

ROBERTO PHILIPPI FÜLLGRAF

**ESPECTROFOTÔMETRO PORTÁTIL COM LED RGB
PARA ANÁLISES QUÍMICAS E BIOLÓGICAS**

FLORIANÓPOLIS, 2012

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO *LATO SENSU*
ESPECIALIZAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO
DE PRODUTOS ELETRÔNICOS**

ROBERTO PHILIPPI FÜLLGRAF

**ESPECTROFOTÔMETRO PORTÁTIL COM LED RGB
PARA ANÁLISES QUÍMICAS E BIOLÓGICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do Certificado de Conclusão do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* Especialização em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos.

Orientador – Wilson Valente Junior, Dr., EE.

FLORIANÓPOLIS, 2012

F971e Füllgraf, Roberto Philippi
Espectrofotômetro portátil com LED RGB para
análises químicas e biológicas [monografia] /
Roberto Philippi Füllgraf; orientador Wilson Valente
Júnior. – Florianópolis, 2012.1 v. : il.

Monografia de especialização (Desenvolvimento de
Produtos Eletrônicos) – Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.
Especialização em Desenvolvimento de Produtos
Eletrônicos. Inclui referências.

1. Espectrofotômetro. 2. LED RGB. 3. Análises
químicas. 4. Análises biológicas. I. Valente Júnior,
Wilson. II. Título.

CDD: 621.381548

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Edinei Antonio Moreno CRB 14/1065
Rose Mari Lobo Goulart CRB 14/277

ESPECTROFOTÔMETRO PORTÁTIL COM LED RGB PARA ANÁLISES QUÍMICAS E BIOLÓGICAS

ROBERTO PHILIPPI FÜLLGRAF

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Certificado de Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* – Especialização em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 30 de maio de 2012.

Banca Examinadora:

Wilson Valente Junior, Dr., EE., Orientador
Presidente da Banca

Jony Laureano Silveira, Dr., EE.

Charles Borges de Lima, Dr., EE.

Dedico este trabalho a minha esposa Michele e ao meu filho Ethan, que foram fonte de inspiração e me deram força e apoio nos momentos que mais precisei.
Amo muito vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda a equipe do Laboratório de Pesquisa Aplicada do SENAI em Florianópolis e, em especial, a: Thiago Leandro de Oliveira, Arnaldo Stramosk Júnior, Luís Fernando Garcia e Alfeu Scotti; sem vocês este projeto não existiria. Muito obrigado!

Ao Léo de Oliveira, Silvia Alves e Liza de Freitas da Alfakit, também deixo os meus agradecimentos, pois tiveram especial participação neste projeto.

Ao professor e amigo, Wilson Valente Junior, pela orientação e, principalmente, por acreditar no potencial deste trabalho.

Ao professor Rafael Luiz Cancian, por me apresentar caminhos e possibilidades para trabalhos futuros.

A todos os professores do Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos, pelo inestimável conhecimento transmitido.

Aos meus pais: César, Bernadette e Helena, por sempre me apoiarem e me incentivarem na busca incessante por conhecimento.

RESUMO

Espectrofotômetros são equipamentos que funcionam com base em um procedimento analítico, através do qual é possível determinar a concentração de substâncias biológicas e físico-químicas em uma solução, mediante a emissão e absorção de energia radiante (luz). O presente trabalho versa sobre o desenvolvimento de um espectrofotômetro portátil de baixo custo, que foi projetado a partir de um conjunto de LEDs: um LED ultravioleta, um LED RGB, para o espectro visível, e um LED infravermelho. O arranjo de LEDs desenvolvido neste trabalho permite realizar diversas análises de concentração de substâncias, absorvância e transmitância na faixa de comprimento de onda que se estende de 400 nm a 870 nm, com resolução de leitura de 1 nm. No decorrer deste documento será mostrado que o equipamento desenvolvido também possui importantes diferenciais quando comparado aos espectrofotômetros convencionais (luz branca decomposta por prisma). Dentre as principais características destacam-se: portabilidade (funcionamento com fonte ou bateria, tamanho e peso reduzidos), robustez (ausência de partes móveis e prisma) e baixo custo (circuito eletrônico simples e compacto), sem que estas características afetem o desempenho, a qualidade e a precisão dos resultados, pois se conseguiu minimizar os erros provenientes do alinhamento e oscilação da fonte luminosa, tão comum nos fotômetros de LED. A validação do equipamento desenvolvido foi feita, através de ensaios comparativos com um espectrofotômetro comercial e por meio de medições com padrões metrológicos rastreados.

Palavras-chave: Espectrofotômetro. LED RGB. Análises químicas. Análises biológicas.

ABSTRACT

Spectrophotometers are devices that operate based on an analytical procedure, which is possible to determine the concentration of biological substances and physical–chemical solution through the emission and absorption of radiant energy (light). The present work deals with the development of a portable and low–cost spectrophotometer, which was designed from a set of LEDs: an ultraviolet LED, an LED RGB to the visible spectrum, and an infrared LED. The arrangement of LEDs developed in this work allows performing several tests for the concentration of substances, absorbance and transmittance in the wavelength range extending from 400 nm to 870 nm, with resolution of 1 nm. In the course of this work it will be shown that the developed equipment also presents important features when compared with conventional spectrophotometers (white light decomposed by prism). Among the main features, it is possible to highlight the following: portability (operation with source or battery, reduced size and weight), robustness (absence of mobile parts and prism) and low cost (compact electronic circuit) these characteristics were achieved without affect the performance, quality and accuracy of results, because it was developed in order to minimize the errors of alignment and oscillation from the light source, so common in LED photometers. The validation of the equipment was done by comparative tests with a commercial spectrophotometer, and measurements traceable to metrological standards.

Keywords: Spectrophotometer. LED RGB. Chemical analysis. Biological analysis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – AT 10P: FOTÔMETRO OU FOTOCOLORÍMETRO	22
FIGURA 2 – (A) DR 2500 E (B) DR 2800: ESPECTROFOTÔMETROS DE PRISMA	23
FIGURA 3 – (A) PLACAS INDIVIDUAIS DOS LEDs; (B) DISPOSITIVO PROPOSTO.....	24
FIGURA 4 – ESPECTROS DE EMISSÃO DOS LEDs.....	25
FIGURA 5 – DISPOSITIVO PROPOSTO	26
FIGURA 6 – ESPECTROS DE EMISSÃO DOS LEDs.....	26
FIGURA 7 – EQUIPAMENTO VOPL	27
FIGURA 8 – DIAGRAMA EM BLOCOS DE UM TÍPICO ESPECTROFOTÔMETRO DE FEIXE DUPLO	28
FIGURA 9 – ILUSTRAÇÃO DO SISTEMA DE FEIXE DUPLO	29
FIGURA 10 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	29
FIGURA 11 – DISPOSITIVO PROPOSTO	30
FIGURA 12 – EQUIPE DE DESENVOLVIMENTO.....	33
FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA	37
FIGURA 14 – SOMA DE DOIS COMPRIMENTOS DE ONDA	39
FIGURA 15 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	40
FIGURA 16 – DETALHE DO ESPECTRO VISÍVEL	41
FIGURA 17 – DECOMPOSIÇÃO DA LUZ BRANCA	41
FIGURA 18 – (A) CÍRCULOS CROMÁTICOS RGB, (B) CÍRCULOS CROMÁTICOS CMY.....	42
FIGURA 19 – ESPECTRO DE ABSORBÂNCIA DA CLOROFILA	45
FIGURA 20 – ILUSTRAÇÃO DA INCIDÊNCIA DE LUZ EM 2 TUBOS DE ENSAIOS	49
FIGURA 21 – ILUSTRAÇÃO DE UM TUBO DE ENSAIO LARGO	49
FIGURA 22 – FENÔMENO DA REFLEXÃO E ESPALHAMENTO	52
FIGURA 23 – CURVA LINEAR DE CALIBRAÇÃO DO SULFETO.....	53
FIGURA 24 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO EQUIPAMENTO.....	56
FIGURA 25 – KIT DESENVOLVIMENTO WS-7.56-PCBA2	60
FIGURA 26 – CURVA DE RESPOSTA DO SENSOR DE COMPRIMENTO DE ONDA.....	61
FIGURA 27 – <i>DISPLAY</i>	62
FIGURA 28 – VISTA SUPERIOR DO TECLADO	64
FIGURA 29 – (A) VISTA INFERIOR DO TECLADO; (B) CIRCUITO ELÉTRICO	64
FIGURA 30 – REGULADOR DA ESTRUTURA DE SINAL	66
FIGURA 31 – REGULADOR DA ESTRUTURA DE POTÊNCIA.....	66
FIGURA 32 – CIRCUITO DE PROTEÇÃO E SELEÇÃO	67

FIGURA 33 – COMUNICAÇÃO SERIAL	68
FIGURA 34 – FOTO DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO	70
FIGURA 35 – PROJETO MECÂNICO DO POÇO	71
FIGURA 36 – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	73
FIGURA 37 – DISPOSIÇÃO INTERNA DA PCI	73
FIGURA 38 – NAVEGAÇÃO DO MENU PRINCIPAL	75
FIGURA 39 – DIAGRAMA DE MODOS DO MENU MEDE ABS	76
FIGURA 40 – DIAGRAMA DE MODOS NO MENU FÁBRICA	77
FIGURA 41 – DIAGRAMA DE MODOS DO MENU ORGANIZADOR	78
FIGURA 42 – DIAGRAMA DE MODOS DO ITEM SELECIONAR	78
FIGURA 43 – DIAGRAMA DE MODOS DO ITEM CRIAR	79
FIGURA 44 – DIAGRAMA DE MODOS DO ITEM EDITAR.....	80
FIGURA 45 – DIAGRAMA DE MODOS DO ITEM EXCLUIR.....	81
FIGURA 46 – INTERFACE DO <i>SOFTWARE</i> CCSTUDIO	82
FIGURA 47 – TELA PRINCIPAL DO <i>SOFTWARE</i>	88
FIGURA 48 – TELA DE CRIAÇÃO DE NOVA CURVA.....	89
FIGURA 49 – EXEMPLO DE ENVIO DE CURVA PARA O EQUIPAMENTO	90
FIGURA 50 – JANELA DE CONFIGURAÇÃO	91
FIGURA 51 – GRÁFICO CONCENTRAÇÃO X ABSORBÂNCIA (CLORO DPD)	95
FIGURA 52 – DIAGRAMA ELÉTRICO SIMILAR AO KIT DESENVOLVIMENTO	97
FIGURA 53 – GRÁFICO DA CURVA DE RESPOSTA DO SENSOR DE COMPRIMENTO DE ONDA	100
FIGURA 54 – CURVA CONCENTRAÇÃO X ABSORBÂNCIA (PADRÃO AMARELO)	103
FIGURA 55 – CURVA CONCENTRAÇÃO X ABSORBÂNCIA (PADRÃO ROSA)	104
FIGURA 56 – CURVA CONCENTRAÇÃO X ABSORBÂNCIA (PADRÃO VERDE)	105
FIGURA 57 – RESPOSTA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA ÓPTICO A LED	107
FIGURA 58 – ESPECTRO DE EMISSÃO DOS LEDs DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO.....	108
FIGURA 59 – CURVA CARACTERÍSTICA DO PADRÃO DE CLORO DPD ..	109
FIGURA 60 – CURVA CARACTERÍSTICA DO PADRÃO DE SULFETO	110
FIGURA 61 – ESPECTROS DE ABSORÇÃO TÍPICOS DO PERMANGANATO DE POTÁSSIO A DIFERENTES CONCENTRAÇÕES	115

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COR COMPLEMENTAR	43
TABELA 2 – COMPRIMENTOS DE ONDA (NM) PARA ANÁLISES COLORIMÉTRICAS	46
TABELA 3 – COMPRIMENTO DE ONDA DOS LEDS UTILIZADOS NO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO	58
TABELA 4 – DESCRIÇÃO DOS BOTÕES DO SOFTWARE	90
TABELA 5 – ENSAIO DO FERRO II, UTILIZANDO $\lambda = 480\text{nm}$	93
TABELA 6 – ENSAIO DO CLORO DPD, UTILIZANDO $\lambda = 515\text{ nm}$	94
TABELA 7 – COMPARATIVO DE LEDS	95
TABELA 8 – RESPOSTA DO SENSOR DE COMPRIMENTO DE ONDA	98
TABELA 9 – RESPOSTA DO SENSOR DE COMPRIMENTO DE ONDA	99
TABELA 10 – LEITURAS PARA O PADRÃO RASTREADO AMARELO	102
TABELA 11 – LEITURAS PARA O PADRÃO RASTREADO ROSA	103
TABELA 12 – LEITURAS PARA O PADRÃO RASTREADO VERDE	104
TABELA 13 – RESULTADOS DA ABSORBÂNCIA PARA VARREDURA DE ESPECTRO	106
TABELA 14 – LEITURAS PARA O PADRÃO DE CLORO DPD	108
TABELA 15 – LEITURAS PARA O PADRÃO DE SULFETO.....	110
TABELA 16 – QUADRO COMPARATIVO DE EQUIPAMENTOS	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

