



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA



Programa de Pós-Graduação em Física

CONSTRUÇÃO DE UM RADIÔMETRO PARA A CARACTERIZAÇÃO DE LEDs

Dissertação de Mestrado

Física

Autora: Kelly Abreu Silva
Orientador: Profº. Dr. Iuri Muniz Pepe
Co-Orientador: Msc. Vitor Leão Filardi

Salvador, 2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA



CONSTRUÇÃO DE UM RADIÔMETRO PARA A CARACTERIZAÇÃO DE LEDs

Dissertação de Mestrado

Física

Esta Dissertação é apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Física pelo Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia – Salvador.

Aprovado por:

Orientador: Prof^o. Dr.: Iuri Muniz Pepe

Co-Orientador: Prof^o. Msc.: Vitor Leão Filardi

Titular Interno 1: Prof^o. Dr.: Marcus Vinicius Santos da Silva

Titular Externo 1: Prof^o. Dr.: Germano Pinto Guedes

Data: _14_/_02_/_2014__

Salvador, 2014

KELLY ABREU SILVA

CONSTRUÇÃO DE UM RADIÔMETRO PARA A
CARACTERIZAÇÃO DE LEDs

Salvador, 2014

Dedico este trabalho a Deus por sempre me guiar, à minha família, aos mestres, em especial ao meu orientador e aos amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sua presença constante em minha vida, a CAPES e a FAPESB pelo apoio e suporte financeiro.

A minha família por sempre me apoiar, me dando suporte para que eu fosse capaz de finalizar o trabalho.

Agradeço em especial ao meu orientador Iuri Muniz Pepe, pois tornou possível a concretização do trabalho, juntamente com toda a equipe do Laboratório de Propriedades Óticas (LaPO), ressaltando as pessoas de Vitor Leão, Geydison Dementino, João Moreira e Ivanoe Rodowanski.

Sou profundamente grata aos meus amigos que são muito mais que amigos, por me apoiar sempre e tornar essa longa jornada menos pesada.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente influenciaram a minha caminhada, que acreditaram que eu chegaria ao fim, mesmo quando nem eu acreditava mais.

“A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, dance, ria e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos.”

Charles Chaplin

RESUMO

Este trabalho reporta sobre a construção de um radiômetro para caracterização de LEDs de 3 e 5 mm encapsulados em epóxi, seguindo a norma internacional CIE 127. Para testar a solução de instrumentação desenvolvida foram caracterizados, em relação à irradiância LEDs de alto brilho com diversos comprimentos de onda: vermelha (631), amarelo (587 nm), verde (530 nm), azul (470nm) e violeta (398 nm). A partir destes dados foi determinado o potencial de irradiância para cada um dos LEDs, os resultados mostram uma grande diferença para esta grandeza variando de 12 a 455 (W/m²)/A). Foi realizado também medidas com LEDs da marca Roithner Lasertechnik com comprimentos de onda: vermelho (700 nm), amarelo (570 nm), verde (500 nm), violeta (430 nm). Foi medido um potencial de irradiância, que variou de 14.3 a 614 (W/m²)/A) e feita uma comparação entre os LEDs de alto brilho e os LEDs da marca Roithner Lasertechnik. Onde a variação do potencial é em grande parte decorrente da diferença existente nos comprimentos de onda. Com auxílio de um goniômetro, montado na entrada de LED do radiômetro, determinou-se a dependência angular da intensidade do feixe de luz gerado, onde esta dependência é função de fatores construtivos destes dispositivos, os resultados são consistentes com a discrepância de alinhamento esperada entre o eixo ótico e o eixo geométrico, sendo mais severa para os LEDs azuis e verdes e menos crítica para os LEDs vermelhos, amarelos e violetas ensaiados. Foi feito o estudo estatístico da distribuição do desempenho de 116 LEDs azuis comerciais, os resultados puderam ser ajustados por uma gaussiana. Dos LEDs ensaiados 85 teve desempenho médio, dentro do intervalo de um desvio, 14 LEDs apresentaram desempenho abaixo da media e 21 superam a media no critério intensidade de luz emitida.

Palavras-chave – Radiômetro para LED, caracterização da irradiância de LEDs e metrologia de LEDs

ABSTRACT

This work reports on the construction of 3 and 5mm diameter, epoxy encapsulated, LED radiometer, for optical characterization. The device design is based on the international norm CIE 127. In order to test the developed instrumentation solution the irradiance of 5 different wavelength LEDs high brightness were measured: red (631nm), yellow (587nm), green (530nm), blue (470nm) and violet (398nm). Were measures the irradiance to LEDs of Roithner Lasertechnik to the wavelength: red (700 nm), yellow (570 nm), green (500 nm), violet (430 nm). From the irradiance value one can determinate the irradiance potential of each LED, the results shows a huge difference for this physical quantities that can range from 12 up to 455 ((W/m²)/A) to high brightness of LEDs. Were also measured the irradiance to Roithner Lasertechnik of LEDs and that can range from 14.3 up 455 ((W/m²)/A). When compared both measured had some differences between its, because has differences between the wavelength of high brightness LEDs and Roithner Lasertechnik of LEDs. Using a goniometer mounted in the LED radiometer input was measured the light intensity as a function of the angular position, this relation appears due to some design and manufacture issues. The results are consistent with the expected misalignment between the optical and the geometrical axis, reveling being more severe for the blue and green LEDs and less critical for the red one. A statistical study was made to determine the performance distribution of 116 commercial blue LEDs; the results could be adjusted using a Gaussian curve. From this total, 85 LEDs had average performance; within the range of one standard deviation; 15 LEDs were below average and 21 exceed the emitted light intensity criterion.

Keywords – LED radiometer, LED irradiance characterization, LED metrology

LISTA DAS FIGURAS

FIGURA 1: ILUSTRAÇÃO DA OBTENÇÕES DAS CORES COMPOSTAS A PARTIR DAS PRIMÁRIAS.	19
FIGURA 2: BANDAS DE CONDUÇÃO E VALÊNCIA DE UM ISOLANTE, SEMICONDUTOR E CONDUTOR, COM A ENERGIA DE GAP PARA UM DETERMINADO MATERIAL SER CONSIDERADO ISOLANTE. ENERGIA DE GAP DE ALGUNS SEMICONDUTORES E A SUPERPOSIÇÃO DAS CAMADAS DE CONDUÇÃO E VALÊNCIA PARA UM CONDUTOR.	23
FIGURA 3: DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM MATERIAL DO TIPO N, COM APLICAÇÃO DE UM CAMPO EXTERNO COM POLARIZAÇÃO DIRETA, GERANDO UM FLUXO CONVENCIONALMENTE NÃO INVERTIDO.	26
FIGURA 4: MODELO DAS LIGAÇÕES DE VALÊNCIA E DAS BANDAS PARA UM SEMICONDUTOR EXTRÍNSECO COM IMPUREZAS DO TIPO DOADOR.	26
FIGURA 5: FIGURA ESQUEMÁTICA DE UM SEMICONDUTOR DO TIPO N, ONDE OS ELÉTRONS NO NÍVEL DOS DOADORES PODEM MIGRAR PARA A BANDA DE CONDUÇÃO.	27
FIGURA 6: MODELO DAS LIGAÇÕES DE VALÊNCIA E DAS BANDAS PARA UM SEMICONDUTOR EXTRÍNSECO COM IMPUREZAS DO TIPO ACEITADOR.	28
FIGURA 7: DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM MATERIAL DO TIPO P, COM POLARIZAÇÃO DIRETA, COM PRESENÇA DE VAZIOS, OU SEJA, BURACOS OU LACUNAS, QUE POSSUEM CARGA POSITIVA.	29
FIGURA 8: DIAGRAMA DE BANDAS DE ENERGIA DO TIPO P. O MATERIAL FOI DOPADO GERANDO NÍVEL DE ACEITADORES ENTRE AS CAMADAS DE CONDUÇÃO E VALÊNCIA.	30
FIGURA 9: “ESPECTRO” DE RESISTIVIDADE. OS SEMICONDUTORES TÊM RESISTIVIDADE INTERMEDIÁRIA, QUE PODEM SER ALTERADAS APRECIAVELMENTE ATRAVÉS DE PEQUENAS ALTERAÇÕES NA SUA ESTRUTURA ELETRÔNICA. A RESISTIVIDADE É O RECÍPROCO DA CONDUTIVIDADE.	32
FIGURA 10: OCUPAÇÃO DAS BANDAS EM ISOLANTES (A) E EM CONDUTORES (B). AS REGIÕES HACHURADAS REPRESENTAM AS FAIXAS DE ENERGIA OCUPADAS PELOS ELÉTRONS.	33
FIGURA 11: COMPARAÇÃO ENTRE AS BANDAS DE ENERGIA PARA ISOLANTES, CONDUTORES E SEMICONDUTORES.	34
FIGURA 12: DIAGRAMA DE BANDAS DE UM SEMICONDUTOR INTRÍNSECO.	35
FIGURA 13: NA FIGURA (A) TEM-SE A TRANSIÇÃO DIRETA DA BORDA DA BANDA DE VALÊNCIA PARA A BANDA DE CONDUÇÃO E NA FIGURA (B) A TRANSIÇÃO É FEITA DE FORMA INDIRETA.	36
FIGURA 14: BANDAS DE VALÊNCIA E DE CONDUÇÃO EM SEMICONDUTORES. AS REGIÕES HACHURADAS REPRESENTAM A OCUPAÇÃO DOS ELÉTRONS EM $T > 0$. A DISTÂNCIA ENTRE AS BANDAS É O GAP DE ENERGIA E_G	37
FIGURA 15: FIGURA ILUSTRATIVA DA FORMAÇÃO DO PAR ELÉTRON BURACO E AS COLISÕES INELÁSTICAS, DENTRO DE UM MATERIAL COM JUNÇÃO DO TIPO P-N, EM UM MATERIAL DE HOMOJUNÇÃO.	43
FIGURA 16: FIGURA ILUSTRATIVA DO FLUXO DE ELÉTRONS ATRAVÉS DA REGIÃO DE DEPLEÇÃO, DEVIDO À CORRENTE DE POLARIZAÇÃO APLICADA. GERANDO NA REGIÃO DE DEPLEÇÃO ENCONTRO DAS LACUNAS COM OS PORTADORES DE CARGAS NEGATIVAS TENDO COMO CONSEQÜÊNCIA UM DECAIMENTO DE UM FÓTON SOB A FORMA DE FONTE LUMINOSA.	44
FIGURA 17: CURVA DE RESPOSTA DO FOTODIODO HAMAMATSU SM1PD2A UTILIZADO NO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA A CARACTERIZAÇÃO DOS LEDs DE ALTO BRILHO.	48
FIGURA 18: ILUSTRAÇÃO DA DETECÇÃO DE FÓTONS E GERAÇÃO DE PARES ELÉTRON-BURACO EM UM DIODO PIN REVERSAMENTE POLARIZADO.	49
FIGURA 19: EXEMPLO DO CIRCUITO DA EQUAÇÃO 6	50
FIGURA 20: CARACTERÍSTICA TENSÃO-CORRENTE DE UM FOTODIODO OU DE UM FOTODIODO PIN PARA UM COMPRIMENTO DE ONDA ESPECIFICADO. A CURVA CORRESPONDE À POTENCIA ÓPTICA INCIDENTE NULA QUE SE REFERE À CORRENTE DE ESCURO.	51
FIGURA 21: ESTRUTURA TÍPICA DE LÂMPADA LED UTILIZADA EM PAINÉIS DE EQUIPAMENTOS ELETRO-ELETRONICOS.	54

<i>FIGURA 22: ESQUEMA DA FABRICAÇÃO DO LED</i>	54
<i>FIGURA 23: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA OBTENÇÃO DO ÂNGULO SÓLIDO</i>	58
<i>FIGURA 24: DIAGRAMA DA BANCADA DE TESTE</i>	61
<i>FIGURA 25: VISTA EM CORTE DO RADIÔMETRO PARA CARACTERIZAÇÃO DE LEDS</i>	62
<i>FIGURA 26: DIAGRAMA DO PORTA LED UNIVERSAL</i>	62
<i>FIGURA 27: FOTODIODO HAMAMATSU SMIPD2A</i>	63
<i>FIGURA 28: FOTO R2LED QUE FOI DESENVOLVIDO NO LAPO</i>	64
<i>FIGURA 29: CIRCUITO ELABORADO E MONTADO NO LAPO, PARA A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO</i>	65
<i>FIGURA 30: ILUSTRAÇÃO DE COMO A LUZ DE LED EMITE LUZ EM FORMA DE CONE</i>	66
<i>FIGURA 31: SEGUNDA MONTAGEM DO RADIÔMETRO DE REFERÊNCIA PARA LEDS</i>	66
<i>FIGURA 32: FIGURA ILUSTRATIVA DA DIFERENÇA ENTRE O EIXO ÓTICO E O EIXO GEOMÉTRICO</i>	90

LISTA DAS TABELAS

<i>TABELA 1: VALORES DAS DISCREPÂNCIAS ASSOCIADAS AS CORES DOS LEDs ESTUDADOS</i>	<i>71</i>
<i>TABELA 2: COMPRIMENTO DE ONDA DO MÁXIMO DE EMISSÃO DE CINCO DIFERENTES LEDs E SEUS RESPECTIVOS POTENCIAIS DE IRRADIÂNCIA, COM OS DIFERENTES FUNDOS DE ESCALA.</i>	<i>77</i>
<i>TABELA 3: DESCRIÇÃO DOS LEDs DA ROITHNER LASER TECHNIK.</i>	<i>83</i>
<i>TABELA 4: COMPRIMENTO DE ONDA DOS NOVOS LEDs ESTUDADOS COM SEUS RESPECTIVOS POTENCIAIS DE IRRADIANCIA</i>	<i>86</i>
<i>TABELA 5: COMPARAÇÃO DOS COMPRIMENTOS DE ONDA E DOS POTENCIAIS DE IRRADIANCIA DOS LEDs DE ALTO BRILHO E DOS LEDs COM FATOR DE QUALIDADE DADO PELO FABRICANTE, AMBOS COM O FUNDO DE ESCALA DE 0.020 A.</i>	<i>86</i>
<i>TABELA 6: DADOS DA VARIAÇÃO DA INTENSIDADE E DA EMISSÃO MÁXIMA</i>	<i>98</i>
<i>TABELA 7: MÉDIA DAS MEDIDAS DA INTENSIDADE E DA EMISSÃO MÁXIMA</i>	<i>99</i>
<i>TABELA 8: ERRO DA VARIAÇÃO DA INTENSIDADE.....</i>	<i>102</i>
<i>TABELA 9: ERRO DA EMISSÃO MÁXIMA</i>	<i>103</i>

LISTA DOS GRÁFICOS

<i>GRÁFICO 1: ESPECTRO DE EMISSÃO PARA O COMPRIMENTO DE ONDA DO VERMELHO, OBTIDO PELO ESPECTROFLUORÍMETRO.</i>	68
<i>GRÁFICO 2: ESPECTRO DE EMISSÃO PARA O COMPRIMENTO DE ONDA DO AMARELO, OBTIDO PELO ESPECTROFLUORÍMETRO.</i>	69
<i>GRÁFICO 3: ESPECTRO DE EMISSÃO PARA O COMPRIMENTO DE ONDA DO VERDE, OBTIDO PELO ESPECTROFLUORÍMETRO.</i>	69
<i>GRÁFICO 4: ESPECTRO DE EMISSÃO PARA O COMPRIMENTO DE ONDA DO AZUL, OBTIDO PELO ESPECTRO FLUORÍMETRO.</i>	70
<i>GRÁFICO 5: ESPECTRO DE EMISSÃO PARA O COMPRIMENTO DE ONDA DO VIOLETA, OBTIDO PELO ESPECTRO FLUORÍMETRO.</i>	70
<i>GRÁFICO 6: IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED VERMELHO COMERCIAL, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,020)A.</i>	72
<i>GRÁFICO 7: IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED VERMELHO COMERCIAL, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,042)A.</i>	73
<i>GRÁFICO 8: IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED AMARELO COMERCIAL, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,020)A.</i>	73
<i>GRÁFICO 9: IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED AMARELO COMERCIAL, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,042)A.</i>	74
<i>GRÁFICO 10: GRÁFICO: IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED VERDE COMERCIAL, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,020)A.</i>	74
<i>GRÁFICO 11: IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED VERDE COMERCIAL, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,042)A.</i>	75
<i>GRÁFICO 12: IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED AZUL COMERCIAL, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,020)A.</i>	75
<i>GRÁFICO 13: IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED AZUL COMERCIAL, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,042)A.</i>	76
<i>GRÁFICO 14: IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED VIOLETA COMERCIAL, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,020)A.</i>	76
<i>GRÁFICO 15: IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED VIOLETA COMERCIAL, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,042)A.</i>	77
<i>GRÁFICO 16: COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS MONTAGENS REALIZADAS COM SEUS RESPECTIVOS ERROS, PARA O ESPECTRO AMARELO.</i>	78
<i>GRÁFICO 17: COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS MONTAGENS REALIZADAS COM SEUS RESPECTIVOS ERROS, PARA O ESPECTRO VERDE.</i>	79
<i>GRÁFICO 18: COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS MONTAGENS REALIZADAS COM SEUS RESPECTIVOS ERROS, PARA O ESPECTRO AZUL.</i>	79
<i>GRÁFICO 19: COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS MONTAGENS REALIZADAS COM SEUS RESPECTIVOS ERROS, PARA O ESPECTRO VIOLETA.</i>	80
<i>GRÁFICO 20: COMPARAÇÃO ENTRE AS MONTAGENS R2LED E PR2LED.</i>	81
<i>GRÁFICO 21: COMPARAÇÃO ENTRE AS MONTAGENS R2LED E PR2LED NORMALIZADAS.</i>	82
<i>GRÁFICO 22: RADIANCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED VERMELHO, COM FATOR DE QUALIDADE CONHECIDO, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,020) A.</i>	84

GRÁFICO 23: RADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED AMARELO, COM FATOR DE QUALIDADE CONHECIDO, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,020) A.	84
GRÁFICO 24: RADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED VERDE, COM FATOR DE QUALIDADE CONHECIDO, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,020) A.	85
GRÁFICO 25: RADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE UM LED VIOLETA, COM FATOR DE QUALIDADE CONHECIDO, COM FUNDO DE ESCALA VARIANDO ENTRE (0,003 E 0,020) A.	85
GRÁFICO 26: CURVA DE COMPARAÇÃO ENTRE O LED VERMELHO DE ALTO BRILHO E O LED VERMELHO COM FATOR DE QUALIDADE DADO PELO FABRICANTE. ONDE O LED 1 É COMERCIAL DE ALTO BRILHO E LED 2 O DISPOSITIVO FABRICADO PELA ROITHNER LASER.	87
GRÁFICO 27: CURVA DE COMPARAÇÃO ENTRE O LED AMARELO DE ALTO BRILHO E O LED AMARELO COM FATOR DE QUALIDADE DADO PELO FABRICANTE. ONDE O LED 1 É COMERCIAL DE ALTO BRILHO E LED 2 O DISPOSITIVO FABRICADO PELA ROITHNER LASER.	88
GRÁFICO 28: CURVA DE COMPARAÇÃO ENTRE O LED VERDE DE ALTO BRILHO E O LED VERDE COM FATOR DE QUALIDADE DADO PELO FABRICANTE. ONDE O LED 1 É COMERCIAL DE ALTO BRILHO E LED 2 O DISPOSITIVO FABRICADO PELA ROITHNER LASER.	88
GRÁFICO 29: CURVA DE COMPARAÇÃO ENTRE O LED VIOLETA DE ALTO BRILHO E O LED VIOLETA COM FATOR DE QUALIDADE DADO PELO FABRICANTE. ONDE O LED 1 É COMERCIAL DE ALTO BRILHO E LED 2 O DISPOSITIVO FABRICADO PELA ROITHNER LASER.	89
GRÁFICO 30: RESPOSTA À ANGULOMETRIA PARA UMA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE 3 MA.	91
GRÁFICO 31: RESPOSTA À ANGULOMETRIA PARA UMA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE 5MA.	92
GRÁFICO 32: RESPOSTA À ANGULOMETRIA PARA UMA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE 10 MA.	93
GRÁFICO 33: RESPOSTA À ANGULOMETRIA PARA UMA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE 15 MA.	93
GRÁFICO 34: RESPOSTA À ANGULOMETRIA PARA UMA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE 20 MA.	94
GRÁFICO 35: RESPOSTA À ANGULOMETRIA PARA UMA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE 25 MA.	95
GRÁFICO 36: RESPOSTA À ANGULOMETRIA PARA UMA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE 30 MA.	96
GRÁFICO 37: RESPOSTA À ANGULOMETRIA PARA UMA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE 35MA.	96
GRÁFICO 38: RESPOSTA À ANGULOMETRIA PARA UMA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE 40 MA.	97
GRÁFICO 39: RESPOSTA À ANGULOMETRIA PARA UMA CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DE 42 MA.	98
GRÁFICO 40: CURVA DE DISPERSÃO DO LED AZUL.	104
GRÁFICO 41: CURVA DE DISPERSÃO DO LED AZUL.	104

SUMÁRIO

LISTA DAS FIGURAS	9
LISTA DAS TABELAS	11
LISTA DOS GRÁFICOS	12
INTRODUÇÃO	17
CAPÍTULO 1	21
ESTRUTURA DA MATÉRIA	21
1.1 INTERPRETAÇÃO FÍSICA DA MASSA EFETIVA	21
1.2 NÍVEIS DE ENERGIA	22
1.3 BANDAS DE ENERGIA	23
1.4 LACUNAS	25
1.5 SEMICONDUTOR DO TIPO N	25
1.6 SEMICONDUTOR DO TIPO P	28
CAPÍTULO 2	31
ESTRUTURA E PROCESSOS ELETRÔNICOS	31
2.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	31
2.2 CONDUTOR	32
2.3 ISOLANTE	33
2.4 SEMICONDUTOR	34
2.5 LUMINESCÊNCIA	37
2.6 ELÉTRONS E LACUNAS EM SEMICONDUTORES INTRÍNSECOS	38
2.7 SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS	39
2.8 ELETROLUMINESCÊNCIA	40
CAPÍTULO 3	42
FOTODIODO E SUA OPERAÇÃO	42

3.1	JUNÇÃO PN	42
3.2	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO	45
3.3	POFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO	46
3.4	CURVA DE RESPOSTA DO DIODO	47
3.5	O FOTODIODO TIPO PIN	48
3.6	CARACTERÍSTICA TENSÃO-CORRENTE	49
	CAPÍTULO 4	52
	DIODO EMISSOR DE LUZ	52
4.1	LED	52
4.2	QUANTIDADES ESPECTRORADIOMÉTRICAS	55
4.3	RADIOMETRIA	56
4.4	ENERGIA RADIANTE E FLUXO RADIANTE	56
4.5	IRRADIÂNCIA	57
4.6	RADIÂNCIA	57
4.7	ÂNGULO SÓLIDO	58
4.8	COLORIMETRIA	59
	CAPÍTULO 5	60
	ARRANJO EXPERIMENTAL	60
5.1	A DEPENDENCIA LINEAR ENTRE A CORRENTE FOTODETECTADA E A CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DOS DIODOS ELETROLUMINESCENTES	60
5.2	A MONTAGEM EXPERIMENTAL	61
	CAPÍTULO 6	67
	TRATAMENTO DE DADOS	67
6.1	DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA DOS LEDs ENSAIADOS COM UM ESPECTROFLUORÍMETRO	67
6.2	MEDIDA DA DEPENDENCIA LINEAR ENTRE A CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DOS LEDs E A CORRENTE FOTODETECTADA	71
6.3	CÁLCULO DO ERRO ENTRE AS MEDIDAS DOS CONJUNTOS PR2LED E R2LED	80

6.4	ANGULOMETRIA	90
6.5	VARIAÇÃO DA INTENSIDADE E EMISSÃO MÁXIMA	91
6.6	CÁLCULO DOS ERROS, ERROS MÉDIOS E ERRO RELATIVO MÉDIO	100
6.7	CÁLCULO DOS ERROS DA VARIAÇÃO DE INTENSIDADE MÁXIMA E EMISSÃO MÁXIMA	101
6.8	ESTUDO ESTATÍSTICO DE UMA POPULAÇÃO DE LEDs AZUIS	103
	CONCLUSÃO	106
	Bibliografia	109
	ANEXO 1	112
	ANEXO 2	113
	ANEXO 3	114
	ANEXO 4	115
	ANEXO 5	116
	ANEXO 6	117
	ANEXO 7	118
	ANEXO 8	119

INTRODUÇÃO

Nos LEDs a transformação de energia elétrica em luz é feita na matéria, por um processo chamado de eletroluminescência. A eletroluminescência é um fenômeno optrônico que resulta na emissão de luz, como resposta à passagem de corrente elétrica em um semicondutor. Nos diodos emissores de luz (LED) a eletroluminescência ocorre quando, em uma junção P-N diretamente polarizada, elétrons do lado N, que acabaram de ultrapassar a barreira de potencial da junção, se recombinam com lacunas do lado P. Essa recombinação impõe a perda da energia adquirida no processo de aceleração do par elétron-buraco, por um campo elétrico externo. Esta perda de energia pode ocorrer de duas formas, por um processo não radiativo (emissão de fônons), que resulta no aquecimento da pastilha semicondutora, ou pela emissão de fótons de luz.

Nos anos noventa, novos materiais foram descobertos e/ou sintetizados, como é o caso do arseneto de gálio (GaAs), fosfeto de gálio (GaP), nitreto de gálio (GaN), nitreto de gálio e índio (InGaN) entre outros. Nestes materiais o processo de eletroluminescência é muitas ordens de grandeza mais eficiente que no germânio ou no silício, no que tange a emissão de fótons. Nestes compostos é possível ter um número de fótons suficiente para que os LEDs constituam excelentes fontes de luz (REZENDE, 1996) e (SCHLOTTER, BAUR, *et al.*, 1999).

No início da eletrônica do estado sólido, em meados do século passado, não era possível pensar nos LEDs como uma fonte de luz eficiente. Isso porque a maior parte de sua energia

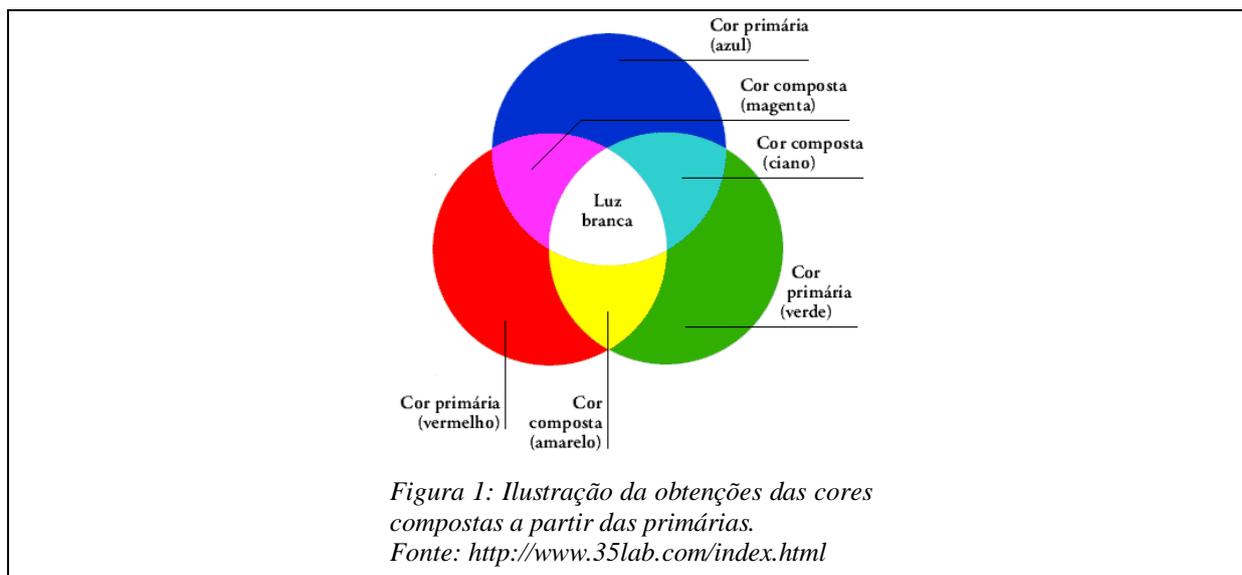
era liberada sob a forma de calor, tornando assim a luz emitida insignificante. Como em qualquer diodo, o LED possui um lado chamado de catodo e outro chamado de anodo. Dependendo de como for polarizado, permite ou não, a passagem de corrente elétrica e, conseqüentemente, a emissão ou não de luz (REZENDE, 1996).

Em geral, a capacidade de produzir luz pelos LEDs varia em função da tecnologia de fabricação, do fabricante e mesmo, do lote fabricado. Sendo assim, a irradiância destes dispositivos passa a ser um parâmetro de interesse, seja por questões de uniformidade de painéis luminosos de grandes áreas, seja por razões de manutenção, quando se impõe a substituição de uma peça por outra, com a mesma qualidade da peça original (troca standard).

Modernamente, os diodos emissores de luz comerciais, em geral, são fabricados a partir de materiais da família III e V da tabela periódica. Existem também LEDs produzidos a partir dos materiais das famílias II-VI, a exemplo do ZnSe. Com a adição de determinadas impurezas químicas, chamadas de dopantes, tanto compostos do tipo III-V como II-VI, podem se tornar semicondutores do tipo P ou do tipo N, com a finalidade de formar uma junção P-N.

A estrutura das substâncias semicondutoras é caracterizada, à temperatura do zero absoluto, por uma região proibida de largura finita, chamada de *gap* de energia, separando assim o semicondutor em bandas, “banda de valência” (banda relativa à presença de elétrons e lacunas em equilíbrio) da “banda de condução” (banda relativa à presença de elétrons excitados). Na temperatura ambiente essas substâncias possuem uma pequena condutividade, resultante da excitação térmica de elétrons da banda de valência para a banda de condução (LEITE e CASTRO, 1978).

Ao longo de décadas os LED se mantiveram limitados às cores vermelho, amarelo e verde, sendo associados às lâmpadas piloto, montadas nos painéis de equipamentos ou mostradores. Porém, nos anos 90, no Japão, foram produzidos os primeiros LED azuis, que combinados com os LEDs vermelhos e verdes produziam luz branca, estendendo assim a aplicabilidade dos diodos eletroluminescentes (NAKAMURA e SHUJI, 1996). Para efeito da visão humana, partir dessas três cores primárias, é possível criar a impressão de uma paleta continua de cores, como mostrado na Figura 1.



Com a tecnologia da Nichia Chemical (pioneira na produção dos LEDs azuis) e os progressos no que tange o desenvolvimento dos LEDs azul e violeta, foi possível a produção de diodos de luz branca, cuja base está na excitação de uma substância fluorescente. Os dispositivos em questão têm seu funcionamento baseado no deslocamento de Stokes. As substâncias absorvem pequenos comprimentos de onda da luz azul e violeta e reemitem luz em comprimentos de onda maiores como verde, amarelo e vermelho (KITTEL, 2006). Desta forma é possível obter um espectro completo, ou quase completo, para os diodos emissores de luz, tornando-os dispositivos que permitem aplicações mais abrangentes e generalizadas.

As aplicações de LED, no que se refere à iluminação, se mostram extremamente promissoras, se comparadas com a iluminação clássica, feita com lâmpadas incandescente. O LED branco é considerado como um candidato promissor para a iluminação do futuro (LOURENÇO, 2010), sendo uma fonte de luz de alta eficiência e baixo consumo de energia, tendo longa vida útil (>30.000 h). Podendo servir para a iluminação pública, comercial ou residencial, iluminação veicular e de máquinas em geral. Portanto, não é difícil vislumbrar a substituição da iluminação como conhecemos hoje, que vem se tornando progressivamente obsoleta, diante desta nova tecnologia (NAKAMURA e SHUJI, 1996), (RODRIGUES, ALMEIDA, *et al.*, 2010). O LED não é apenas usado como dispositivo de iluminação, mas também como

dispositivo de comunicação, seja de dados, por fibra ótica, ou comunicação visual por painéis (NAKAMURA e SHUJI, 1996). Não esquecendo as aplicações na área de análise química e aplicações na área médica como os tratamentos fototerapêuticos usados nos tratamentos desde a acne até no tratamento de alguns tipos de câncer (PÉREZ, PÉREZ-OCÓN, *et al.*, 2008) e (BAROLET, 2008), etc.

Neste particular é importante munir laboratórios de pesquisa e oficinas de montagem de um equipamento que siga as normas técnicas internacionais de caracterização de LEDs. Esta dissertação propõe uma solução de instrumentação, na forma de radiômetro para LEDs de 5 e 3 mm, capaz de determinar, entre outras características técnicas, a irradiância destes dispositivos.

CAPÍTULO 1

ESTRUTURA DA MATÉRIA

1.1 INTERPRETAÇÃO FÍSICA DA MASSA EFETIVA

A massa efetiva de um elétron na banda de energia pode ser positiva ou negativa. Os estados de massa efetiva positiva ocorrem perto da extremidade inferior de uma banda, porque uma massa efetiva positiva significa uma curvatura de banda positiva. Os estados de massa efetiva negativa ocorrem perto do topo da banda. Uma massa efetiva negativa significa que, quando o elétron passa do estado k para o estado $k + \Delta k$, a transferência de momento do elétron para a rede é maior do que a transferência de momento para o elétron. Embora o campo aplicado faça k aumentar de Δk , e com isso o elétron se aproxima da condição de reflexão de Bragg. Este efeito pode produzir uma redução do momento efetivo do elétron, conferido a este uma massa efetiva negativa (KITTEL, 2006).

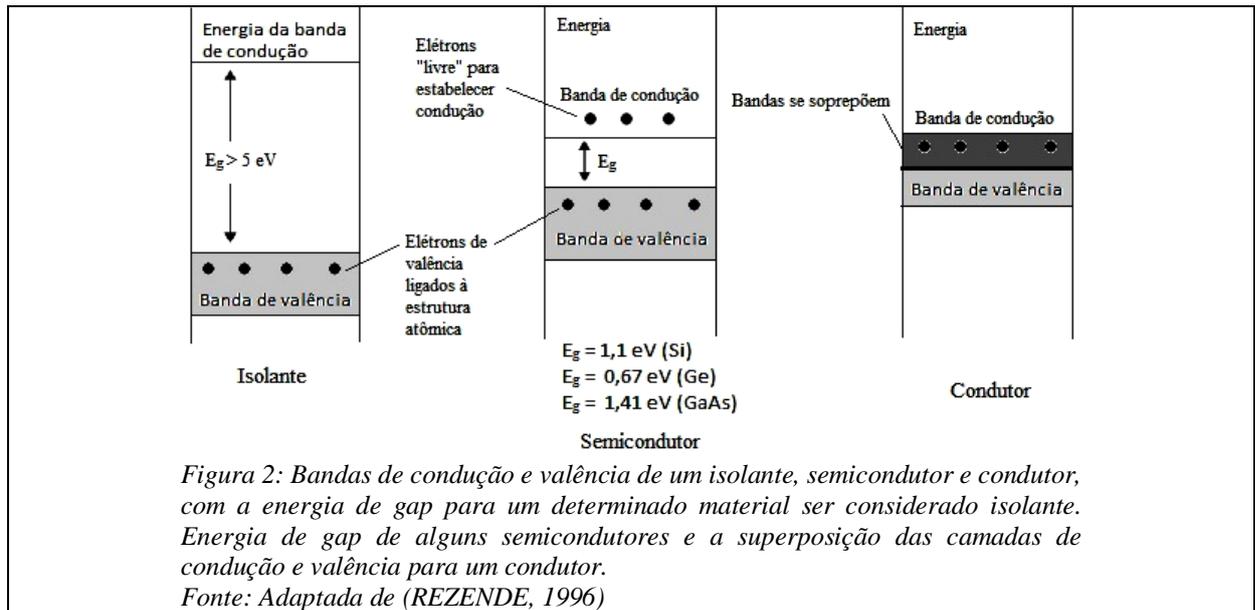
Um elétron que possui seu movimento orientado por um campo elétrico periódico, dentro de um cristal, terá seu movimento influenciado pelo campo elétrico combinados de todos os núcleos da rede cristalina. De modo intuitivo é possível esperar que o efeito desse campo

combinado possa ser incorporado, isto faz com que o elétron tenha um comportamento como se sua massa não fosse mais livre, mas sim uma massa efetiva m_e . O valor dessa massa efetiva é de aproximadamente um quinto do valor da massa de uma partícula livre.

