, a radiação em VIS, é distribuída de acordo com a tabela 6.2, a potência de acordo com a tabela 6.3, e o fluxo luminoso de acordo com a tabela 6.4.

Tabela 6.2 – Comparação da emissão na região do visível para os 4 modelos de LEDs.

Corrente (A)	LEDs (%)			
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
20	91,17±0,12	99,58±0,01	96,27±0,55	94,1±2,4
50	98,91±0,01	98,50±0,00	99,43±0,81	–
100	97,09±0,04	98,53±0,00	–	–
150	97,79±0,03	98,69±0,01	–	–
200	98,46±0,01	99,00±0,01	–	–
250	98,06±0,01	98,78±0,00	–	–
300	96,30±0,00	98,28±0,01	–	–
350	97,73±0,00	97,51±0,00	–	–

Observa-se que, no geral, a potência dos LEDs na região do visível é mais eficiente, aproximadamente 97%, quando correntes mais baixas são aplicadas, e 98% quando estão sujeitos a correntes maiores (modelos 1 e 3). Para o modelo 2, a média das potências é de 99 %, e o desvio padrão é insignificante independente da corrente aplicada. Para os LEDs do Modelo 3, a corrente máxima de variação foi de 65mA.

Tabela 6.3 – Comparação da potência média, para os 4 modelos de LEDs.

Corrente (I)	LEDs – Potência média (mW)			
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
20	22,80±0,00	19,50±0,00	27,56±0,00	19,0±0,0
50	55,12±0,00	55,50±0,01	63,06±0,00	–
100	115,83±0,02	116,00±0,02	–	–
150	170,38±0,02	172,50±0,03	–	–
200	223,22±0,02	228,50±0,04	–	–
250	278,17±0,02	280,00±0,05	–	–
300	345,72±0,00	327,00±0,05	–	–
350	407,13±0,06	377,00±0,04	–	–

Tabela 6.4 – Comparação do fluxo luminoso, para os 4 modelos de LEDs e a quantidade equivalente em lm/W.

LEDs – fluxo luminoso (ϕ)						
Corrente (I)	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	lm	lm/W	lm	lm/W	lm	lm/W
20	6,6±1,0	127,95	6,8±0,9	127,61	8,69±0,85	160,04
50	17,5±1,1	128,89	18,8±3,3	137,04	20,94±1,08	147,17
100	35,2±3,8	125,53	39,1±8,0	137,75	–	–
150	52,3±5,1	121,54	58,9±10,0	134,72	–	–
200	69,9±6,6	118,86	77,2±13,0	129,66	–	–
250	86,40±5,7	114,58	94,1±17,0	124,31	–	–
300	103,83±2,8	111,64	108,8±15,0	117,62	–	–
350	121,76±8,3	110,44	118,6±5,0	108,34	–	–

Observa-se na tabela 6.3, que para o modelo 1, a quantidade de lumens aumenta com a corrente, assim como a potência média (tabela 6.2), porém o fluxo luminoso é maior para correntes mais baixas. Para o modelo 2, se verifica maior fluxo luminoso para todas as correntes de excitação aplicadas. Esta característica torna este modelo de LED, o mais favorável para uma aplicação em iluminação, em que se pode trabalhar com correntes mais baixas. O modelo 3 apresenta um fluxo luminoso mais linear e eficiente.

Os três modelos de LEDs estudados são bem mais eficientes que a lâmpada incandescente; modelo 1 – (10,0±0,6), modelo 2 – (10,6±0,8), modelo 3 – (12,8±0,7), e também mais que as fluorescentes; modelo 1 – (2,63±0,15), modelo 2 – (2,79±0,22), modelo 3 – (3,37±0,14), assim como o LED do modelo 4, já visto anteriormente.

Neste trabalho, foi feito também um experimento com um LED tipo SMD, utilizando-se de uma montagem, para determinar a iluminância em função da corrente aplicada e para estudar o efeito da temperatura nos mesmos. Os resultados indicaram que a temperatura tem grande influência na eficiência dos LEDs, principalmente quando este é submetido a correntes maiores, necessitando assim de um dissipador de calor que, sem o qual, a temperatura poderia ser ainda maior. Este efeito poderá ser mais bem investigado em trabalhos futuros.