λ	–	Comprimento de Onda
A	–	Ampér
ADC	–	<i>Analog to Digital Converter</i>
CMY	–	<i>Cyan, Magenta and Yellow</i>
DAC	–	<i>Digital to Analog Converter</i>
DNA	–	<i>Deoxyribonucleic Acid</i>
Hz	–	Hertz
HPLC	–	<i>High Performance Liquid Chromatography</i>
I2C	–	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
kbytes	–	Kilobytes
kHz	–	Kilohertz
LCD	–	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	–	<i>Light Emitting Diode</i>
MHz	–	Megahertz
nm	–	Nanometro
OEM	–	Onda Eletromagnética
PCI	–	Placa de Circuito Impresso
PCR	–	<i>Polymerase Chain Reaction</i>
ppm	–	Parte Por Milhão
PWM	–	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	–	<i>Random Access Memory</i>
RGB	–	<i>Red, Green and Blue</i>
RTC	–	<i>Real Time Clock</i>
SENAI	–	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SMD	–	<i>Surface Mounting Devices</i>
SPI	–	<i>Serial Peripheral Interface</i>
V	–	Volts
VOPL	–	<i>Variable Optical Path Length</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
1.2 MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	30
1.3 OBJETIVOS.....	34
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	35
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	37
2.1 LUZ E ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	37
2.1.1 Espectro de luz.....	39
2.1.2 Padrão RGB e CMY	42
2.2 INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA.....	42
2.2.1 Sensibilidade das substâncias	44
2.3 PRINCÍPIOS DA FOTOMETRIA	48
2.3.1 Transmitância e absorbância	48
2.3.2 Reflexão e espalhamento.....	50
2.3.3 Lei de Lambert–Beer	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 DESENVOLVIMENTO DE <i>HARDWARE</i>	55
3.1.1 Arranjo de LEDs	57
3.1.2 Controlador dos LEDs	58
3.1.3 Sensor de comprimento de onda	60
3.1.4 Display	62
3.1.5 Teclado.....	63
3.1.6 Sensor de intensidade luminosa	65
3.1.7 Circuito de alimentação.....	66
3.1.8 Comunicação serial	68
3.1.9 Microcontrolador	69
3.1.10 Projeto mecânico.....	69
3.1.11 <i>Layout</i> de placa	72
3.2 DESENVOLVIMENTO DO <i>FIRMWARE</i>	74
3.2.1 Interface com o usuário / navegação	74
3.2.2 Ferramenta de programação.....	81
3.2.3 Estrutura do <i>firmware</i>	83
3.3 DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i> DE ALTO NÍVEL..	86
3.3.1 Telas e funcionamento	87
3.4 MÉTODOS EMPREGADOS.....	91
3.4.1 Métodos de medição	92

3.4.2	Ensaio de mistura de cor	95
3.4.3	Métodos de aferição do sensor de comprimento de onda ...	99
4	RESULTADOS	101
4.1	ENSAIO COM PADRÕES METROLÓGICOS RASTREADOS 101	
4.2	ENSAIO DE VARREDURA.....	105
4.3	ENSAIO COM PADRÕES DA ALFAKIT.....	108
5	DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	111
5.1	VANTAGENS E LIMITAÇÕES	113
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	114
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
	REFERÊNCIAS	119
	ANEXO A – PESQUISA DE PATENTES	123
	ANEXO B – DATASHEETS	125
	ANEXO C – CERTIFICADO DE AFERIÇÃO DOS PADRÕES DA MERCK.....	135
	ANEXO D – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO – DR 2500	137

1 INTRODUÇÃO

Investigações analíticas de compostos materiais possuem um papel imprescindível em diversos segmentos do setor industrial, científico e médico. A análise de matérias primas, produtos e resíduos, dentre outros, necessitam cada vez mais de métodos confiáveis de investigação qualitativa e quantitativa. Estas análises desempenham um papel cada vez mais importante nas mais diversas categorias de análises químicas relacionadas ao desenvolvimento de produtos industrializados, tais como: plásticos, combustíveis, metais, adubos, artigos de consumo, etc. Além destes, as análises materiais auxiliam as agências reguladoras a desempenharem um importante papel para a sociedade, avaliando e controlando a qualidade de produtos entregues aos consumidores, investigando a poluição ambiental, no controle de substâncias agrotóxicas, em análises biológicas e, até mesmo, em análises criminais. Finalmente, as análises materiais também são um importante aspecto de desenvolvimento científico, aplicadas diretamente em inúmeras pesquisas, seja no ramo farmacêutico, como o desenvolvimento de medicamentos; em pesquisas geológicas, como avaliação das águas em rios, ou na área da medicina, como em estudos de componentes sanguíneos, análise de DNA (*Deoxyribonucleic Acid*), etc. Todos estes exemplos são apenas uma pequena amostra da vasta gama de aplicações em que os processos de análises de materiais podem estar inseridos.

Atualmente, existe no mercado de análise de água, efluentes, solo, clorofila, extratos de plantas e sangue, basicamente dois tipos de equipamentos: fotômetros e espectrofotômetros. Estes equipamentos realizam um procedimento analítico, por meio do qual se determina a concentração de espécies biológicas e físico-químicas em uma solução mediante a absorção de energia radiante (luz).

Os fotômetros são equipamentos que utilizam a tecnologia de LEDs (*Light Emitting Diode*) com varredura, geralmente, entre 470 nm a 690 nm do comprimento de onda. Estes equipamentos são mais baratos que os espectrofotômetros e, em geral, são fáceis de transportar e manusear. Eles podem ser utilizados em inúmeras análises químicas colorimétricas, tais como: a determinação de alumínio, cobre, zinco, nitrato, amônia, entre

outros, em amostras de água ou efluentes. Entretanto, são equipamentos que possuem diversos aspectos interferentes durante a realização da análise (como a variação da alimentação, excessiva radiação luminosa espúria e problemas de alinhamento dos LEDs), não atendendo uma faixa de mercado que envolve processos que necessitam de equipamentos mais confiáveis, com resultados mais exatos e precisos.

Na Figura 1, observa-se a foto de um modelo de fotômetro, também chamado de fotocolorímetro, comercializado pela empresa Alfacit.



FIGURA 1 – AT 10P: Fotômetro ou fotocolorímetro

Fonte: (ALFAKIT, 2011)

Estes equipamentos possuem um LED para cada comprimento de luz (cor), sendo assim, análises que necessitam de um comprimento que fique entre a cor de dois LEDs têm seu resultado prejudicado. Outro problema bastante comum em fotômetros é a instabilidade da intensidade luminosa dos LEDs, prejudicando muito a calibração e repetibilidade de resultados.

Já os espectrofotômetros são equipamentos que utilizam a tecnologia de um sistema óptico (prisma) para decompor a luz

em diversos comprimentos de onda, geralmente de 295 nm a 960 nm. Estes equipamentos são robustos e de alto valor, são utilizados exclusivamente para análises químicas e clínicas. Porém, devido à fragilidade do sistema óptico, estes equipamentos têm sua mobilidade restringida, de modo que não representam uma solução viável para atividades em campo. A Figura 2 apresenta alguns modelos de espectrofotômetros comerciais.



FIGURA 2 – (a) DR 2500 e (b) DR 2800: espectrofotômetros de prisma

Fonte: (HACH, 2011)

É importante destacar que, atualmente, a indústria nacional (ANEXO A – PESQUISA DE PATENTES) não possui um equipamento com as seguintes características: portabilidade (para atividades em campo), eliminação de interferentes e utilização de LEDs RGB (*Red, Green and Blue*) para a cobertura em banda larga do espectro da luz.

Desta forma, o presente trabalho visa suprir esta lacuna técnica ao desenvolver um espectrofotômetro de baixo custo e que atende às características supracitadas, para aplicação em uma série de análises químicas e biológicas, como a medição da concentração de substâncias químicas dissolvidas em líquidos, ou até mesmo em gases.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O trabalho de Yeh e Tseng (2006) demonstra, assim como os estudos de Gaião et al. (2005) e Lüdke (2010), que uma tecnologia para espectrofotometria baseada em LEDs é capaz de fornecer curvas de absorbância tão satisfatórias quanto uma tecnologia baseada em luz branca e prisma, e com custo tão baixo quanto o dos fotômetros.

Yeh e Tseng (2006) utilizaram uma configuração de 7 LEDs (389 nm, 407 nm, 462 nm, 527 nm, 572 nm, 587 nm e 620 nm), montados em placas separadas, onde, dependendo da análise que se desejava fazer, deveria ser encaixada manualmente a placa correspondente ao dispositivo (Figura 3). Com esta configuração, conseguiram bom resultados nas leituras de absorbância, quando comparado com o espectrofotômetro USB 2000 da *Ocean Optics*. A exceção ficou na faixa do ultravioleta, em torno de 430 nm, onde não houve boa absorção, em virtude de situar-se justamente entre os picos de absorbâncias dos LEDs de 407 nm e 462 nm, conforme pode-se observar na FIGURA 4. Nota-se também uma ausência de emissão dos LEDs próximo ao comprimento de onda de 490 nm, porém para esta faixa, não foram apresentados ensaios.

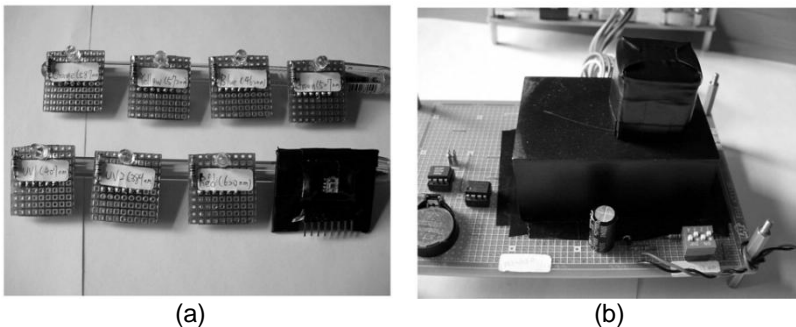


FIGURA 3 – (a) Placas individuais dos LEDs; (b) dispositivo proposto

Fonte: (YEH; TSENG, 2006)

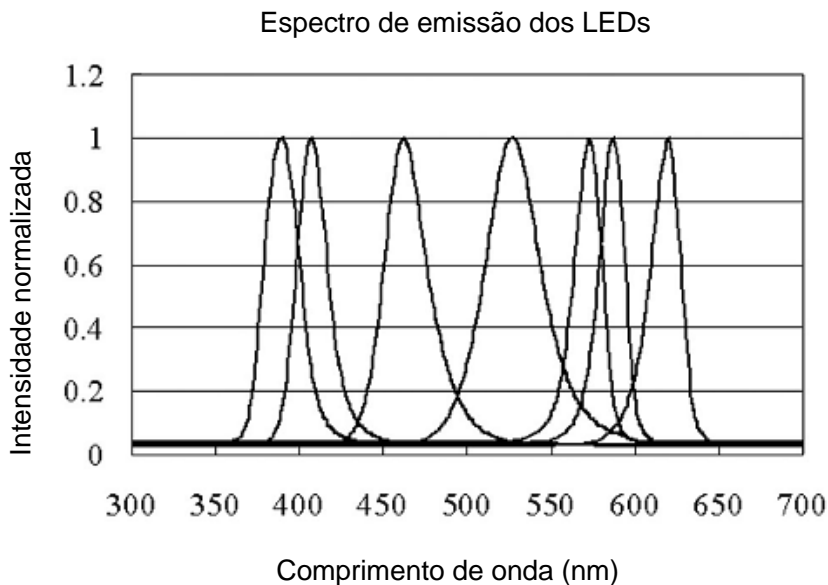


FIGURA 4 – Espectros de emissão dos LEDs

Fonte: adaptado de Yeh e Tseng (2006)

Gaião et al. (2005) propõe um dispositivo semelhante a Yeh e Tseng (2006), porém com 6 LEDs (430 nm, 485 nm, 560 nm, 580 nm, 600 nm e 660 nm) e um sistema mecânico diferente para troca e alinhamento dos LEDs. Os LEDs são montados em um suporte circular adaptado ao eixo de uma chave eletro-mecânica de seis posições (Figura 5). Os resultados dos ensaios foram descritos como satisfatórios, quando comparados com dois espectrofotômetros comerciais (*Hewlett Packard*–HP, modelo 8453 e *Micronal*, modelo B342II). Na Figura 6 observa-se o espectro de emissão dos 6 LEDs utilizados no experimento, onde tem-se boa cobertura em toda a faixa de trabalho, com exceção do $\lambda = 540$ nm.