1.2 NÍVEIS DE ENERGIA

Associados a cada elétron, em orbita, há níveis de energia que podem ser chamados de discretos. No entanto, os materiais, individualmente, terão seu arranjo de níveis de energia permitidos (REZENDE, 1996).

A partir do momento em que os átomos de um determinado material começam a se unir, de maneira a formar uma estrutura de rede cristalina, a interação entre estes átomos aparece. Dessa interação resultam diferentes órbitas para os elétrons de cada um dos átomos. Estes níveis de energia são análogos aos níveis dos átomos livres, mas apresentam uma leve diferença entre si, pois pertencem a átomos diferentes. Num cristal com muitos sítios observa-se uma expansão dos níveis discretos de energia, para elétrons de valência, conforme mostrado na Figura 2. É possível observar a existência entre os níveis de ligação e estados de energia máxima, possibilitando a presença de elétrons em regiões proibidas, entre a banda de valência e o nível de ionização, quando se tratavam de átomos individuais. Por ionização entende-se o meio pelo qual um elétron pode absorver energia suficiente para se desligar da estrutura atômica e ir para a banda de condução (BOYLESTAD e NASHELKY, 1999).



1.3 BANDAS DE ENERGIA

O termo banda de energia pode ser entendido como sendo um conjunto de níveis de energia, criados e sobreposto pela degenerescência dos níveis discretos dos átomos individuais, que os elétrons de um determinado sólido possam vir a ocupar.

Em átomos isolados os níveis de energia são discretos. Já nos cristais, devido à presença de elétrons próximos e ligados entre si, forma-se uma rede. Há, portanto, uma influencia dos núcleos vizinhos sob cada elétron, transformando os níveis de energia atômicos em bandas de energia. A teoria quântica garante que os elétrons, de um determinado átomo, não podem ocupar qualquer nível de energia, mas apenas aqueles determinados por números quânticos permitidos.

É fundamentado nesse conceito, que é possível estudar esses níveis de energia e determinar a maior ou menor ligação de átomo em uma rede. Os níveis de energia completamente ocupados; que abrigam os elétrons mais fortemente ligados ao núcleo, aqueles que ocupam as regiões mais internas e profundas dos átomos; formam a chamada de banda de valência. Esta

banda possui níveis de energia mais baixos, sendo pouco ou nada afetados pelos átomos da sua vizinhança.

Por estarem dentro de uma estrutura cristalina os elétrons que interagem com elementos vizinhos são os elétrons menos ligados ao núcleo, aqueles que ocupam as camadas mais externas dos átomos da rede. Como no caso da banda de valência, os elétrons mais afastados podem formar uma banda, quando essa banda se encontra parcialmente preenchida é chamada de banda de condução.

As propriedades elétricas dos sólidos são explicadas pela teoria de bandas. Alguns elétrons se movimentam dentro da rede cristalina, muitas vezes quase que totalmente livres, podendo ainda saltar de um estado quântico para outro. A passagem de um elétron, que ocupa um determinado estado quântico só é possível, se houver estados quânticos vazios. Via de regra, os elétrons não podem saltar de um estado quântico para outro da mesma banda. Da mesma forma, não é permitida a transição da banda de valência para a banda de condução, se esta encontra totalmente preenchida.

Quando ocorre passagem de corrente elétrica na banda de condução, é porque os elétrons não preenchem completamente a banda. De modo geral, os metais são os melhores condutores de corrente elétrica, a sua banda de valência, assim como a sua banda de condução, se encontram semi-preenchida. Essa, entretanto, não é a única razão, a outra importante razão é o fato da banda de condução se sobrepor a banda de valência.

No caso dos isolantes que são, por sua vez, materiais que praticamente não conduzem corrente elétrica, as bandas de valência e condução estão muito separadas, por uma larga zona proibida. Essa zona proibida impede que os elétrons transitem de uma banda para outra, pois os mesmos não possuem energia suficiente para romper a zona proibida.

Para os semicondutores, que possuem uma zona de separação entre as bandas muito menor que dos isolantes, a passagem dos elétrons das bandas de valência (totalmente preenchidas) para as bandas de condução (bandas semi-preenchidas) é possível. Bastando para tanto um

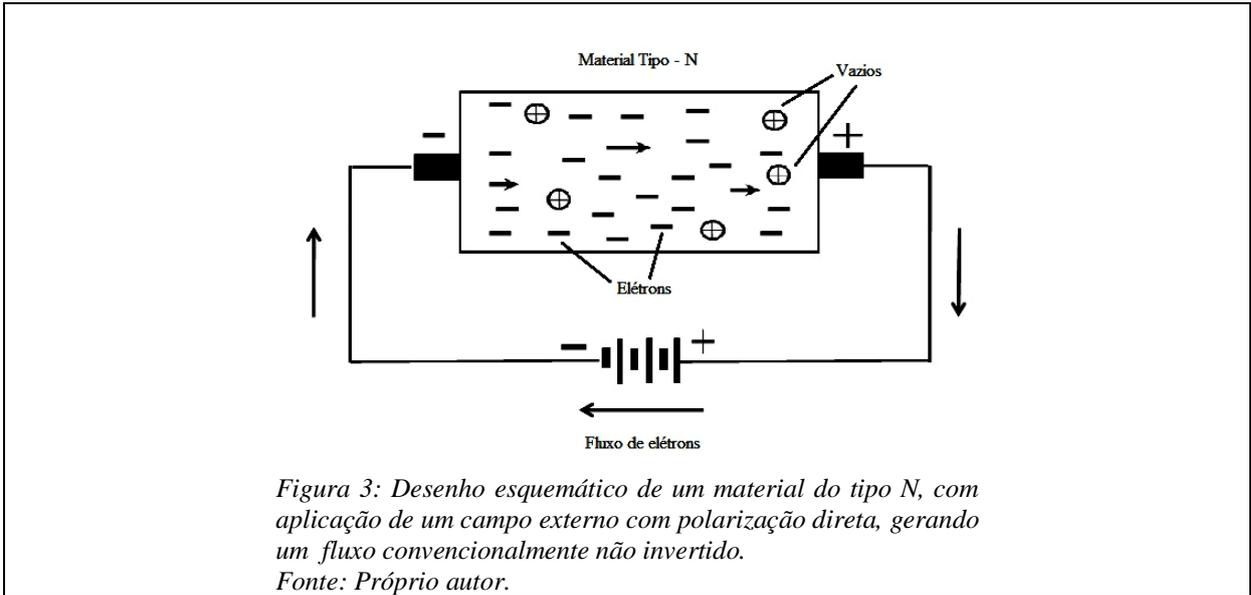
“pequeno” aporte de energia. Este aporte ocorre mediante o aumento de temperatura ou aplicação de um campo externo ou ainda por meio de uma excitação luminosa.

1.4 LACUNAS

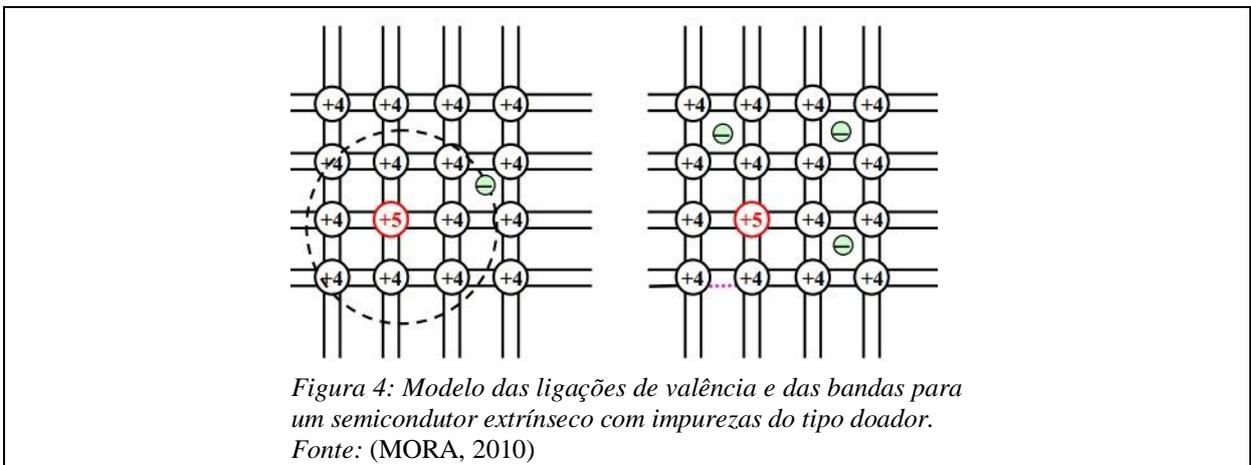
Os orbitais vazios e o estudo de suas propriedades são considerados de extrema importância, tanto para física dos semicondutores, como para a eletrônica do estado sólido. Esses orbitais vazios, quando estão em uma banda de energia, recebem um nome especial, eles são chamados de buracos. Quando se têm orbitais vazios, que também podem ser chamados de lacunas, sob a influência de campos elétricos ou magnéticos, esses orbitais/buracos se comportam como partículas de carga positiva $+e$.

1.5 SEMICONDUTOR DO TIPO N

Tendo átomos com valência quatro e adicionando a estes, pequenas quantidades de um elemento com valência cinco, é possível a obtenção de uma rede, na qual um átomo de impureza substitui, de quando em quando, o átomo cuja valência é quatro. Na Figura 3 é possível visualizar um esquema do que acontece com o fluxo de elétrons.

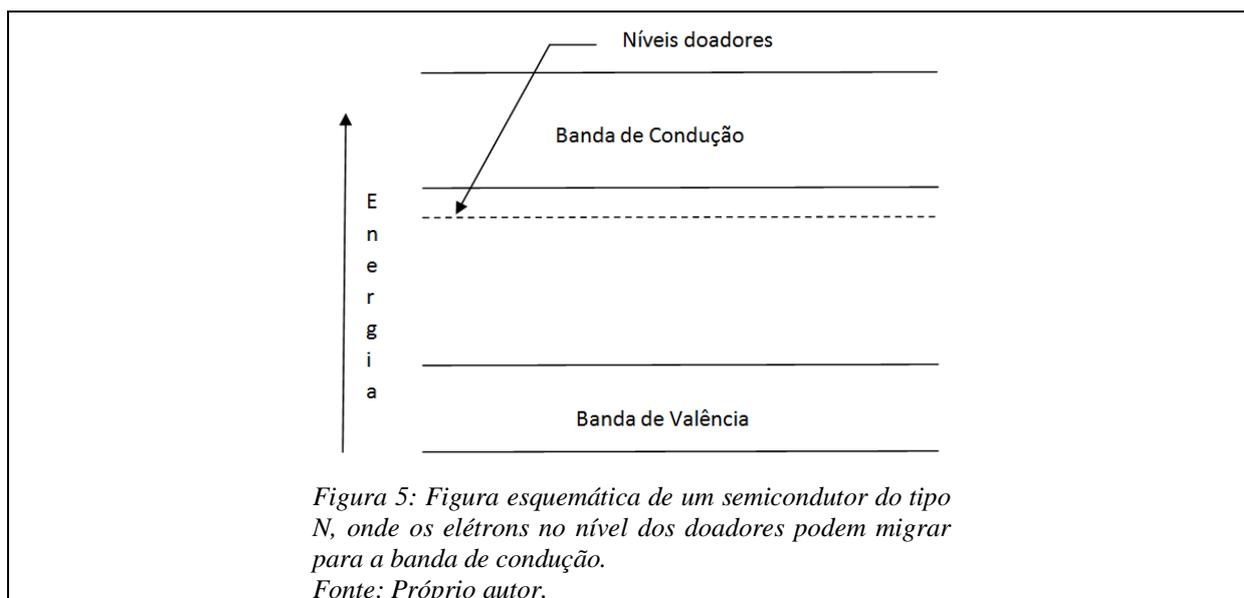


Quando um átomo de As^{+5} , por exemplo, substitui um átomo de Ge^{+4} , quatro dos cinco elétrons de valência tomam lugar nos quatro pares de ligação covalente. Resta então, um quinto elétron que não participa da co-valência. Esse quinto elétron fica ligado ao seu átomo por uma energia muito fraca, e em primeira aproximação, é possível fazer uma analogia com um modelo de hidrogênio não no vácuo, mas no meio de constante dielétrica igual a do germânio (CASSIGNOL, 1960). Na Figura 4 é possível observar um modelo de formação de materiais do tipo N.



Como consequência, o elétron não ligado tem o mesmo comportamento de um elétron de condução, ligado a um centro de impureza. Este centro funciona, então, como um fornecedor ou um doador de elétrons. O que caracteriza um semiconductor extrínseco com excesso de elétrons, ou semiconductor de tipo N.

A introdução de impurezas químicas, em pequenas quantidades, não perturba o diagrama de energia, os átomos de impurezas vão ocupar um nível de energia cuja distancia em relação a banda de condução é igual à energia de ativação. Tem-se então, para um semiconductor de tipo N, cujo diagrama de bandas de energia é mostrado na Figura 5, elétrons dos níveis doadores que passam com facilidade para a banda de condução (CASSIGNOL, 1960, p. 8) e (AZAROFF, 2001).

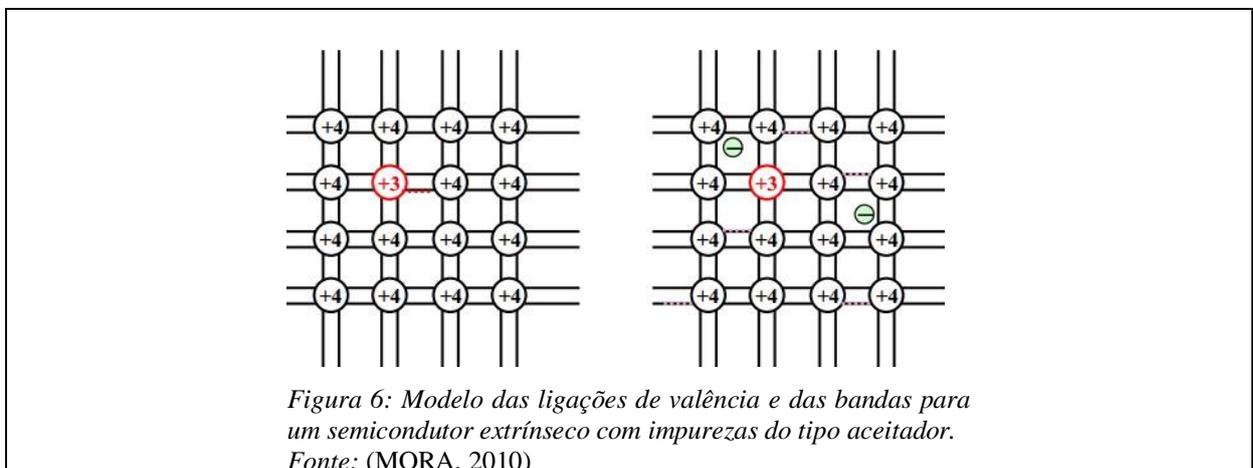


Um modo de se obter semicondutores do tipo-N é dopando o silício com fósforo ou arsênio, por exemplo. O silício é usado, bem como o germânio e o carbono, por possuírem uma composição eletrônica com quatro elétrons na banda de valência. Esse tipo de configuração eletrônica permite ao átomo a formação de cristais, com um átomo no centro, possibilitando sua ligação com quatro átomos vizinhos. No entanto, esse tipo de configuração, não permite

que os elétrons permaneçam livres para a condução de corrente, motivo pelo qual a dopagem se faz necessária.

1.6 SEMICONDUTOR DO TIPO P

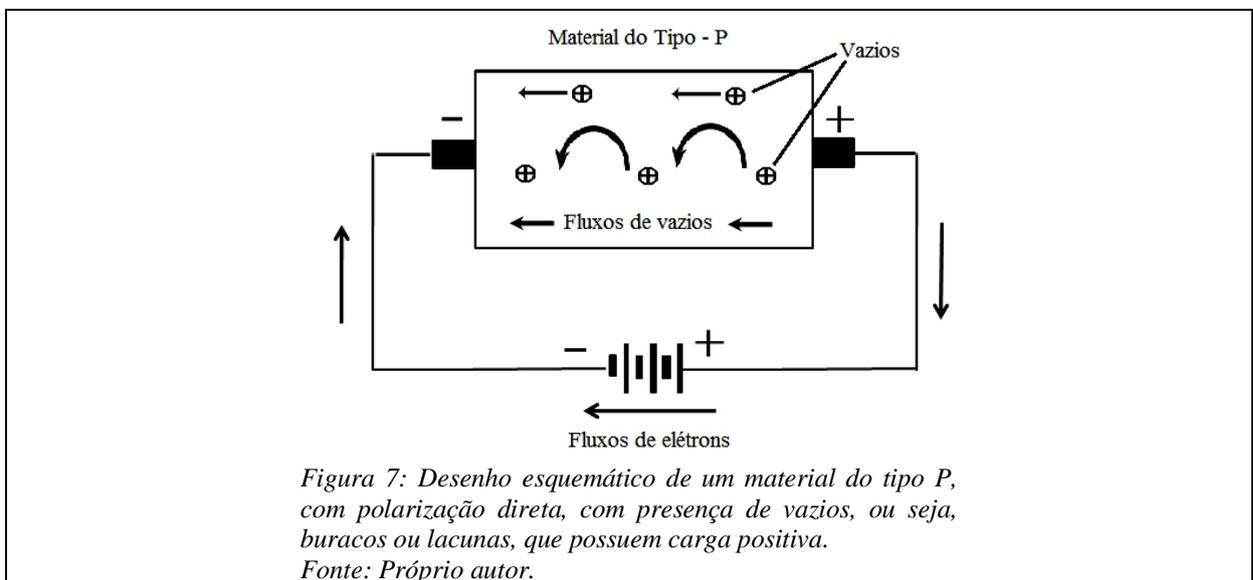
O mesmo processo utilizado para a criação de uma camada do tipo-N, pode ser usado para a formação de uma camada do tipo-P. Em lugar de dopar o material com fósforo ou arsênio, a dopagem pode ser feita com boro ou gálio, materiais trivalentes. Quando um átomo de boro, por exemplo, se liga ao de silício criam-se buracos e o elétron do silício não tem onde ligar-se. É exatamente a falta de um elétron que gera uma carga positiva “virtual”. Quando se trata de um cristal é formada uma camada positiva onde há excesso de buracos ou lacunas (MORA, 2010) e (PEREIRA, 2010).



A introdução de impurezas de tipo aceitador, como o Boro (B) no Silício (Si), resulta em lacunas eletrônicas. A impureza possui apenas três elétrons para compartilhar com os 4 átomos de Si vizinhos, pelo que fica uma ligação incompleta como é possível ver na Figura 6.

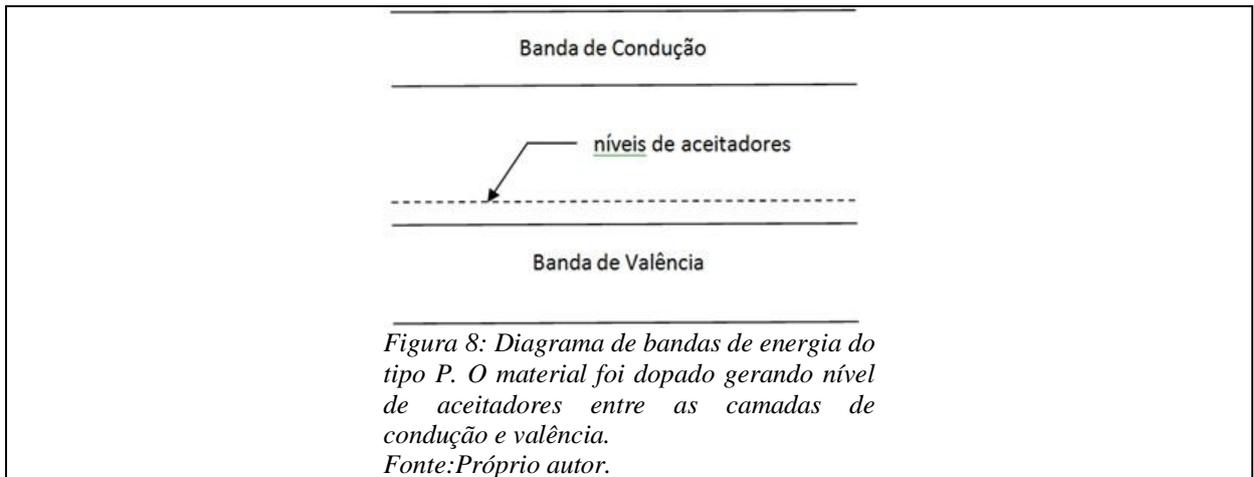
Uma das ligações covalentes do Si com o átomo de B fica com falta de um elétron. Essa ausência de elétron se comporta como uma lacuna, porém essa lacuna não se encontra na banda de valência, uma vez que o elétron dessa banda precisa receber certa energia para ocupar este estado. Sendo assim, as lacunas oriundas das impurezas ocupam nível de energia acima da banda de valência, na banda proibida, chamado de nível receptor ou níveis aceitadores. Essa lacuna atua como carga positiva, atraindo elétrons para completar sua ligação. Essas impurezas são chamadas de receptoras ou aceitadoras (MORA, 2010).

Na Figura 7 tem-se ilustrado o comportamento de um material do tipo P, quando submetido a uma corrente de polarização direta.



Os buracos eletrônicos que permanecem na banda de valência atuam como transportadores de carga positiva, na região semicondutora do tipo P.

Os átomos de impureza formam os níveis aceitadores, separados da banda de valência por um intervalo da mesma ordem de grandeza do intervalo entre níveis doadores e a banda de condução, como ilustra Figura 8.



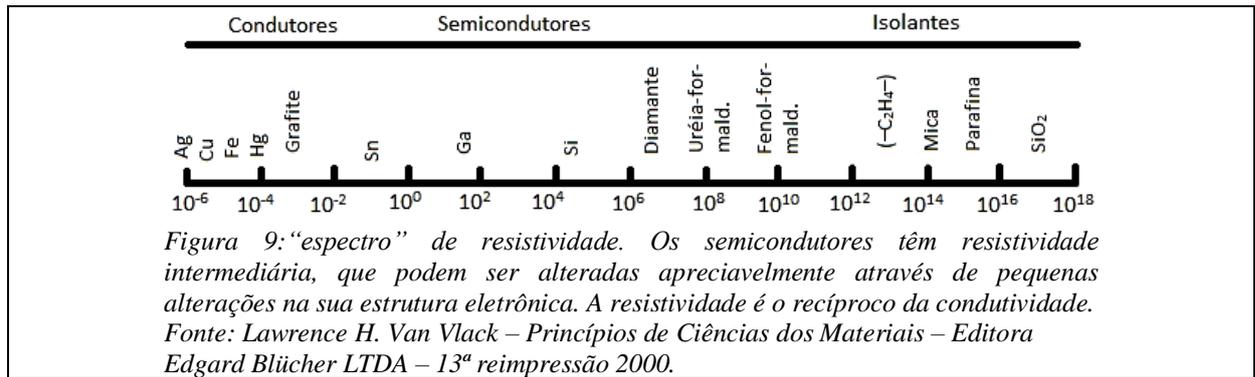
CAPÍTULO 2

ESTRUTURA E PROCESSOS ELETRÔNICOS

2.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A condutividade elétrica é definida como a habilidade de um material, ou solução, em permitir o trânsito de cargas elétricas. Em cristais, elétrons e pseudo-íons positivos podem se mover de um ponto para o outro da rede cristalina. De modo geral, um dado material ou composto pode ser classificado em termos de sua condutividade em três grandes grupos: condutores, isolantes e semicondutores.

Em materiais semicondutores a condução de corrente elétrica está intimamente ligada à temperatura, nestes materiais a probabilidade de ocorrência de transições eletrônicas é baixa, ou mesmo zero, a menos que a temperatura seja alta. Diante do fato de que a carga deve ser levada por “íons” ou elétrons, cuja mobilidade varia para os mais diferentes materiais, há um “espectro” completo de condutividades, desde metais altamente condutores, até os isolantes praticamente perfeitos Figura 9 (NAKAMURA e SHUJI, 1996).

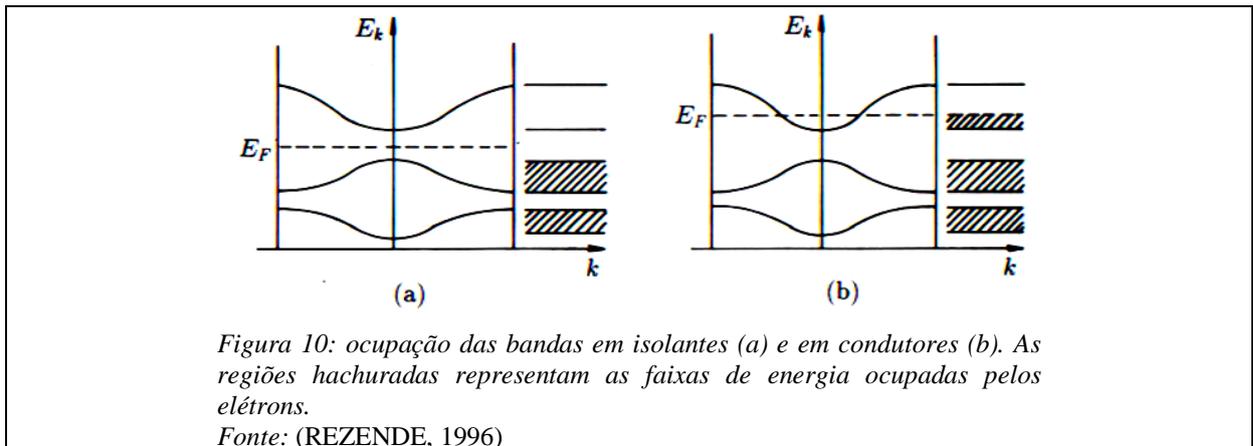


Em soluções, por se tratar de condutividade iônica, os portadores de carga podem ter tanto cátions como ânions. Porém quando se trata de condutividade eletrônica, os portadores são elétrons ou buracos eletrônicos (NAKAMURA e SHUJI, 1996).

2.2 CONDUTOR

Os materiais condutores podem ser também identificados como metais e são maioria na tabela periódica. Comumente os metais possuem elétrons mais afastados do núcleo, esses elétrons estão fracamente ligados, e tem a possibilidade de se mover com certa mobilidade nos espaços interatômicos, esses elétrons são chamados de elétrons livres. Sendo responsáveis pela maioria das propriedades intrínsecas dos metais.

Os metais, em geral, possuem a última banda semi-preenchida. Dessa forma, é possível mudar os estados dos elétrons com um campo elétrico externo, resultando em corrente elétrica. Nestes materiais a camada de maior energia é a camada mais exterior à última camada completa. Na Figura 10 tem-se a representação das bandas de energia para os condutores e isolantes, onde a Figura 10 (a) representa os isolantes e a Figura 10 (b) os condutores, E_F representa a energia ou nível de Fermi.



A energia de Fermi (E_F) está associada ao nível ocupado mais energético em um determinado sistema fermiônico, na temperatura do zero absoluto. Para temperaturas acima do zero Kelvin, a energia de Fermi corresponde à energia obtida mediante uma média das energias dos diferentes níveis quânticos, sendo sua probabilidade de ocupação decorrente da agitação térmica, ou seja, onde na temperatura do zero absoluto todos os níveis estariam ocupados, logo a probabilidade de ocupação é igual a um. Em contraponto, os níveis acima dessa temperatura estariam desocupados, ou, com probabilidade de ocupação nula. Em relação aos sistemas em que as temperaturas são não nulas, tem-se uma transição abrupta de probabilidade dada pela distribuição Fermi-Dirac.

2.3 ISOLANTE

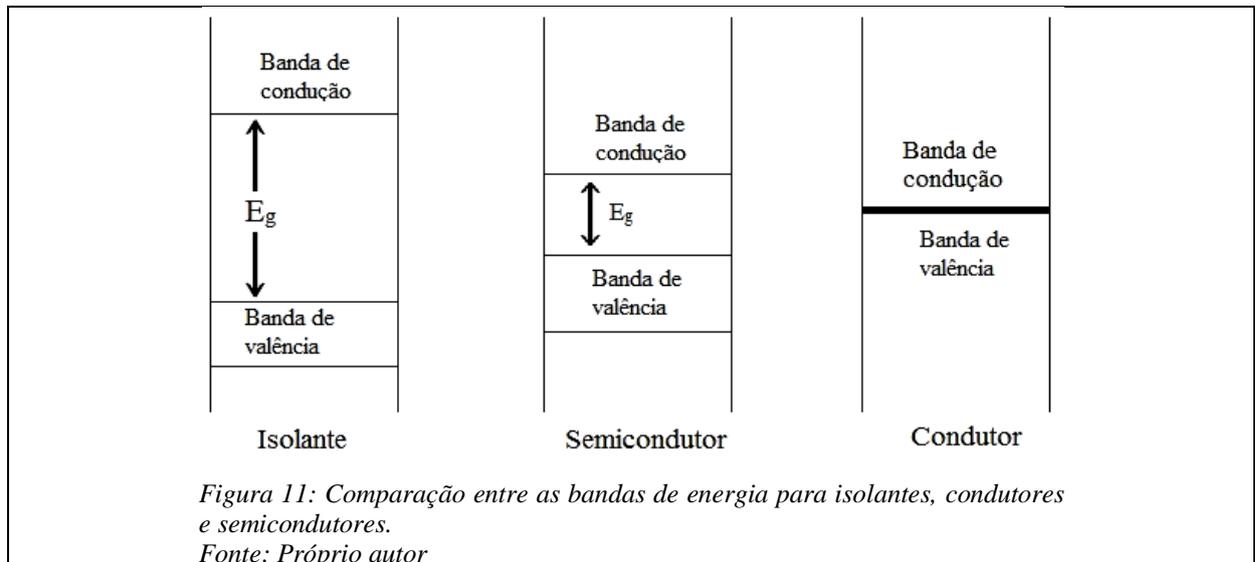
Materiais que não conduzem corrente elétrica têm em sua maioria, a última banda de energia completamente cheia. Os isolantes são também conhecidos como dielétricos e são utilizados, tanto para o armazenamento de energia elétrica, quanto para fins de segurança. Diferentemente do que ocorre nos condutores e nos semicondutores, a presença do campo elétrico nos isolantes não libera os elétrons dos átomos ou das moléculas. Nesses cristais, a aplicação de um campo elétrico externo não altera o momentum total nulo dos elétrons pois,

todos os estados disponíveis estão ocupados, não ocasionando a passagem de uma corrente quando um campo elétrico externo é aplicado (REZENDE, 1996).

2.4 SEMICONDUTOR

A diferença que existe entre isolante, condutor e semicondutor, pode ser explicada em termos de estrutura de bandas (ver seção 1.3). Para um isolante, a camada de valência está separada da camada de condução por um intervalo, ou *gap* de energia, denominado banda proibida. A energia para que um elétron da camada de valência chegue a camada de condução em um isolante é superior a 6 eV. Os semicondutores também apresentam *gap* de energia ou banda proibida, porém, este *gap* é muito inferior ao dos isolantes.

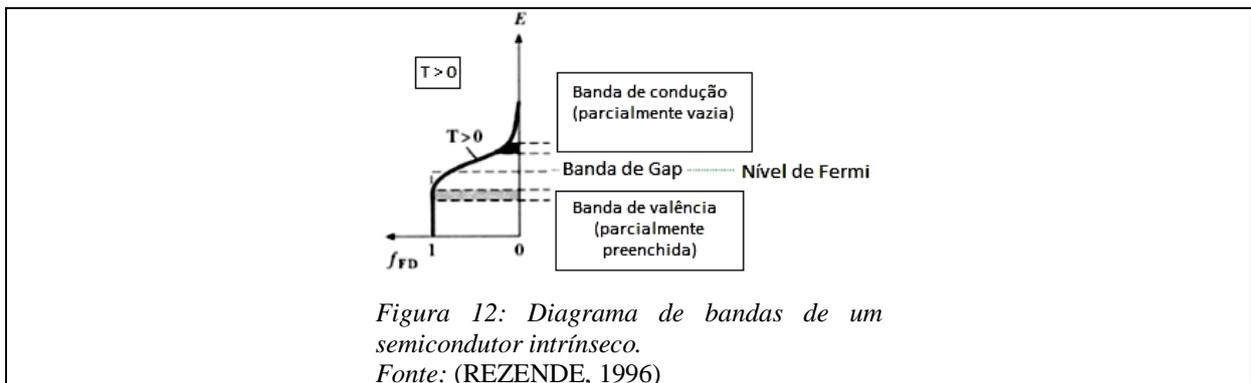
Em materiais com condutividade elétrica intermediária, entre isolante e condutor, é chamado de semicondutor, como ilustrado na Figura 11. A condutividade dos semicondutores não é tão alta quanto a dos condutores (metais), no entanto, existem algumas características elétricas que os tornam especiais. Isto porque suas propriedades elétricas são extremamente sensíveis à presença de impurezas, mesmo que em pequenas concentrações.



Os materiais o condutores, onde os elétrons das camadas mais externas estão fracamente ligados aos núcleos atômicos, as bandas de valência e de condução se superponham, permitindo a existência de elétrons livres. Estas partículas livres são responsáveis pela alta condutividade elétrica destes materiais.

Os semicondutores de alta pureza apresentam uma condutiva intrínseca, enquanto os semicondutores menos puros apresentam uma condutividade extrínseca associada a impurezas e defeitos da rede.

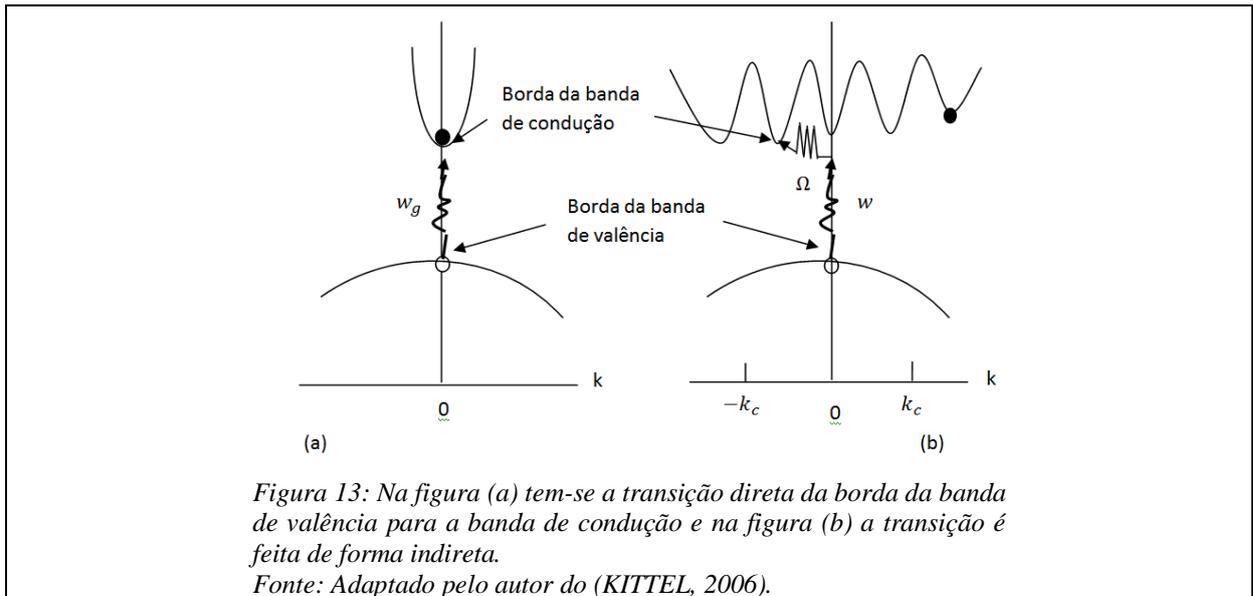
Na Figura 12 pode ser visualizado um diagrama de bandas de energia associado à condutividade intrínseca. A banda de condução, que está vazia no zero absoluto, é separada da banda de valência, que está completa, por uma banda proibida de largura E_g (KITTEL, 2006, p. 161).