Conclui-se que todos os LEDs, além de gerarem a maior parte da radiação no espectro visível têm uma curva espectral muito semelhante a da resposta do olho humano. Os resultados obtidos mostraram que o uso de LEDs em iluminação é bem mais eficiente que as

lâmpadas incandescentes e fluorescentes, no entanto, a aplicação deve ser cuidadosamente analisada para garantir a temperatura de funcionamento dentro de parâmetros pré-definidos, de forma a preservar a integridade dos mesmos. Em termos da iluminação residencial, comercial e pública é altamente eficiente, pois converte mais de 85% da energia em luz.

Referências Bibliográficas

BASTOS, F. C. *Análise da política de banimento de lâmpadas incandescentes do Mercado brasileiro*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.

Building Technologies Program. Disponível em: www1.eere.energy.gov/buildings/ssl. U.S. Department, [acessado em: 15 de May de 2013.] PNNL-SA-63254. October de 2008.

BOHAN YAN; TRAN, N.T.; JIUN-PYNG YOU; SHI, F.G. Can Junction Temperature Alone Characterize Thermal Performance of White LED Emitters? *Photonics Technology Letters, IEEE, vol.23, no.9, pp.555-557, May1, 2011 doi: 10.1109/LPT.2011.2115997*. 2011.

CRAWFORD, M. H. LEDS for Solid – state Lighting: Performanca challenges and Recent Advances. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 15, NO. 4, JULY/AUGUST 2009*. 2009, Vol. 15, 4. 2009.

DEWOLF, D. A. *Electro-Optics Handbook*. 2ª ed. São Paulo: Ed. Indústrias Burle, 1992. 255 págs.

DOSSIER LED. *Iluminação Com Uma Nova Fonte De Luz*. 2ª edição, Dezembro 2011. ETAP.

EPERLEIN. “Reflectance modulation – a novel approach to laser mirror characterization” in *Proceedings of 17th International Symposium of Gallium Arsenide and Related Compounds*, IOP Conference Series, IOP, London, 112, 633,1990.

EPERLEIN E BONA. “Influence of the vertical structure on the mirror facet temperatures of visible GaInP quantum well lasers” *Appl. Phys. Lett.* 62, 3074, 1993.

HALL D. C., GOLDBERG L., MEHUYS D. “Technique for lateral temperature profiling in optoelectronic devices using a photoluminescence microprobe” *Appl. Phys. Lett.* 61, 384, 1992.

GU Y., NARENDRAN, N. “A non-contact method for determining junction temperature of phosphor- converted white LEDs” *Third International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE*, San Diego, Calif., 2003.

GIANELLI. *O Emprego de Tecnologia LED na Iluminação Pública – Seus Impactos na Qualidade de Energia e no Meio Ambiente*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de São Paulo, SP. 2009

GOEKING, W. Revista O Setor Elétrico, Lâmpadas e Leds. *Revista o Setor Elétrico, 2009. Ed. 46. São Paulo..* Disponível em: <http://osetoreletronico.com.br>. Acesso em 9 de Maio de 2011.

GRUNDMANN, M.; JASON, H.; AMIR, M.; JOE, S. Blue InGaN Quantum Well LED Fabrication. *Department of Electrical and Computer Engineering, University of California – Santa Barbara*, 2002.

GRUNDMANN, M. *The Physics of Semiconductors*. Editora Springer. Leipzig, January 2006. ISBN-13 978-3-540-25370-9.