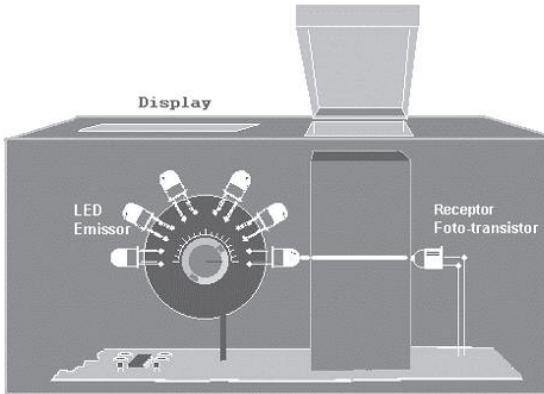


FIGURA 5 – Dispositivo proposto

Fonte: (GAIÃO et al., 2005)

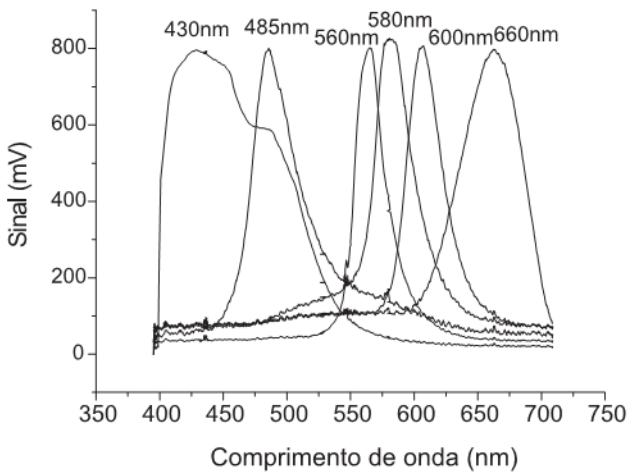


FIGURA 6 – Espectros de emissão dos LEDs

Fonte: (GAIÃO et al., 2005)

Tang et al. (2011) propõem também um complexo sistema mecânico, com a finalidade de reduzir os erros causados pela instabilidade da fonte luminosa e pelo circuito de detecção, na

medição de concentração. O equipamento foi chamado de VOPL (*variable optical path length*) ou “comprimento do caminho óptico variável” e este possui duas câmaras, uma para a solução “branca” e outra para a solução a ser medida. O equipamento é acionado por um motor de passo, que varia o comprimento do caminho óptico da câmara da solução medida, fazendo rapidamente diversas leituras. Segundo Tang et al. (2011), a variação no caminho óptico altera somente o valor da absorbância, sendo esta variação isenta de interferentes, fornecendo desta maneira, dados confiáveis para o cálculo da concentração. A Figura 7, ilustra o equipamento desenvolvido.

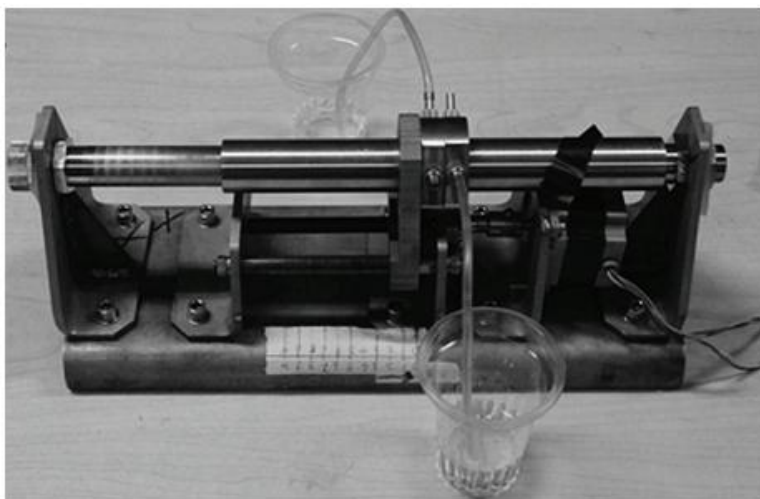


FIGURA 7 – Equipamento VOPL

Fonte: (TANG et al., 2011)

Gong et al. (2009), utilizando o conceito de espectrometria de feixe duplo, conforme ilustra a Figura 8, propôs um espectrofotômetro de baixo custo para medição de nitrato em água do mar. O princípio de utilização do feixe duplo traz ganhos em redução de ruídos e interferentes, como: oscilação da fonte luminosa e radiações da luz ambiente; pois sempre, junto com cada medição da solução de interesse, é feita a calibração do

padrão “branco”, além de aumentar a velocidade de medição, por não necessitar de uma operação extra de medição/calibração do “branco”. A desvantagem é que este princípio requer um sistema mais complexo, caro e volumoso.

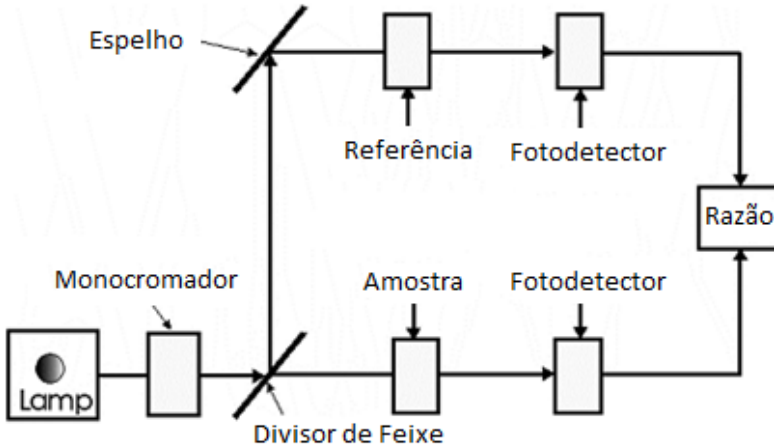


FIGURA 8 – Diagrama em blocos de um típico espectrofotômetro de feixe duplo

Fonte: adaptado de Gong et al. (2009)

Para não utilizar os caros sistemas de espelhos e luz monocromática, Gong et al. (2009) utilizaram um LED verde e um sistema de filtros e modulação da alimentação do LED, para aproximar a luz do LED (policromática) em uma luz monocromática, descrita pela Lei de Lambert–Beer (ver item 2.3.3), conforme ilustrado na Figura 9.

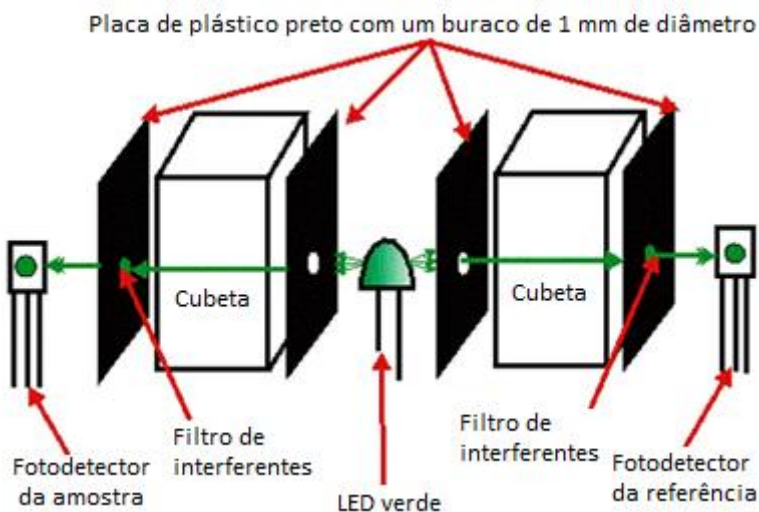


FIGURA 9 – Ilustração do sistema de feixe duplo

Fonte: adaptado de Gong et al. (2009)

Gong et al. (2009) conseguiram bons resultados para medição de concentração de nitrato em água salgada, conforme apresentado na Figura 10.

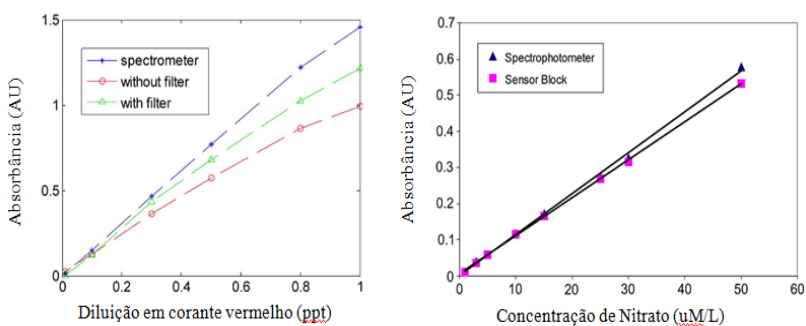


FIGURA 10 – Resultados dos experimentos

Fonte: adaptado de Gong et al. (2009)

Por fim, Lüdke (2010) apresenta um espectrofotômetro de baixo custo, utilizando somente um LED como fonte luminosa (o LED deveria ser trocado conforme a análise). Como o foco deste equipamento era o ensino de técnicas fundamentais de espectrometria e a comprovação quantitativa da Lei de Lambert–Beer, Lüdke (2010) propôs um dispositivo bastante simples, tanto na parte mecânica com na eletrônica (Figura 11).

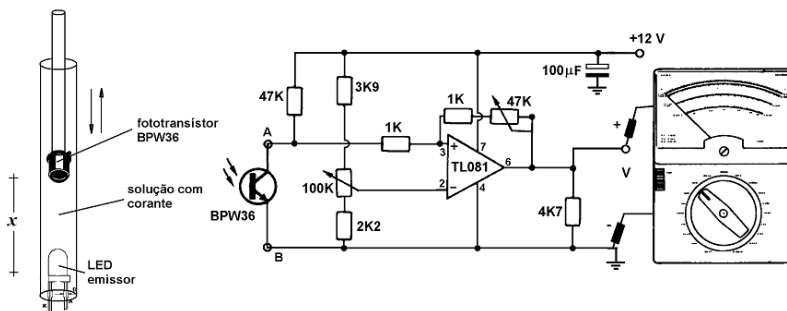


FIGURA 11 – Dispositivo proposto
Fonte: (LÜDKE, 2010)

1.2 MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

A demanda para o desenvolvimento do presente projeto partiu da empresa Alfakit, especializada na fabricação de *kits* e equipamentos para análises de águas, solos e efluentes, localizada em Florianópolis/SC.

A Alfakit iniciou suas atividades no ano de 1989 com o objetivo de facilitar a vida de criadores de peixes, camarões e produtores rurais com a iniciativa de montar o primeiro kit nacional para análise de água utilizada em aquicultura e carcinicultura, conhecido e comercializado até hoje como Kit Produtor. Motivado e surpreendido pelo sucesso deste kit, surgiu a ideia de elaborar um novo kit para análise de água e efluentes, que originou a diversa gama de kits que a Alfakit

possui hoje. Entre esses, merece destaque o Ecolit, desenvolvido especialmente para educação ambiental que ainda hoje é um dos kits mais vendidos, conhecido e utilizado nacionalmente, sendo largamente empregado em projetos de monitoramento ambiental.

A partir deste momento, a principal motivação para o desenvolvimento de novos produtos e para melhoria dos produtos existentes, surgiu da necessidade do mercado e da ausência de uma tecnologia nacional que atenda a essa necessidade, com custo dentro da realidade que o país vive.

Com o crescimento da empresa, em 1993 iniciou-se a produção de equipamentos eletrônicos, com o desenvolvimento do primeiro Fotocolorímetro multiparâmetros com tecnologia 100 % nacional. A partir de 1994 a empresa investiu em novos equipamentos eletrônicos que gradualmente foram lançados no mercado com grande aceitação e sucesso. Entre eles destacam-se os oxímetros, pHmetros e blocos digestores. (ALFAKIT, 2011)

Desta forma, no final de 2009, a Alfakit procurou o SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) em Florianópolis, e apresentou a ideia do desenvolvimento de um espectrofotômetro portátil, com as características já citadas; porém na época, a Alfakit não cogitava a utilização de LEDs RGB, mas sim a interpolação matemática da luz de diversos LEDs.

Como será visto no decorrer deste trabalho, o rumo do desenvolvimento acabou apontando para a utilização de um LED RGB para o espectro de luz visível, acrescido de um LED infravermelho e outro ultravioleta.

No SENAI, a empresa Alfakit foi encaminhada para o Laboratório de Pesquisa Aplicada, que tem como principal objetivo o desenvolvimento de produtos eletrônicos e de

automação para a indústria nacional. Este Laboratório possui um corpo técnico formado de diversos consultores, engenheiros e tecnólogos, das mais diversas áreas (elétrica, eletrônica, mecânica, automação e informática), além de contar com uma infraestrutura laboratorial adequada para o desenvolvimento de produtos eletrônicos.