De um modo mais amplo, é possível medir a largura da banda proibida por meio de absorção ótica. Esse é um processo direto de absorção, o limiar da absorção ótica, w_g , é uma medida da largura da banda proibida $E_g = \hbar w_g$.

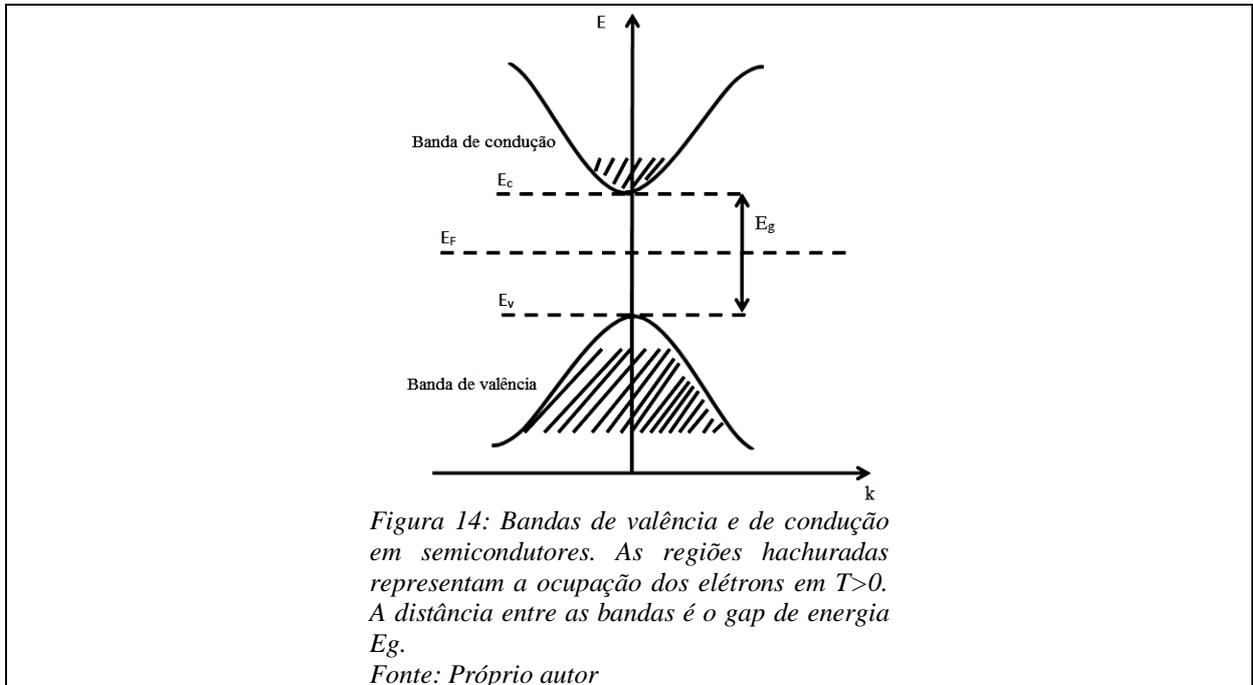
A diferença existente entre o ponto mais baixo da banda de condução e o ponto mais alto da banda de valência, expressa a chamada largura da banda proibida. A largura da banda proibida também pode ser determinada a partir da variação da condutividade ou da concentração de portadores na faixa intrínseca de temperaturas. Para temperaturas acima do

zero absoluto há uma possibilidade não nula que alguns elétrons ganhem energia térmica suficiente para saltar sobre o *gap* de energia, até uma banda permitida de maior energia, criando buracos na banda inferior. As bordas das bandas no Ge e no Si são ligadas por transições indiretas; as bordas das bandas no InSb e no GaAs são ligadas por uma transição direta (KITTEL, 2006).



Na Figura 13(a) o mínimo da banda de condução coincide com o máximo da banda de valência, neste caso uma transição não pressupõem uma mudança no momento (k) do portador de carga. Dessa forma, a representação da transição é uma linha vertical. A Figura 13(b) representa uma transição indireta, intermediada por um fóton e um fônon, uma vez que o mínimo da banda de condução e o máximo da banda de valência estão separados por um distancia k , em relação ao eixo das abscissas. O limiar da energia para um processo indireto, representado na Figura 13(b), é maior que a largura da banda proibida. Sendo assim o limite de frequências para absorção de fótons é $\omega = \frac{E_g}{\hbar} + \Omega$, onde Ω é a frequência de um fônon da rede.

A Figura 14 ilustra a ocupação das bandas de valência e de condução num semiconductor de gap direto e intrínseco, de sorte que a ocupação da banda de condução decresce com o aumento da razão $\frac{E_g}{K_b T}$ (REZENDE, 1996).



2.5 LUMINESCÊNCIA

Existem várias maneiras de se ativar os elétrons e elevá-los a níveis de energia mais altos, a comumente usada é a excitação por fótons. Se ao retornar à sua posição de origem o elétron libera o excedente de energia na forma de um ou mais fótons, diz-se que o material produziu luminescência. Via de regra, para materiais com características óticas de meio linear, a energia re-irradiada nunca é superior à energia da luz de excitação. Ou seja, o fóton, ou fótons emitidos têm um comprimento de onda maior que a do fóton inicial, a diferença existente entre o comprimento de onda absorvido e o emitido é conhecido como a lei ou deslocamento de Stokes (VAN VLACK, 2000).

Na luminescência não há instantaneidade, haverá sempre um atraso devido ao tempo de vida do elétron no nível de energia para o qual este foi excitado. A re-irradiação ocorre segundo uma lei estatística, a intensidade da luminescência , I_t , para certo instante de t , está relacionada com a intensidade inicial de emissão de luz de des-excitação pela Equação 1

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 1$$

Nesta expressão τ é o tempo de relaxação característico da desexcitação radiativa. Sistemas com pequeno tempo de relaxação são conhecidos como fluorescentes, em lugar de sistemas luminescentes. Para materiais com tempo de relaxação grande, de forma que a luminescência ocorre mesmo depois que a excitação cessa, usa-se o termo fosforescência. A distinção entre os dois tipos de comportamento está relacionada com a velocidade de reação do meio sensível à energia da fonte excitação (VAN VLACK, 2000).

2.6 ELÉTRONS E LACUNAS EM SEMICONDUTORES INTRÍNSECOS

Materiais semicondutores intrínsecos são aqueles que foram cuidadosamente refinados para reduzirem as impurezas a um nível muitíssimo baixo, além de apresentarem grande perfeição cristalográfica – essencialmente são materiais perfeitos e tão puros quanto possível (BOYLESTAD e NASHELSKY, 1999).

Como mencionado antes, o aumento da temperatura em um semicondutor puro pode resultar em um aumento na concentração de elétrons na banda de condução, ou seja, a temperatura exerce grande influência no poder condutivo em materiais intrínsecos (princípio dos Nanotubos de Carbono) (BOYLESTAD e NASHELSKY, 1999) e (REZENDE, 1996).

Os elétrons próximos ao topo da banda de valência têm massa efetiva negativa, devido a certa curvatura da função $E(k)$. A quantidade de portadores em um condutor não aumenta significativamente com a temperatura, entretanto, o seu modo de vibração em volta de uma determinada posição fixa da rede cristalina, trará certa dificuldade para os elétrons atravessarem o material. Este efeito gera a resistência à passagem de corrente elétrica encontrada nos metais, em função do aumento da temperatura (BOYLESTAD e NASHELSKY, 1999) e (REZENDE, 1996).

2.7 SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS

A característica dos materiais semicondutores também pode ser significativamente alterada com a presença de impurezas, ou seja, átomos diferentes que serão adicionados a composição do cristal semiconductor. Estas impurezas, embora adicionadas em razões menores que uma parte em 100 milhões, podem alterar a estrutura de banda, modificando as propriedades elétricas do material. É esta característica que possibilita a fabricação de grande variedade de dispositivos eletrônicos, a partir do mesmo material semiconductor. O processo de colocar impurezas, de elementos conhecidos, num semiconductor é chamado de dopagem. Semicondutores com impurezas são chamados dopados ou extrínsecos (BOYLESTAD e NASHELSKY, 1999) e (REZENDE, 1996).

Através da dopagem é possível fazer com que o número de elétrons, disponíveis para a condução, seja maior que o de lacunas, ou vice-versa. Os semicondutores com predominância de elétrons são chamados do tipo **N** (negativo) e criados pela adição de elementos químicos com elétrons em excesso, a exemplo dos pentavalentes. Enquanto que os de maior concentração de lacunas são ditos tipo **P** (positivos) e são formados pela adição de certa quantidade de átomos com menor número de elétrons na última camada, como os trivalentes. O efeito deste processo de dopagem na condutividade pode ser mais bem entendido por um diagrama de banda, discutido na seção 1.3.

Em um semicondutor dopado um nível de energia discreto, chamado de doador, aparece no interior da banda proibida e forma um novo *gap* de energia em relação a banda de condução. A energia E_g deste *gap* é significativamente menor que no material intrínseco. Os elétrons livres, devido à impureza adicionada, situam-se neste novo nível de energia. Eles têm menos dificuldade em absorver energia, mesmo que térmica, e assim experimentarem uma transição para a banda de condução. Os semicondutores dopados têm condutividade que varia pouco com a temperatura, isso devido à presença de um grande número de portadores (por exemplo: elétrons) no nível de condução. Resultando na blindagem virtual à chegada de novos elétrons nos níveis mais elevados da banda de condução. Por outro lado, a presença de carga livre na banda de condução aumenta, consideravelmente, a condutividade do material, cujo valor, é determinado pela concentração de impurezas. É o controle das propriedades dos semicondutores por dopagem que possibilita utilizá-los em uma enorme variedade de dispositivos eletrônicos (BOYLESTAD e NASHELSKY, 1999) e (REZENDE, 1996).

2.8 ELETROLUMINESCÊNCIA

Eletroluminescência é a emissão de luz como resultado da estimulação eletrônica do material (IVEY, 1966). Estudos estabeleceram que o processo responsável pela eletroluminescência é a injeção de elétrons em um dos eletrodos, de um diodo emissor de luz, e o respectivo aparecimento de buracos ou lacunas no outro eletrodo (R. H. FRIEND, 1999). Dispositivos eletroluminescentes podem emitir em várias cores, com grande eficiência, brilho e uniformidade. A cor da emissão vai depender da diferença de energia entre os estados eletrônicos, ou seja, a diferença de energia entre as bandas de condução e de valência. No entanto, outros fatores estão incluídos nesse processo, como a estrutura química e a morfologia do material (OLIVEIRA, COSSIELLO e ATVARS, 2006). A estrutura química do material tem grande influencia sobre a região espectral da emissão. Isso porque, a partir dela se definem os níveis de energia, o potencial de ionização e a afinidade eletrônica.

Já no processo de injeção de carga, o controle acontece pela diferença que existe entre as funções trabalho (energia necessária para retirar um elétron da banda de valência para um nível do vácuo) dos eletrodos, da afinidade eletrônica do catodo e do potencial de ionização do anodo. A emissão foto ou eletroluminescente é caracterizada por uma transição eletrônica entre orbitais. (OLIVEIRA, COSSIELLO e ATVARS, 2006).

CAPÍTULO 3

FOTODIODO E SUA OPERAÇÃO

3.1 JUNÇÃO PN

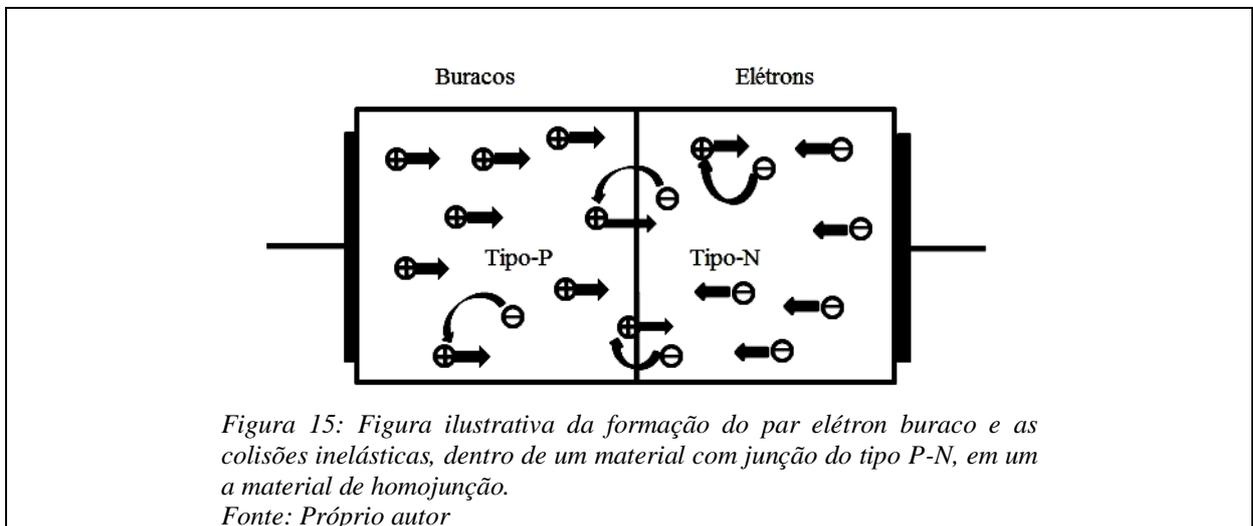
A junção P-N é obtida pelo contato de duas regiões semicondutoras com diferentes propriedades elétricas. Se nesse contato for utilizado o mesmo semicondutor, então, essa junção é dita homojunção, se for realizado por dois diferentes semicondutores é chamada de heterojunção. Essa junção resulta na formação de um tipo de diodo, no qual podem ser implantados dois contatos metálicos (eletrodos) para entrada e saída de corrente.

Em se tratando da homojunção, a formação das regiões P e N é realizada pela dopagem do material matriz, cuja finalidade é a obtenção de materiais dos tipos P (aceitadores), onde em sua maioria são buracos ou lacunas e N (receptores), onde em sua maioria os portadores são elétrons.

Durante o processo de dopagem, átomos dopantes ricos em buracos ou lacunas, que são maioria do lado P, tendem a se difundir para o lado N, enquanto átomos ricos em elétrons, que

são maioria do lado N, tendem a difundir para o lado P. Essa difusão perturba a neutralidade elétrica local do sistema (KITTEL, 2006). Os átomos com buracos, que migraram para o lado N, têm forte tendência a se fixarem, aprisionando um elétron livre dessa região. De maneira análoga, os átomos com elétrons em excesso, que difundiram na zona P, se fixam aos íons positivos fixos da rede presentes nesta região do cristal. Em ambos os lados é criada uma região desprovida de carga elétrica livre, com características de isolante, chamada de *zona de depleção*. A influência da zona de depleção sobre a difusão é muito clara, aos pouco a zona formada dificulta, até fazer parar, a chamada corrente de difusão, formada por átomos dopantes, nesse momento está formado o diodo.

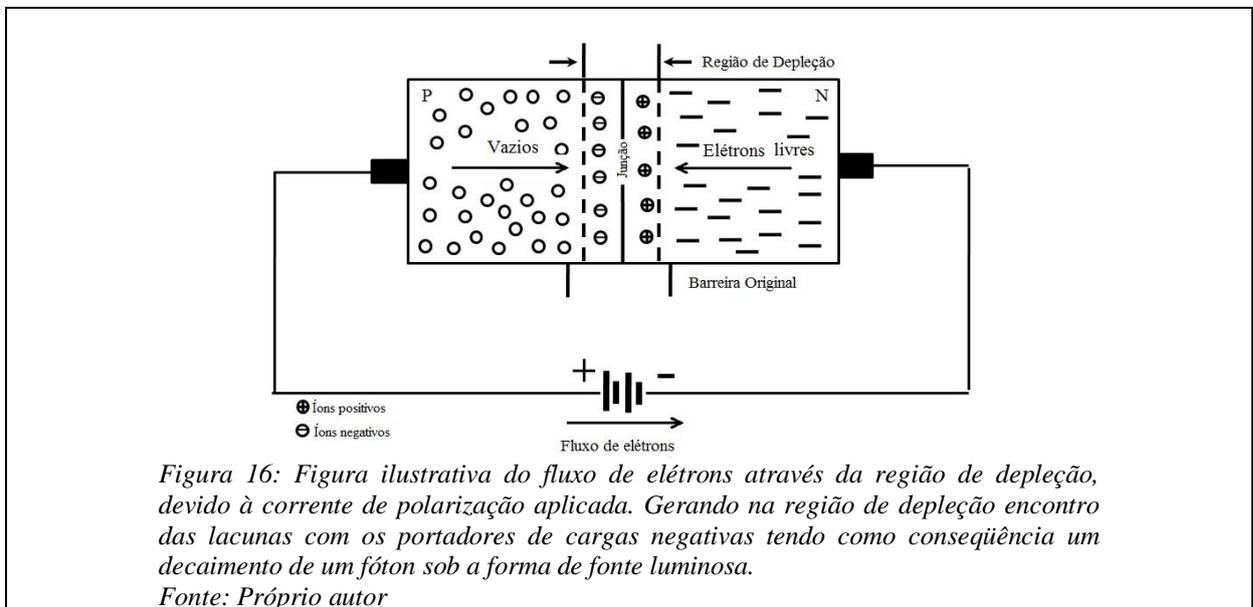
Esse tipo de junção, ou melhor diodo, pode ser empregado como detector de radiação, pois portadores de carga livres podem percorrer o semiconductor se absorvida a quantidade certa de energia. Isso, apesar do espalhamento (colisões inelásticas) que sofrem, tanto com a nuvem eletrônica dos átomos da rede, quanto com os íons fixos dessa mesma rede. Apesar disso, haverá transferência de parte da energia conseguida, pela interação desse dispositivo com a radiação externa. As colisões e as transferências de energia estão ilustradas na Figura 15.



Se na transferência de energia, a cada colisão, a energia passada de portador a portador for superior a energia da banda proibida, serão criados elétrons livres, possibilitando a migração

da banda de valência para a banda de condução, ao mesmo tempo em que se criam buracos na banda de valência, dessa forma são gerados pares elétron-buraco (CAMARGO, 2005) e (KITTEL, 2006).

É importante ressaltar a importância do processo no qual os íons negativos, que migraram para o lado P, e os buracos positivos, que migraram para o lado N, agora se encontram fixos. Este processo causa um desequilíbrio de carga em cada lado da matriz semicondutora. O acúmulo de cargas elétricas, de sinais contrários, cria um potencial, dito potencial de barreira, que se contrapõem a passagem de corrente elétrica. Um esquema dessa difusão de elétrons e buracos pode ser melhor visualizado na Figura 16.



O número total de pares elétron-lacuna produzido é proporcional à quantidade de energia da partícula ionizante ou da onda eletromagnética absorvida na região vizinha à junção. Este número pode ser calculado pela relação entre a energia incidente e energia média necessária para se produzir um par elétron-lacuna num dado semicondutor. A energia média para criação do par leva em consideração as perdas de energia devido às vibrações da rede cristalina, excitação dos átomos, etc. Apenas para exemplificar, a energia média necessária para se produzir um par elétron-lacuna no silício a 300 K é de 3,62 eV (KITTEL, 2006).

Quando a ionização ocorre na *zona de depleção*, que margeia a junção semicondutora, os pares criados podem ser acelerados pela diferença de potencial (tensão de barreira) existente nesta região. Como a polaridade dessa diferença de potencial é inversa, em relação a abundância dos portadores majoritários presentes em cada lado do cristal, os elétrons são repulsados para o lado N e as lacunas para o lado P, dando lugar a uma corrente.

Como a diferença de potencial intrínseca na junção é pequena, não excedendo 1,0 V, pode ocorrer a recombinação de grande parte dos pares elétron-lacuna formados, conduzindo a uma coleta parcial das cargas geradas e portanto da energia incidente. Este efeito afeta a amplitude do sinal gerado (corrente), visto que esta grandeza depende da carga coletada e também da capacitância da junção (CAMARGO, 2005).

Para que haja uma garantia de proporcionalidade entre a amplitude de um sinal elétrico e a energia de radiação incidente é aconselhável que o excesso de carga livre, produzida por ionização na junção, seja coletada, o que é conseguido através da polarização reversa da junção, de forma a aumentar a diferença de potencial entre essas regiões. De modo simultâneo há uma redução da capacitância do diodo, em decorrência disto tem-se um aumento na amplitude sinal.

3.2 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO

A taxa que representa a formação de pares elétron-lacuna depende do coeficiente de absorção do semicondutor, que é representado pela diminuição da densidade de potencia ótica (grandeza relativa à quantidade de fótons por unidade de superfície por unidade de tempo) com a distancia percorrida dentro do material. Como a potencia representa a taxa de variação de energia por unidade de tempo e a energia da irradiação é igual ao número de fótons multiplicado pela energia de um fóton; o decréscimo da densidade de potencia ótica com a distância significa uma redução na quantidade de fótons por unidade de tempo, à medida que a luz penetra no meio. Com isto, reduz-se a quantidade de elétrons liberados por unidade de

tempo e também a contribuição para formar a fotocorrente. A densidade de potencia óptica, para o caso de incidência normal à superfície do cristal, a uma distância x do ponto por onde entrou a luz, é descrita por pela Equação 2.

$$S(x) = S_0 e^{-\alpha x}$$

2

Em que S_0 é a densidade de potencia do campo óptico logo que penetra no semiconductor, α é o coeficiente de absorção e $e = 2.7182 \dots$ a base do logaritmo neperiano (RIBEIRO, 2007, p. 287) e (VAN VLACK, 2000).

É possível ainda observar a existência de um comprimento de onda máximo a partir do qual o material passa a ser sensível ao feixe óptico. Trata-se, portanto, de um comprimento de onda de corte acima do qual a energia do fóton é insuficiente para fazer o elétron sair da banda de valência para a banda de condução. No estudo da física dos semicondutores, mostrou-se que a liberação de elétrons para a banda de condução de um cristal intrínseco, exige que a energia do fóton seja igual ou maior que a energia da banda proibida. O comprimento de onda de corte do material é calculado pela equação deduzida da lei de Planck:

$$\lambda_c = \frac{1,241}{E_g}$$

3

onde o comprimento de onda λ é dado em unidades de μm e a energia da banda proibida E_g em eV (RIBEIRO, 2007, p. 288).

3.3 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

Nas análises de desempenho de fotodetectores costuma-se definir a profundidade de penetração δ , como sendo a distância necessária para que a densidade de potência ótica caia para um valor $\frac{1}{e}$ vezes o valor que tinha no momento em que entrou no meio. Da expressão 3

deduz-se que a profundidade de penetração é igual ao inverso do coeficiente de absorção (RIBEIRO, 2007).

$$\delta = \frac{1}{\alpha}$$

4

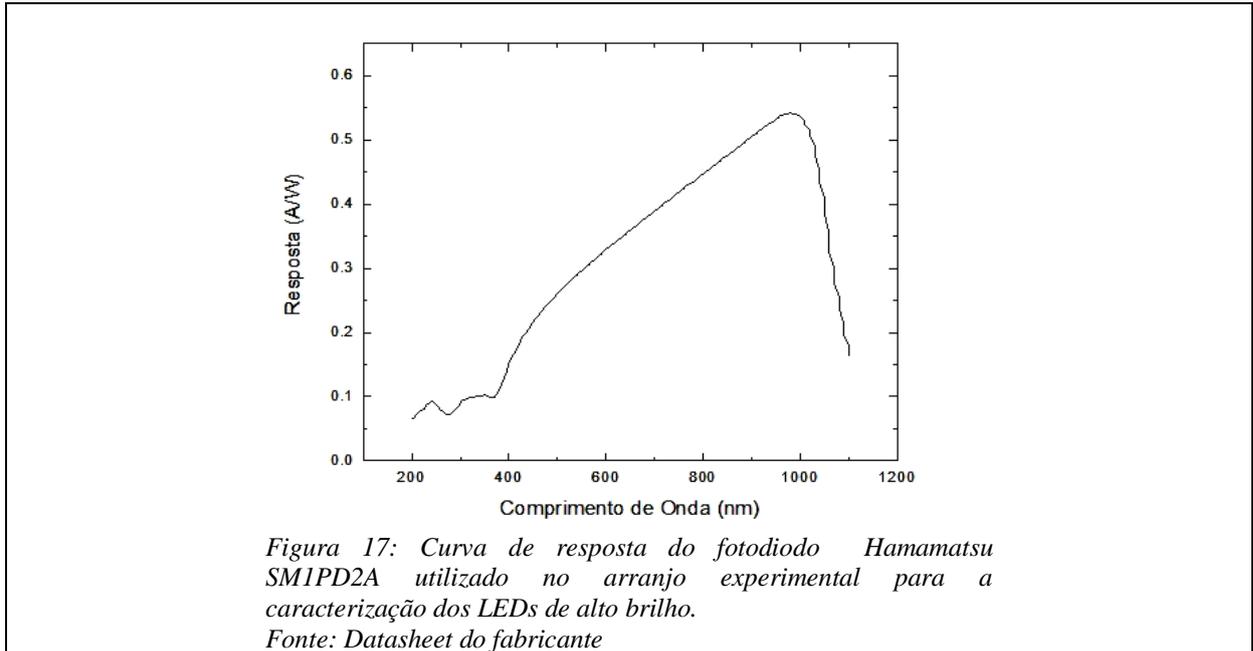
A profundidade de penetração também dependerá do comprimento de onda da irradiação. A densidade de potencia pode ser descrita também como sendo uma redução na densidade de fótons à medida que a radiação avança no cristal. Portanto, quanto maior o valor de δ , maior será a distancia que o fluxo de fótons percorre dentro do meio, contribuindo para a formação da corrente no dispositivo (RIBEIRO, 2007).

3.4 CURVA DE RESPOSTA DO DIODO

Esta característica é definida pela relação entre a fotocorrente gerada e a potencia óptica incidente no diodo. Sua representação é uma função de transferência que relaciona a resposta do componente (corrente fotogerada) com a excitação externa (potencia óptica aplicada), como mostra a Equação 5: (RIBEIRO, 2007, p. 209).

$$R = \frac{I_p}{P_0}$$

5



Na Figura 17 está representada a curva de resposta do fotodiodo (ANEXO 1) usado no radiômetro desenvolvido (Hamamatsu SM1PD2A). Ela foi usada para a obtenção das curvas de irradiância dos LEDs caracterizados, essas curvas são melhor discutidas na seção 6.2, no Capítulo 6, onde são feitos o tratamento dos dados experimentais.

3.5 O FOTODIODO TIPO PIN

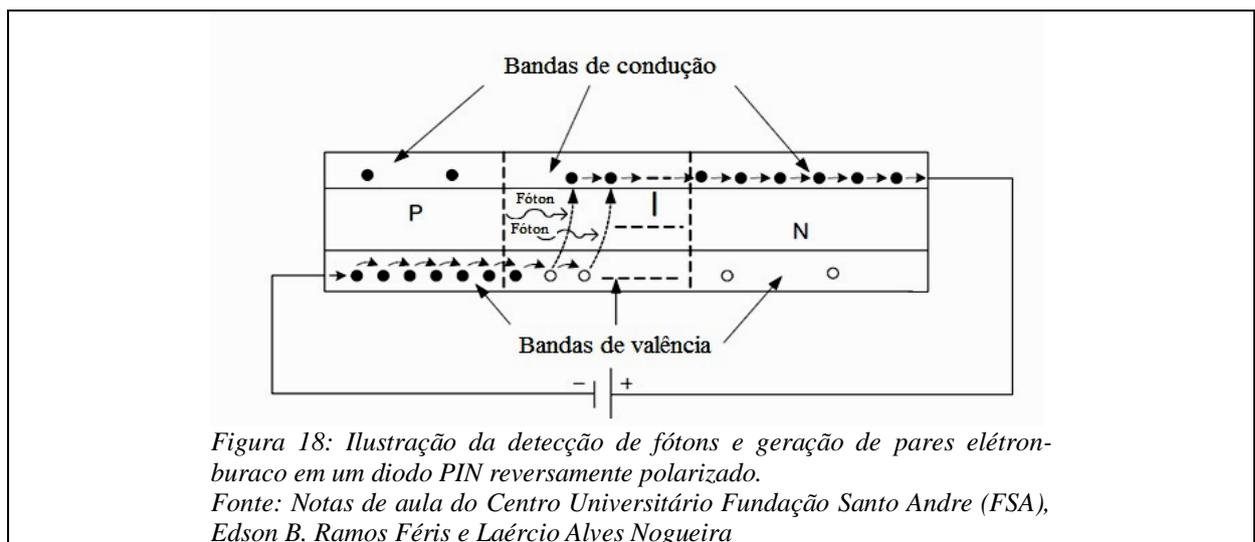
O nome PIN é um anagrama que faz referencia às regiões P e N do diodo, geralmente de silício, onde foi incorporada uma camada intermediária fracamente dopada, portanto com alta resistividade, dita intrínseca (I).

Na polarização direta, lacunas e elétrons são injetados na camada intrínseca I, disso resulta certa quantidade de carga nessa camada, o que possibilita a condução. Já na polarização nula ou inversa, não há injeção de carga e o diodo se comporta como um capacitor em paralelo com uma resistência de alto valor, uma vez que a região central (I) desse arranjo tem alta

resistividade. Em resumo, o diodo PIN se comporta quase como um curto-circuito ou como circuito aberto, em função da polarização.

Em um diodo a foto-corrente é proporcional ao número de pares criados e, portanto, ao número de fótons que incidem sobre a área ativa da pastilha e da probabilidade desses fótons criarem pares na zona de depleção.

Em se tratando de polarização reversa, a zona de depleção aumenta e os fótons que incidem nos átomos da região intrínseca (I) têm maior probabilidade de criar pares elétron-buraco. A pequena mobilidade desta região dificulta a recombinação do par criado, aumentando a probabilidade que estas cargas cheguem às regiões N e P respectivamente, contribuindo para o aumento da foto-corrente, conforme ilustra a Figura 18.



3.6 CARACTERÍSTICA TENSÃO-CORRENTE

A característica corrente-tensão de um fotodiodo é semelhante à de um diodo comum. A geração da foto-corrente (I_p) pode ser entendida como a associação de um gerador de corrente

em paralelo com a resistência dinâmica (r_D) do diodo, obedecendo á Equação 6. A Figura 19 representa em termos de circuito a Equação 6.

$$I_D = I_S e^{\left(\frac{qV}{mKT}\right)} - 1 - I_p$$

6

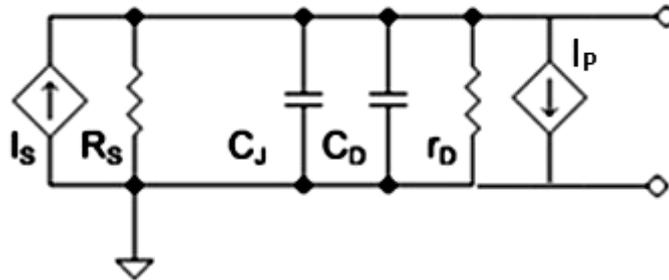


Figura 19: Exemplo do circuito da Equação 6

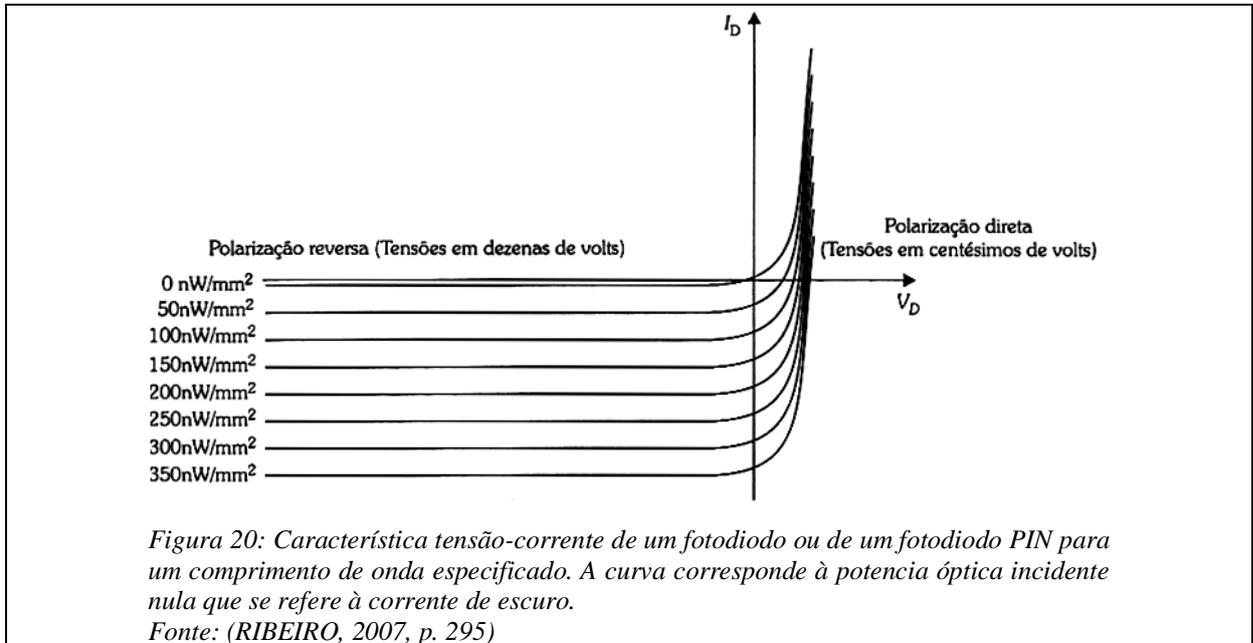
Em que, I_S é a corrente de saturação, q é a carga do elétron, K é a constante de Boltzman, T é a temperatura absoluta em kelvins, V é a diferença de potencial da junção, m é um fator que depende de características construtivas e I_p é a fotocorrente gerada. Como a junção é polarizada reversamente, o termo exponencial torna-se desprezível para tensões superiores a 0,1 V. Resultando em um valor igual à soma de I_S e I_p , com sinal trocado, indicando que o fluxo da fotocorrente é em sentido oposto ao adotado para a corrente direta ou corrente de saturação, como expresso pela equação Equação 7 (RIBEIRO, 2007):

$$I_D \cong -I_S - I_p$$

7

Quando não há incidência da luz no diodo, a fotocorrente é nula e a única corrente circulante será de origem térmica ou de ruído eletromagnético. Por este motivo, não faz sentido falar de corrente de saturação em fotodetectores. Na obscuridade ou ausência de fótons a corrente nos fotodiodos é chamada corrente de escuro, como apresentado Figura 20. Sendo a fotocorrente proporcional à potência óptica incidente, em determinado comprimento de onda, a Equação

7 representa uma família de curvas quase paralelas e praticamente independentes da tensão reversa aplicada, como indicado no Figura 20 (RIBEIRO, 2007).



CAPÍTULO 4

DIODO EMISSOR DE LUZ

4.1 LED

A luz pode ser produzida e/ou controlada eletronicamente de diversas maneiras. Para o LED, a luz emitida é gerada por um processo optrônico chamado de eletroluminescência, proporcional a corrente direta passando neste dispositivo.

O incrível desenvolvimento dos LEDs nos últimos anos tem gerado um crescimento significativo do mercado criado pelo crescente número de novas aplicações destas versáteis fontes de luz.

A obtenção de certas cores por combinação das cores ditas primária ou RGB, só seria possível com o advento de um LED na cor azul, fato que só foi conseguido muitas décadas depois da produção dos primeiros a diodos eletroluminescentes.