GRUNDMANN, M. *The Physics of Semiconductors*. Editora Springer. Leipzig. ISBN-13 978-3-642-13883-6. 2010

HANDBOOK. LED Metrology - INSTRUMENT SYSTEMS GMBH Neumarkter Str. 83 • D-81673 München • Germany. Disponível em: http://www.instrumentsystems.com/fileadmin/editors/downloads/Products/LED_Handbook_e.pdf. 1997

LIMA, M. G. *Avaliação da Sensibilidade ao Contraste Espacial de Cores em Humanos*. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

DAL LAGO, M.; MENEGHINI, M.; TRIVELLIN, N.; MENEGHESSO, G.; ZANONI, E. Degradation mechanisms of high power white LEDs activated by current temperature - Microelectronics Reliability. *Science Direct*, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271411002563> Acessado em 12 Jan. 2012.

MATERIALNEWS 2012. White LEDs directly on paper. 11 de setembro de 2012. Disponível em: <http://www.materialsgate.de/en/mnews/12347/White+LEDs+directly+on+paper.html> acesso em: 12 de mar. 2013.

MELLO H. A.; DE BIASI, R. S. *Introdução à Física dos Semicondutores*, Materiais e Dispositivos Eletrônicos. 1978.

NARUKAWA, Y.; ICHIKAWA, M.; SANGA, D.; SANO, M. E MUKAI, T. *White light emitting diodes with super-high luminous efficacy*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43 (2010) 354002 (6pp). Tokushima, Japão. doi:10.1088/0022-3727/43/35/354002.

OLIVEIRA. Do Fogo ao LED, a História da Iluminação. Disponível em: <http://pauloliveira.wordpress.com>. Acesso em 14 de março de 2012.

PAULA, H. F.; ALVES, E. G.; MATEUS, A. L.; 2011. *Quântica para Iniciantes: Investigações e Protestos*. - Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011. 204 p. ISBN: 978-85-7041-884-5. 2011

PAULO FARINA , *A Magia da Iluminação* 2013-
<https://www.google.com.br/search?q=Melich+LED+2011&hl=pt-BR>

REZENDE, S. M. *Materiais e Dispositivos Eletrônicos*. 2ª ed. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2004. ISBN 858-83-2527-6.

(Revista Ciências do Ambiente On-Line Junho, 2010 Volume 6, Número 1; Boyce, P. R. 2003. *Human Factors in Lighting* - 2nd Edition. London; New York: Taylor & Francis.)

SCHUBERT, E. F. *Light-Emitting Diode*. Londres : Cambridge Press, 2006. ISBN-13 978-0-511-34476-3.

SYVÄJÄRVI, M.; MÜLLER, J.; SUN, J. W.; GRIVICKAS, V.; OU, YIYU; JOKUBAVICIUS, V.; HENS, P.; KAISR, M.; ARIYAWONG, K.; GULBINAS, K.; HENS, P.; LILJEDAHL, R.; LINNARSSON, M. K.; KAMIYAMA, S.; WELLMANN, P.; SPIECKER, E.; OU, HAIYAN. Fluorescent SiC as a new material for white LEDs. In: *Physica Scripta*, Vol. 2012, No. T148, p. 014002. 2012.

U.S. Department of Energy (DOE). 2013. Disponível em: http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/news_detail.html?news_id=19263 U.S. Department of Energy (DOE), 30 de April de 2013. Acessado em: 15 de Maio de 2013.

UNESP – Universidade Estadual Paulista. *Análise de Desempenho energético e Luminotécnico de lâmpadas tubulares a LED*. LESIP – Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas de Iluminação Pública, UNESP . Guaratingueta - São Paulo: s.n., p. 8, Análise de Desempenho Energético. 2012.

YEN-KUANG K.; TSUN-HSIN W.; e JIH-YUAN C. *Advantages of blue InGaN light-emitting diodes with InGaN-AlGaN-InGaN barriers*. Taiwan : American Institute of Physics., America Institute of Physicas. *Appl. Phys. Lett.* 100, 031112; doi: 10.1063/1.3678341. 2012.

YUNG, K. C.; H. LIEM, H. S. CHOY; e W. K. LUN. Degradation mechanism betonaol device self – heating in high power Light-emitting diodes. *Hong Kong Polytechnic University - Journal of Applied Physics.* 109, 094509; doi: 10.1063/1.3580264. 2011.