As demandas que chegam para esta equipe são analisadas sobre o foco de viabilidade técnica e econômica e, uma vez constatadas estas viabilidades, uma proposta comercial é elaborada e apresentada ao cliente. É importante ressaltar, no contexto de desenvolvimento de produtos eletrônicos, que mesmo em situações em que as empresas não dispõem de todo o recurso financeiro para custear o projeto, os consultores de captação de recursos do SENAI possuem meios de subsidiar estes projetos, através da busca de editais de fomento.

No caso da Alfakit, o edital escolhido para submeter o projeto foi o **Pró-Pesquisa 2009/2010**, um edital interno e anual do SENAI/SC. Este edital permite que os recursos alocados pelo projeto possam ser utilizados para compra de máquinas, equipamentos e material de consumo, além de pagamento de horas técnicas, serviços de terceiros, cursos, diárias e viagens, ou seja, possibilita plenamente o desenvolvimento de projetos de inovação.

Após a aprovação do projeto no edital, uma equipe multidisciplinar formada por profissionais do SENAI e da Alfakit, conforme apresenta a Figura 12, foi constituída para planejar e desenvolver todas as etapas do projeto.



FIGURA 12 – Equipe de desenvolvimento

As funções desempenhadas pelo autor deste trabalho – gerente do projeto, projeto elétrico e designer de produto – são detalhas a seguir.

Gerente do Projeto:

Responsável pelos processos de Iniciação, Planejamento, Execução, Monitoramento/Controle e Encerramento, tendo como principais funções: definição do escopo e objetivos do projeto junto com o cliente; análise técnica e econômica do projeto; captação de recursos (editais de fomento a inovação); negociação com cliente; definição e acompanhamento do cronograma de execução; definição e gerenciamento da equipe de desenvolvimento; controle financeiro e prestação de contas.

Projeto Elétrico:

Responsável pelo estudo dos princípios físico-químicos envolvidos; definição de tecnologia e componentes; projeto de hardware eletro-eletrônico; montagem de circuitos e ensaios.

Designer de Produto:

Responsável pelo projeto da interface com o usuário, como as definições de gabinete, teclado, display, conectores e menu de navegação.

1.3 OBJETIVOS

Pautado nos argumentos supracitados, o objetivo principal deste projeto é o desenvolvimento de um espectrofotômetro portátil de baixo custo, para a realização de análises químicas e biológicas, utilizando LEDs como fonte de luz.

Além deste objetivo, destacam-se, no escopo do projeto, a definição de uma série de objetivos específicos que também devem ser atingidos, conforme os tópicos listados a seguir:

- Desenvolver uma nova tecnologia nacional de análise colorimétrica;
- Projetar um produto de confiabilidade adequada e baixo custo;
- Obter linearidade de resposta superior a 0,90 (90 % de linearidade);
- Substituir a tecnologia de sistemas ópticos dos analisadores existentes no mercado, por um sistema com LEDs de diferentes comprimentos de onda;
- Preencher uma lacuna de mercado entre fotômetros e espectrofotômetros;
- Desenvolver um analisador químico e biológico portátil, capaz de ser utilizado em análises de campo e/ou laboratório;
- Executar análises de 420 nm a 860 nm de comprimento de onda;
- Eliminar efeitos de descalibração das curvas inseridas no equipamento;
- Reduzir a instabilidade de emissão dos LEDs, quando comparados aos fotômetros;
- Possuir 100 posições de memórias para gravação das curvas de parametrização dos usuários;

- Eliminar efeitos de mau ajuste ou centralização do compartimento “porta–cubetas¹”.
- Diminuir o excessivo custo de calibrações dos equipamentos com sistema óptico;
- Permitir funcionamento do equipamento com fonte e bateria.

Finalmente, cabe ressaltar que outras metas de desenvolvimento para o espectrofotômetro foram colocadas de forma comparativa com o fotocolorímetro (Figura 1), equipamento já comercializado pela Alfakit. Dentre estas metas, o espectrofotômetro em desenvolvimento devia contemplar as seguintes características:

- Garantir um maior tempo de duração da bateria;
- Realizar a comunicação de dados via porta serial com um computador.

Todos estes desenvolvimentos serão apresentados e discutidos nos capítulos a seguir.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento é composto por um total de 5 (cinco) capítulos. O presente capítulo introduz os objetivos e a motivação para realização deste trabalho, fazendo uma breve contextualização e apresentando uma revisão bibliográfica sobre pesquisas e experimentos correlatos.

O Capítulo 2 aborda os conceitos fundamentais da teoria sobre luz e ondas eletromagnéticas, a interação da luz com a matéria e, ainda, dos princípios da fotometria. Assim, fica solidificada a teoria clássica que sustenta todo o embasamento científico e o pressuposto básico abordado nesta obra.

O Capítulo 3 apresenta e discute os materiais e métodos utilizados para desenvolvimento, começando pelo

¹ Compartimento do equipamento onde é colocado o tubo de ensaio, com o objetivo de fazer uma câmara escura para realização das medições; também chamado de poço.

desenvolvimento de *hardware*, depois indo ao desenvolvimento de *firmware*, desenvolvimento de *software* de alto nível e, por fim, indo aos métodos de mediação, ensaios e aferição do sensor de comprimento de onda.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios realizados para verificar e comprovar o funcionamento do produto desenvolvido.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais, destacando as vantagens e limitações do produto, e apresentando temas e sugestões para aprimoramento e continuidade do desenvolvimento proposto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como a fotometria (conceito base deste estudo) refere-se à forma como a luz interage com a matéria, é necessário antes discutir-se alguns aspectos relacionados à luz. Este capítulo revisa os conceitos fundamentais referentes à teoria utilizada na presente pesquisa.

2.1 LUZ E ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A luz nada mais é do que uma onda eletromagnética (OEM) composta por dois campos oscilatórios, um elétrico e outro magnético, perpendiculares entre si e ao sentido de propagação. A distância entre dois picos deste movimento oscilatório chama-se de comprimento de onda (λ). Na Figura 13 podemos observar a representação de uma OEM, seu comprimento de onda e o sentido de propagação.

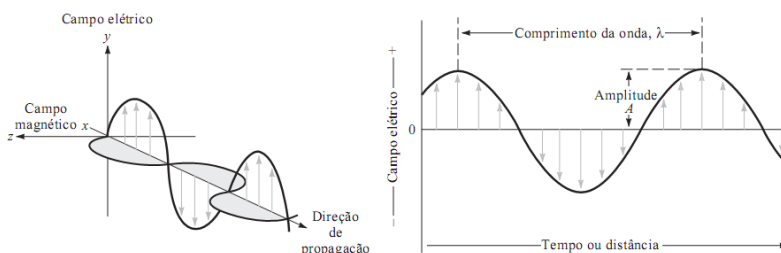


FIGURA 13 – Representação de uma onda eletromagnética
Fonte: (SKOOG et al., 2005)

O físico e matemático britânico, James Clerk Maxwell, em 1864, demonstrou que uma onda eletromagnética se propaga no vácuo com velocidade da luz “ c ” conforme a equação [1] (BALANIS, 1938):

$$C = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}} \cong 3.10^8 \text{ m/s}$$

[1]

Onde: μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m);
 ε_0 = permissividade elétrica do vácuo ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m).

Desta forma foi possível calcular o valor do comprimento de onda (λ) de uma OEM, por meio de sua frequência de oscilação, que é dada pela equação [2]:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

[2]

Onde: λ = comprimento de onda (m);
 c = velocidade da luz no vácuo (m/s);
 f = frequência da onda (Hz).

Da equação acima, verifica-se que comprimento de onda e frequência de oscilação são inversamente proporcionais. Sendo assim, quando maior for λ , menor será sua frequência.

Na Figura 14 pode-se observar duas ondas com comprimentos e amplitudes diferentes, uma com $\lambda = 200$ nm e amplitude igual a 1 e outra com $\lambda = 360$ nm e amplitude igual a 0,6. Sendo que nas ondas de luz, a amplitude representa a intensidade luminosa dessas ondas.

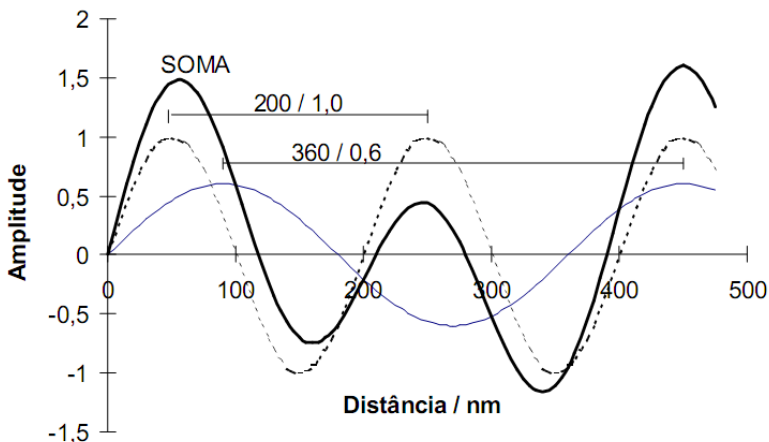


FIGURA 14 – Soma de dois comprimentos de onda

Fonte: (LENZ, 1997)

Uma propriedade de suma importância das ondas eletromagnéticas é que estas podem interagir umas com as outras, num efeito construtivo (soma) ou destrutivo (diferença). Dependendo da sua energia, as ondas eletromagnéticas, possuem interações diferentes com a matéria, sendo esta característica amplamente utilizada para diversos fins, dentre eles a fotometria (LENZ, 1997).

Analisando ainda a Figura 14, pode-se notar que a onda SOMA, possui um novo comprimento de onda e amplitude (ou intensidade luminosa) que não são constantes como as OEM que a formaram, adicionando-se um fator complicador na sua análise.

2.1.1 Espectro de luz

Da percepção do olho humano à luz, definiu-se a faixa do espectro visível, que compreende os comprimentos de onda entre 400 nm e 700 nm (KUSTERER, 2011). Esta faixa será o principal foco deste estudo, pois é utilizada para realização de diversos cálculos em fotometria. Na Figura 15 observa-se um

esboço do espectro eletromagnético, com destaque para a faixa do espectro visível.

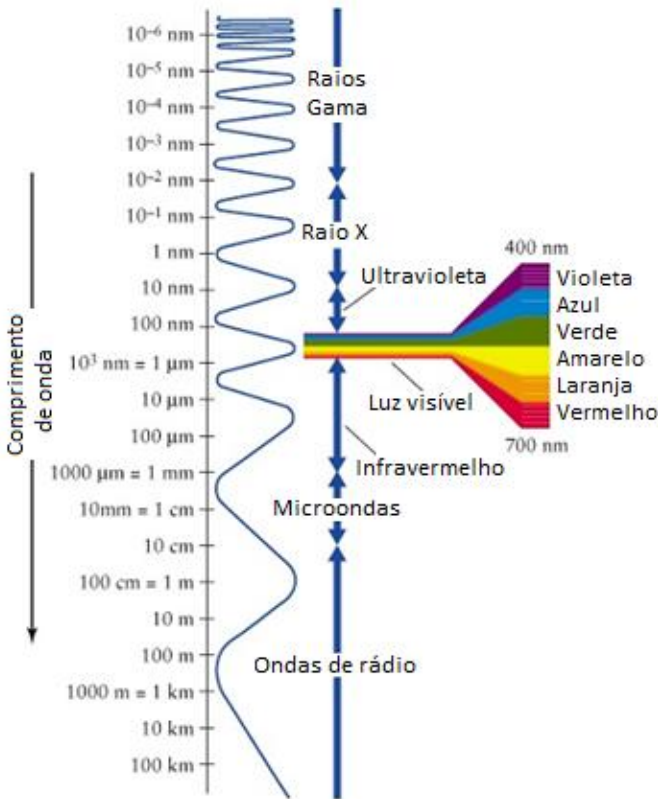


FIGURA 15 – Espectro eletromagnético

Fonte: adaptado de Kusterer (2011)

Nos extremos do espectro visível temos as faixas do ultravioleta e infravermelho, que também são utilizadas em fotometria, porém são cores compostas por comprimentos de onda que os olhos humanos não conseguem ver², conforme ilustra a Figura 16 (ROCHA, 2010).

² A luz ultravioleta é vista por muitos insetos e a luz infravermelha pode ser enxergada por alguns répteis, como a cobra (ROCHA, 2010).

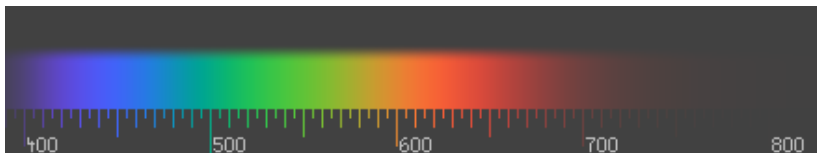


FIGURA 16 – Detalhe do espectro visível

Fonte: disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/cor>>.