Junto com as novas aplicações vem crescendo a exigência de rigor na caracterização ótica dos LEDs, bem como uma necessidade de se obter maior precisão e resultados com boa

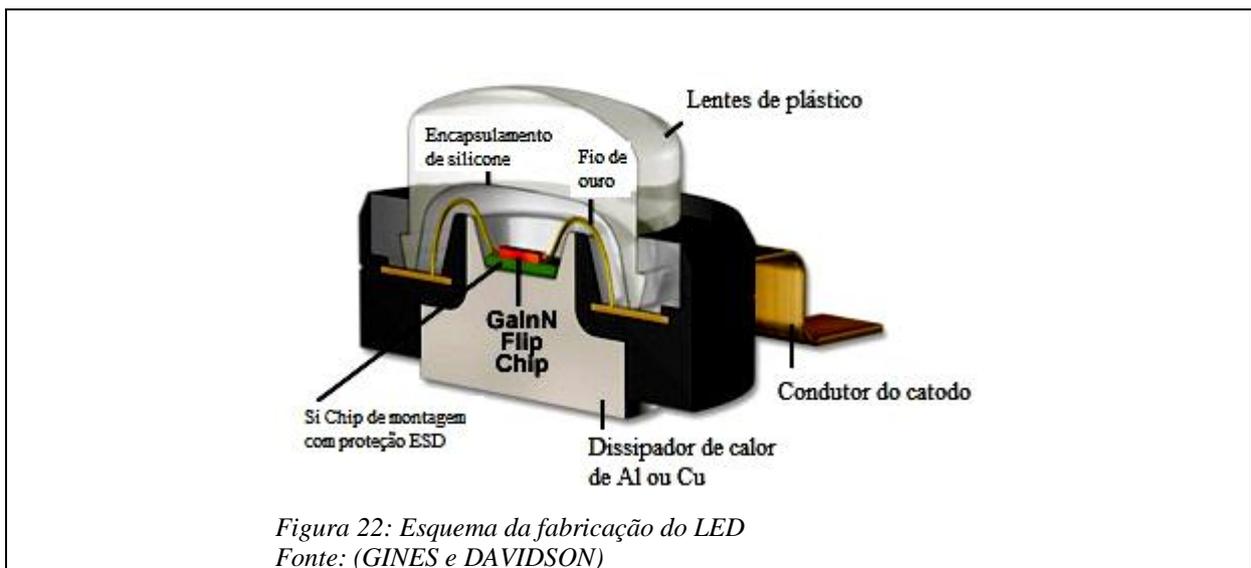
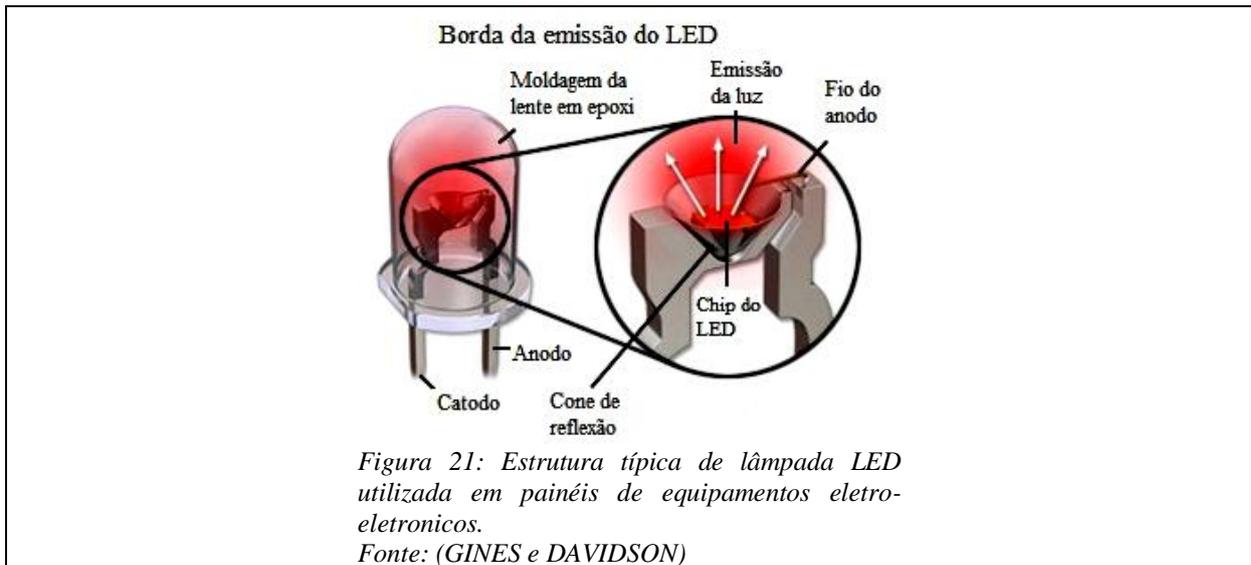
reprodutibilidade (LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 200). (GU, SROT, *et al.*, 2007).

A continuada pesquisa em novos materiais semicondutores tem perseguido maior eficiência e qualidade na produção desses materiais e nos dispositivos que deles derivam. Essa eficiência tem criado novos conceitos no ramo da iluminação, algumas empresas vem na eficiência desses materiais a oportunidade de substituir a iluminação pública, como conhecida hoje, por soluções baseadas em LEDs. As vantagens são muitas, uma delas é uma diminuição do consumo de energia, diminuição dos custos de manutenção e o aumento da qualidade da iluminação de espaços e equipamentos urbanos, em relação à iluminação que se dispõem hoje em dia (HUI e QIN, 2009).

Nas lâmpadas incandescentes comuns, no melhor dos casos, apenas 5 % da energia elétrica são convertidos em energia luminosa. Além de ineficientes, essas lâmpadas geram muito calor e tem resposta extremamente lenta no tempo. Durante muitas décadas elas foram a única possibilidade, tanto para a iluminação urbana ou doméstica, ou mesmo como, em indicadores e mostradores de aparelhos e equipamentos. A partir da década de 70, inicialmente timidamente e em seguida em larga escala, as lâmpadas de indicação foram paulatinamente substituídas por diodos emissores de luz e outros dispositivos de estado sólido, como os mostradores de cristal líquido (REZENDE, 1996) (RODRIGUES, ALMEIDA, *et al.*, 2010).

Os LEDs que operam no visível são feitos com uma grande variedade de formatos e de cores. As Figura 21 e Figura 22 mostram estruturas típicas de LEDs, encapsulados em epóxi transparente (5 mm diâmetro) e em encapsulamento de alta potencia, com estrutura de dissipação de calor otimizada para LEDs que consumem a cima de 1 W .

Nos LEDs de 3 e 5 mm, o *chip* do LED é montado sobre um dos pinos metálicos utilizados como terminais externos. O contato com o outro terminal é feito por um fio soldado num filme metálico (contato ôhmico) no lado da janela do LED. O conjunto é encapsulado em epóxi colorido ou transparente, cuja parte superior é conformada, em forma de lente, para colimar parcialmente a luz emitida pelo dispositivo (REZENDE, 1996).



Nesses diodos para a emissão de luz com intensidade constante basta fazer circular, no sentido direto do diodo, uma corrente constante. Nos sistemas de comunicação óptica é preciso incorporar um circuito de modulação da corrente para produzir variações na intensidade da luz. Estas variações correspondem á informação codificada (REZENDE, 1996).

Existem algumas definições e termos básicos utilizados na fotometria e colorimetria que, em conjunto com os detalhes das propriedades físicas, servem para caracterizar os LEDs. Estes ramos da técnica dão uma visão geral das grandezas físicas importantes e os cuidados essenciais para o correto uso de instrumentos de medida. Entretanto, existe uma distinção entre quantidades radiométricas, que descrevem propriedades físicas de radiação e as quantidades fotométricas, que descrevem efeitos sobre o olho humano. O trabalho reportado nesta dissertação foi realizado com foco nas quantidades radiométricas.

4.2 QUANTIDADES ESPECTRORADIOMÉTRICAS

A espectroradiometria é a técnica usada para medir a distribuição espectral de potência (DEP) da radiação emitida por uma fonte. Para esse tipo de medição é necessário que se separe a radiação em suas componentes espectrais, de acordo com seu comprimento de onda, onde cada uma dessas componentes será analisada separadamente.

A curva de intensidade luminosa, em função do comprimento de onda, informa sobre as características físicas da fonte luminosa. A medida da radiação pode dar lugar a diferentes resultados, não necessariamente compatíveis entre eles, a depender de como a luz é coletada, como ela chega à entrada do espectroradiômetro, e de como é processada pelo sistema ótico e pelo sistema de detecção. De qualquer forma, o resultado de medidas confiáveis pode, por exemplo, ser convertido em um equivalente fotométrico, que mostra como a radiação é percebida pelo olho humano em termo de luminosidade ou, convertido em um equivalente colorimétrico, que mostra como a radiação é percebida pelo olho humano (LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 200) e (OLIVEIRA, 2006).

4.3 RADIOMETRIA

A radiometria busca determinar a energia ou a densidade de radiação ótica, para uma determinada geometria de propagação. O espectro abrange todas as componentes espectrais, indo do UV até o infravermelho, conseqüentemente independe da sensibilidade do olho humano para cor e brilho (LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 200).

Existem quatro quantidades radiométricas básicas: energia radiante ou fluxo radiante, intensidade radiante, irradiância e radiância (LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 200).

4.4 ENERGIA RADIANTE E FLUXO RADIANTE

O poder radiante é definido como a energia total emitida $d\Phi_e$ por unidade de ângulo sólido $d\Omega$, e é expresso em watts por esfero radiano (sr) $\frac{W}{sr}$ (LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 200) e (OLIVEIRA, 2006).

$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	8
---------------------------------	---

Um detector com área ativa A , posicionado a uma distancia r de uma fonte de luz mede o poder radiante $d\Phi_e$. Essa configuração assume uma fonte pontual, cujo fluxo por unidade de área varia com o inverso do quadrado da distancia r entre o detector e a fonte. Para um detector de área dA , o ângulo sólido é definido como sendo $d\Omega$ (LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 200) e (OLIVEIRA, 2006).

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} \quad 9$$

4.5 IRRADIÂNCIA

O iluminamento energético é irradiância E_e , esta grandeza é obtida a partir da relação da energia radiante $d\Phi_e$ e a área do detector dA . Essa relação é expressa em $\frac{W}{m^2}$ (LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 200) e (OLIVEIRA, 2006).

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad 10$$

A relação entre a intensidade radiante I_e e a irradiância E_e , para uma fonte de luz pontual, é derivada a partir da Equação 11 (LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 200) e (OLIVEIRA, 2006):

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} = \frac{I_e d\Omega}{dA} = \frac{I_e}{r^2} \quad 11$$

4.6 RADIÂNCIA

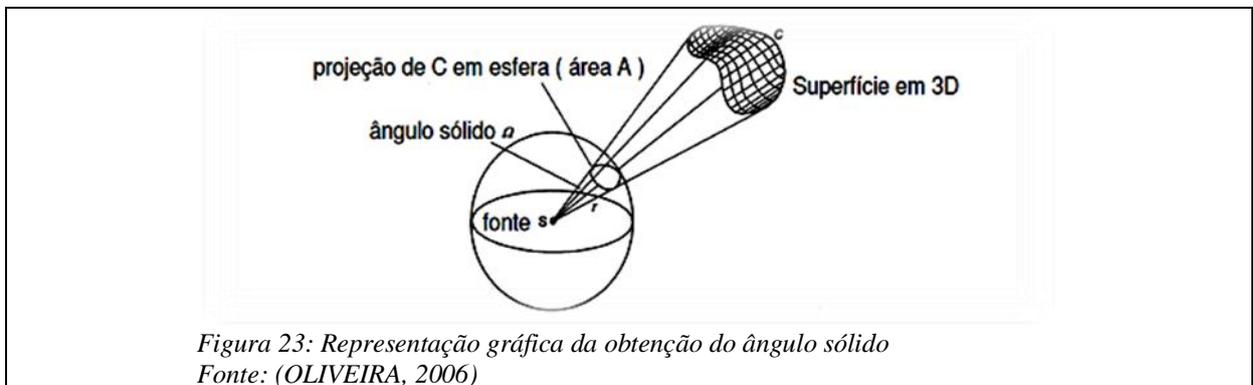
A radiância L_e , para uma fonte de luz não pontual, é definida como poder radiante $d\Phi_e$, emitido por uma área dA_e , por unidade de ângulo sólido. Esta relação é expressa em watts por esfero radiano por centímetro ao quadrado $\frac{W}{sr\ cm^2}$ (LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 200) e (OLIVEIRA, 2006).

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dA_e d\Omega}$$

12

4.7 ÂNGULO SÓLIDO

Esta quantidade tem por definição a razão entre a área projetada sobre uma superfície esférica e o quadrado do raio dessa mesma esfera. Desse modo, considera-se uma situação na qual uma pequena fonte de luz, aproximadamente pontual, projeta ou radia um fluxo luminoso sobre uma esfera hipotética, na direção determinada pelo raio dessa mesma esfera, gerando um cone de iluminação. Numa distancia que coincide com o raio da esfera hipotética a superfície interceptada pelo cone é chamado de área (A). O ângulo sólido é representado pela letra grega Omega e é dado pela relação $\Omega = \frac{A}{r^2}$, a Figura 23 ilustra esta grandeza geométrica (LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 2000), (OLIVEIRA, 2006).



4.8 COLORIMETRIA

Colorimetria faz referencia à ciência e a tecnologia usada para quantificar e descrever percepções visuais da cor pelo olho humano e fornece uma descrição qualitativa e quantitativa de cor. A importância desse estudo reside no fato de que a percepção das cores pelo olho humano não é um processo meramente visual, fisiológico, mas sim psico-visual. O ser humano não possui memória para cor, dessa forma, a cor é algo que se vê com os olhos, e se interpreta com o cérebro. Sendo o resultado da interação da luz, geralmente, com a superfície dos materiais (Commission internationale de l'Éclairage, "Colorimetry", CIE, 1986), (LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 200).

A colorimetria faz parte das quantidades fotométricas, porém ela é realizada mediante estudos das quantidades radiométricas e padronizada pela CIE (Comissão Internacional de Iluminação), sendo utilizada para descrever a cor. Esta, para ser padronizada, deve estar dentro da norma dos iluminantes e de observadores. Esse estudo é de grande relevância, pois uma fonte de iluminação pública, por exemplo, não pode alterar a cor que se enxerga em determinado material. Sendo assim, essa fonte luminosa terá que ter seu poder de irradiância próximo da irradiância solar, para que a cor enxergada pelo observador, não seja alterada pela fonte luminosa. Para que um LED se torne uma fonte de iluminação pública, ele deverá atender as normas estabelecidas pelo CIE.

CAPÍTULO 5

ARRANJO EXPERIMENTAL

5.1 A DEPENDENCIA LINEAR ENTRE A CORRENTE FOTODETECTADA E A CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DOS DIODOS ELETROLUMINESCENTES

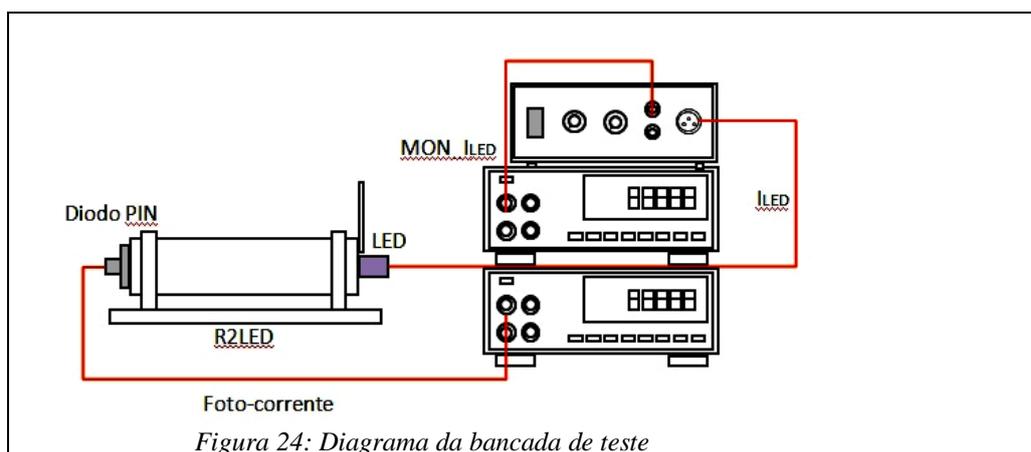
Neste trabalho foram investigados LED comerciais de alto brilho. Nas diferentes medições da intensidade irradiada pelos diodos estudados foi usado um foto diodo PIN de silício, como fotodetector e uma fonte de corrente constante para polarizar os LEDs.

Diferentes autores demonstraram que existe uma relação linear entre a fotocorrente gerada nos fotodiodos (FD) e a potencia óptica incidente neles. Isso é verdade desde que a potência óptica aplicada mantenha-se dentro de determinados limites. O valor mínimo depende da tensão reversa de polarização do FD, de sua área fotossensível e da forma de operação do detector. Experiências têm demonstrado que o limite inferior de sensibilidade dos FDs situa-se entre 10^{-12}W e 10^{-15}W . O limite máximo está associado às características construtivas do componente, tendendo a ocorrer uma saturação em altos valores de corrente foto-detectada (RIBEIRO, 2007).

5.2 A MONTAGEM EXPERIMENTAL

Caracterizar um LED em relação a sua propriedade radiante é estabelecer a curva, ou melhor, a reta que relaciona a fotocorrente detectada, por um detector de fótons com resposta linear, com a corrente de polarização direta deste diodo emissor de luz. A Figura 24 apresenta a bancada de teste montada para este fim. Ela é composta pelo radiômetro desenvolvido, uma fonte de corrente constante ajustável e dois multímetros digitais de bancada, responsáveis pela medição da fotocorrente gerada no fotodiodo e pela monitoração da corrente de polarização do LED.

O circuito de polarização dos LEDs foi montado de forma a garantir corrente constante ajustável, sem atentar contra a integridade dos dispositivos ensaiados. A fonte de corrente foi especialmente projetada de forma a garantir uma faixa segura de trabalho entre 3 e 42 mA DC. Uma resistência com 0.1% de precisão, em série com o LED em teste, cria uma queda de tensão proporcional à corrente de polarização deste diodo eletroluminescente. Esta corrente pode então ser monitorada por um segundo multímetro MDM-8146, desenho esquemático da bancada de ensaios na Figura 24.



O radiômetro R²LEDs desenvolvido é composto por um caminho ótico constante e prefixado, uma base, para deixá-lo estável, e engates montados nas extremidades deste caminho ótico.

Um dos engates permite o acoplamento de um porta LED e a outro é capaz de receber o fotodetector. A Figura 25 apresenta a vista de corte do radiômetro de LEDs preconizado pela norma (Commission internationale de l'Éclairage, "Colorimetry", CIE, 1986). Este desenho serviu de base para o projeto do radiômetro montado neste trabalho.

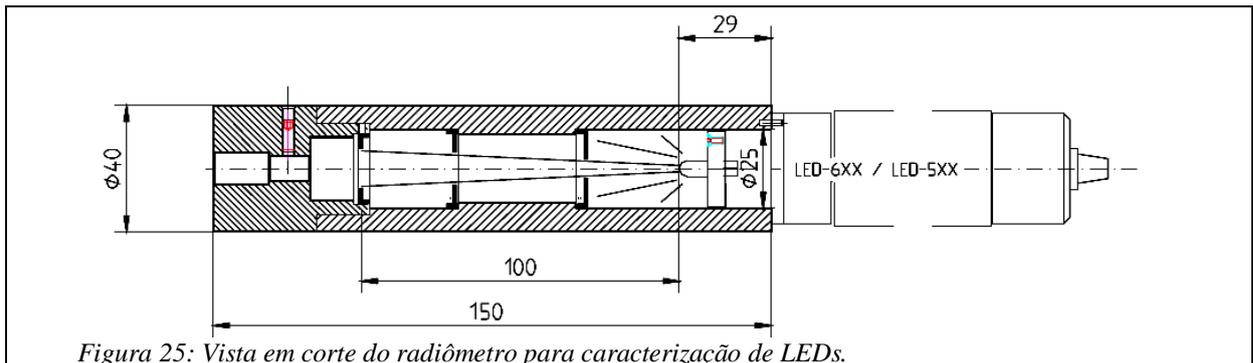


Figura 25: Vista em corte do radiômetro para caracterização de LEDs.

O suporte para os LEDs foi montado de forma a dar acomodação mecânica e a conexão elétrica do LED em teste, sem que haja necessidade de dobrar, soldar ou *crimpar* seus terminais, assegurando a integridade do dispositivo testado, visualizado na Figura 26.

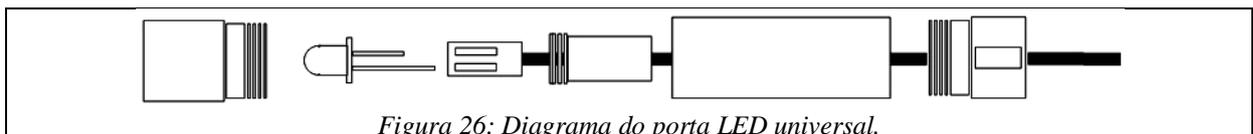


Figura 26: Diagrama do porta LED universal.

No outro lado do cilindro foi acoplado um fotodiodo Hamamatsu SM1PD2A, cuja corrente de saída, medida por um multímetro de bancada Minipa MDM-8146, serve para determinar a intensidade de luz emitida pelos dispositivos a serem ensaiados, montados no porta LED no outro lado do caminho ótico. A área ativa do Hamamatsu SM1PD2A, visto na Figura 27, é de 100 mm^2 , como estipula a norma.



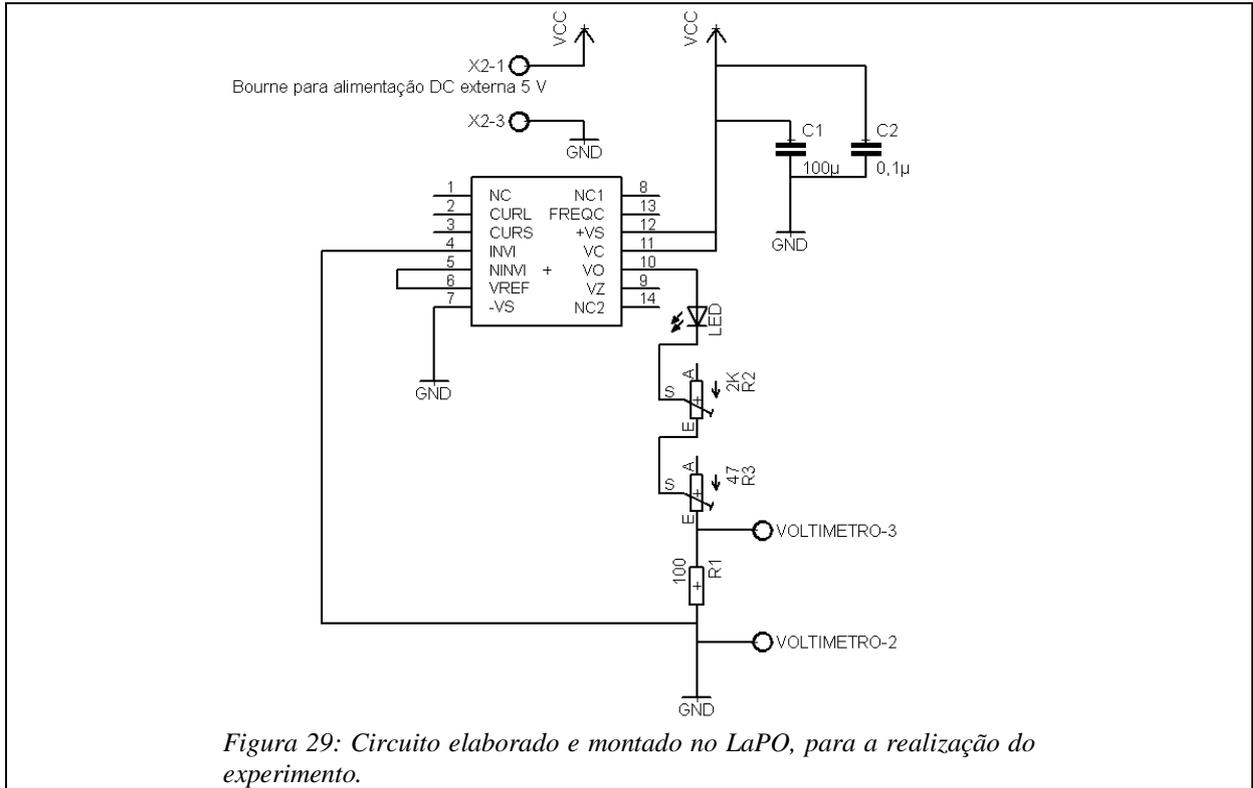
Para montar o protótipo, foi usinado no Laboratório de Propriedades Óticas (LaPO), do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia (UFBA), um tarugo de poliestireno de 40 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento. Além de uma base de fixação e dois mancais de apoio em perfil de alumínio anodizado, ver Figura 28. Em uma das extremidades do cilindro foi montado um suporte capaz de receber um porta LED universal, que permite montagens não destrutivas de LEDs de 3 e 5 mm, encapsulados em epóxi.

No intuito de aumentar a gama de possibilidades de medição, foi montado no ponto de inserção do suporte de LED um goniometro comercial, em aço inox, estampado. A figura Figura 28 apresenta o aspecto externo final do R2LEDs.

A instalação do goniômetro permite estudar a distribuição angular da luz emitida pelos LEDs. De modo geral, não é encontrado na literatura os detalhes da montagem dos diodo emissores de luz, nem como as pastilhas semicondutoras são fixadas dentro do espelho cônico de cada LED.



Na Figura 29 é apresentado circuito de fonte de corrente constante ajustável projetado, desenvolvido e montado no Laboratório de Propriedades Óticas (LaPO) para dar suporte à caracterização de LEDs. Nesta fonte de corrente foi utilizado o circuito integrado LM723 na configuração de fonte ajustável de corrente. Esse CI é mais usualmente utilizado em aplicações como: fonte de tensão, regulador de desvio e controlador de temperatura. O controle da corrente do LED é feito pelo LM723 graças a comparação entre a tensão aplicada na entrada não-inversora (pino 5) e a queda de tensão sobre o resistor R2, ligado ao terra, e aplicada ao pino 4 (entrada inversora). A tensão aplicada à entrada não-inversora é determinada pelo potenciômetro R3, e será no máximo, igual a tensão de referência presente no pino 6 deste CI. Essa comparação determina a correção da corrente fornecida pelo pino 10 do LM723, de forma a manter a diferença entre as entradas do comparador sempre igual a zero, ver Figura 29.



A emissão de luz por um LED não é como uma lâmpada convencional, a luz é emitida na forma de diversos cones de iluminação, saindo em todas as direções, como pode ser visualizado na Figura 30. Esses cones de luz se interceptam, uns sobre os outros, podendo afetar, tanto a qualidade da colimação do feixe final de luz, quanto a resolução espacial desse feixe. Há também a influencia da posição de fixação da pastilha em relação ao fio que faz a conexão com o outro eletrodo. Esta estrutura pode criar uma sombra e ocasionar perda de energia radiante no *spot* de luz criado pelo LED. De forma geral, qualquer alteração nos parâmetros geométricos desses diodos pode influenciar drasticamente no resultado e na qualidade da luz emitida. Porém existe grande dificuldade em obter detalhes da geometria e da ótica interna de um LED, seja na literatura, ou mesmo, em se contatando as empresas fabricantes. Um bom exemplo são os dados de homogeneidade e da geometria do cone de iluminação gerado pelos diodos emissores de luz, mostrados na Figura 30.

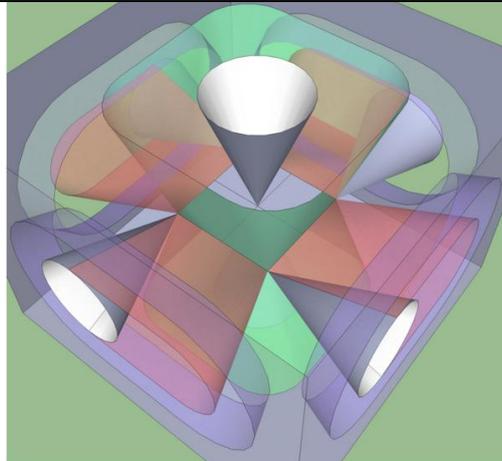


Figura 30: Ilustração de como a luz de LED emite luz em forma de cone.

Fonte: (MULLER, 2000)

Respeitando as mesmas diretrizes de projeto da primeira versão de radiômetro, foi desenvolvida outra versão, mais simples e com menor custo, a partir de um tubo de PVC preto, em lugar do tarugo usinado. Apellido de PRRLED (ver Figura 31) ou PR²LEDs, com este dispositivo devidamente instrumentado foram realizadas medidas para o estudo da linearidade entre os parâmetros fotocorrente do fotodiodo e a corrente de polarização dos LEDs. Foi feito um comparativo entre os resultados encontrados, o que se observou foi uma boa consistência nos resultados, a menos de um fator multiplicativo. Para as diversas raias espectrais observadas as curvas de corrente por corrente são idênticas para os dois diferentes radiômetros. Resultados apresentados no Capítulo 7.

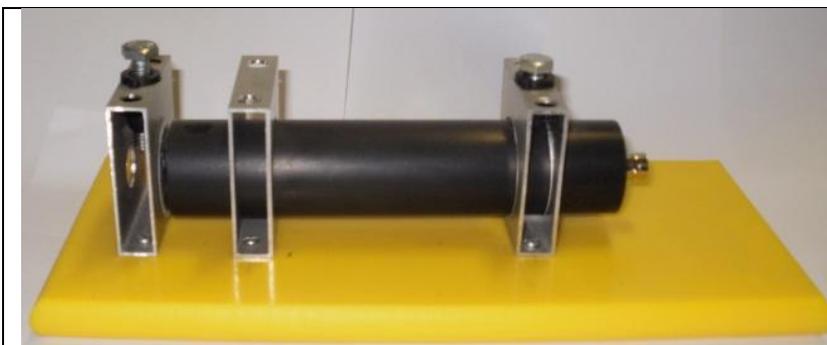


Figura 31: Segunda montagem do Radiômetro de Referência para LEDs

CAPÍTULO 6

TRATAMENTO DE DADOS

6.1 DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA DOS LEDs ENSAIADOS COM UM ESPECTROFLUORÍMETRO

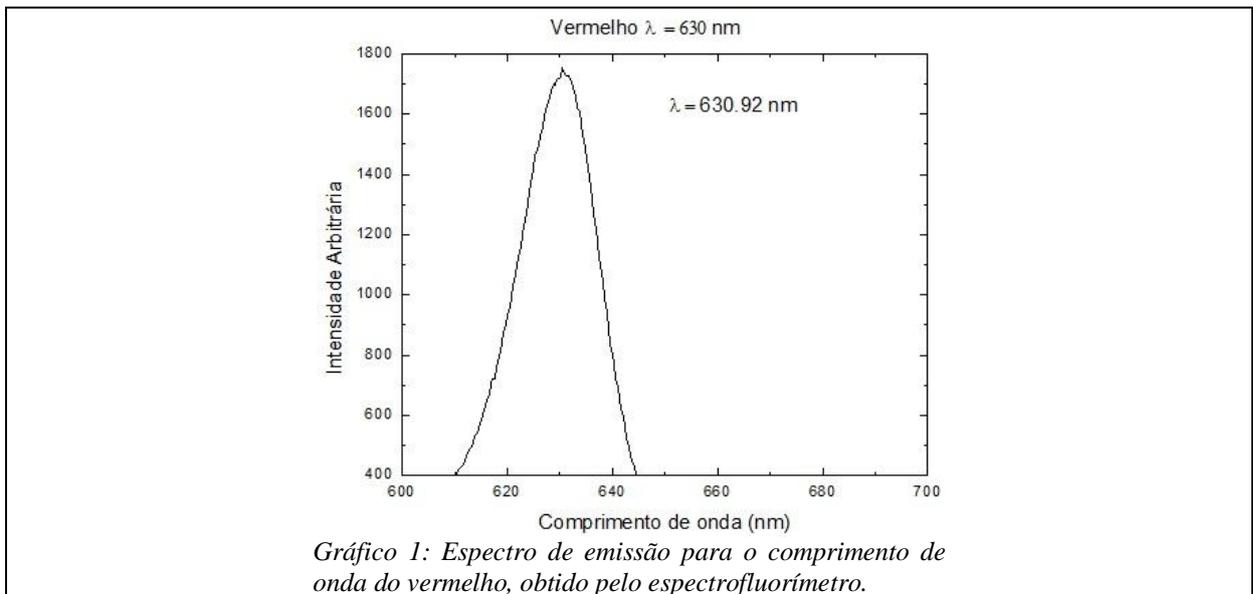
Usando o espectrômetro que compõem o espectrofluorímetro Q798-FIL, da QUIMIS, foi possível determinar o comprimento de onda de emissão dos LEDs comerciais de alto brilho estudados. O fato de não se ter conhecimento das técnicas de fabricação dos LEDs adquiridos no comércio varejista, faz com que a caracterização, com a ajuda de um espectrômetro, passe a ser primordial. O espectrofluorímetro usado foi desenvolvido pela equipe de engenharia do LaPO, em parceria com a Quimis Aparelhos Científicos LTDA, e possibilita o estudo do espectro de emissão de LEDs das mais variadas cores, inclusive infravermelho próximo e ultra violeta, como apresentado nos Gráfico 1 ao Gráfico 5.

Usando a Equação 13:

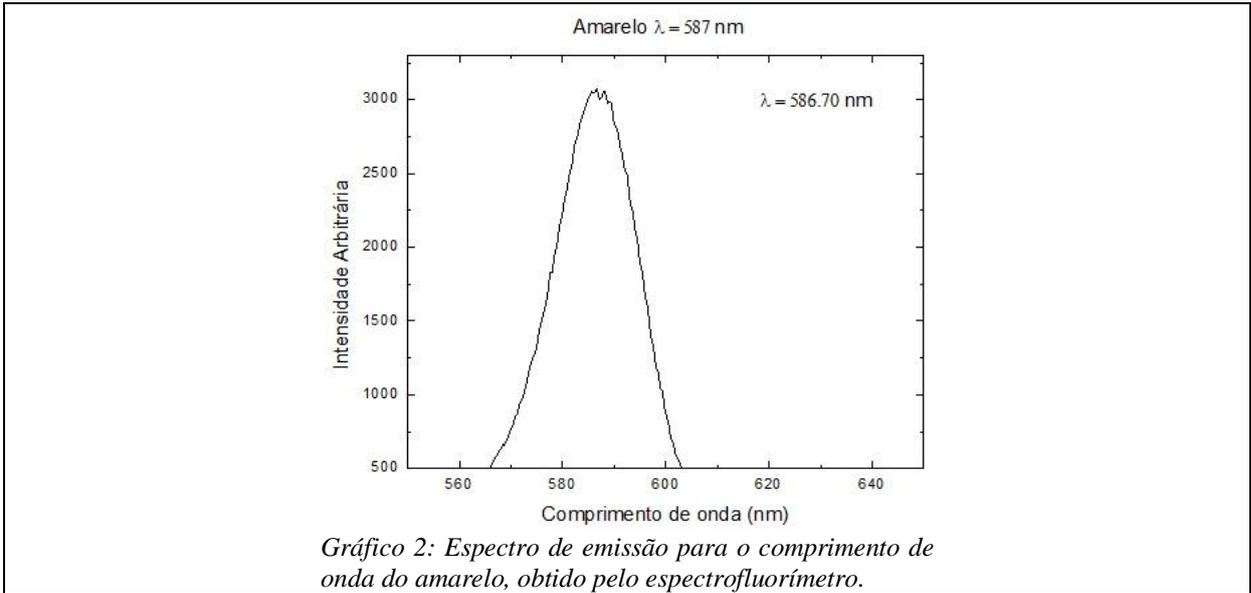
$$\Delta = \left| \frac{x' - x''}{x''} \right| \cdot 100\%$$

13

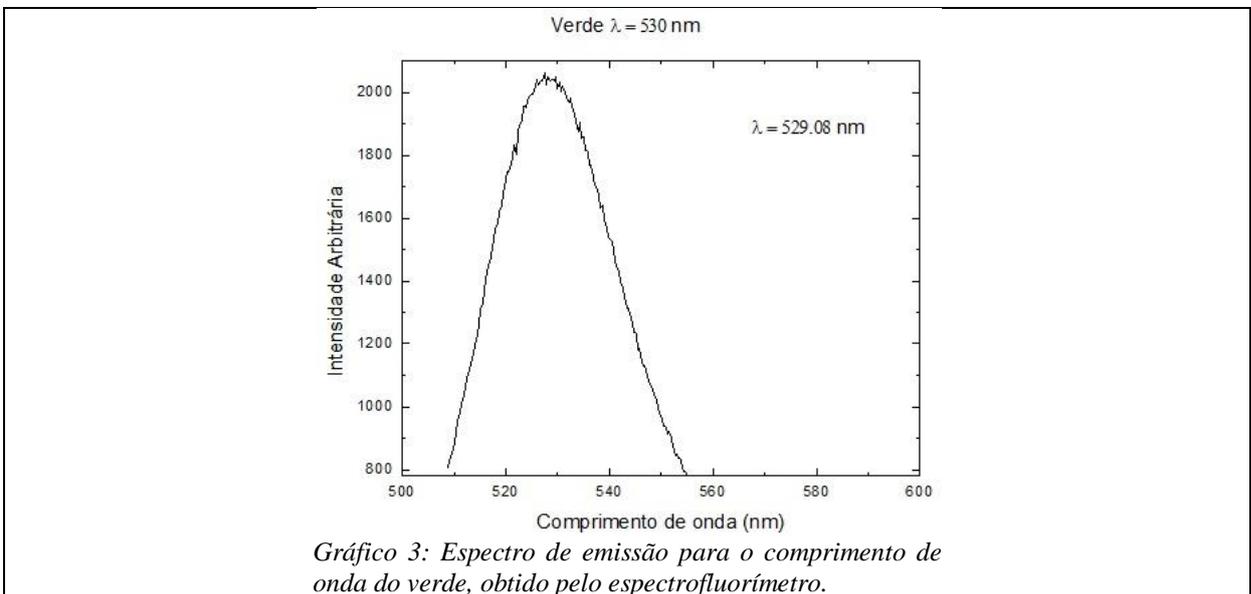
foi encontrado a discrepância entre o comprimento de onda do máximo do espectro dos LEDs estudados (X') e o comprimento de onda onde, segundo a literatura, deveria ocorrer o máximo de emissão (X'') para LEDs comerciais usuais (MULLEN, 1984), (WORTHEY, 2003).