Acesso em: 18 nov. 2011.

A mistura uniforme e simultânea de todas as ondas do espectro visível produz na vista humana a percepção do branco, desta forma, a luz que se conhece como branca, é na verdade o resultado da combinação de diversas cores. Quem primeiro fez esta demonstração foi o cientista inglês, Isaac Newton, em 1666, que utilizando um prisma (triângulo sólido de vidro) decompôs a luz do sol e obteve sete cores: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul claro, azul escuro e violeta (cores do arco-íris), conforme ilustrado na Figura 17. Newton também descobriu, por meio de um experimento que ficou conhecido como “Disco de Newton”, que para recompor a luz branca não são necessárias as setes cores originais, mas apenas o vermelho, o verde e o azul, que mais tarde deu origem ao padrão de cores RGB (*Red, Green and Blue*) (ROCHA, 2010).

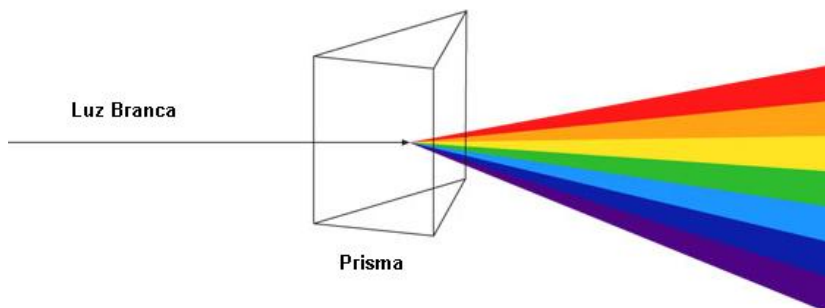


FIGURA 17 – Decomposição da luz branca

Fonte: adaptado de <www.proyectacolor.cl/teoria-de-los-colores/el-color-es-luz/>. Acesso em: 18 nov. 2011.

2.1.2 Padrão RGB e CMY

O padrão de cores RGB, ou sistema RGB, é conhecido como sistema cor-luz ou sistema aditivo, que regula as cores dos corpos que emitem luz (ex: LEDs, lâmpadas, monitores, televisão, etc.); já o sistema CMY (*Cyan, Magenta and Yellow*) é conhecido como sistema cor-pigmento ou sistema subtrativo, que regula as cores de corpos opacos (ex: papel em branco).

No padrão RGB, se somarmos as três cores básicas, nas proporções corretas, obteremos a cor branca, e no padrão CMY, se somarmos as três cores nas proporções corretas obteremos a cor preta (Figura 18).

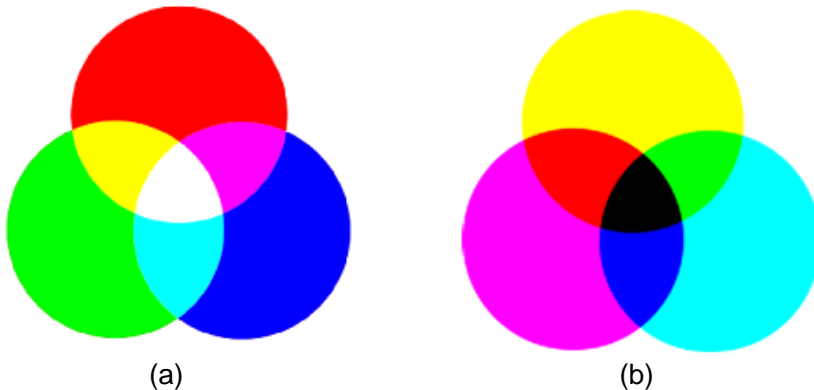


FIGURA 18 – (a) Círculos cromáticos RGB, (b) Círculos cromáticos CMY

Fonte: (ROCHA, 2010)

No padrão RGB, ou sistema cor-luz, combinando-se as cores primárias nas proporções certas, podem ser produzidas todas as cores do espectro de luz visível (ROCHA, 2010).

2.2 INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA

Devido às diversas formas de interação da luz com a matéria é que a visão humana consegue distinguir as cores da

natureza, dos objetos, dos animais, etc. Skoog et al. (2005) explicam porque uma solução vermelha é percebida e distinguida por sua coloração.

Uma solução contendo $\text{Fe}(\text{SCN})_2^{2+}$ é vermelha não porque o complexo adiciona radiação vermelha ao solvente, mas porque absorve o verde da radiação branca que penetra no frasco e transmite o componente vermelho de forma inalterada. Assim, em uma determinação colorimétrica de ferro baseada no seu complexo com tiocianato, o máximo de variação na absorvância com a concentração ocorre com a radiação verde; a variação da absorvância com a radiação vermelha é desprezível. Em geral, a radiação empregada em uma análise colorimétrica deve ser a cor complementar da solução do analito. (SKOOG et al., 2005, p. 685)

Na TABELA 1 pode-se observar a relação entre cor da luz absorvida versus a cor complementar transmitida, para várias partes do espectro visível.

TABELA 1 – Cor complementar

Região de Comprimento de Onda Absorvida, nm	Cor da Luz Absorvida	Cor Complementar Transmitida
400–435	Violeta	Amarela-esverdeada
435–480	Azul	Amarela
480–490	Azul-esverdeada	Laranja
490–500	Verde-azulada	Vermelha
500–560	Verde	Púrpura
560–580	Amarela-esverdeada	Violeta
580–595	Amarela	Azul
595–650	Laranja	Azul-esverdeada
650–750	Vermelha	Verde-azulada

Fonte: (SKOOG et al., 2005)

Em síntese, esta relação define a cor que pode ser percebida pelo olho humano durante a observação de diferentes objetos.

2.2.1 Sensibilidade das substâncias

Cada substância interage com a luz de uma forma diferente e, por meio do estudo desta interação, é possível identificar importantes características como a absorvância, transmitância e concentração da substância.

Para se realizar uma análise espectrofotométrica ainda é necessário conhecer o espectro de absorção da amostra que se quer determinar. Isto é feito para se definir qual o comprimento de onda da radiação incidente que causará o máximo de absorção pela espécie a ser determinada e assim obter-se a melhor sensibilidade na sua quantificação. O espectro de absorção é obtido variando-se o comprimento de onda da radiação que incide sobre a amostra e medindo-se a quantidade de radiação absorvida em um espectrofotômetro. (ANDRADE et al., 2000, p. 4)

O espectro de absorção, ou espectro de absorvância, é construído por meio da medição da quantidade de luz absorvida por uma substância, ou solução, em vários comprimentos de onda, conforme ilustrado na Figura 19.

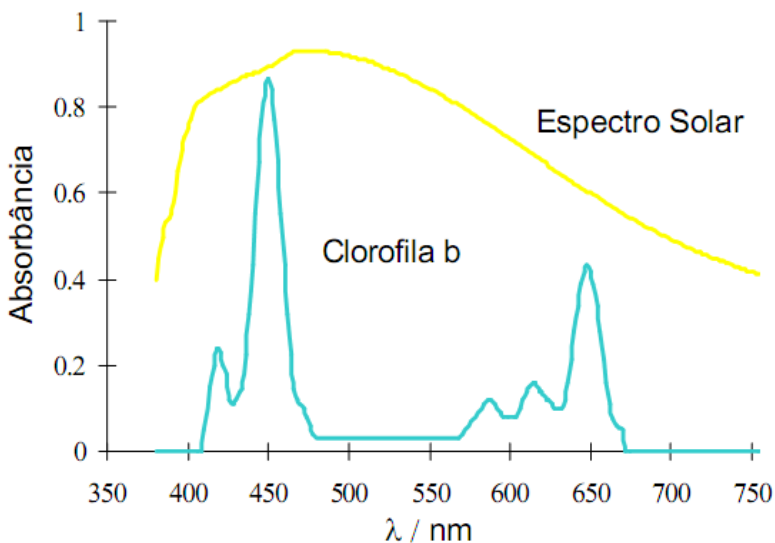


FIGURA 19 – Espectro de absorvância da Clorofila

Fonte: (Lenz, 1997)

A Clorofila, responsável pelo verde das plantas, é assim porque possui uma forte absorção de luz na faixa do azul e do vermelho. Desta forma, quando se observa uma folha, nos olhos humanos incide uma luz filtrada, isto é, luz branca (todos os comprimentos de onda) subtraídos do azul e vermelho que foram absorvidos, sendo então refletida a faixa do verde (500 nm a 560 nm) (Figura 19). Da mesma forma, todas as demais colorações são resultado da absorção e reflexão seletiva de algum comprimento de onda (λ) (LENZ, 1997).

Uma vez que diferentes substâncias têm diferentes padrões de absorção, a espectrofotometria permite, por exemplo, identificar substâncias dissolvidas em soluções, com base no seu espectro. Permite também quantificá-las, uma vez que a quantidade de luz absorvida está relacionada com a concentração da substância.

Com base neste princípio é possível montar tabelas que determinem quais os picos de absorção de cada substância. Para a confecção da TABELA 2 foram tomadas como base as análises espectrofotométricas da Alfakit que, por sua vez, tem

como referência, o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005), livro com padrões mundiais para análise de água e efluentes, e que oferece centenas de testes de laboratório que comprovam a qualidade da água. Estes métodos representam atualmente as melhores práticas correntes de análise de água e águas residuais.

Na TABELA 2 temos os parâmetros colorimétricos utilizados pela Alfakit e seu correspondente comprimento de onda (λ).

TABELA 2 – Comprimentos de onda (nm) para análises colorimétricas

PARÂMETRO	MÉTODO ³	UNIDADES	λ (nm)
Alumínio	Eriocromocianina	mg L ⁻¹ Al	535
Boro	Curcumina	mg L ⁻¹ B	550
Cloro	DPD	mg L ⁻¹ Cl ₂	515
Cloro	OTA	mg L ⁻¹ Cl ₂	440
Cobre	Ditiocarbamato	mg L ⁻¹ Cu	440
Cromo	Difenilcarbazida	mg L ⁻¹ Cr	540
DQO	Oxidante com dicromato	mg L ⁻¹ O ₂	600
Detergentes (Surfactantes Aniônicos)	Azul de metileno	mg L ⁻¹ LAS	650
Fenol	Nitroanilina	mg L ⁻¹ C ₆ H ₆ O	470
Ferro (Fe total, Fe II e FeIII)	Tiocianato	mg L ⁻¹ Fe	480
Ferro Total	Ácido tioglicólico	mg L ⁻¹ Fe	530
Flúor	SPADNS	mg L ⁻¹ F	595

³ Métodos padrão para o exame de água e águas residuais (APHA, 2005).

Fosfato Total Baixas Concentrações	Azul de molibdênio	mg L ⁻¹ PO ₄	650
Fosfato Total Alta Concentração	Ác. Ascórbico	mg L ⁻¹ PO ₄	650
Fósforo	Vanadomolibdico	mg L ⁻¹ P	415
Hidrazina	Dimetilamonibenzaldeído	mg L ⁻¹ H ₄ N ₂	450
Manganês	Para-formaldeído	mg L ⁻¹ Mn	450
Molibdênio	–	mg L ⁻¹ Mo	465
Níquel	Dimetilglioxima	mg L ⁻¹ Ni	450
Nitrogênio– Amoniacal	Azul de Indofenol	mg L ⁻¹ N– NH ₃	630
Nitrogênio– Amoniacal (água doce)	Nessler	mg L ⁻¹ N– NH ₃	450
Nitrogênio– Amoniacal (água salgada)	Nessler	mg L ⁻¹ N– NH ₃	450
Nitrogênio– Nitrato	Brucina	mg L ⁻¹ N– NO ₃	415
Nitrogênio– Nitrato	NTD	mg L ⁻¹ N– NO ₃	535
Nitrogênio– Nitrito	Alfanaftilamina	mg L ⁻¹ N– NO ₂	520
Nitrogênio– Nitrito	NTD	mg L ⁻¹ N– NO ₂	535
Nitrogênio Total	Digestão Persulfato / Brucina	mg L ⁻¹ N– NO ₃	415
Ortofosfato Baixas Concentração	Azul de molibdênio	mg L ⁻¹ PO ₄	650
Ortofosfato Alta Concentração	Ac. Ascórbico	mg L ⁻¹ PO ₄	650
Potássio	Tetrafenil–borato de sódio	mg L ⁻¹ K	415
Sílica	Azul de Heteropólio	mg L ⁻¹ SiO ₂	660

Sulfato	Cloreto de Bário	mg L ⁻¹ SO ₄	415
Sulfeto	Azul de Metileno	mg L ⁻¹ S	660
Zinco	Zincon	mg L ⁻¹ Zn	620

Fonte: (ALFAKIT, 2011)

2.3 PRINCÍPIOS DA FOTOMETRIA

Os métodos fotométricos são métodos que utilizam o princípio luminoso (foto) para realizar a medição (métricos) de compostos que tem a capacidade de interagir com a luz. Estes métodos são geralmente utilizados para medir a concentração de substâncias, valendo-se da relação físico-química observada entre a luz e a matéria presente no mensurando.

2.3.1 Transmitância e absorbância

Para compreensão da metodologia de medição utilizada neste trabalho, é importante revisar alguns conceitos como **transmitância e absorbância**.

Toma-se como exemplo dois tubos de ensaios de mesmas dimensões, como os da Figura 20, o primeiro com uma solução mais diluída e o segundo com a mesma solução, porém mais concentrada. Projetando-se uma fonte luminosa com intensidade I_0 em um dos lados dos tubos de ensaio e captando-se, com um sensor, a intensidade luminosa do outro lado, tem-se I_1 para o tubo 1 e I_2 para o tubo 2.

Sendo o comprimento de onda (λ) da luz incidente (I_0) especificamente sensível às moléculas da solução em questão; uma parte desta luz será absorvida pelas moléculas da solução, resultando na luz de saída I_1 e I_2 . Como a concentração de moléculas é maior no tubo 2, a intensidade luminosa I_2 será menor que I_1 (KHAN, 2011).

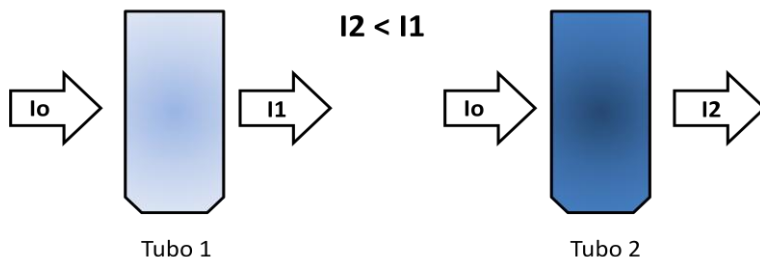


FIGURA 20 – Ilustração da incidência de luz em 2 tubos de ensaios

Adiciona-se um terceiro tubo de ensaio (Figura 21), mais largo que os anteriores, porém com a mesma solução e concentração do tubo 2. Incidindo-se a mesma fonte luminosa I_0 , neste caso, esta luz terá que percorrer um trajeto maior até sair do outro lado, colidindo com um maior número de moléculas e sofrendo maior absorção de energia, de modo a resultar em uma intensidade luminosa de saída I_3 que, por consequência, é menos intensa do que I_2 . Nota-se, desta forma, que a luz de saída não depende somente da concentração, mas também do comprimento (l) que ela atravessa (KHAN, 2011).

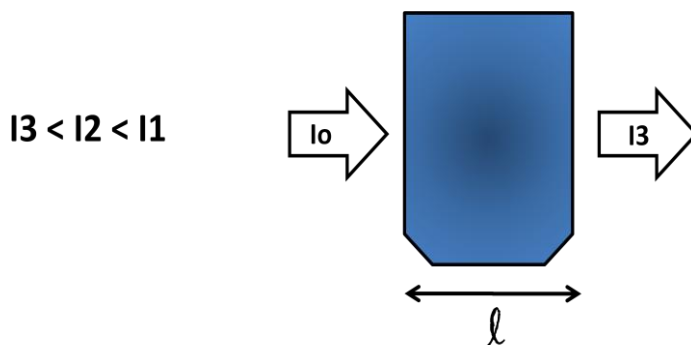


FIGURA 21 – Ilustração de um tubo de ensaio largo

A relação entre a luz de saída e luz incidente é conhecida com **Transmitância** (T) dada pela equação [3] (SKOOG et al., 2005):

$$T_1 = \frac{I_1}{I_0} \quad T_2 = \frac{I_2}{I_0} \quad T_3 = \frac{I_3}{I_0} \quad \therefore \quad T_3 < T_2 < T_1$$

[3]

Outro conceito importante é o de **Absorbância** (A), ou seja, a quantidade de luz que é absorvida pelas moléculas da solução. A absorbância possui, naturalmente, uma relação inversa com a transmitância, uma vez que quanto mais luz se absorve, menor é sua intensidade na saída. A equação [4] define a relação de absorbância (SKOOG et al., 2005):

$$A = -\log(T) \quad \therefore \quad A_1 = -\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right)$$

[4]

2.3.2 Reflexão e espalhamento

Quando um feixe de luz monocromático (comprimento de onda, λ , único e definido), com intensidade I_0 , incide sobre uma cubeta ou tubo de ensaio contendo uma solução, diversos fenômenos podem ocorrer. O mais importante deles é a absorção de parte da radiação pelo meio que está sendo analisado, porém a diferença entre radiação incidente e a transmitida não é igual ao valor da radiação absorvida, pois parte desta radiação é **refletida** e outra **espalhada**. A reflexão ocorre em função de diferenças entre o índice de refração do meio onde a radiação se propaga e do meio que está sendo analisado. Skoog et al. (2005) apresentam o seguinte exemplo: “cerca de 8,5 % de um feixe de luz amarela é perdido por reflexão quando este passa por uma célula de vidro”. Já o espalhamento, ele ocorre caso o meio não seja transparente e homogêneo. Todos estes efeitos associados à intensidade de radiação (Figura 22)

estão relacionados entre si, por uma expressão linear descrita pela equação [5] (ANDRADE et al., 2000):

$$I_0 = I_r + I_e + I_a + I_t$$

[5]

Onde: I_0 = Intensidade do feixe incidente;
 I_r = Intensidade do feixe refletido;
 I_e = Intensidade do feixe espalhado;
 I_a = Intensidade do feixe absorvido pelo meio;
 I_t = Intensidade do feixe transmitido.

Como os efeitos de reflexão e espalhamento, também conhecidos como interferentes (SKOOG et al., 2005), são indesejados a este projeto, medidas adicionais são tomadas para minimizar seus efeitos, como: cubetas com paredes homogêneas e de pequena espessura, além de faces perfeitamente paralelas (ANDRADE et al., 2000). Outra medida importante é quanto ao procedimento de medição, onde, primeiramente, mede-se a transmitância da cubeta com uma solução que não absorva a radiação do comprimento de onda do ensaio (tipicamente água deionizada) e, depois, utilizando a mesma cubeta, troca-se a solução para a de interesse e uma nova medição é realizada. A primeira leitura serve de referência para a segunda, pois com ela é possível quantificar o efeito dos interferentes, fazendo com que a intensidade transmitida no primeiro ensaio seja desconsiderada dos resultados da medição final.

A Figura 22 ilustra os principais fenômenos de propagação luminosa que podem ser observados durante uma medição.

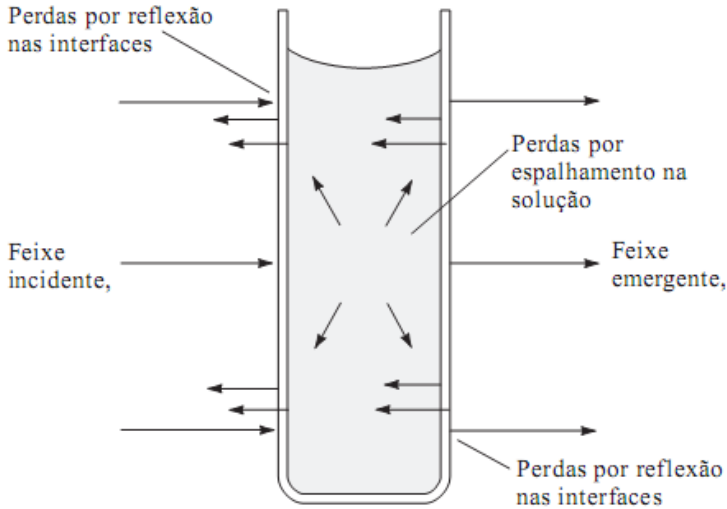


FIGURA 22 – Fenômeno da reflexão e espalhamento

Fonte: adaptado de Skoog et al. (2005)

2.3.3 Lei de Lambert–Beer

Dos estudos de Pierre Bouguer, em 1729, Johann Heinrich Lambert, em 1760, e August Beer, em 1852, formulou-se a **Lei de Lambert–Beer** ou Lei de Beer–Lambert–Bouguer, que enuncia que a absorvância é diretamente proporcional a três fatores; concentração, caminho óptico e absorvidade. A equação [6] apresenta esta relação (SKOOG et al., 2005):

$$A = \alpha \cdot \ell \cdot C$$

[6]

Onde:

A = Absorvância;

C = Concentração (mol/L);

ℓ = Distância percorrida pela luz ou caminho óptico (cm);

α = Coeficiente de absorção ou absorvidade (L/mol.cm).

Como a absorvância é uma grandeza adimensional (sem unidade), geralmente expressa de 0 a 1 ou 0 a 100 %, pode-se notar que as unidades de α cancelam as unidades de C e l (SKOOG et al., 2005). O coeficiente de absorção (α) é uma constante dependente de λ , da substância, do solvente e da temperatura. Quanto maior for o valor de α , mais elevada é a capacidade da substância absorver luz em certo comprimento de onda (λ). A clorofila, por exemplo, possui um dos maiores coeficientes de absorção da natureza, para $\lambda = 480$ nm, sendo perfeito para captação de luz para fotossíntese (LENZ, 1997).

A radiação eletromagnética que uma dada substância absorve pode revelar importantes informações sobre suas características. “A Lei de Beer estabelece uma relação linear entre a absorvância e a concentração da amostra, sendo, portanto, possível determinar a concentração de uma amostra através de sua curva de calibração (absorvância versus concentração)” (ANDRADE et al., 2000). A Figura 23, mostra em um caso prático⁴, a linearidade enunciada pela Lei de Lambert-Beer.

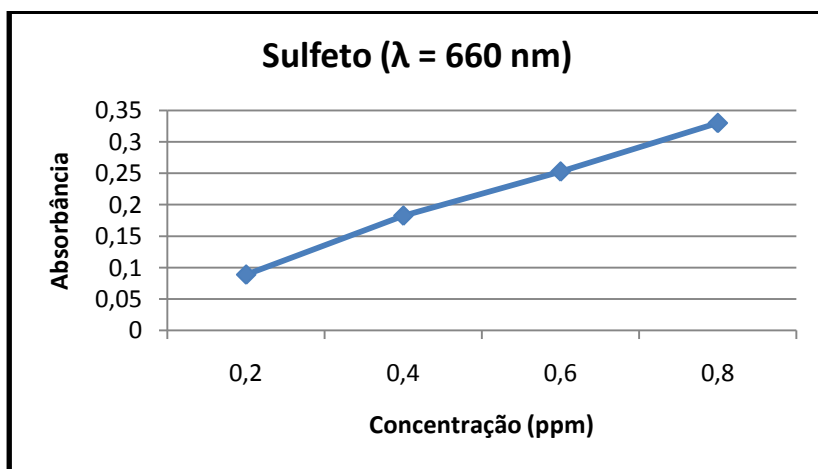


FIGURA 23 – Curva linear de calibração do Sulfeto

Fonte: curva levantada experimentalmente

⁴ Dados levantados experimentalmente com o espectrofotômetro de LED, desenvolvido neste trabalho.

Os conceitos vistos até aqui serão importantes quando forem tratadas as metodologias de cálculo utilizadas neste projeto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente projeto foi desenvolvido a partir de diversas frentes de trabalho, e este capítulo apresenta de maneira sistemática cada um dos processos desenvolvidos, especificando todos os materiais em sua concepção e os métodos envolvidos.

3.1 DESENVOLVIMENTO DE *HARDWARE*

A presente seção destina-se a apresentação geral do projeto e das concepções de *hardware* realizadas no desenvolvimento deste trabalho. Para que as pesquisas e especificação de componentes fossem melhor orientadas, montou-se um diagrama de blocos, explicitando as funcionalidades do equipamento. A organização deste diagrama foi pautada pela adequação aos objetivos específicos, previamente mencionados como escopo do projeto. O desenho deste diagrama de blocos é apresentado pela Figura 24, onde estão esquematizadas as principais relações entre cada parte funcional do *hardware* do equipamento.