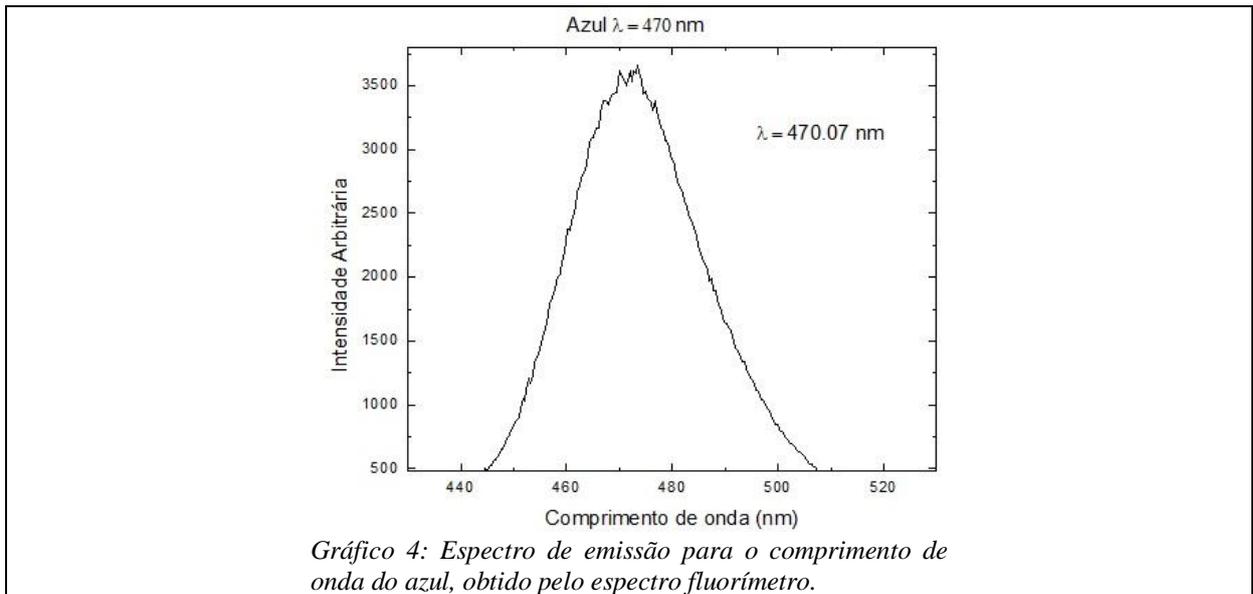
A discrepância da medida do LED vermelho foi de 0.14%.



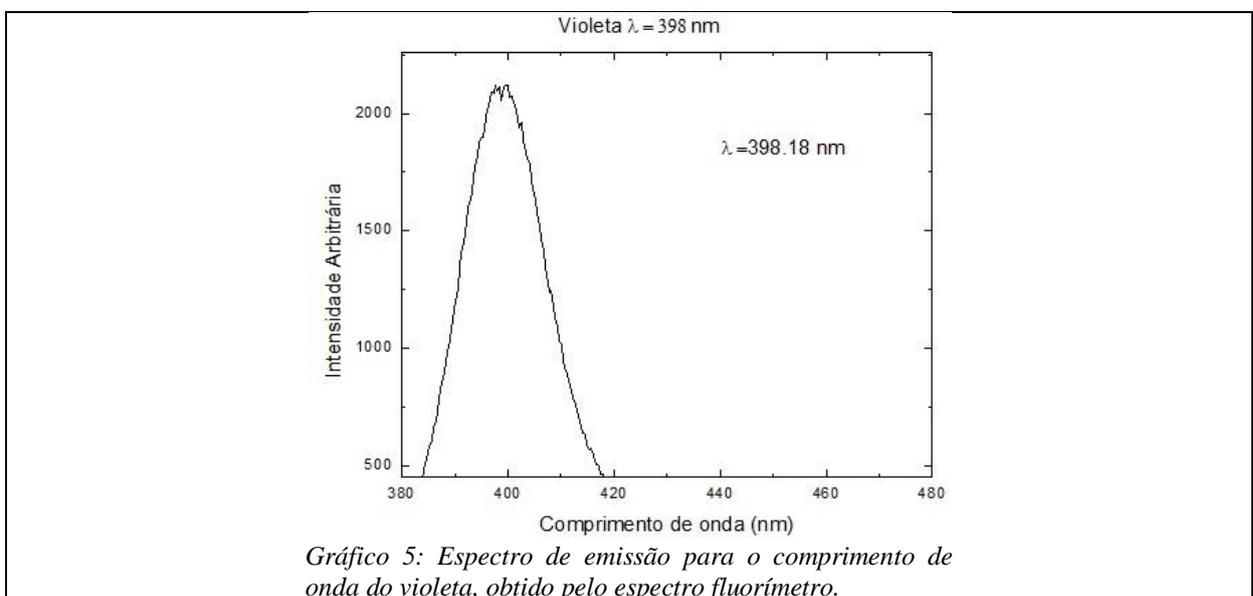
Para o LED amarelo o valor da discrepância foi de 0.05%.



Para o LED verde a discrepância teve um valor de 0.17%.



Para o LED azul a discrepância foi de 0.015%.



Para o LED violeta a discrepância encontrada foi de 0.04%.

Na Tabela 1 é possível visualizar os valores das discrepâncias dos LEDs ensaiados e seus respectivos comprimentos de onda e de emissão.

Tabela 1: Valores das discrepâncias associadas as cores dos LEDs estudados

Cor do LED/comprimento de onda de referencia	Vermelho/630nm	Amarelo/587nm	Verde/530nm	Azul/470nm	Violeta/398nm
Comprimento de onda do espectrofluorímetro	630.92nm	586.70nm	529.08nm	470.07nm	398.18nm
Discrepância	0.14%	0.05%	0.17%	0.015%	0.04%

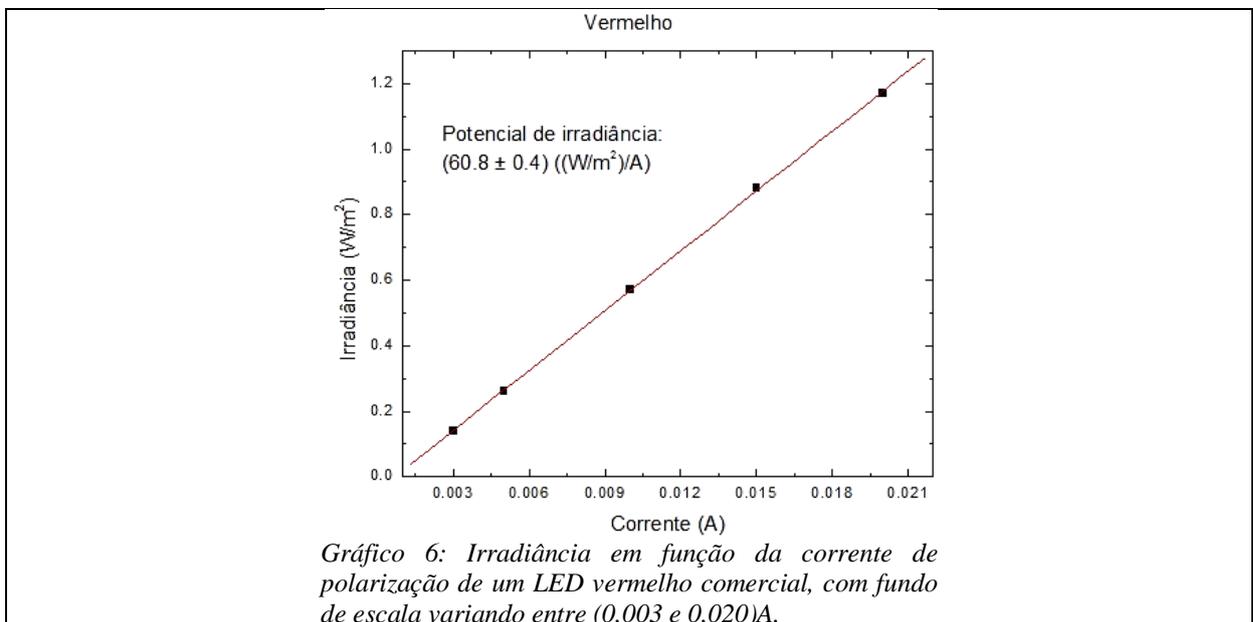
As emissões dos LEDs estudados mostram coerência entre os valores experimentais (Tabela 1) e os valores tabelados encontrados na teoria, com erro experimental muito inferior a 1 %. Sendo que a maior discrepância foi de 0.17%, para o diodo emissor de luz verde. Sendo assim, os LEDs estudados estão em acordo com as especificações, no que tange, as suas respectivas bandas de emissão, assegurando não haver entre eles nenhuma grande anomalia. A partir dessas informações tem-se maior segurança para analisá-los com mais profundidade, no que diz respeito ao estudo da linearidade desta fonte de luz, de sua característica de emissão em função do ângulo, bem como fazer um estudo estatístico de uma população destes LEDs comerciais.

6.2 MEDIDA DA DEPENDENCIA LINEAR ENTRE A CORRENTE DE POLARIZAÇÃO DOS LEDs E A CORRENTE FOTODETECTADA

Com os LEDs montados no radiômetro foram feitas medidas da radiância em função da fotocorrente. Os resultados obtidos foram, em muito boa aproximação, compatíveis com o esperado. Ou seja, uma resposta linear para a dependência entre fotocorrente e corrente de polarização dos LEDs.

Para determinar a irradiância a partir da fotocorrente foi usado um fotodiodo, a foto corrente gerada por este dispositivo serviu de monitor para o feixe de fótons emitido pelo LED. Um programa de tratamento de dados da corrente gerada por fotodiodos, desenvolvido pelo LaPO,

foi usado para determinar a irradiância dos LEDs nas diferentes faixas de emissão. Esta ferramenta numérica utiliza a curva de resposta do diodo (Figura 17, da sessão 3.4 do Capítulo 3), fornecida pelo fabricante, digitalizada e aproximada por até seis polinômios, a corrente gerada pelo fotodiodo (μA) e o comprimento de onda de máxima emissão do LED para determinar a intensidade emitida por unidade de área. A irradiância encontrada é dada em unidades de Watt por metro quadrado ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$). Como, para cada diodo a radiância é medida para dez diferentes valores de corrente de polarização, o conjunto de pontos obtidos apresenta uma dispersão assimilável a uma reta. É possível, então, obter o coeficiente angular desta reta em unidades de $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{A}}$. Esta grandeza foi chamada de *Potencial de irradiância*. Nos Gráfico 6 a Gráfico 15 é possível visualizar estas retas, o potencial de irradiância e o respectivo erro associado a essa grandeza. Além disso, foi feita uma comparação entre medidas feitas para diferentes fundos de escala da fonte de corrente usada para polarizar os LEDs.



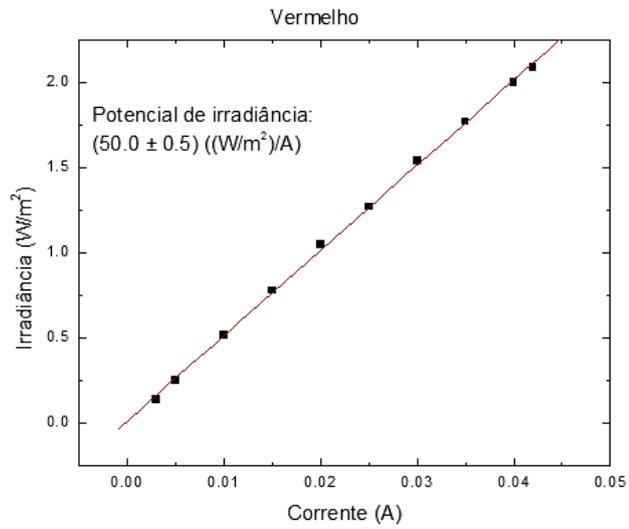


Gráfico 7: Irradiância em função da corrente de polarização de um LED vermelho comercial, com fundo de escala variando entre (0,003 e 0,042)A.

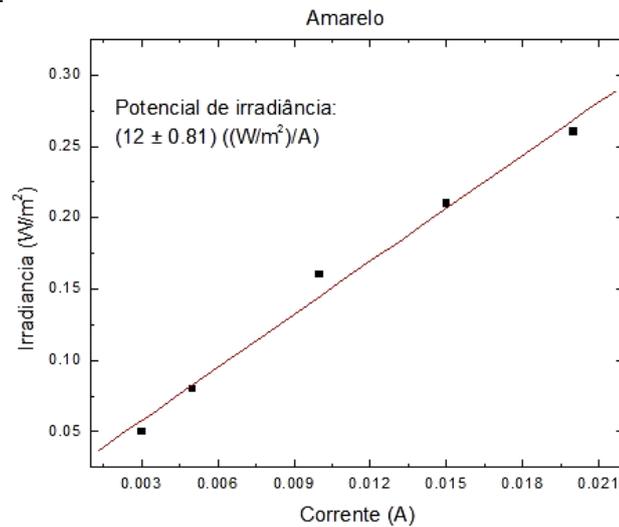


Gráfico 8: Irradiância em função da corrente de polarização de um LED amarelo comercial, com fundo de escala variando entre (0,003 e 0,020)A.

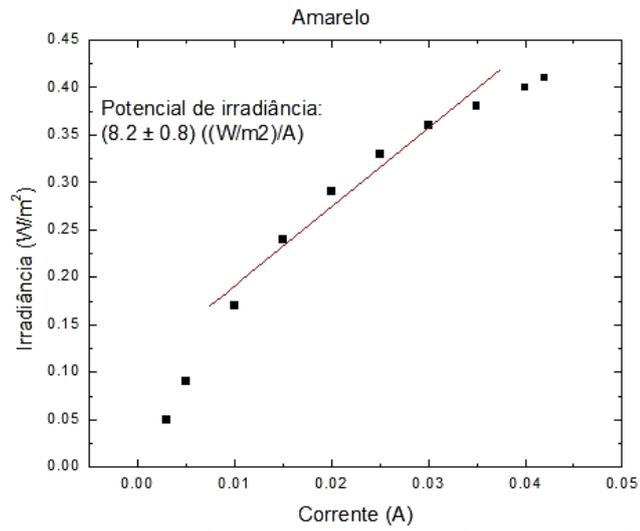


Gráfico 9: Irradiância em função da corrente de polarização de um LED amarelo comercial, com fundo de escala variando entre (0,003 e 0,042)A.

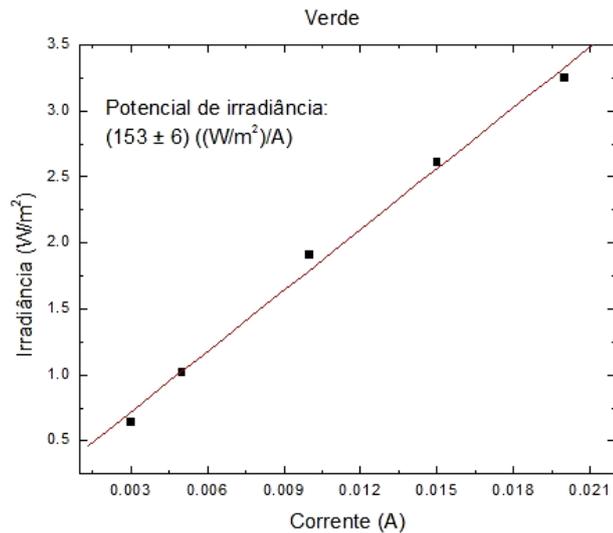


Gráfico 10: Gráfico: Irradiância em função da corrente de polarização de um LED verde comercial, com fundo de escala variando entre (0,003 e 0,020)A.

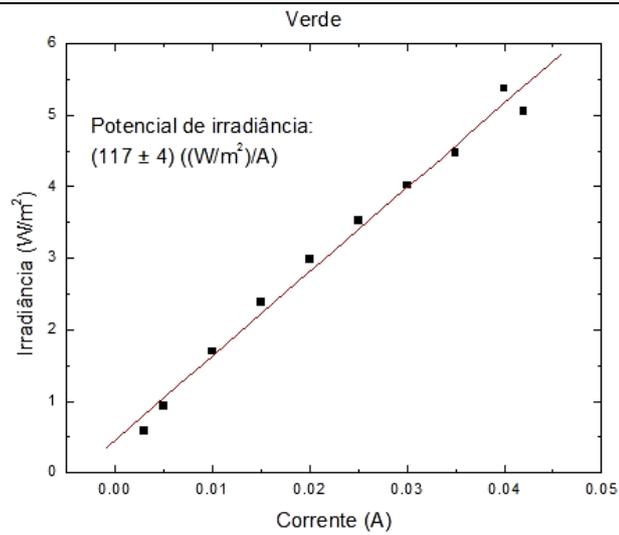


Gráfico 11: Irradiância em função da corrente de polarização de um LED verde comercial, com fundo de escala variando entre (0,003 e 0,042)A.

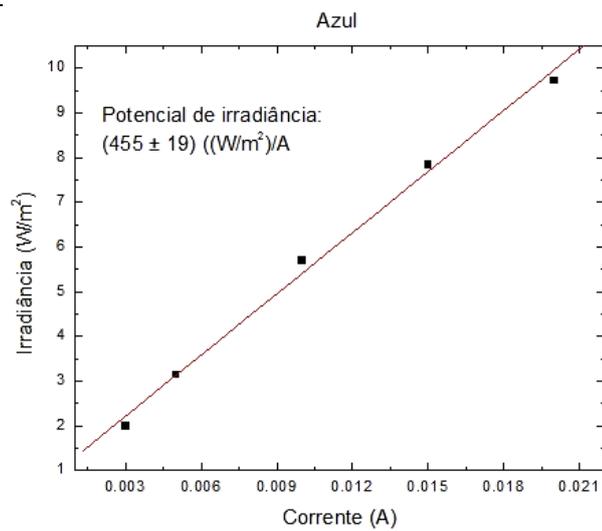
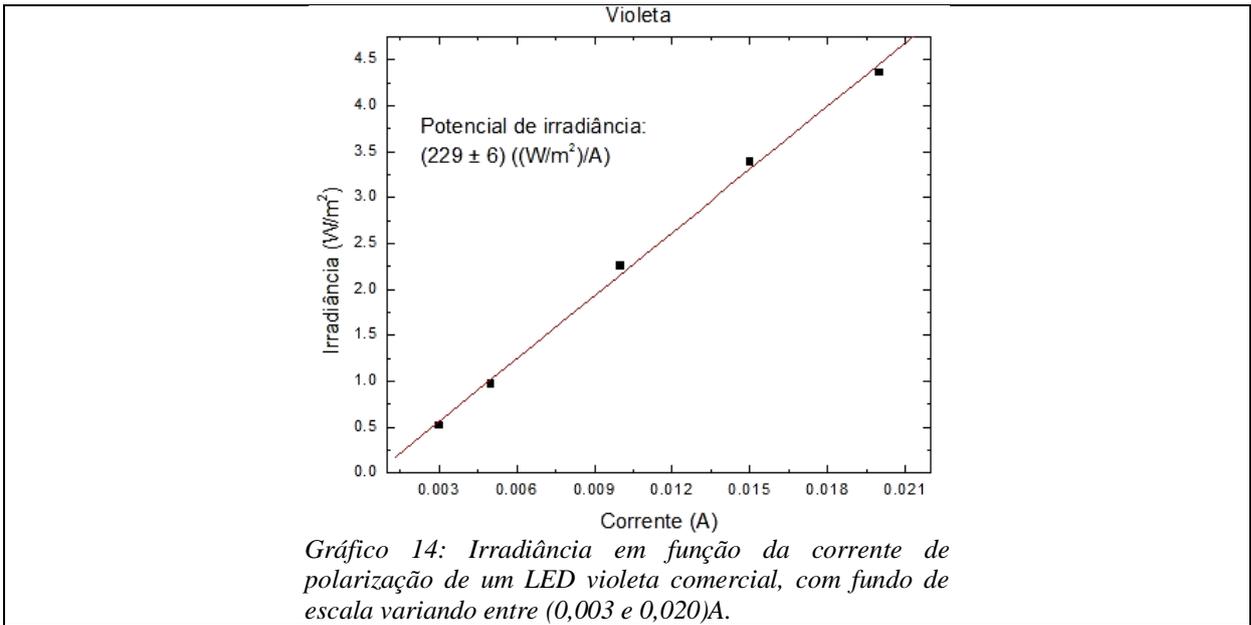
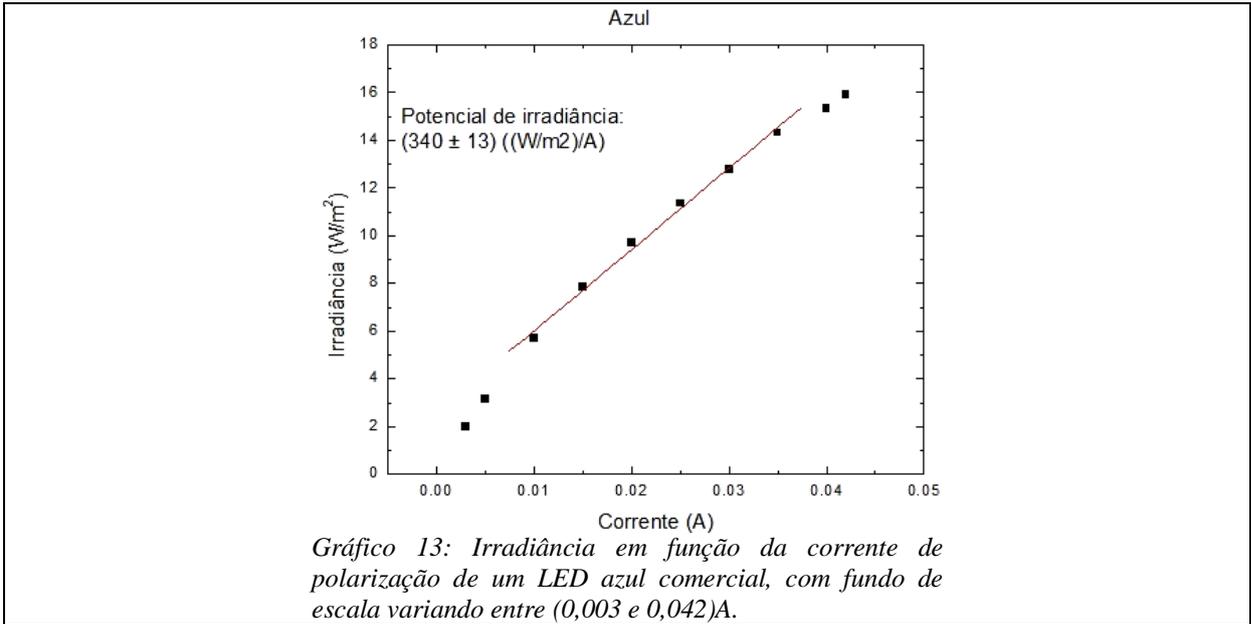
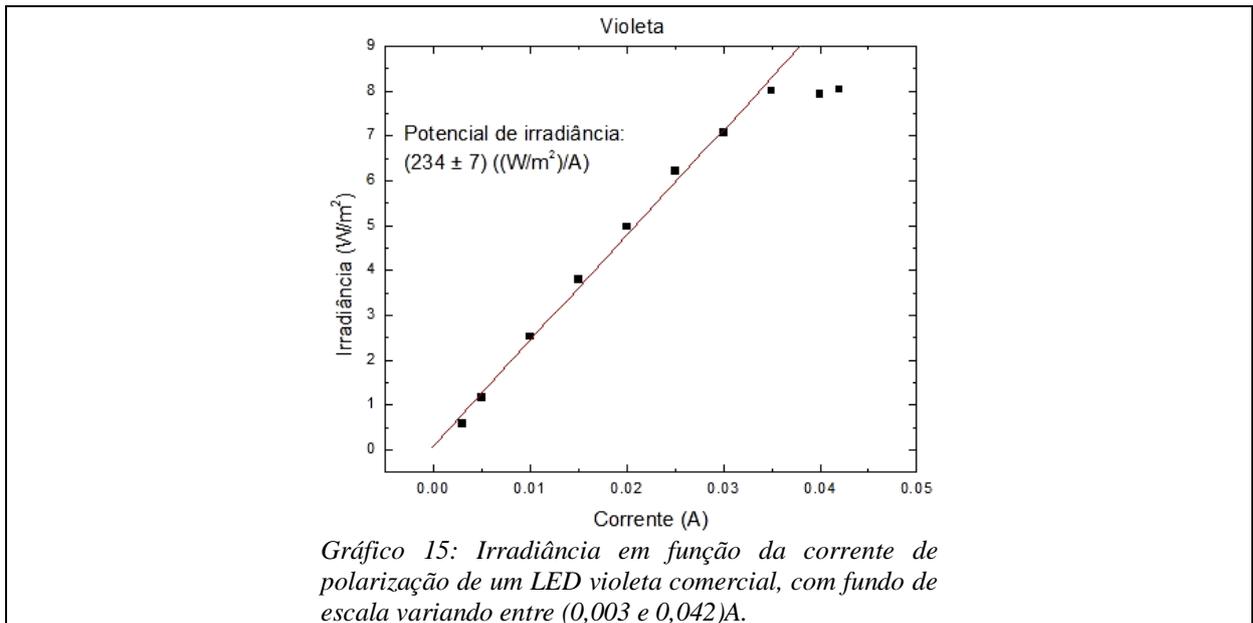


Gráfico 12: Irradiância em função da corrente de polarização de um LED azul comercial, com fundo de escala variando entre (0,003 e 0,020)A.





Na Tabela 2 é possível ver os potenciais de irradiância para os cinco diferentes LEDs testados, os seus respectivos erros e o comprimento de onda de cada LED. Os resultados foram obtidos pela regressão linear dos pontos experimentais, usando para tanto o método dos Mínimos Quadrados.

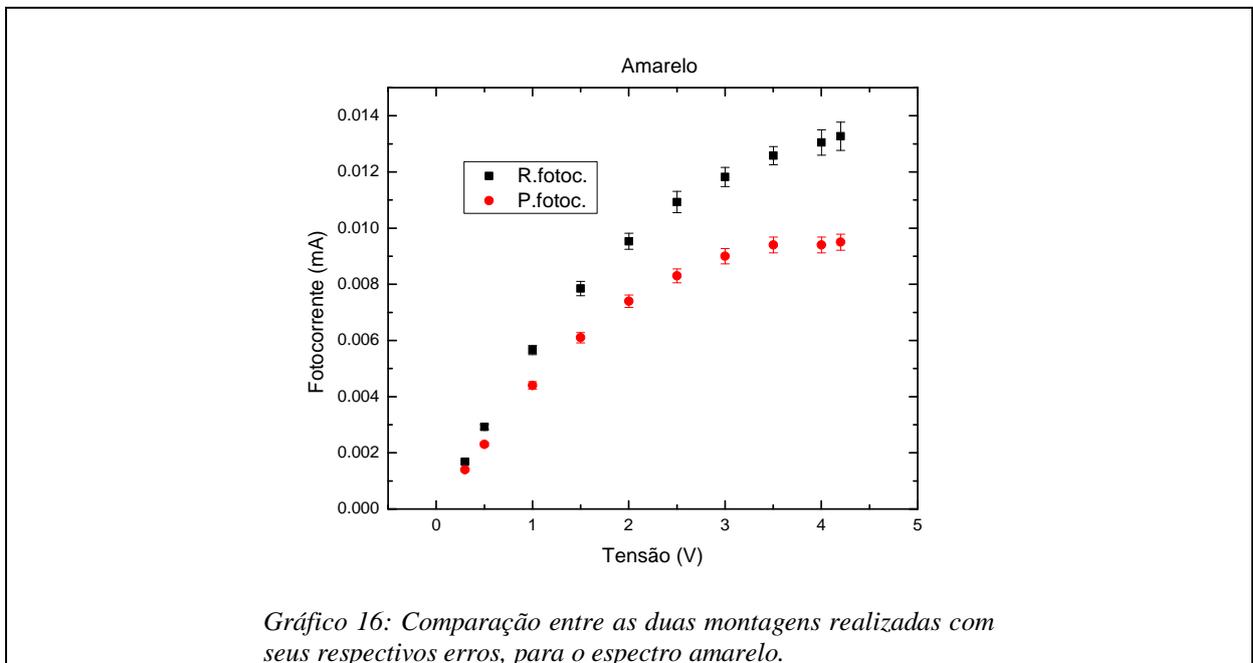
Tabela 2: Comprimento de onda do máximo de emissão de cinco diferentes LEDs e seus respectivos potenciais de irradiância, com os diferentes fundos de escala.

Cor	Vermelho	amarelo	verde	azul	violeta
Comprimento de onda (nm)	631	587	530	470	398
Potencial de irradiância((W/m ²)/A) (0.020A)	60.8 ± 0.4	12.0 ± 0.81	153 ± 6	455 ± 19	229 ± 6
Potencial de irradiância((W/m ²)/A) (0.042A)	50.0 ± 0.5	8.2 ± 0.8	117 ± 4	340 ± 13	234 ± 7

No Gráfico 9 e Gráfico 13 observa-se certo comprometimento da linearidade, em função do aumento o fundo de escala da corrente de polarização (variável independente). Inicialmente, para um fundo de escala de 0.020 A, a linearidade foi mantida. No intuito de explorar os

limites máximos de funcionamentos dos LEDs ensaiados, o limite da corrente foi aumentado para 0.042 A, que corresponde ao fundo de escala da fonte de corrente usada. Para as demais retas de irradiância, o aumento do fundo de escala, não alterou a linearidade das curvas, logo, a saturação para os diodos vermelhos, verdes e violetas acontece para valores superiores a este limite. O resultado experimental obtido nesse trabalho está coerente com o que prevê a teoria discutida na seção 5.1 do capítulo 5, onde é dito que linearidade ocorre dentro de certos limites (RIBEIRO, 2007).

Para validar o segundo radiômetro, sobretudo, pelo fato deste ser uma montagem de menor custo, utilizando um tubo de PVC comum, respeitando a distância (LED-fotodiodo) preconizada pela norma, foram refeitas, utilizando os mesmos LEDs, as medições de irradiância. Os resultados dessa medição são apresentados nos Gráfico 16 a Gráfico 19. As curvas observadas se mantiveram dentro do esperado. Apesar das curvas com o R2LEDs e com o PR2LEDs terem formas semelhantes, estas não são curvas absolutamente paralelas. Tal fato denota que a diferença dos resultados não é um simples fator multiplicativo, mas contém diferenças sistemáticas entre eles. Desta forma, os resultados obtidos precisam ser analisados por um modelo um pouco mais complexo que a aproximação linear.



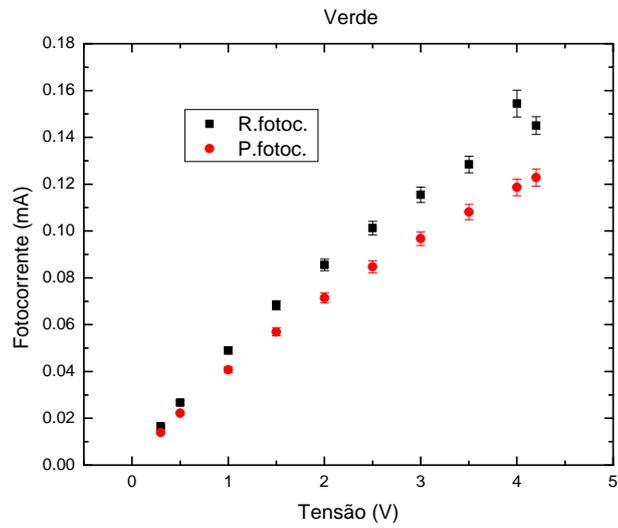


Gráfico 17: Comparação entre as duas montagens realizadas com seus respectivos erros, para o espectro verde.

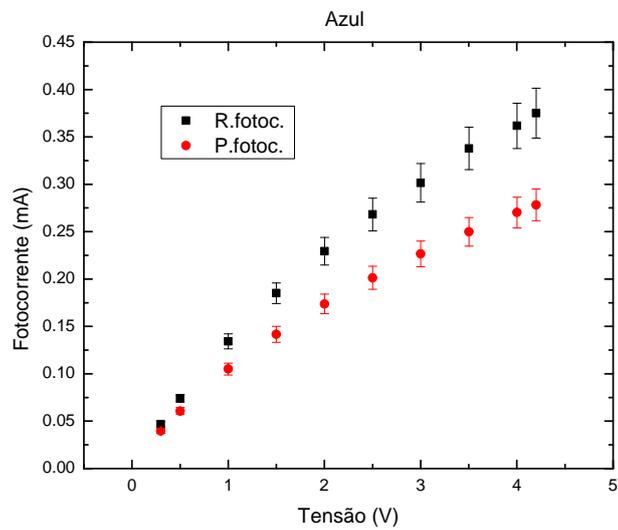
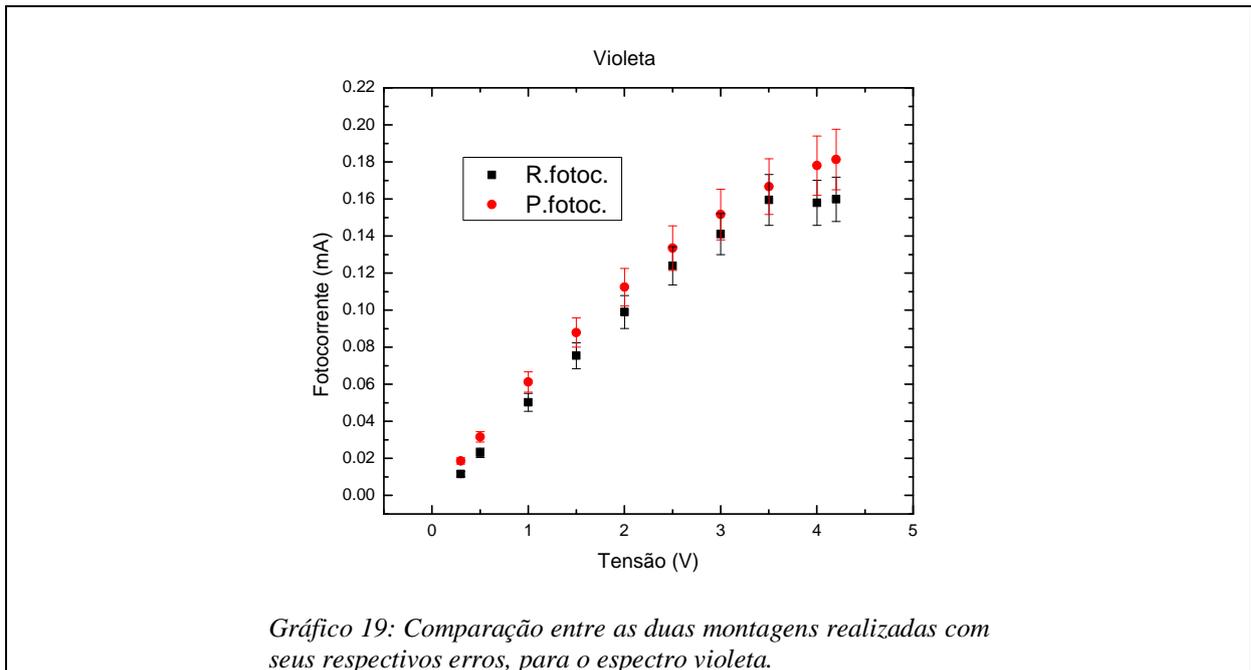


Gráfico 18: Comparação entre as duas montagens realizadas com seus respectivos erros, para o espectro azul.