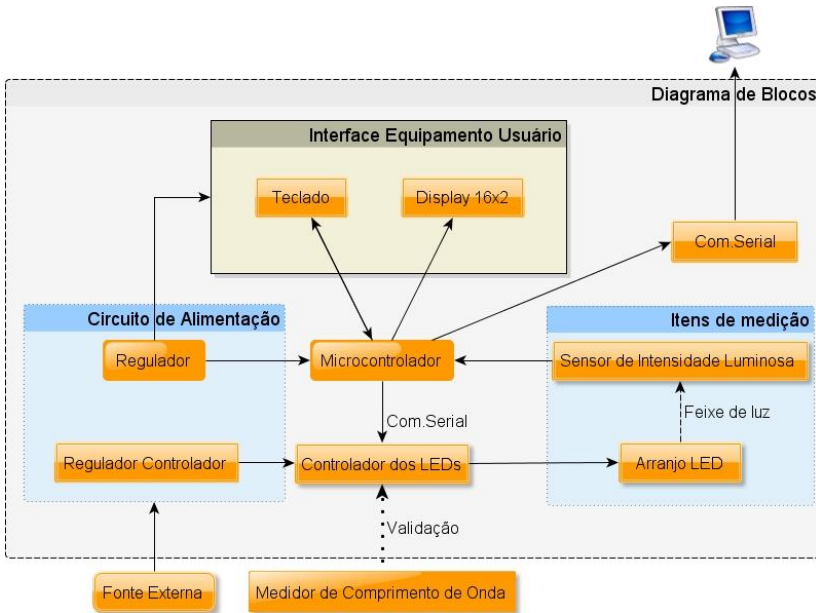


FIGURA 24 – Diagrama de blocos do equipamento

A fonte externa tem sua alimentação proveniente de uma bateria de 9 V ou fonte de 12 V ligada à rede de energia elétrica. Isto oferece ao usuário a opção de escolha para cada situação de trabalho, seja ela em bancada ou em campo. Internamente têm-se dois blocos de regulação de tensão, responsáveis pelo fornecimento de diferentes níveis de tensão para o funcionamento dos demais componentes eletrônicos. O projeto baseia-se na operação de um microcontrolador, responsável pela coordenação e processamentos das informações e sinais. Além deste, têm-se também um controlador do arranjo de LEDs e um sensor de intensidade luminosa, os quais operam de modo a viabilizar toda a parte de medição do equipamento. Finalmente, o trabalho de interface com o usuário fica por conta de um teclado alfanumérico e um *display* de cristal líquido. A seguir, cada bloco será discutido em detalhes.

3.1.1 Arranjo de LEDs

Ao apresentar a ideia de desenvolvimento de um espectrofotômetro, a concepção inicial da Alfakit previa a utilização de aproximadamente 10 LEDs comuns, com comprimentos de onda entre 420 nm e 860 nm. Para os comprimentos de onda entre os LEDs seria realizada uma interpolação matemática entre 2 LEDs adjacentes. Uma das principais dificuldades inerentes a esta técnica, já enfrentada pela Alfakit em desenvolvimentos anteriores, refere-se ao ajuste/alinhamento mecânico do feixe dos 5 LEDs do fotocolorímetro (Figura 1). Para um adequado funcionamento desta abordagem todos os feixes luminosos devem convergir para um mesmo ponto do sensor receptor e, portanto, a ideia de inserir mais LEDs no processo de medição, acabaria por agravar o problema da convergência luminosa. Além deste aspecto, a interpolação matemática dos comprimentos de onda nesta implementação é um processo bastante complexo e que não garante um resultado confiável.

Para contornar o referido problema, definiu-se como premissa principal a utilização de um LED RGB para produzir exatamente o comprimento de onda desejado, ao invés de utilizar interpolações referentes aos diversos LEDs. Uma das principais vantagens desta abordagem é a solução do problema de ajuste/alinhamento dos feixes de luz.

Partiu-se então para a especificação de alguns LEDs RGB e testes em laboratório que melhor atendessem à esta concepção e, em paralelo, iniciou-se uma pesquisa para especificação do microcontrolador que melhor se adequasse ao projeto.

Após inúmeros testes e ensaios, descritos no transcrito deste trabalho, chegou-se a uma configuração de 3 LEDs, sendo 1 Ultravioleta, 1 RGB e 1 Infravermelho, conforme mostrado na Tabela 3.

TABELA 3 – Comprimento de onda dos LEDs utilizados no equipamento desenvolvido

λ LED (nm)	Fabricante
400	Bivar
470	Bivar (RGB)
528	Bivar (RGB)
628	Bivar (RGB)
870	Roithner

3.1.2 Controlador dos LEDs

Com base no trabalho de Moreno e Contreras (2007) e ensaios em laboratório, verificou-se que, ligando de forma convencional os LEDs vermelho, verde e azul, ter-se-ia visualmente uma cor nova, mas eletromagneticamente, seriam 3 comprimentos de onda distintos e não um único resultante da combinação entre eles. Desta forma, era necessário pesquisar uma forma de controle dos LEDs que possibilitasse a combinação perfeita dos comprimentos de onda, para formação de uma luz que mais se aproximasse de uma luz monocromática.

Após extensa pesquisa de métodos e componentes, encontrou-se uma linha de controladores para LEDs da *Texas Instruments* (TLC5940), que tem como princípio de controle a escala de cinza, controle por PWM (*Pulse Width Modulation*), e o *dot correction* (controle de corrente). Com base nestes conceitos foi especificado o controlador de corrente e tensão empregado no projeto.

O *dot correction* visa colocar duas fontes luminosas com comprimentos de onda diferentes no mesmo plano, fazendo com que ocorra uma mistura homogeneia da cor, ou seja, ao misturar verde puro (a 100 %) e vermelho puro (a 100 %), temos a cor intermediária: amarelo. Este conceito é provado na prática realizando-se o controle da corrente dos LEDs; determinando-se a mesma corrente para ambos e fazendo com que a variação inerente a alimentação seja a menor possível. Já a escala de cinza, que tem como finalidade controlar o "claro" e "escuro" da cor misturada, faz este controle por meio de um sinal PWM (controle de carga). Utilizando-se o exemplo acima, com o

controle da escala de cinza é possível então se obter o amarelo, do escuro ao claro (TEXAS, 2008).

Dentre os controladores da família optou-se em usar o TLC5941, isto porque este trabalha com correntes de 0 a 80 mA, utiliza comunicação compatível com SPI (*Serial Peripheral Interface*), tem uma resolução de 6 bits para os registradores responsáveis pelo *dot correction* e 12 bits para os registradores de escala de cinza, além de ter um erro menor que 1 % (TEXAS, 2008).

Além destas vantagens, uma grande característica deste controlador é a de trabalhar com tensão de alimentação entre 3,0 V e 5,5 V. Como um dos pré-requisitos deste projeto é o de que o equipamento deverá ser portátil, era importante que todos os periféricos trabalhassem com 3,3 V, isso facilitou a integração dos blocos, não sendo necessário incluir condicionadores de sinais.

Foi necessário, para o acionamento com o controlador, que o LED RGB fosse do tipo ânodo comum, ou seja, os LEDs são alimentados com a tensão no terminal comum, sendo os outros terminais conectados às portas do controlador para o efetivo controle.

Para o acionamento das portas foi necessário utilizar um protocolo específico do controlador, muito parecido com a comunicação SPI, utilizando-se 4 terminais para a comunicação: terra, *clock*, pino de saída para o envio das informações e o pino de entrada para a confirmação dos dados enviados. Este protocolo determina que; primeiro deve-se enviar o pacote de dados referente aos registradores de *dot correction* (16 x 6 bits), e em seguida, os dados referentes aos registradores da escala de cinza (16 x 12 bits). Junto a estes pacotes de dados é necessário configurar outros registradores como o *mode* e *xlat*; o primeiro é usado para selecionar o registrador em que se deseja armazenar os dados (*dot correction* ou escala de cinza), e para o segundo é necessário um pulso ao final de cada pacote de dado para guardar os dados no registrador.

3.1.3 Sensor de comprimento de onda

Para a validação do funcionamento do controlador dos LEDs, foi necessário o uso de um dispositivo que informasse qual o comprimento de onda (λ) da luz resultante do LED RGB. Como nem o Laboratório do SENAI, nem a Alfakit possuíam tal equipamento, foi necessário a pesquisa, especificação e compra de um sensor de comprimento de onda.

O sensor adquirido para esta finalidade foi o WS-7.56-PCBA2 (Figura 25), um kit desenvolvimento, produzido pela empresa *Pacific Silicon Sensor* (especializada em sensores para medição na área óptica).

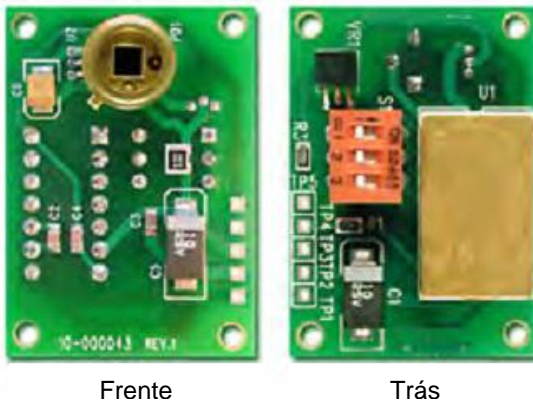


FIGURA 25 – Kit desenvolvimento WS-7.56-PCBA2

Fonte: Pacific Silicon Sensor, Datasheet

É importante salientar a diferença entre o sistema óptico adotado neste projeto e o que é utilizado atualmente no mercado. Os sistemas ópticos utilizados hoje no mercado têm como fonte luminosa, para a realização das medições, uma lâmpada de cor branca. Haja vista que a luz branca compreende todas as cores visíveis, é necessário realizar a sua decomposição, por meio da utilização de filtros (prisma), para se obter o comprimento de onda desejado. Neste sistema, tem-se como principal característica a emissão de uma luz muito próxima da monocromática, equivalente a uma emissão luminosa em um

"único" comprimento de onda (ou uma banda espectral muito pequena, tendo como dominância o comprimento de onda desejado).

O trabalho proposto tem como característica, uma fonte luminosa policromática (LED), diferente da monocromática, e que tem uma banda espectral grande, com um pico de comprimento de onda bem específico.

Este kit desenvolvimento, além do sensor de comprimento de onda, trás junto um circuito eletrônico, que fornece uma saída em tensão, que permite realizar o processo de levantamento da curva de resposta, que não é linear, para cada comprimento de onda específico. A Figura 26 apresenta a resposta característica deste sensor.

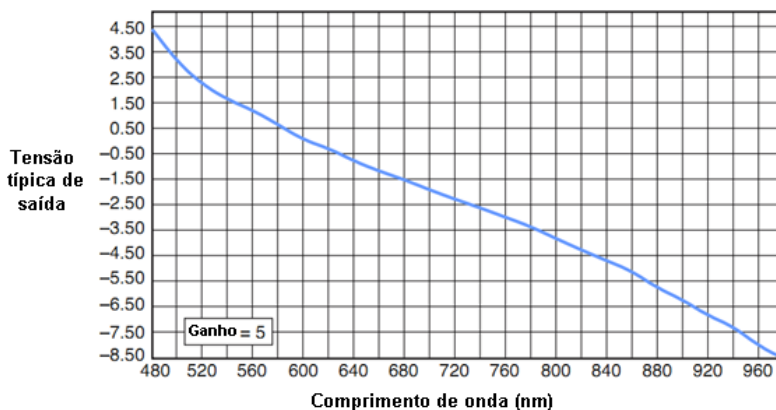


FIGURA 26 – Curva de resposta do sensor de comprimento de onda

Fonte: Pacific Silicon Sensor, Datasheet

Posteriormente, no item 3.4.3, esta característica de resposta será discutida, para estabelecer um nível de referência de tensão a partir de um comprimento de onda definido.

3.1.4 Display

De acordo com os pré-requisitos do projeto, o *display* deveria ter como características:

- Ser pequeno (devido ao espaço interno do gabinete);
- Ter baixo consumo;
- Operar com tensão de 3,3 V;
- Possuir 16 colunas x 2 linhas;
- Possuir *backlight*.

Diante destas características optou-se pelo NHD-0216HZ-FSW-FBW-3V3C, fabricado pela empresa *New Heaven Display*, que atende aos requisitos acima, e destaca-se por seu baixo consumo de 2 mA. A Figura 27, representa o esquema elétrico usado para ligar o *display* com os seus respectivos terminais de dados.

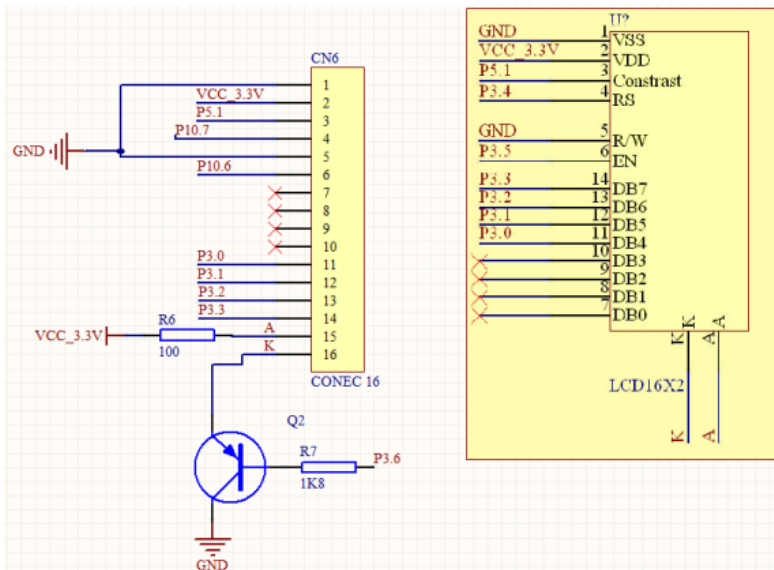


FIGURA 27 – *Display*

Para o controle do contraste, ao invés de empregar um componente passivo como, por exemplo, um potenciômetro, optou-se pelo uso do DAC (*Digital to Analog Converter*) do microcontrolador, diminuindo assim o número de componentes e, conseqüentemente, o custo do produto.