6.3 CÁLCULO DO ERRO ENTRE AS MEDIDAS DOS CONJUNTOS PR2LED E R2LED

O erro das medidas do conjunto PR2LED (ERP) foi encontrado utilizando o erro relativo médio (\overline{EREL}) do conjunto de maior confiabilidade R2LED, descrito pela expressão 19 e melhor explicado na sessão 6.5 e a fotocorrente do conjunto PR2LED. Para tanto foi escolhido o maior valor do \overline{EREL} (\overline{MEREL}) multiplicado pela fotocorrente do PR2LED (FP). De forma que a expressão utilizada para encontrar ERP é:

$$ERP = \overline{MEREL} \cdot FP$$

14

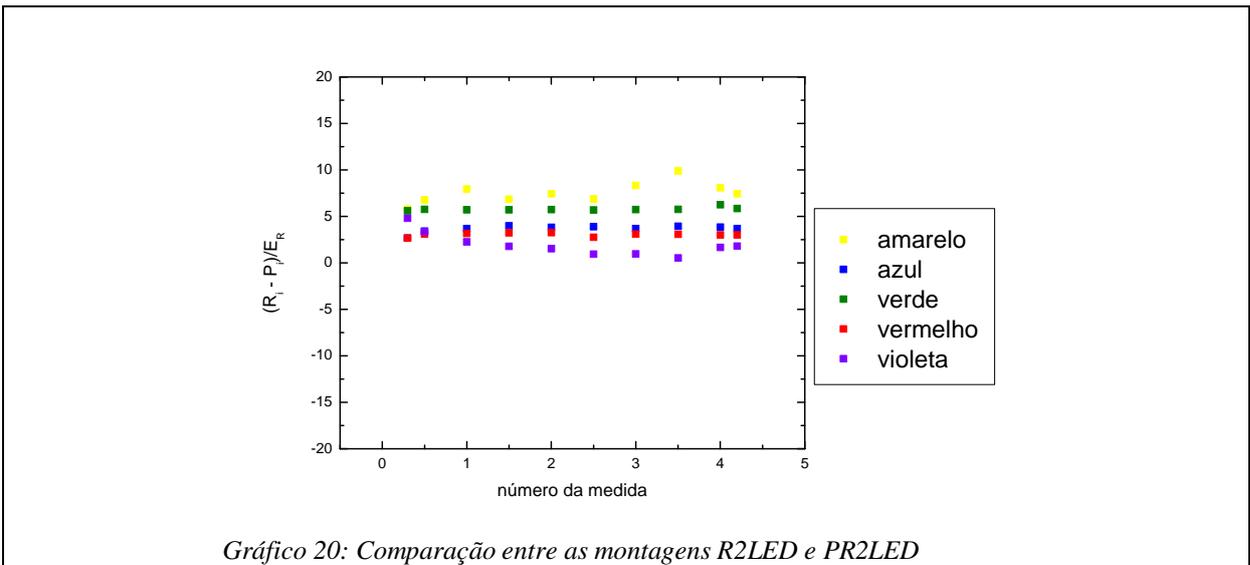
Para analisar os dados obtidos, apresentados nos Gráfico 16 a Gráfico 19, a maneira que parece mais adequada é aplicar um modelo que leve em consideração o valor da fotocorrente detectada, para um mesmo LED, por cada um dos radiômetros (R2LEDs e PR2LEDs), em

relação ao intervalo de confiança das medidas feitas com o radiômetro que inspira maior confiança, ou seja, o R2LEDs. Como a tentativa é de checar o “porquê” da diferença entre os resultados com os dois radiômetros, a expressão 15 expressa esta preocupação.

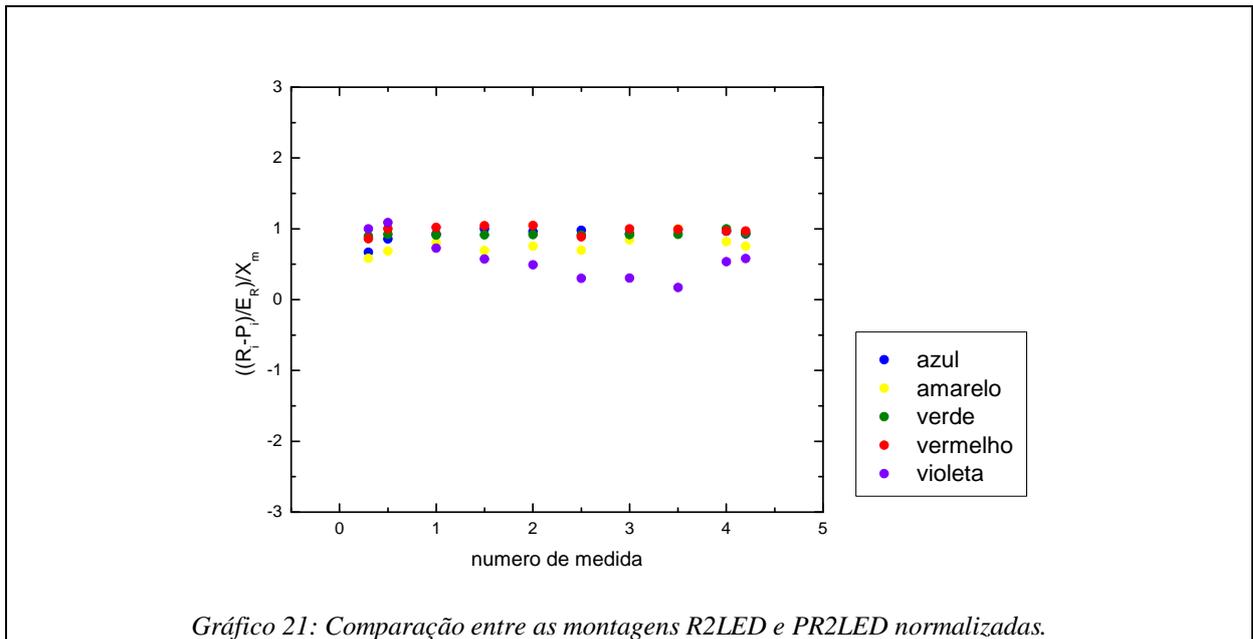
$$(ERS)^2 = \frac{(R_i - P_i)^2}{(ER_i)^2} \quad 15$$

Onde ERS é o erro sistemático, R_i é a fotocorrente do arranjo R2LED, P_i é a fotocorrente gerada pelo PR2LED e ER_i é o máximo (\overline{TER}) quando se mede com do arranjo R2LED (expressão 18 da sessão 6.5)

A partir dos valores calculados pela 15, em função do numero da medida feita, foi possível montar o Gráfico 20.



Neste Gráfico 20, levando em consideração o intervalo de confiança das medidas feitas com R2LEDs, é possível dizer que apesar de uma aparente discordância entre as curvas obtidas pelos radiômetros, os resultados obtidos são compatíveis entre si. Guardando, certas ressalvas quanto ao comportamento do LED violeta. Tal comportamento, pode ser melhor visualizado em um gráfico similar ao Gráfico 20 fazendo, entretanto, a normalização em relação ao desvio máximo calculado, pode ser visto no Gráfico 21.



No Gráfico 21 fica muito mais clara a discordância dos dados obtidos para o LED violeta.

Esta diferença, muito provavelmente, está ligada ao espalhamento de luz dentro do tubo de PVC, que não recebeu nenhum tratamento em sua geometria para ser usado como caminho ótico de um radiômetro. Outra possibilidade de explicação está ligada ao fato do PVC, mesmo que preto, poder ser mais ou menos sensível a um dado comprimento de onda, tendo uma absorção seletiva, preferencialmente, em uma dada banda de emissão.

Em ultima análise o uso de um tubo de PVC preto não é uma idéia de toda ruim, sobre tudo se o objetivo é ter o valor da irradiância de um LED em primeira aproximação. Especialmente em se tratando de um laboratório didático ou no caso de um laboratório com poucos recursos, ou no caso de uma medida emergencial.

Para assegurar o desempenho do radiômetro desenvolvido foi realizado um novo campanha de medidas. Para essas novas medidas tomou-se LEDs com qualidade conhecida, fabricados pela Roithner Laser Technik. É possível visualizar as retas de fotocorrente em função da corrente de polarização, os erros das regressões lineares obtidas pelo tratamento dos dados por

Métodos dos Mínimos Quadrados nos Gráfico 22 Gráfico 25. Na Tabela 4 é possível ter uma melhor comparação entre essas curvas.

Para os LEDs escolhidos, a Roithner Laser Technik fornece alguns dados da fabricação destes dispositivos (ANEXO 2 e ANEXO 3). Para os LEDs com o pico em 430 nm (violeta) a pastilha semicondutora é de InGaN, onde a intensidade da radiância para 20 mA é de 100 mW/sr, sendo o total do poder irradiante para os mesmos 20 mA de 22mW.

Já o LEDs com pico em 570 nm, feito de AlGaInP, para a obtenção da cor amarela, tem-se como intensidade de radiância 2.1mW/sr, onde o total do poder de radiância é 0.6 mW, para os mesmos 20mA.

Esses dados são melhor visualizados na Tabela 3

Tabela 3: Descrição dos LEDs da Roithner Laser Technik.

Cor dos LEDs	Violeta	Amarelo
Comprimento de onda	430	570
Intensidade de radiância	100mW/sr	2.1mW/sr
Total do poder de radiância máximo	22mW	0.6 mW
Material semicondutor	InGaN	AlGaInP
Corrente de polarização	20 mA	20mA

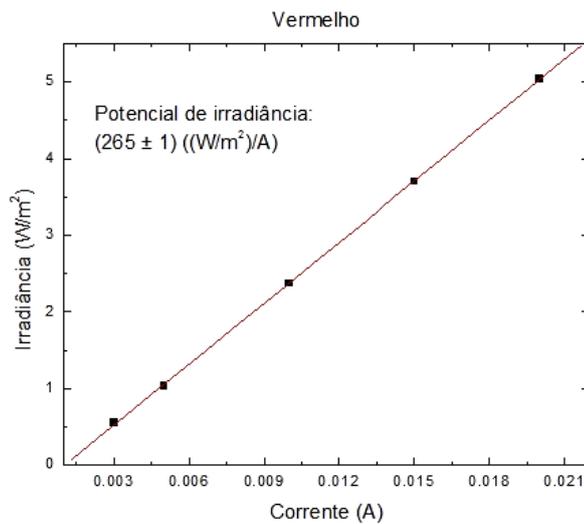


Gráfico 22: Radiância em função da corrente de polarização de um LED vermelho, com fator de qualidade conhecido, com fundo de escala variando entre (0,003 e 0,020) A.

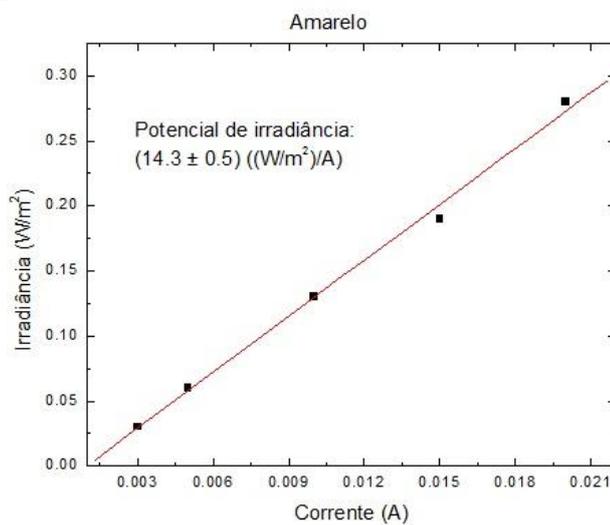
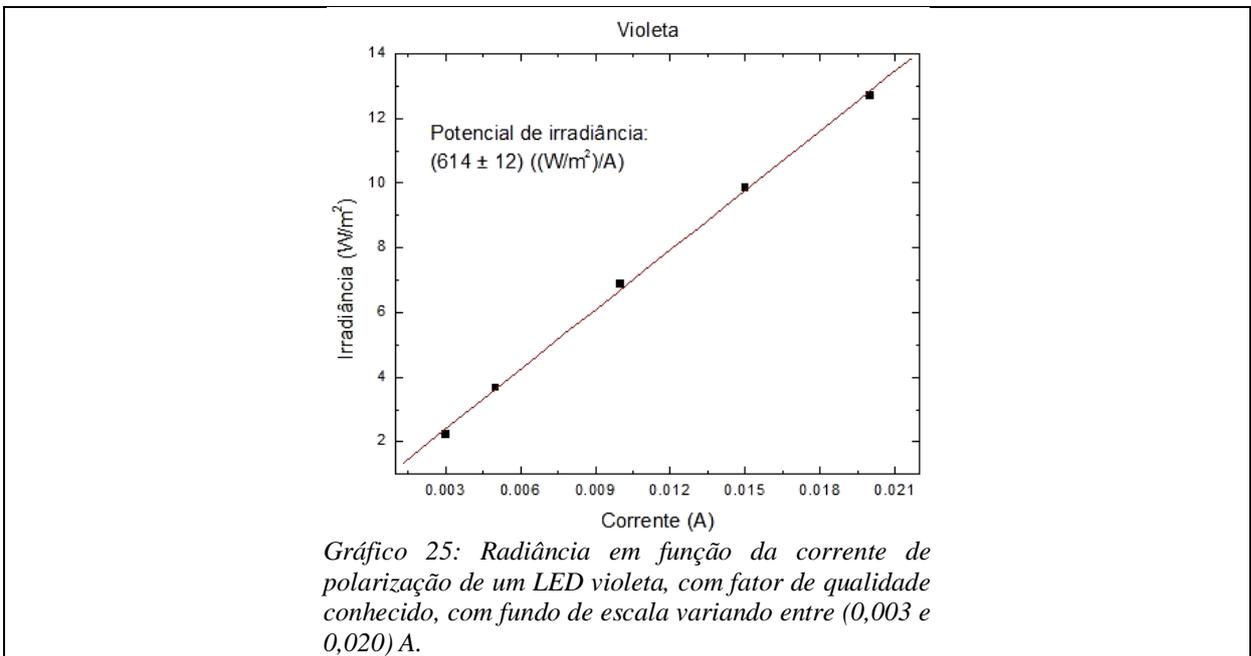
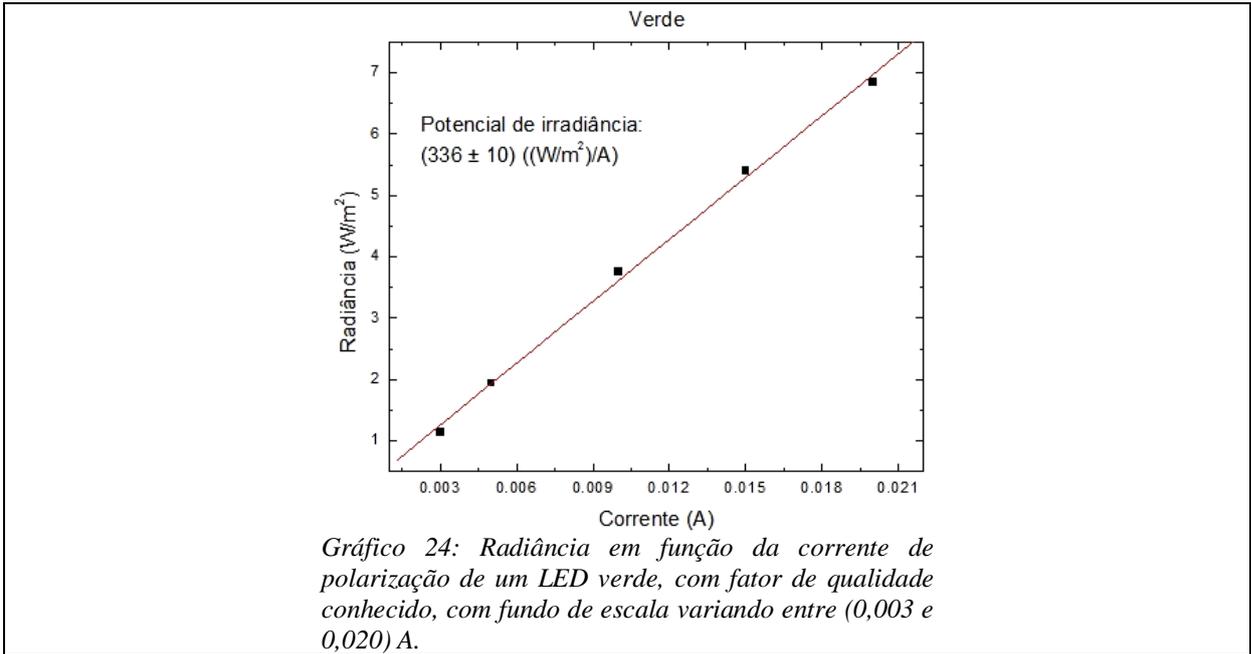


Gráfico 23: Radiância em função da corrente de polarização de um LED amarelo, com fator de qualidade conhecido, com fundo de escala variando entre (0,003 e 0,020) A.



A Tabela 4 mostra o comprimento de onda com suas cores correspondentes e os Potenciais de irradiância associados a esses LEDs. Na Tabela 5 é possível visualizar uma comparação entre

os dois potenciais irradiantes dos LEDs comerciais de alto brilho e dos LEDs manufaturados pela Roithner Laser. Há uma grande diferença entre eles, porém essa variação pode estar associada ao comprimento de onda de emissão dos LEDs estudado. Entre outros fatores construtivos destes dispositivos.

Tabela 4: Comprimento de onda dos novos LEDs estudados com seus respectivos Potenciais de irradiância

Cor	vermelho	amarelo	verde	violeta
Comprimento de onda (nm)	700	570	500	430
Potencial de irradiância ((W/m ²)/A)	265 ± 1	14.3 ± 0.5	336 ± 10	614 ± 12

Tabela 5: Comparação dos comprimentos de onda e dos Potenciais de irradiância dos LEDs de alto brilho e dos LEDs com fator de qualidade dado pelo fabricante, ambos com o fundo de escala de 0.020 A.

Cor	λ (nm) LEDs comerciais	Potencial irradiância LEDs comerciais ((W/m ²)/A)	λ (nm) LEDs Roithner	Potencial irradiância LEDs Roithner ((W/m ²)/A)
Vermelho	631	60.8 ± 0.4	700	265 ± 1
Amarelo	587	12.0 ± 0.81	570	14.3 ± 0.5
Verde	530	153 ± 6	500	336 ± 10
Violeta	398	229 ± 6	430	614 ± 12

Para validar a instrumentação utilizada, utilizou-se a seguinte relação:

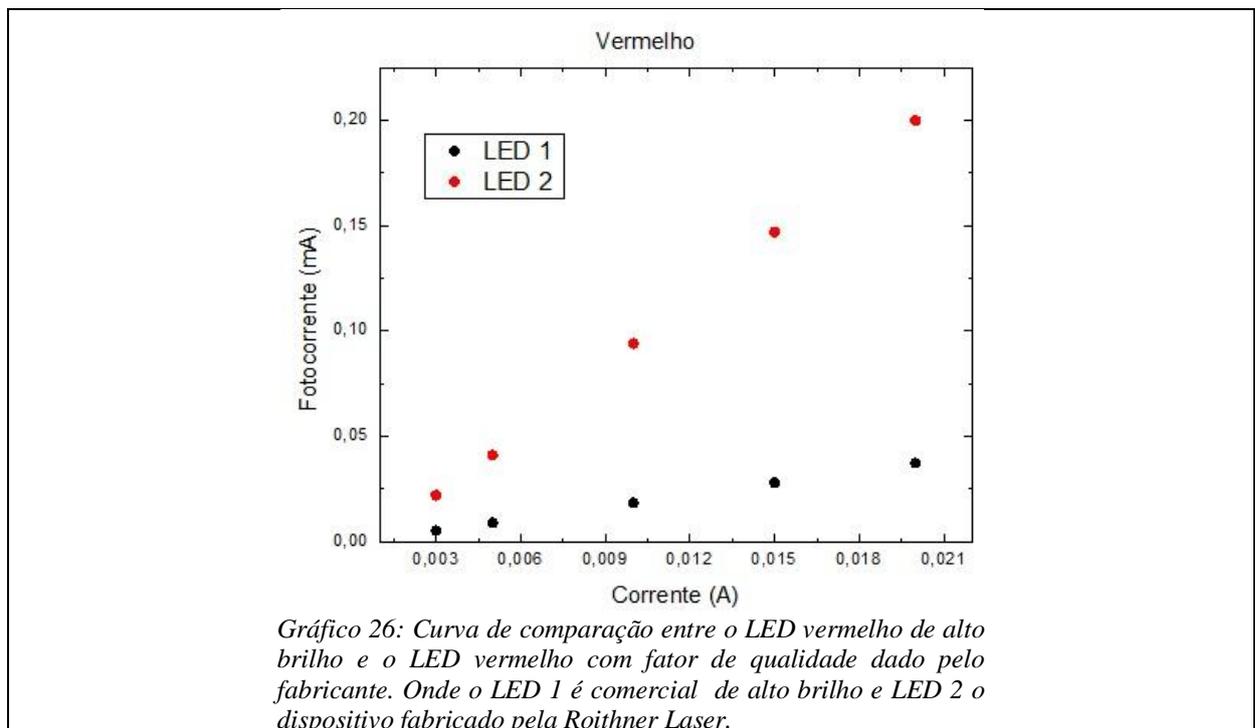
$$I_{rd} \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{I_{fotodiodo} (A)}{A (m^2) S_{pd} \left(\frac{A}{W} \right)} \quad 16$$

Onde $I_{fotodiodo}$ é em Àmpere (valor retirado dos dados experimentais através do R2LED), A é a área ativa da pastilha dado em m^2 e S_{pd} é a resposta do diodo em Àmpere por Watt, retirado dos valores dados pelo fabricante da Figura 17.

Para o diodo com o fator de qualidade garantido pelo fabricante para o LED violeta, utilizando a relação 16, foi de 22.2 mW e o valor dado pela Roithner Laser é de 22 mW, vide Tabela 3. Para o diodo amarelo foi conseguido um valor de 0,64 mW, o e o valor dado pela Roithner Laser foi de 0.6 mW, ambos expressos na Tabela 3.

Fica então evidenciada a consistência bem como a validade dos resultados encontrados pelo equipamento desenvolvido R2LED.

Nos Gráfico 26 a Gráfico 29 é possível visualizar a comparação entre as retas utilizando o arranjo R2LED para os LEDs comerciais de alto brilho e os LEDs com fator de qualidade dado pelo fabricante, cujo fundo de escala utilizado foi de 0.020 A.



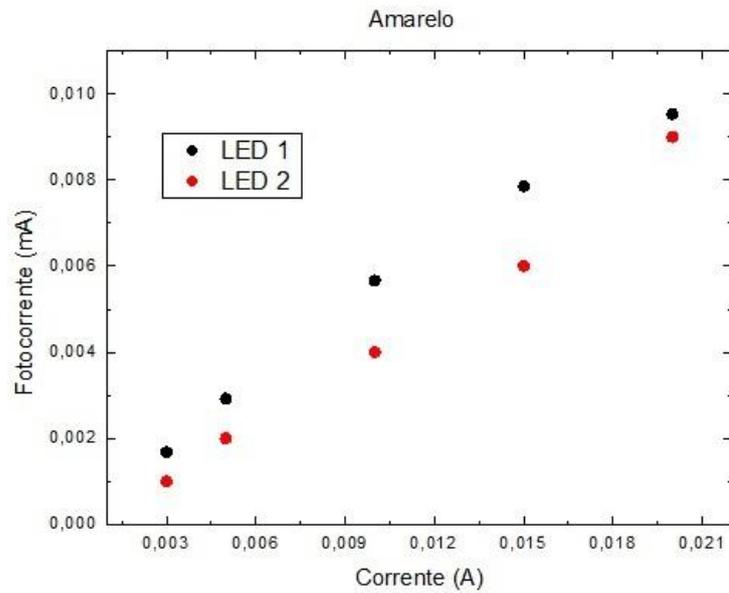


Gráfico 27: Curva de comparação entre o LED amarelo de alto brilho e o LED amarelo com fator de qualidade dado pelo fabricante. Onde o LED 1 é comercial de alto brilho e LED 2 o dispositivo fabricado pela Roithner Laser.

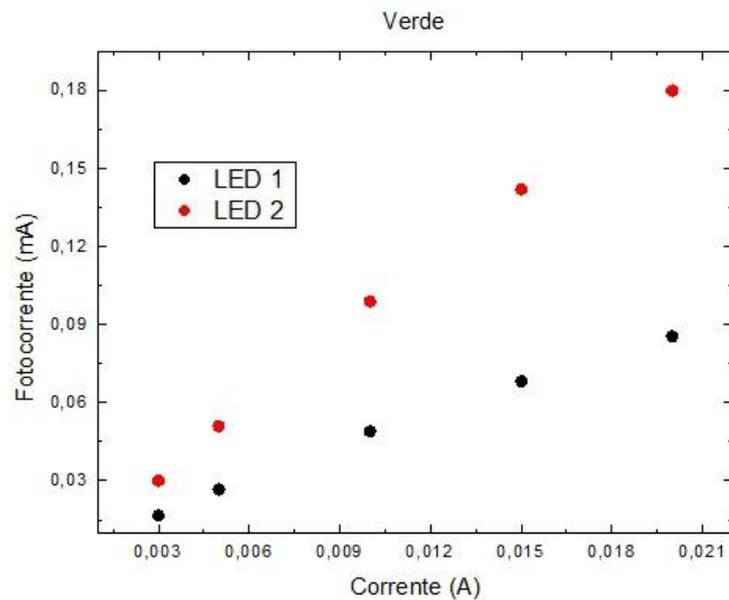
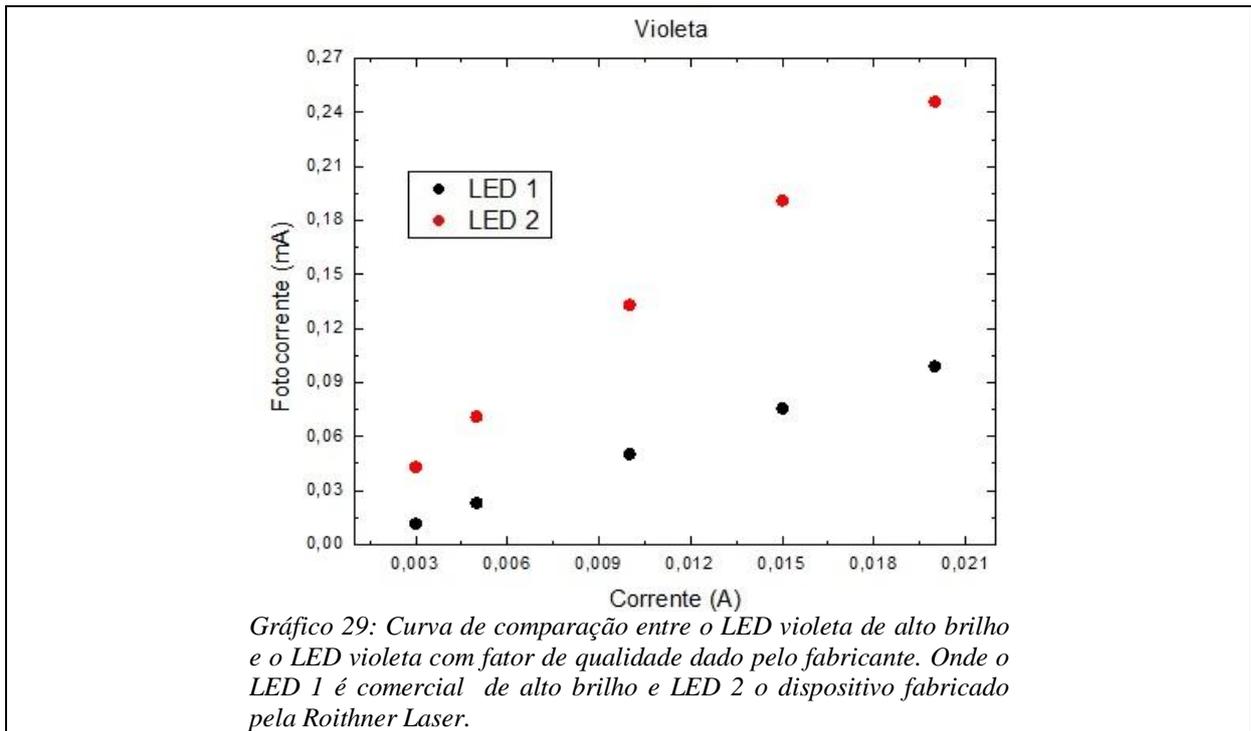


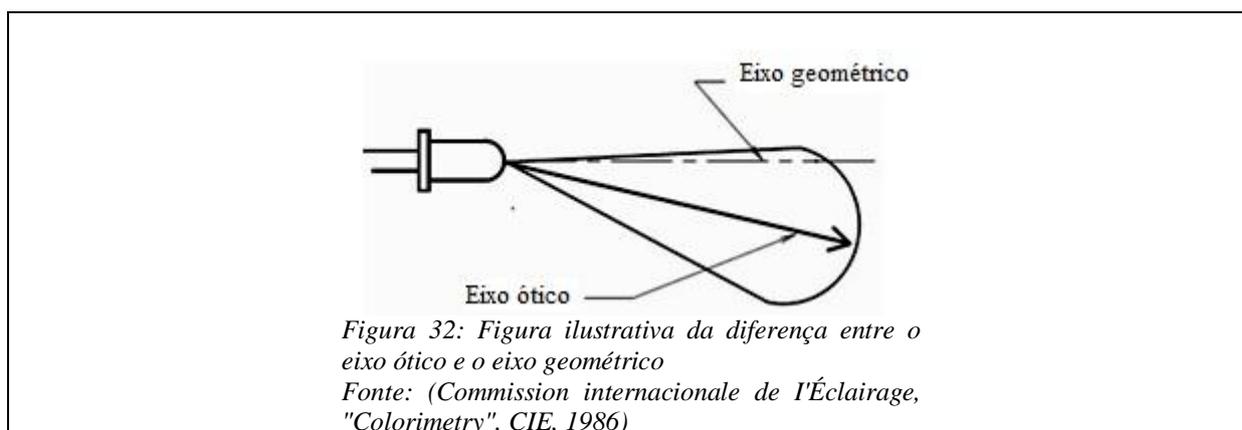
Gráfico 28: Curva de comparação entre o LED verde de alto brilho e o LED verde com fator de qualidade dado pelo fabricante. Onde o LED 1 é comercial de alto brilho e LED 2 o dispositivo fabricado pela Roithner Laser.



É possível verificar nos Gráfico 26 a Gráfico 29 e na Tabela 5, a comparação entre os LEDs comerciais e os de um fabricante conhecido e reputado. A diferença é grande, mas pode ser explicada por diferentes fatores construtivos. Apesar de serem LEDs com faixa espectrais próximas, estas não são idênticas, assim a variação da faixa emitida, e, portanto o semicondutor e sua dopagem, podem ser parte da explicação da diferença constatada. O tipo e a qualidade da pastilha utilizada, o posicionamento do contato ôhmico ligando a pastilha ao foto catodo, a qualidade e o tipo de lente utilizado para encapsular os LEDs ensaiados, bem como, o posicionamento do cone de emissão de luz dentro do encapsulamento, são fatores relevantes quando se busca máximo desempenho. Mesmo com todas essas variantes os resultados apresentam consistência, de modo que é possível validar as medidas feitas, utilizando-as como um parâmetro de referencia para caracterização de LEDs e mesmo do radiômetro desenvolvido.

6.4 ANGULOMETRIA

Da manipulação dos LEDs montados no R²LEDs foi percebida uma variação de irradiância do diodo, em estreita dependência com sua posição angular. Isto porque há uma diferença entre o eixo ótico e o eixo geométrico na estrutura dos LEDs como é ilustrado na Figura 32.



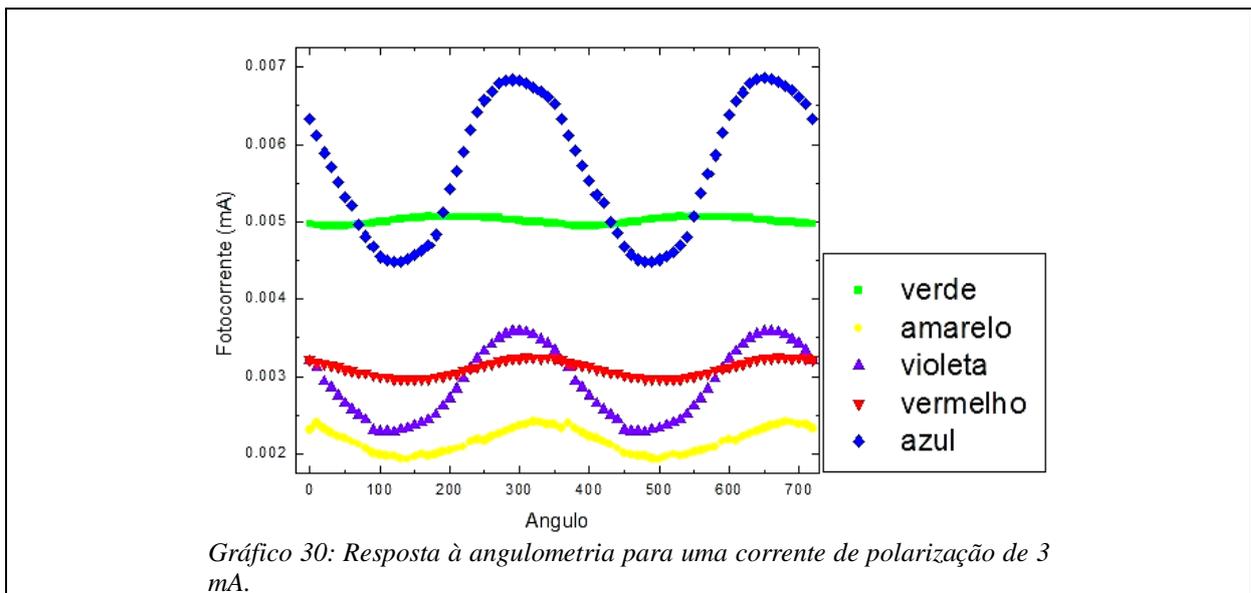
Por esta razão foi montado um método para estudar a relação entre a radiação do LED, que chega ao fotodiodo, em função do ângulo do LED, em relação a uma posição de referencia. Para tanto, foi acoplado ao radiômetro desenvolvido, um goniômetro na extremidade que recebe o LED, tornando possível a mensuração de ângulos absolutos, ou deslocamento angular relativo, e a resposta da intensidade irradiada, para cada ângulo escolhido.

Nesta etapa do experimento, para corrente de polarização igual a: 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 e 42 mA, foi feitas varreduras de 0° a 360°, com passos de 10°, totalizando 360 dados por LED analisado. Em cada rotina de medição da intensidade de irradiação foram tomadas 10 amostras (10 LEDs) resultando em um conjunto de 3600 dados, por banda espectral estudada. Esse processo foi repetido para diodos emissores de luz vermelhos, amarelos, verdes, azuis e violetas, num total de 18000 medições analisadas. Desta campanha de medição resultaram curvas com comportamento semelhantes à função cosseno. Desse estudo angulométrico foi

possível encontrar a variação da intensidade e a posição de emissão máxima para cada corrente de polarização, para cada LED, bem como o erro associado as medidas.

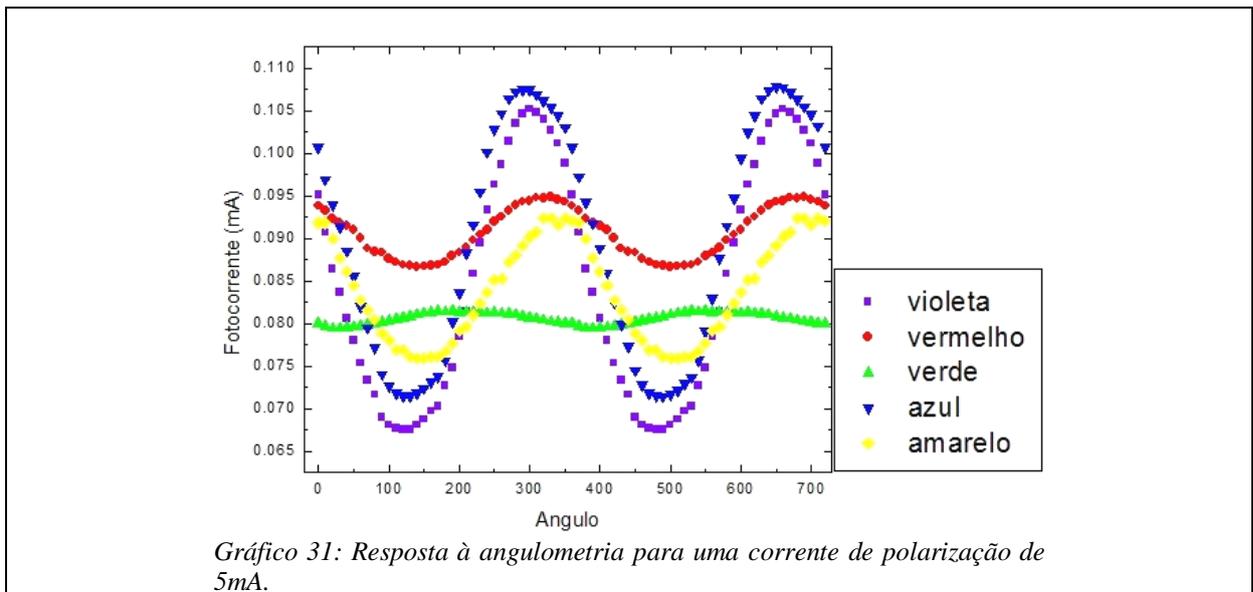
6.5 VARIAÇÃO DA INTENSIDADE E EMISSÃO MÁXIMA

O tratamento do conjunto de dados foi iniciado pelo calculo da média aritmética dos resultados para 10 LEDs, as rotinas de varredura foram separadas pela respectiva corrente de polarização, foram então, avaliando os pontos de cristas de vales.

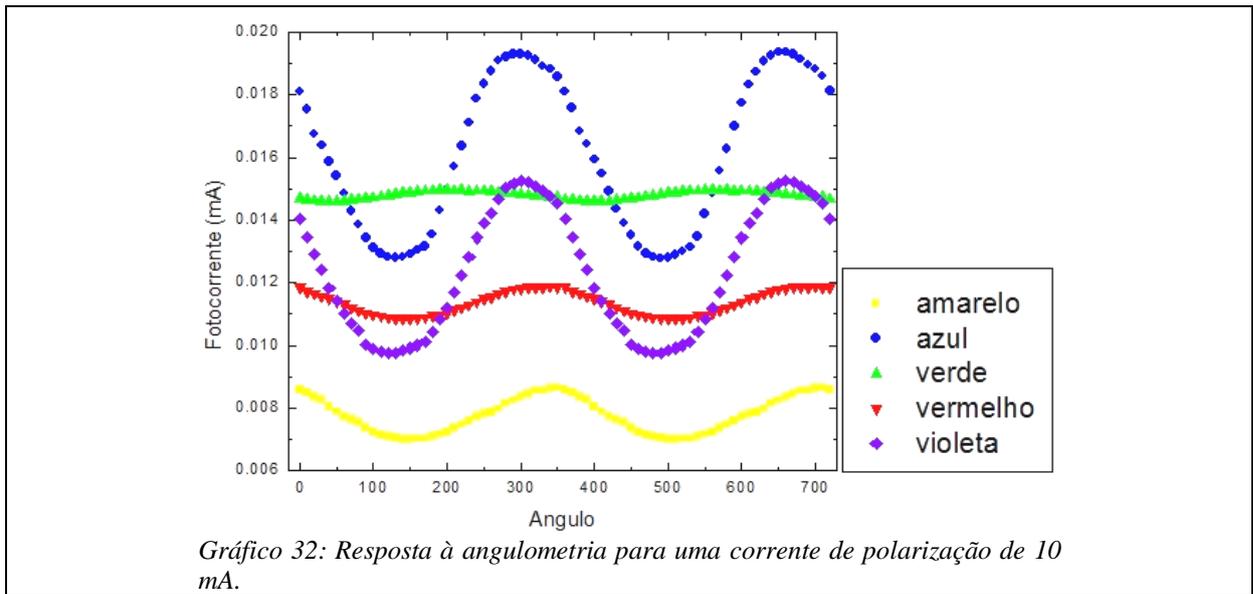


De acordo os resultados do Gráfico 30, o LED vermelho tem uma variação de 7% em sua intensidade de emissão em função do ângulo e emissão máxima em 310°. Para o LED amarelo a variação de intensidade é de 26% e a máxima emissão está em torno de 333°. O verde tem variação em torno de 2% de sua intensidade e sua máxima emissão está em torno de 189°. Já o

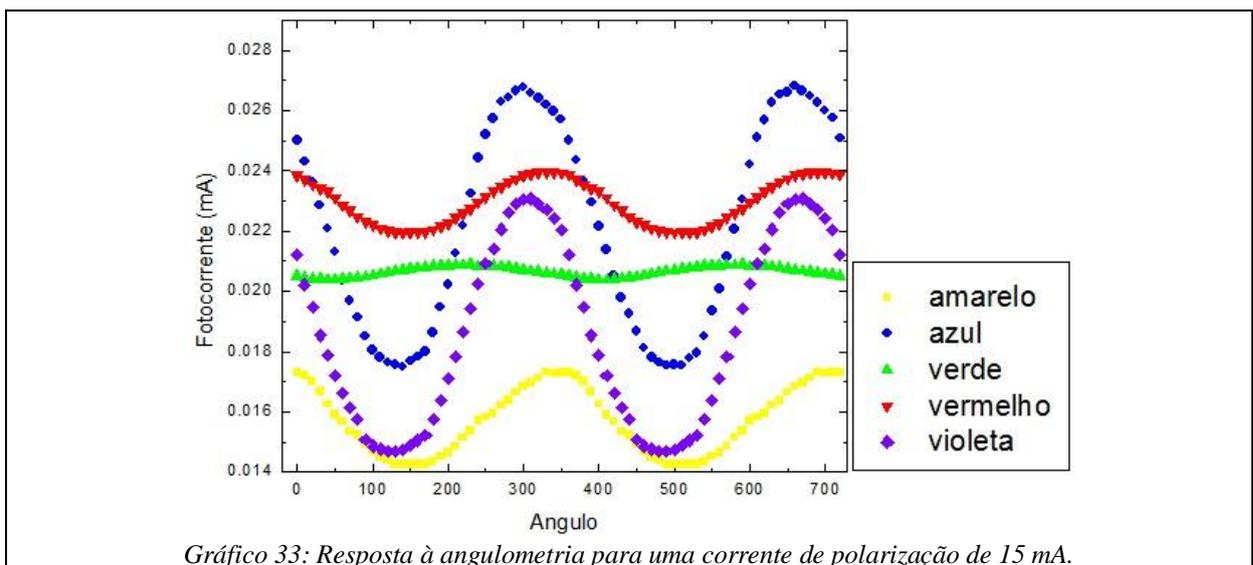
LED azul apresenta variação da intensidade de, aproximadamente, 52% e máximo de emissão está em torno 292° e em 651°. No caso do violeta, a variação de 59% em intensidade, com dois pontos de emissão máxima 296° e 661°.



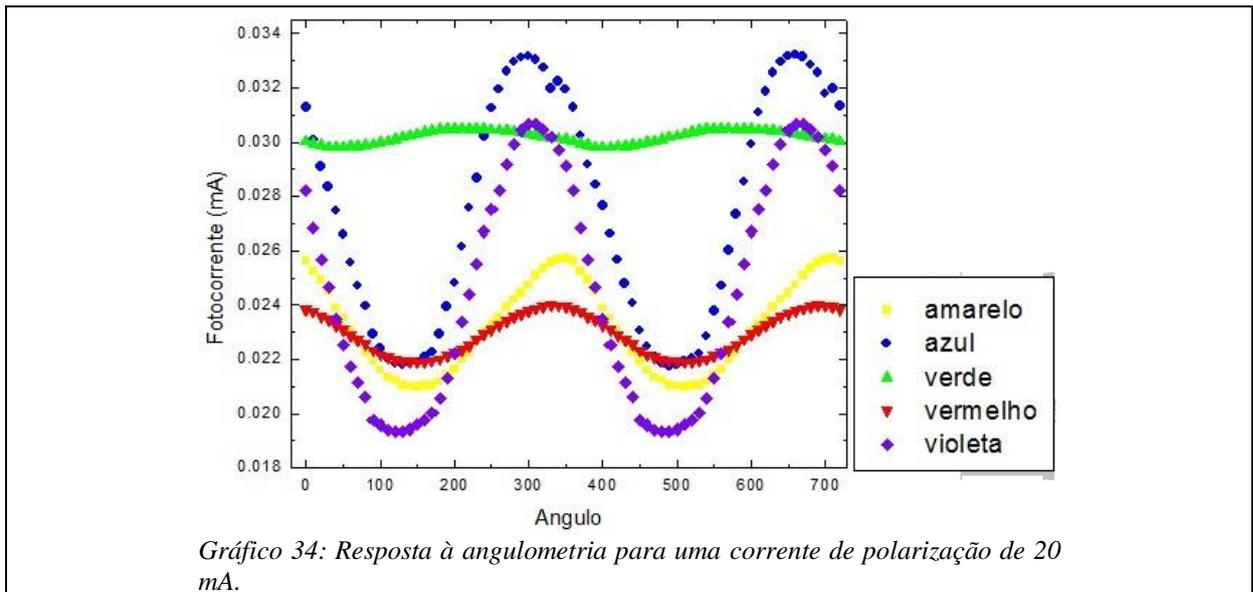
Para o conjunto de medidas à 5 mA, ver Gráfico 31, tem-se 9% de variação da intensidade para o LED vermelho, cujas emissão máxima estão em torno de 310° e 675°. 23% de variação na intensidade é observada para o amarelo, com a máxima emissão em torno de 333° e uma segunda emissão 694°. 2% de variação para o verde com a emissão máxima em 177° com 52% de variação para o azul como variação da intensidade, onde a emissão máxima esta em torno de 292° e em 651°. Finalmente, 56% de variação para o violeta, que possui dois pontos de emissão um em 298° e o outro em 659°.



O Gráfico 32 para 10 mA, a variação da intensidade luminosa é 19% para o vermelho possuindo uma emissão em 310°; 23% para o amarelo onde sua emissão máxima esta em torno de 343°; 2% para o verde com uma emissão máxima em torno de 178°; 48% para os LEDs azuis sendo sua emissão máxima na primeira volta completa do circulo trigonométrico em torno de 293° e na segunda volta a emissão máxima é por volta de 651°; 54% para o violeta com emissões máximas para as posições angulares de 297° e 662°.



Na corrente de polarização de 15 mA visualizada no Gráfico 33 a variação de intensidade é 9% para o vermelho, com emissão máxima 310°; 21% para o amarelo com a intensidade máxima em torno de 347°; 4% para o verde com emissão máxima em torno de 189; 49% para o azul, onde a sua emissão máxima está situada em torno de 292° e 652° e 64% para o violeta cuja emissão máxima está em 296° e uma segunda emissão em torno de 661°.



Para a tensão 20 mA, visualizada no Gráfico 34, é possível observar a variação da intensidade para o espectro vermelho é 10% com emissão de 311°; para o amarelo a variação da intensidade é em torno de 22% e sua emissão máxima esta em uma posição angular de 342°; para o espectro verde a variação da intensidade é por volta de 2% com emissão máxima de 189°; para a curva espectral azul, a variação da intensidade é em torno de 52% com uma emissão angular máxima de 292° e 650° e para o violeta a variação da intensidade é cerca de 58%, cuja emissão máxima é cerca de 298° e 661°.

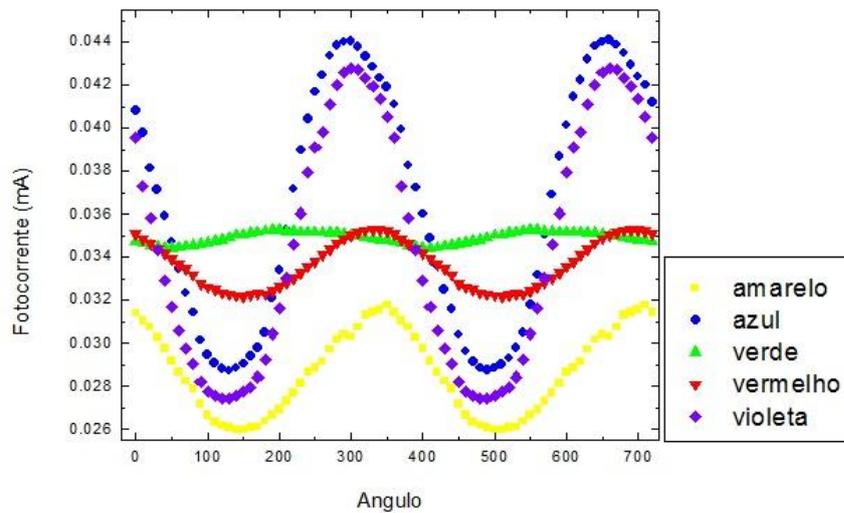


Gráfico 35: Resposta à angulometria para uma corrente de polarização de 25 mA.

No Gráfico 35 observa-se que para o espectro vermelho a variação da intensidade foi de 10%, cuja emissão máxima está em torno de 310°; a variação da intensidade para o espectro amarelo foi de 21%, onde a emissão máxima foi 347°; para o espectro de cor verde a variação da intensidade foi de 3%, cuja emissão máxima foi de 189°; para o espectro azul a variação da intensidade foi de 53% e teve sua emissão máxima nos pontos de 292° e 651°, para o violeta a variação da intensidade foi de 59%, onde a emissão máxima foi 301° e 663°.

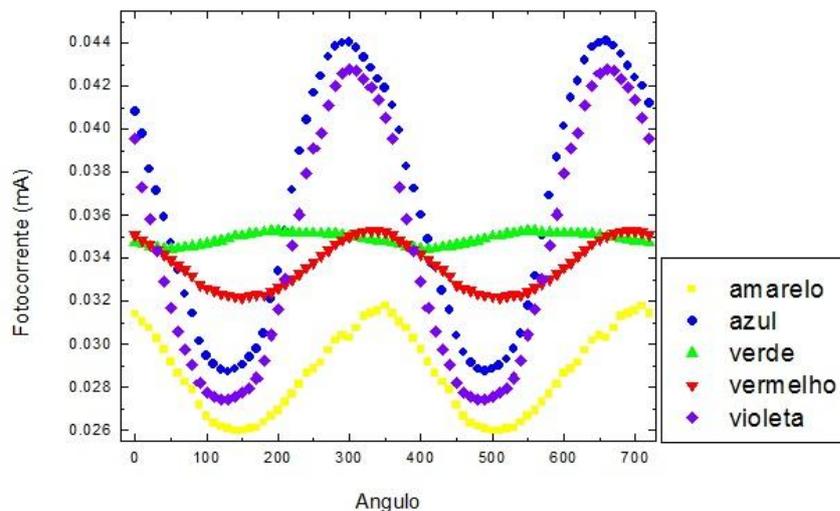


Gráfico 36: Resposta à angulometria para uma corrente de polarização de 30 mA.

No Gráfico 36 é possível observar que para o espectro vermelho a variação da intensidade foi de 9%, cuja emissão máxima está em torno de 311°; a variação da intensidade para o espectro amarelo foi de 22%, onde a emissão máxima foi 347°; para o espectro de cor verde a variação da intensidade foi de 2%, cuja emissão máxima foi de 189°; para o espectro azul a variação da intensidade foi de 53% e teve sua emissão máxima nos pontos de 292° e 650°, para o violeta a variação da intensidade foi de 56%, onde a emissão máxima foi 296° e 661°.

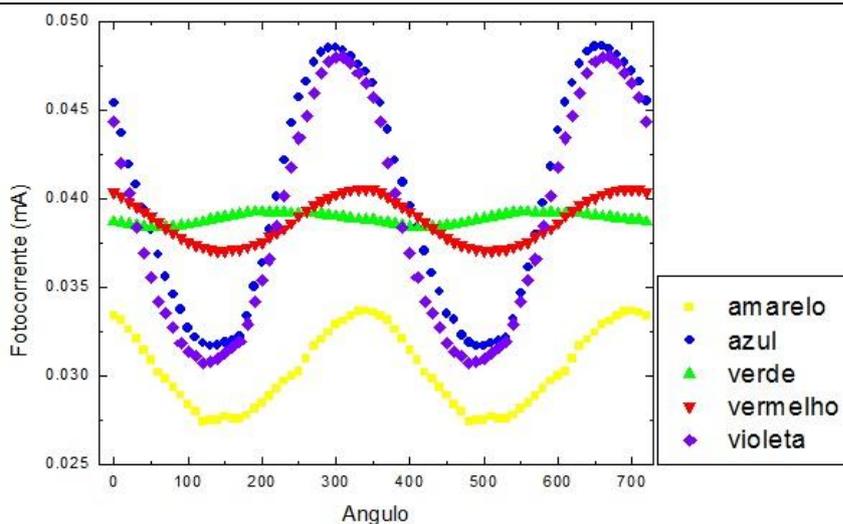
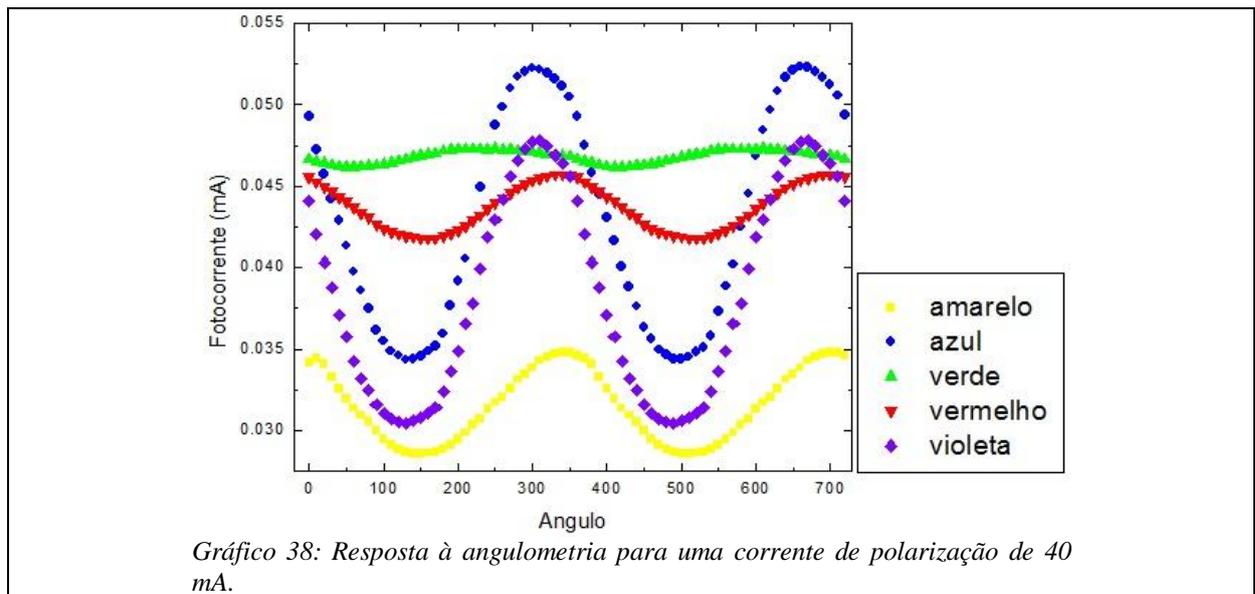
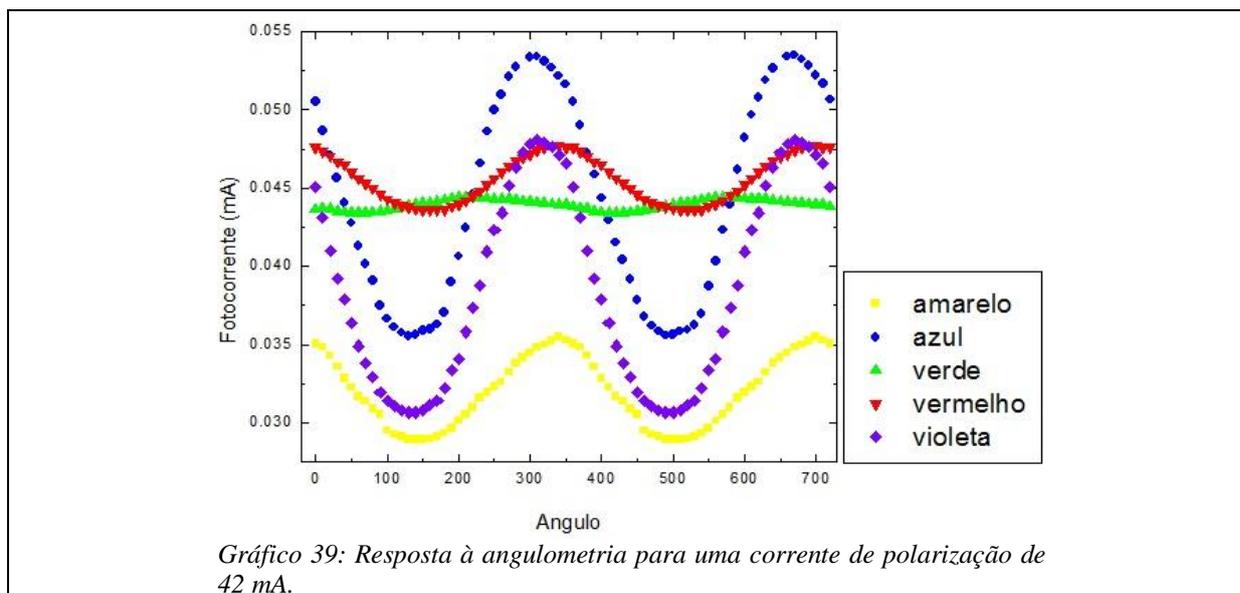


Gráfico 37: Resposta à angulometria para uma corrente de polarização de 35 mA.

No Gráfico 37 é possível observar que para o espectro vermelho a variação da intensidade foi de 9%, cuja emissão máxima está em torno de 310°; a variação da intensidade para o espectro amarelo foi de 22%, onde a emissão máxima foi 344°; para o espectro de cor verde a variação da intensidade foi de 2%, cuja emissão máxima foi de 189°; para o espectro azul a variação da intensidade foi de 53% e teve sua emissão máxima nos pontos de 292° e 651°, para o violeta a variação da intensidade foi de 56%, onde a emissão máxima foi 297° e 661°.



No Gráfico 38 observa-se que para o espectro vermelho a variação da intensidade foi de 9%, cuja emissão máxima está em torno de 310°; a variação da intensidade para o espectro amarelo foi de 21%, onde a emissão máxima foi 343°; para o espectro de cor verde a variação da intensidade foi de 3%, cuja emissão máxima foi de 189°; para o espectro azul a variação da intensidade foi de 52% e teve sua emissão máxima nos pontos de 292° e 651°, para o violeta a variação da intensidade foi de 57%, onde a emissão máxima foi 299° e 660°.



No gráfico de Gráfico 39 observa-se que para o espectro vermelho a variação da intensidade foi de 9%, cuja emissão máxima está em torno de 311°; a variação da intensidade para o espectro amarelo foi de 22%, onde a emissão máxima foi 344°; para o espectro de cor verde a variação da intensidade foi de 2%, cuja emissão máxima foi de 189°; para o espectro azul a variação da intensidade foi de 50% e teve sua emissão máxima nos pontos de 292° e 651°, para o violeta a variação da intensidade foi de 56%, onde a emissão máxima foi 297° e 661°.

Tabela 6: Dados da variação da intensidade e da emissão máxima

Corrente de polarização	Varição da intensidade Vermelho	Emissão máxima (vermelho)	Varição da intensidade Amarelo	Emissão máxima (amarelo)	Varição da intensidade Verde	Emissão máxima (verde)	Varição da intensidade Azul	Emissão máxima (azul)	Varição da intensidade Violeta	Emissão máxima (violeta)
3 mA	7%	310°	26%	333°	2%	189°	52%	292° e 651°	59%	296° e 661°
5 mA	9%	310° e 675°	23%	333° e 694°	2%	177°	52%	292° e 651°	56%	298° e 659°
10 mA	19%	310°	23%	343°	2%	178°	48%	293° e 651°	54%	297° e 662°
15 mA	9%	310°	21%	347°	4%	189°	49%	292° e 652°	64%	296° e 661°
20 mA	10%	311°	22%	342°	2%	189°	52%	292° e 650°	58%	298° e 661°
25 mA	10%	310°	21%	347°	3%	189°	53%	292° e 651°	59%	301° e 663°
30 mA	9%	311°	22%	347°	2%	189°	53%	292° e 650°	56%	296° e 661°
35 mA	9%	310°	22%	344°	2%	189°	53%	292° e 651°	56%	297° e 661°
40 mA	9%	310°	21%	343°	3%	189°	52%	292° e 651°	57%	299° e 660°
42 mA	9%	311°	22%	344°	2%	189°	50%	292° e 651°	56%	297° e 661°

A Tabela 6 resume os valores de variação da intensidade luminosa, para vales e cristas das cossenoides observadas, dos LEDs em função do ângulo, além dos ângulos de máxima emissão para cada banda espectral. Dessa tabela, uma serie de resultados podem ser observados: (a) de forma geral a variação da intensidade independe da corrente de polarização, somente no caso do LED verde foi medida uma variação da ordem de 10 % a partir de 15 mA. (b) ainda neste particular, o LED violeta apresenta um aumento de 10% da variação de intensidade para a corrente de 15 mA. (c) o deslocamento angular parece seguir uma tendência de mínimo para as bandas espectrais próximas de 600 nm. O ângulo de máximo de emissão é grande para os pequenos comprimentos de onda, passando por um mínimo, para em seguida aumentar novamente nas frequências mais baixas.

A partir das 10 medidas de intensidade máxima e emissão máxima (onde o índice i varia de 1 ate 10) em função do ângulo, para cada uma das cores (vermelho, amarelo, verde, azul e violeta) foi feita a média aritmética dos resultados das medições, apresentadas na Tabela 6. Na Tabela 7 é possível observar os valores obtidos para estas médias.

Tabela 7: Média da medidas da intensidade e da emissão máxima

Cor	Média da variação da intensidade (\overline{MV})	Media da emissão máxima (\overline{ME})
Vermelho	10%	310° e 675°
Amarelo	22%	342° e 694°
Verde	2%	187°
Azul	51%	292° e 651°
Violeta	58%	298° e 661°

Na Tabela 7 é possível notar que as menores variações da intensidade são para os LEDs vermelho e verde. Nessa mesma tabela são apresentadas as posições angulares para o máximo de emissão de luz.

6.6 CÁLCULO DOS ERROS, ERROS MÉDIOS E ERRO RELATIVO MÉDIO

Na Tabela 8 são apresentados os erros associados às medidas da variação da intensidade em função do ângulo para as diferentes correntes de polarização.

O erro dessas medidas foi calculado da seguinte forma: de posse das médias (\bar{M}) das X_i medidas, subtraiu-se a média da medida X_1 , obtendo assim o primeiro conjunto de erros ER_1 , o mesmo procedimento foi realizado para $X_2, X_3 \dots X_{10}$. Expressado na Equação 17. Essa manipulação matemática foi realizada para todo o estudo angulométrico da sessão 6.4.

$$\bar{M} - X_i = ER_i \quad 17$$

Em seguida foi realizada uma soma aritmética dos erros encontrados para a obtenção de um erro médio, a expressão 18 permite essa manipulação requerida:

$$\overline{TER} = \sqrt{\frac{(ER_i)^2 + (ER_{i-1})^2 + \dots + (ER_1)^2}{10}} \quad 18$$

O erro relativo médio das medidas foi encontrado pela divisão do erro médio da 18, pela média aritmética das amostras (LEDs), cuja expressão é 19:

$$\overline{EREL} = \frac{\overline{TER}}{\overline{M}}$$

19

6.7 CÁLCULO DOS ERROS DA VARIAÇÃO DE INTENSIDADE MÁXIMA E EMISSÃO MÁXIMA

Do estudo angulométrico foi possível analisar a variação da intensidade máxima assim como a emissão. Para encontrar a média da variação da intensidade e a média da emissão, fez-se uma média aritmética para cada grandeza estudada das respectivas correntes de polarização da Tabela 6, \overline{MV} para a média da variação da intensidade máxima e \overline{ME} para a média da emissão, de sorte que a expressão que corresponde as médias estudadas é 20:

$$\overline{MV} = \sum_i^N \frac{V_i}{n}$$

20

Onde V_i é variação da intensidade máxima para cada corrente de polarização aplicada, n é a quantidade de corrente utilizada (foram utilizadas 10 correntes, então $n = 10$), e os índices do somatório variam de $i = 3$ mA até $N = 42$ mA.

A média para as emissões obedecem a expressão 21:

$$\overline{ME} = \sum_i^N \frac{\theta_i}{n}$$

21

Onde θ_i é a variação da emissão com relação ao ângulo, n é a quantidade de corrente utilizada (foram utilizadas 10 correntes, então $n = 10$), e os índices dos somatórios variam de $i = 0^\circ$ até $N = 360^\circ$.

Para o cálculo do erro da variação máxima foi utilizado a média da variação de intensidade máxima assim como a variação para cada corrente de polarização aplicada; de modo que o erro obedece a relação 22:

$$ERV = \overline{MV} - V_i \quad 22$$

Onde i varia de 3 a 42 mA e ERV corresponde ao erro da variação de intensidade máxima.

A mesma manipulação matemática foi utilizada para o calculo do erro das emissões, de modo que:

$$ER\theta = \overline{ME} - \theta_i \quad 23$$

Onde i varia de 0 a 360° e $ER\theta$ corresponde ao erro da intensidade máxima.

A Tabela 8 são apresentados os valores dos erros da variação da intensidade para cada comprimento de onda e para cada corrente de polarização aplicada nos LEDs estudados. Na Tabela 9 é possível verificar o erro de emissão máxima.

Tabela 8: Erro da variação da intensidade

Corrente de polarização dos LED	Erro da variação da intensidade do vermelho	Erro da variação da intensidade do amarelo	Erro da variação da intensidade do verde	Erro da variação da intensidade do azul	Erro da variação da intensidade do violeta
3 mA	± 3%	± 4%	± 0%	± 1%	± 1%
5 mA	± 1 %	± 1%	± 0%	± 0%	± 2%
10 mA	± 9%	± 1%	± 0%	± 3%	± 4%
15 mA	± 1%	± 1%	± 2%	± 2%	± 6%
20 mA	± 0%	± 0%	± 0%	± 0%	± 0%
25 mA	± 0%	± 1%	± 1%	± 2%	± 1%
30 mA	± 1%	± 0%	± 0%	± 2%	± 2%
35 mA	± 1%	± 0%	± 0%	± 2%	± 2%
40 mA	± 1%	± 1%	± 1%	± 1%	± 1%
42 mA	± 1%	± 0%	± 0%	± 1%	± 2%

Tabela 9: Erro da emissão máxima

Corrente de polarização do LED	Erro da média da emissão máxima do vermelho	Erro da média da emissão máxima do amarelo	Erro da média da emissão máxima do verde	Erro da média da emissão máxima do azul (1ª volta)	Erro da média da emissão máxima do azul (2ª volta)	Erro da média da emissão máxima do violeta (1ª volta)	Erro da média da emissão máxima do violeta (2ª volta)
3 mA	± 0°	± 9°	± 2°	± 0°	± 0°	± 2°	± 0°
5 mA	± 0°	± 9°	± 10°	± 0°	± 0°	± 0°	± 2°
10 mA	± 0°	± 1°	± 9°	± 1°	± 0°	± 1°	± 1°
15 mA	± 0°	± 5°	± 2°	± 0°	± 1°	± 2°	± 0°
20 mA	± 1°	± 0°	± 2°	± 0°	± 1°	± 0°	± 0°
25 mA	± 0°	± 5°	± 2°	± 0°	± 0°	± 3°	± 2°
30 mA	± 1°	± 5°	± 2°	± 0°	± 1°	± 2°	± 0°
35 mA	± 0°	± 2°	± 2°	± 0°	± 1°	± 1°	± 0°
40 mA	± 0°	± 1°	± 2°	± 0°	± 0°	± 1°	± 1°
42 mA	± 1°	± 2°	± 2°	± 0°	± 0°	± 1°	± 0°

Pode-se visualizar nas Tabela 8 Tabela 9 que os erros das medidas são razoáveis, onde os maiores erros encontrados nas medidas chegam a no máximo 10%.

Nos Gráfico 30 a Gráfico 39 nota-se uma coincidência entre os vales e as cristas das curvas de intensidade contra posição angular dos LEDs. As curvas com menor corrente de polarização apresentam certa flutuação, isso porque a quantidade de luz que chega ao diodo é pequena, dessa sorte correntes com até 15 mA são as que apresentam maiores erros associados. Por outro lado, quando a corrente aumenta essas curvas passam a ter maior estabilidade e seu comportamento passa a ser mais próximo de uma cossenoide, como era esperado é onde são obtidos os menores erros. Diante dos dados coletados, dos resultados e dos erros obtidos é possível afirmar que o experimento apresenta absoluta coerência, demonstrando assim confiabilidade com respeito às medidas realizadas.

6.8 ESTUDO ESTATÍSTICO DE UMA POPULAÇÃO DE LEDs AZUIS

Utilizando 116 LEDs azuis, foi possível estimar a dispersão na produção de fótons nos diodos eletroluminescentes, no comprimento de onda 472,58 nm. Neste estudo foram utilizados diodos emissores de luz de um mesmo fornecedor, de um mesmo lote de fabricação, mantendo-se fixa a corrente de polarização (10 mA). Neste ensaio, o ângulo de posicionamento foi mantido, cuidadosamente, constante e igual a 90°. A partir dos dados

obtidos foi possível estimar a dispersão da produção de fótons desta população expressados nos Gráfico 40 e Gráfico 41.

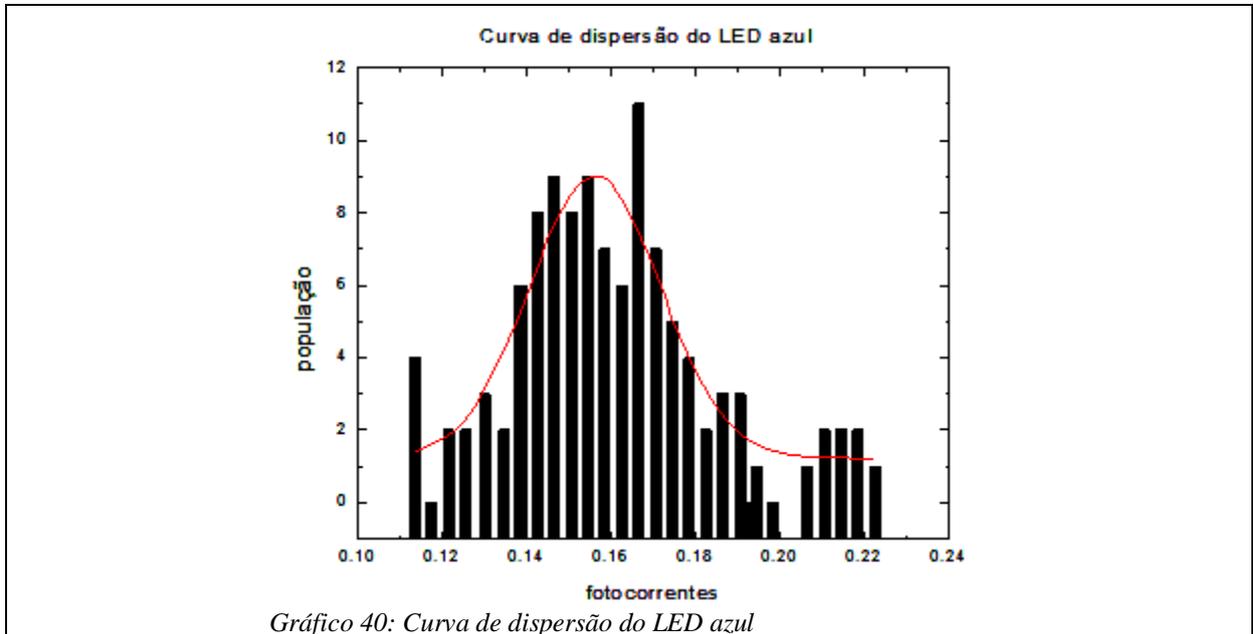


Gráfico 40: Curva de dispersão do LED azul

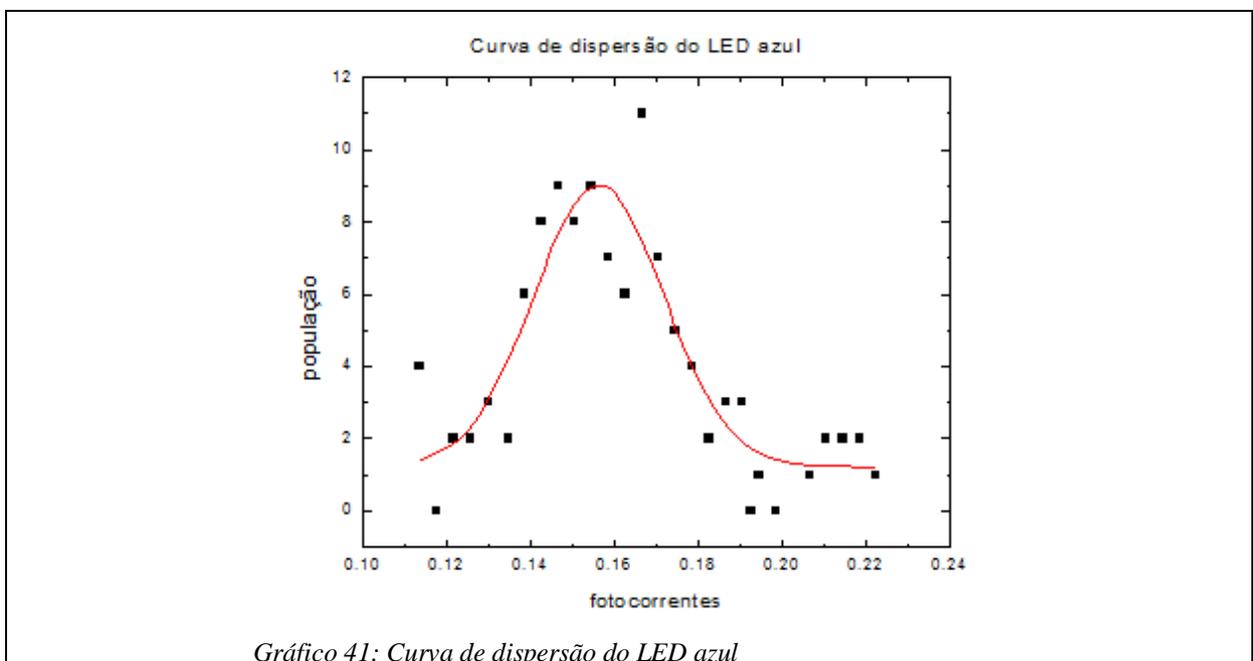


Gráfico 41: Curva de dispersão do LED azul

No centro da distribuição os LEDs geram até 0.156 mA no fotodiodo, a altura da distribuição é de 7.8 eventos. Isso determina uma meia altura de 3.9 LEDs, sendo que a largura para a meia altura é de 0.031 mA, ou um desvio percentual de 9.95%. Dentro do intervalo tido como um desvio padrão foi observado que 80 LEDs estariam compreendidos dentro deste limite. Dentro de tal limite, se considerada uma população caracterizada como atendendo a uma distribuição normal de probabilidade, portanto, era de se esperar 79 LEDs. Como o número estimado e o número observado são consistentes entre eles, conclui-se que o universo amostrado tem significância estatística.

Ainda desse estudo, ficou evidenciado que 15 LEDs apresentaram desempenho abaixo da média, enquanto que 21 desses elementos superam esta média no critério intensidade de luz emitida.

CONCLUSÃO

Foi projetado, desenvolvido e montado no Laboratório de Propriedades Óticas do Instituto de Física da UFBA um radiômetro para caracterizar LEDs de 3 e 5 mm, encapsulados em epóxi. Este radiômetro segue as normas internacionais de medição de LEDs, preconizadas pela CIE 127 de 1997, revisada em 2007 (Commission internationale de l'Éclairage, "Colorimetry", CIE, 1986).

Com base nos resultados obtidos, foi possível determinar o poder de irradiância de LEDs comerciais das cores vermelho, amarelo, verde, azul e violeta, evidenciando uma grande variação no desempenho desses dispositivos. A grandeza irradiância é expressa em $(W/m^2)/A$, pode ser usada como referência para a normalização da intensidade em aplicações que requeiram o uso de um conjunto de LEDs formando uma fonte de luz policromática.

O radiômetro vem munido de um goniômetro que permite o estudo da dependência angular do feixe de luz gerado pelo LED. No que tange a curva de variação angular, as curvas obtidas se aproximam de uma cossenoide, onde as variações de máximos e mínimos se repetem. Este comportamento mostra consistência em relação ao que se espera para LEDs que incorporam certos aspectos construtivos (tipo de pastilha, geometria dos contatos, ancoramento das pastilhas no catodo, etc.).

Do estudo estatístico de uma população de 116 LEDs azuis e comerciais ficou evidente a necessidade de caracterização destes componentes se a aplicação demanda homogeneidade de eficiência da emissão de luz. Para 80 destes LEDs o desempenho ficou caracterizado como

médio, dentro do intervalo de um desvio padrão, sendo que 15 LEDs apresentaram desempenho abaixo da média e 21 superam esta média no critério intensidade de luz emitida.

Foi visto ainda que para as curvas com maior fundo de escala para a corrente de polarização houve saturação dos espectros. Isto por que a linearidade deste dispositivo eletroluminescente tem limite. Quando se aumenta a quantidade de corrente, as medições tendem a atingir certa saturação.

É possível analisar a quantidade de pares elétrons-lacunas criados, pois a fotocorrente medida é proporcional ao número de fótons que incidem sobre a área ativa do diodo. Dessa forma é possível criar um critério de proporcionalidade da fotocorrente medida nesse trabalho, com a quantidade de pares criados para cada polarização aplicada, para cada banda espectral medida.

Os espectros, vermelho, verde e amarelo possuem as menores variações de intensidade em função do ângulo.

Na medida em que utiliza cada vez mais LEDs, enquanto fonte de luz, a caracterização destes dispositivos passa a ser indispensável para os grupos de pesquisa e laboratórios de desenvolvimento. Este trabalho apresenta uma solução de instrumentação para a caracterização dos parâmetros de irradiância e homogeneidade do campo de radiação de LEDs de 3 e 5 mm encapsulados em epóxi. No intuito de dar crédito e ênfase ao radiômetro R²LED, projetado e montado no LaPO do IF-UFBA, são apresentados os resultados de três diferentes rotinas de caracterização: 1- determinação do poder de irradiância de LEDs; 2- determinação da resposta angular do LED em teste; 3- caracterização da curva de dispersão do desempenho de uma população de LEDs, de um mesmo fabricante e de um mesmo lote de fabricação. Igualmente, quanto maior for a corrente aplicada menor será o erro de leitura – para o diodo envolvido SM1PD2A em conjunto com os LEDs de alto brilho e os da marca Roithner Lasertechnik – é válido lembrar que é necessário manter a integridade física dos LEDs envolvidos não ultrapassando o que cada componente suporta de corrente.

O radiômetro proposto neste trabalho pode ser um instrumento de grande ajuda na otimização da potencia ótica dos LEDs, de modo a obter máxima irradiância e estabelecer a direção de

maior iluminância, contribuindo para a garantia de uma homogeneidade de um conjunto de LEDs utilizado.

Como perspectiva futura é importante automatizar o processo de aquisição de dados, hoje realizado de forma manual. Em parceria com alguma empresa, é possível vislumbrar a construção de um radiômetro como esse em escala comercial. Em posse de um radiômetro dessa natureza consegue-se estudar e selecionar os melhores candidatos (LEDs) para serem utilizados em um determinado arranjo que se queira, visando o custo benefício.

Bibliografia

AZAROFF, L. **INTRODUCTION TO SOLIDS**. [S.l.]: Tata Mcgraw Hill, v. 1, 2001.

BAROLET, D. Light-Emitting Diodes (LEDs) in Dermatology. **Elsevier**, v. 27, p. 227-238, 2008. ISSN Issue 4.

BOYLESTAD, R. L.; NASHESKY, L. **Dispositivos Eletronicos e Teoria de Circuitos**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil LTDA, 1999.

CAMARGO, F. **Fatores que Influenciam a Resolução em Energia na Espectrometria de Partículas Alfa com Diodos de Si**. São Paulo: Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2005.

CASSIGNOL, É. J. **Semicondutores Física e Eletronica**. 2.ed. ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher Editor, 1960.

COMMISSION internationale de l'Éclairage, "Colorimetry", CIE, 1986.

GINES, T. B.; DAVIDSON, M. W. Carl Zeiss: Education in Microscopy and Digital Imaging. **Site da Carl Zeiss**. Disponível em: <<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/tutorials/leddiagram/>>. Acesso em: 17 Dezembro 2013.

GRATZEL, M. Photoelectrochemical cells. **Nature**, Lausanne/Suíça, v. 414, p. 338-344, Novembro 2001.

GU, L. et al. Band-gap measurements of direct and indirect semiconductors using monochromated electrons. **Phys. Rev. B**, v. 75, p. 195214, Maio 2007.

HUI, S. Y. R.; QIN, Y. X. A General Photo-Electro-Thermal Theory for Light. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, v. 24, p. 1967-1976, Agosto 2009. ISSN 8.

IVEY, H. F. Electroluminescence and semiconductor lasers. **Quantum Electronics, IEEE Journal of**, v. 2, p. 713-726, Janeiro 1966.

KITTEL, C. Introdução à Física do Estado Sólido. 8ª Edição. ed. Rio De Janeiro: LTC, 2006. p. 161.

LED Metrology, Handbook of LED Metrology, Instrument Systems GmbH, 200. [S.l.]: [s.n.].

LEITE, R. C. D. C.; CASTRO, A. R. B. **Física do Estado Sólido**. ? ed. São Paulo: Edgar Blücher, Campinas UNICAMP, 1978.

LOURENÇO, D. R. **Sistemas de Iluminação Pública com Gestão Inteligente de Consumo**. Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro, 2010.

- MOLL, J. L. **Physics of Semiconductores**. 1ª Edição. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1964.
- MORA, N. D. **Apostila de materiais elétricos**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Foz do Iguaçu. 2010.
- MOURA, J. A. D. S. **Filmes Nanométricos de FeN e AlN Crescidos por Sputtering e Aplicações do Efeito Peltier**. Rio Grande do Norte: Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- MULLEN, K. T. THE CONTRAST SENSITIVITY OF HUMAN COLOUR VISION TO RED-GREEN AND BLUE-YELLOW CHROMATIC GRATINGS. **Journal of Applied Physiology**, Cambridge, p. 381-400, Março 1984.
- MULLER, G. **Electroluminescence I**. San Diego: Academic Press, 2000.
- NAKAMURA, S. [S.l.]: [s.n.].
- NAKAMURA; SHUJI. High-brightness blue/green LEDs and first III-V nitride-based laser diodes. **Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series**, v. 2693, p. 43-56, Maio 1996.
- NEUDECK, G. W. **The PN Junction Diode**. 2nd.ed. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 2, 1989.
- OHNO, Y. **Fundamentals in Photometry and Radiometry II - Photometers and Integrating Spheres, CIE LED Workshop and Symposium**, Vienna, 1997.
- OLIVEIRA, D. F. D. **Confiabilidade metroológica e validação de procedimentos espectralométricos para medição de fontes luminosas**. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.
- OLIVEIRA, H. P. M. D.; COSSIELLO, R. F.; ATVARIS, T. D. Z. E. A. L. Dispositivos poliméricos eletroluminescentes. **Quím. Nova [online]**, v. 29, p. 277-286, 2006.
- PEREIRA, J. M. T. **Fundamentos de Eletrônica**. Lisboa/Portugal: Instituto Tecnico Superior, 2010.
- PÉREZ, M. D. M. et al. Stability and Reproducibility of Radiometric Properties of Light Curing Units (LCUs). Part II: LED LCUs. **Dental Materials Journal**, v. 27, p. 292-299, 2008. ISSN 2.
- R. H. FRIEND, R. W. G. A. B. H. J. H. B. R. N. M. Electroluminescence in conjugated polymers. **Nature**, v. 397, p. 121-128, Janeiro 1999.
- REZENDE, S. Materiais e Dispositivos Eletronicos. In: REZENDE, S. M. **A Física de Materiais e Dispositivos Eletronicos**. Pernambuco: Universidade Federal de Pernambuco, 1996. Cap. 4, p. 101.
- REZENDE, S. M. **A Física de Materiais e Dispositivos Eletronicos**. Recife: Universitária da UFPE, v. 1, 1996.
- RIBEIRO, J. A. J. **Comunicações Ópticas**. 3rd.ed. ed. São Paulo: São Paulo, 2007.

RODRIGUES, C. R. B. S. et al. **Um Estudo Comparativo de Sistemas de Iluminação Pública:** Estado Sólido e Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão. Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on. São Paulo: [s.n.]. 2010. p. 11904408.

SCHLOTTER, P. et al. Fabrication and characterization of GaN:InGaN:AlGaIn double. **Materials Science and Engineering: B**, v. 59, p. 390 - 394, 1999.

SVILAINIS, L. LED directivity measurement in situ. **Elsevier**, v. 41, p. 647-654, July 2008.

SVILAINIS, L. LED directivity measurement in situ. **Elsevier**, v. 41, p. 647-654, July 2008.

SVILAINIS, L. LED directivity measurement in situ. **Elsevier**, v. 41, p. 647-654, July 2008.

SVILAINIS, L.; DUMBRAVA, V. LED Goniometry System. **Electronics and electrical engineering**, p. 69-74, 2006. ISSN 8(72).

USP. <http://www.demar.eel.usp.br/electronica/aulas/Semicondutores.pdf>. Acesso em: Dezembro 2012.

VAN VLACK, L. H. Princípios de Ciências dos Materiais. 13ª Edição. ed. [S.l.]: Edgard Blücher LTDA, 2000.

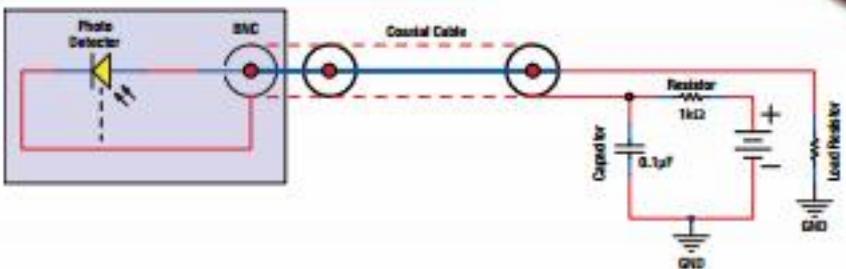
WANG.Y. et al. **Prediction of PIN Diode Reverse Recovery**. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen: [s.n.]. 2004.

WORTHEY, J. A. Color Rendering: Asking the Question. **Wiley Periodicals, Inc.**, v. 28, p. 403-412, Dezembro 2003.

ANEXO 1

THORLABS

Recommended Circuit Diagram



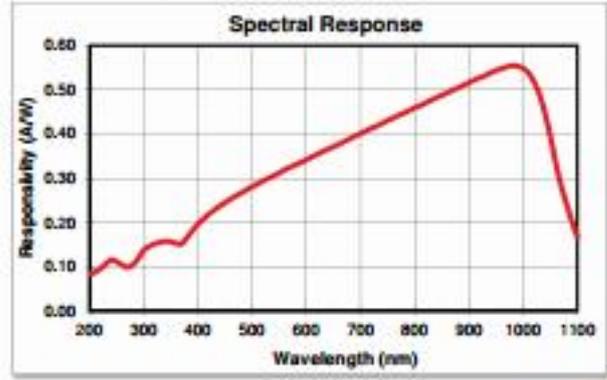
The diagram illustrates the recommended circuit for a photodiode. It shows a photodiode connected to a BNC connector, which is connected to a Coaxial Cable. The other end of the cable is connected to a circuit consisting of a 1kΩ resistor, a 0.1µF capacitor, and a load resistor connected to ground.

Spectral Response

The responsivity of a photodiode is a measure of its sensitivity to light and is defined as the ratio of the photocurrent I_p to the incident light power P at a given wavelength:

$$R_\lambda = \frac{I_p}{P}$$

In other words, it is a measure of the effectiveness of the conversion of light power into electrical current. Responsivity varies from lot to lot and with the wavelength of the incident light, applied reverse bias, and temperature. It increases slightly with applied reverse bias due to improved charge collection efficiency in the photodiode. The change in temperature increases or decreases the width of the band gap and varies inversely with the temperature.



Wavelength (nm)	Responsivity (A/W)
200	0.10
300	0.15
400	0.20
500	0.30
600	0.38
700	0.45
800	0.50
900	0.53
1000	0.55
1100	0.15

US, Canada, & South America: +1-973-300-3000 | Europe: +49 (0) 8131-5998-0 | UK & Ireland: +44 (0)1353-654440
France: +33 (0) 970 444 844 | Scandinavia: +46-31-733-30-00 | Japan & Asia: +81-3-5979-8289 | China: +86 (0)21-60981122

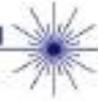
www.thorlabs.com

November 12, 2012
TTN011350-501, Rev D

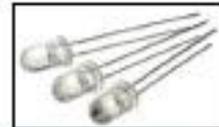
ANEXO 2



ROITHNER LASERTECHNIK GmbH
 WIEDNER HAUPTSTRASSE 76 1040 VIENNA AUSTRIA
 TEL. +43 1 586 52 43 -0. FAX. -44. OFFICE@ROITHNER-LASER.COM



LED430-06



TECHNICAL DATA

Visible LED, 5 mm

InGaN

LED430-06 is a InGaN LED mounted on a lead frame with a UV resistant resin.
 On forward bias it emits a band of visible light with a peak at 430 nm.

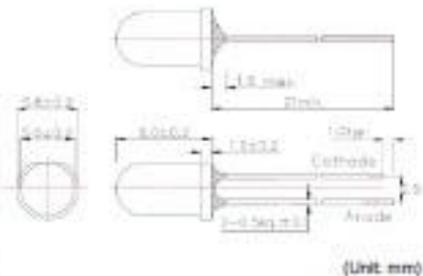
Specifications

- Structure: InGaN
- Peak Wavelength: typ. 430 nm
- Optical Output Power: typ. 22 mW
- Package: 5 mm clear UV-resistant epoxy

Absolute Maximum Ratings ($T_a=25^\circ\text{C}$)

Item	Symbol	Value	Unit
Power Dissipation	P_D	200	mW
Forward Current	I_F	50	mA
Reverse Voltage	V_R	5	V
Operating Temperature	T_{op}	-30 ... +85	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	T_{stg}	-30 ... +100	$^\circ\text{C}$
Soldering Temperature*	T_{sld}	265	$^\circ\text{C}$

* must be completed within 3 seconds



(Unit: mm)

Electro-Optical Characteristics

Item	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	V_F	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	3.4	4.0	V
Reverse Current	I_R	$V_R = 5 \text{ V}$	-	-	10	μA
Total Radiated Power	P_O	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	22.0	-	mW
Radiation Intensity	I_r	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	100	-	mW/sr
Brightness	I_v	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	2000	-	mcđ
Peak Wavelength	λ_p	$I_F = 20 \text{ mA}$	420	430	440	nm
Half Width	$\Delta\lambda$	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	20	-	nm
Viewing Half Angle	$\Theta_{1/2}$	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	± 5	-	deg.

Brightness is measured by Tektronix J-16
 Total Radiated Power is measured by S3584-08

Notes

- Do not view directly into the emitting area of the LED during operation!
- The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice.

ANEXO 3



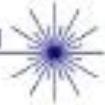
ROITHNER LASERTECHNIK GmbH

WIEDNER HAUPTSTRASSE 76

1040 VIENNA

AUSTRIA

TEL. +43 1 586 52 43 -0, FAX. -44, OFFICE@ROITHNER-LASER.COM



LED570-03



TECHNICAL DATA

Visible LED, 5 mm

AlGaInP

LED570-03 is a AlGaInP LED mounted on a lead frame with a clear epoxy lens.
On forward bias it emits a band of visible light with a peak at 570 nm.

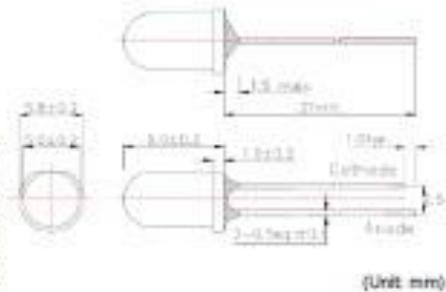
Specifications

- Structure: AlGaInP
- Peak Wavelength: typ. 570 nm
- Optical Output Power: typ. 0.6 mW
- Package: 5 mm clear epoxy resin

Absolute Maximum Ratings ($T_a=25^\circ\text{C}$)

Item	Symbol	Value	Unit
Power Dissipation	P_D	110	mW
Forward Current	I_F	50	mA
Reverse Voltage	V_R	5	V
Operating Temperature	T_{opr}	-30 ... +80	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	T_{stg}	-30 ... +100	$^\circ\text{C}$
Soldering Temperature *	T_{sld}	265	$^\circ\text{C}$

* must be completed within 3 seconds



Electro-Optical Characteristics

Item	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	V_F	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	2.1	2.3	V
Reverse Current	I_R	$V_F = 5 \text{ V}$	-	-	10	μA
Total Radiated Power	P_O	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	0.6	-	mW
Radiant Intensity	I_e	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	2.1	-	mW/sr
Brightness	I_v	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	1.3	-	cd
Peak Wavelength	λ_p	$I_F = 20 \text{ mA}$	560	570	580	nm
Half Width	$\Delta\lambda$	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	10	-	nm
Viewing Half Angle	$\Theta_{1/2}$	$I_F = 20 \text{ mA}$	-	± 12	-	deg.

Brightness is measured by Tektronix J-16

Total Radiated Power is measured by 83584-08

Radiant Intensity is measured by Tektronix J-6512

Notes

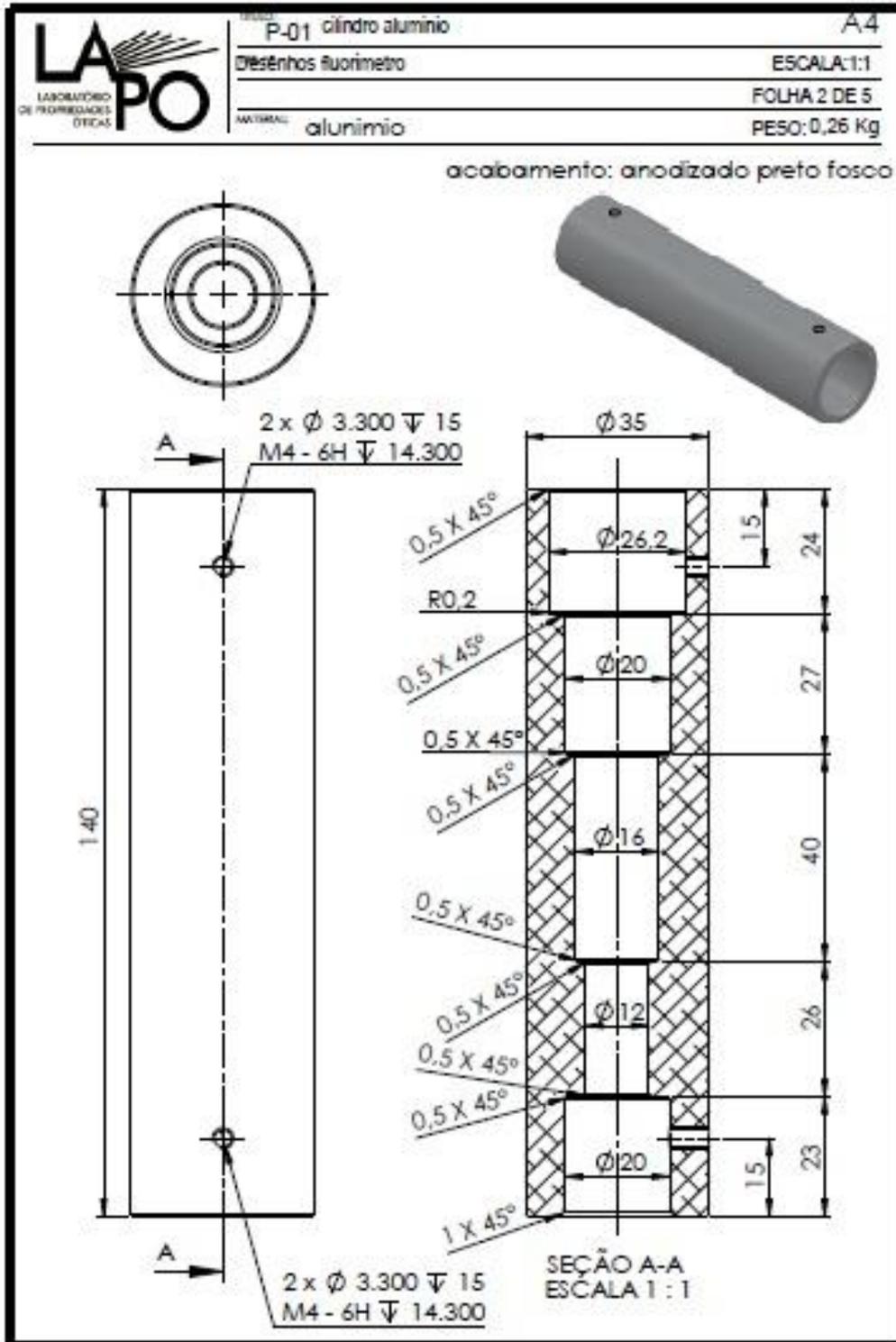
- Do not view directly into the emitting area of the LED during operation!
- The above specifications are for reference purpose only and subjected to change without prior notice.

ANEXO 4

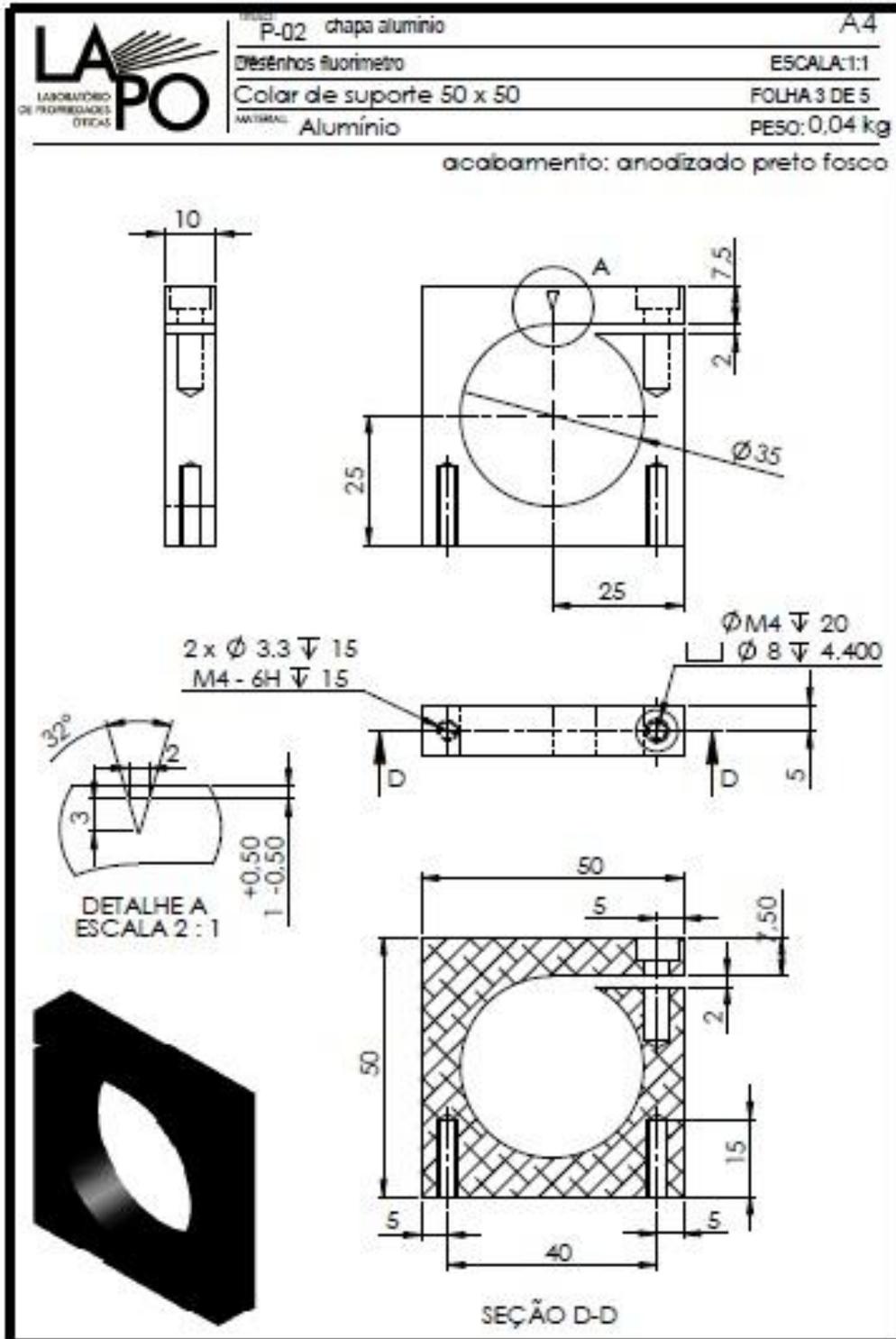
	TÍTULO	Projeto porta led fluorímetro	A4
	DESIGNOS	fluorímetro	ESCALA:12,5
	VISTA	vista de montagem, explodido e lista de componentes	FOLHA 1 DE 5
	MATERIAL	liga de alumínio, acabamento anodizado	PESO:0,6 Kg

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	MATERIAL	QTD.
1	P-01	cilindro aluminio	1
2	P-02	chapa aluminio	2
3	P-03	chapa aluminio	1
4	P-04	cilindro aluminio	1
5	SM1PD2A-THORLABS	não fabricar	1
6	Case_LED-01	não fabricar	1

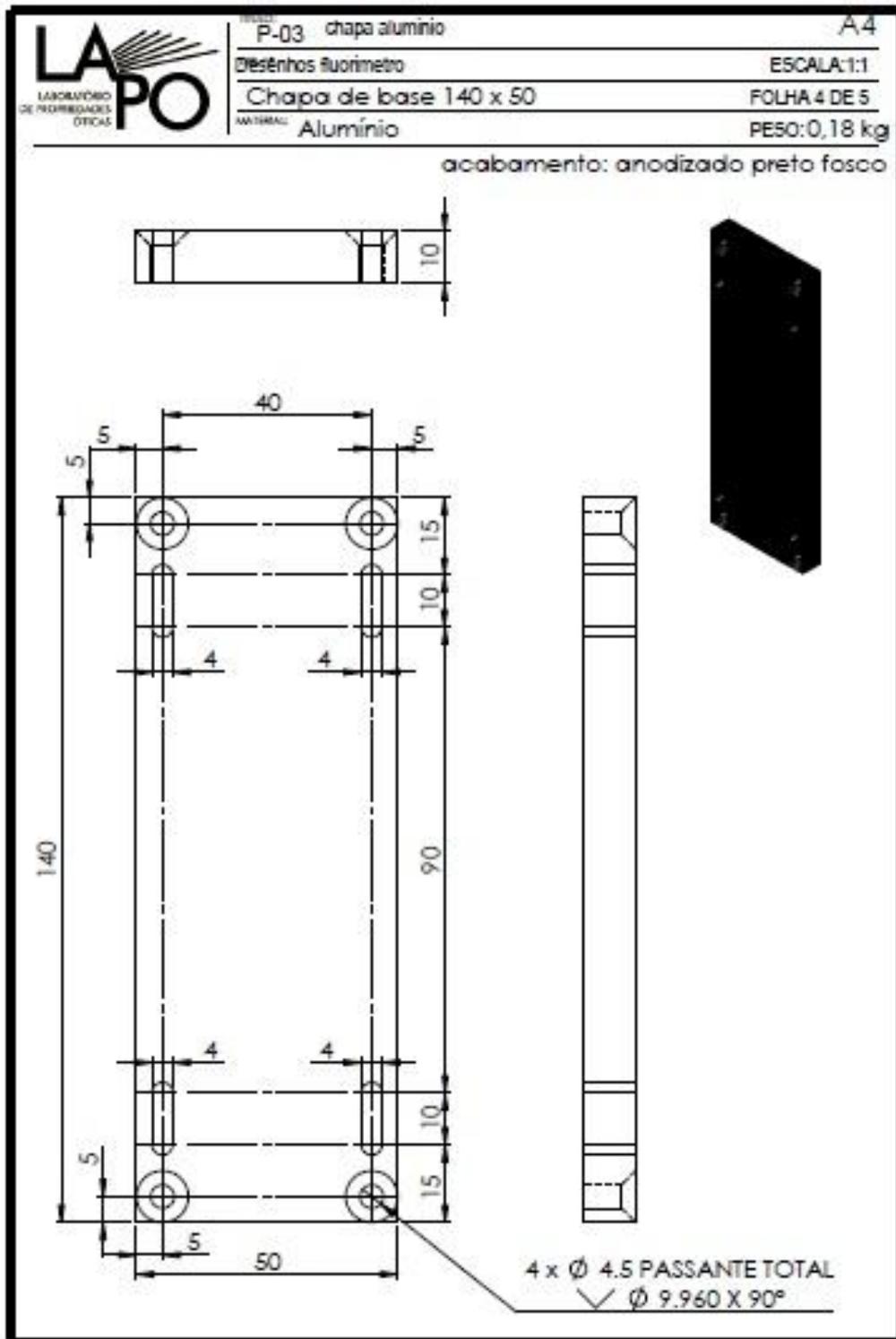
ANEXO 5



ANEXO 6



ANEXO 7



ANEXO 8