Para utilização e configuração do *display*, utilizou-se via de dados de 4 bits (DB7, DB6, DB5 e DB4), sendo então enviados dois pacotes de dados: primeiro os 4 bits mais significativos, em seguida os 4 bits menos significativos. Com isso foi possível utilizar poucos terminais da porta P3 do microcontrolador e reduzir a quantidade de trilhas da placa de circuito impresso.

Para o acionamento da luz de fundo (*backlight*) do *display*, foi necessário usar um transistor. Este transistor está configurado como chave, ou seja, quando há uma tensão na sua base, ele aciona o *backlight*. Esta tensão de base é controlada pelo terminal P3.6 do microcontrolador.

3.1.5 Teclado

Após determinado o *display*, foi realizada a especificação técnica do teclado. Devido à considerável quantidade de informação que deveria ser inserida no equipamento, optou-se por empregar um teclado de membrana de 12 teclas, no formato 4 x 3, com a mesma ergonomia adotada nos teclados de celulares. Esta alternativa viabiliza a inserção de diferentes tipos de dados, a partir do formato alfa-numérico.

A Figura 28 mostra o projeto final do teclado de membrana, contendo a disposição das teclas, furação do poço e campo onde será visualizado o *display*.

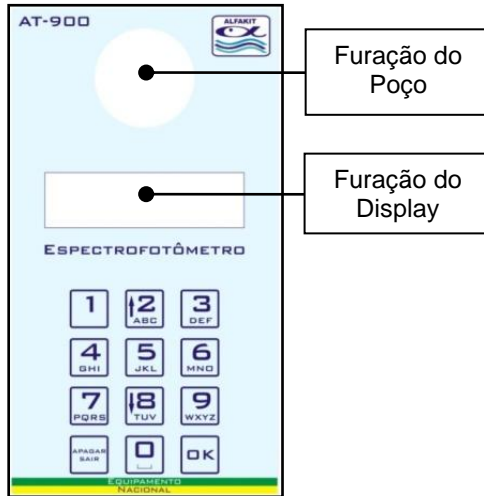


FIGURA 28 – Vista superior do teclado

Na Figura 29, seguem: a vista inferior e circuito elétrico utilizado pelo teclado. Este circuito emprega um sistema de varredura para a identificação da tecla pressionada.

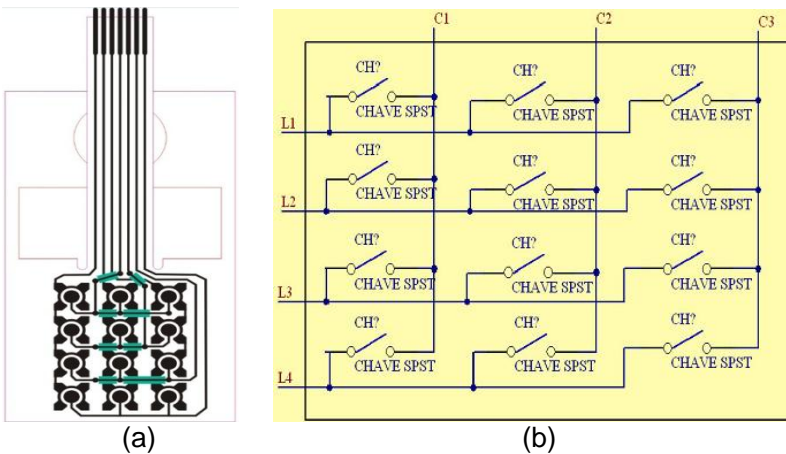


FIGURA 29 – (a) Vista inferior do teclado; (b) Circuito elétrico

3.1.6 Sensor de intensidade luminosa

Adotou-se para o projeto, o TSL230ARD, produzido pela empresa TAOS (*Texas Advanced Optoelectronic Solutions*), pois, após pesquisa, não foram encontrados sensores com melhores características. Este sensor tem como função, medir a transmitância inicial (I_0), chamada de intensidade ao “padrão branco” e medir a transmitância com a amostra (I_1), também chamada de intensidade ao “padrão cor”.

Este sensor possui saída em frequência, com formato de onda quadrada (PWM com *duty cycle* em 50 %), que varia de acordo com a intensidade medida pela célula de leitura, que vai de 0 Hz, para o escuro, e 1 MHz, para a luz incidente sobre o sensor, além de possuir sensibilidade de resposta na faixa de comprimento de onda de 320 nm a 1050 nm.

Uma característica importante deste sensor é possuir dois ajustes digitais: **escala** e **sensibilidade**, utilizados para o pleno funcionamento do sensor.

O ajuste de escala é utilizado para dividir a frequência de saída. Como exemplo prático, para um divisor de escala igual a 1 e uma determinada intensidade luminosa, a frequência de saída seria igual a 600 kHz. No entanto, frequências desta ordem, são difíceis de serem medidas pelo microcontrolador, sendo assim, notou-se que para uma boa leitura da frequência, a configuração da escala em 100 vezes, trazia a resposta do sensor para uma frequência média de 6 kHz, mais adequada para ser utilizada pelo microcontrolador.

Já a escala de sensibilidade serve para se determinar a precisão das medições, além de deixar o sensor em baixo consumo. Para o projeto foi definida uma sensibilidade intermediária. Afinal, foi verificado que para uma sensibilidade alta o sistema ficava muito suscetível a ruídos, causados por um considerável espalhamento do sinal luminoso. Em contra partida, para uma sensibilidade baixa, o sistema passava a ter um maior erro de leitura, diminuindo a precisão do sistema.

Para uma leitura mais estável e confiável do sensor, o microcontrolador efetua uma média móvel de 10 valores, e utiliza este resultado em seus cálculos.

3.1.7 Circuito de alimentação

Em virtude do consumo e precisão, optou-se por utilizar 2 reguladores de tensão, conforme mostrado na Figura 30 e Figura 31. O regulador REG1 (REG113-33), aciona toda a estrutura de sinal e o regulador REG2 (LP2951-33), aciona a estrutura de potência (controlador dos LEDs), ambos da *Texas Instruments*.

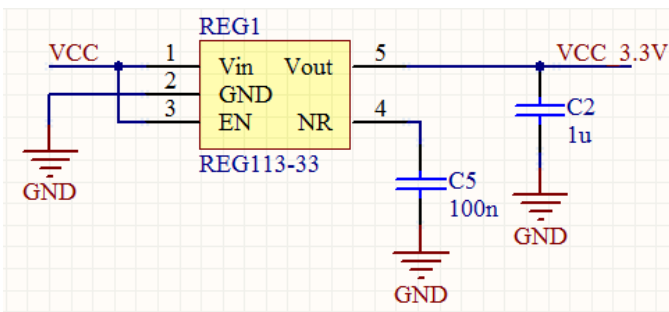


FIGURA 30 – Regulador da estrutura de sinal

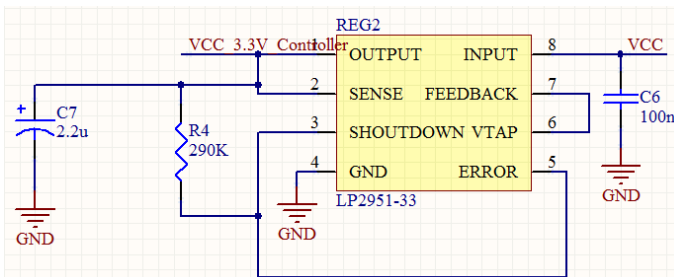


FIGURA 31 – Regulador da estrutura de potência

Estes reguladores têm como características o baixo consumo para o seu funcionamento, ficando abaixo de 5 mA, e saída de 3,3 V, além de fornecer uma tensão de saída com baixo *ripple*. É importante ressaltar que variações na tensão de

alimentação, por menor que sejam, interferem nas medições realizadas, pois podem resultar em uma menor intensidade do feixe luminoso utilizado para teste (o que degrada os resultados fotométricos). Este aspecto confere aos reguladores de tensão um importante papel na confiabilidade dos resultados obtidos pelo produto final.

A diferença entre os dois reguladores é basicamente a capacidade de corrente, enquanto o REG1 tem capacidade máxima de 50 mA, o REG2 tem capacidade de 120 mA.

Como um dos requisitos de funcionamento do equipamento era o de funcionar com bateria e fonte externa, foi necessário projetar um circuito de proteção e seleção, para o caso de se conectar as duas fontes de alimentação simultaneamente. Na Figura 32 observamos o circuito de proteção e seleção.

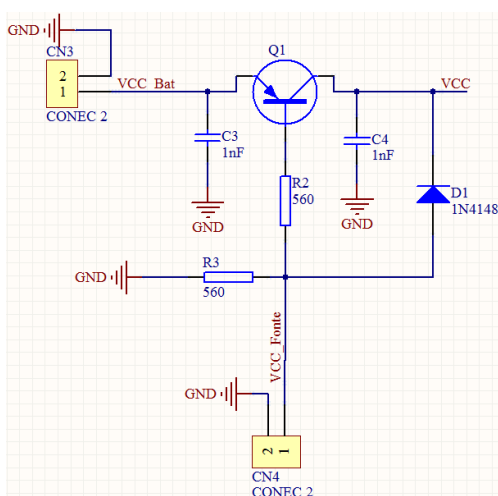


FIGURA 32 – Circuito de proteção e seleção

Este circuito, além de garantir a proteção entre as duas fontes, tem ainda a finalidade de selecionar preferencialmente a alimentação da fonte (CN4), independentemente de ela estar ou

não conectada à bateria (CN3), isto para garantir um maior tempo de uso da bateria.

3.1.8 Comunicação serial

Dentre os componentes de comunicação serial mais utilizados no mercado, nenhum tem como alimentação a tensão de 3,3 V, sendo assim, foi necessário pesquisar um componente que operasse com esta tensão. O componente escolhido foi o MAX563, da *Maxim*, por ser de fácil configuração.

A comunicação serial neste projeto é utilizada para realizar a calibração do produto pelo fabricante (Alfakit). A escolha da comunicação serial deu-se pelo fato de ser uma comunicação robusta e de fácil manipulação, tanto para a programação de baixo nível, implementada pelo microcontrolador, como pelo *software* de alto nível em *Java*.

A Figura 33 mostra o circuito elétrico utilizado para a comunicação serial, entre o produto e o computador.

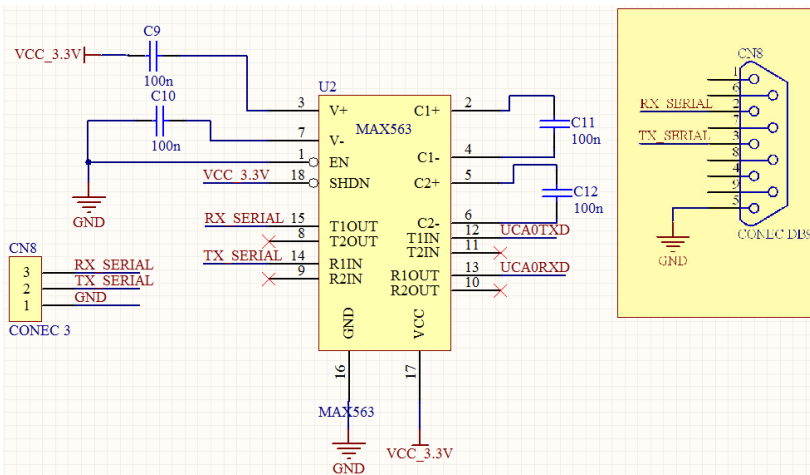


FIGURA 33 – Comunicação serial

3.1.9 Microcontrolador

Para a escolha do microcontrolador foram utilizados os seguintes requisitos:

- Possuir modos de operação de baixo consumo;
- Ter alimentação de 3,3 V;
- Possuir pelo menos um DAC (usado para o controle de contraste do *display*);
- Conter um contador interno de pelo menos 12 bits (usado para a leitura da frequência de saída do sensor de intensidade luminosa);
- Ter um número suficiente de entradas e saídas, para que seja possível o controle de todos os periféricos (teclado, display, controlador dos LEDs e comunicação serial);
- Possuir pelo menos 60 Kbytes de memória, para o armazenamento de dados no momento da calibração do equipamento.

Diante destes requisitos levantados, optou-se pelo microcontrolador MSP430FG4618, da *Texas Instruments*.

3.1.10 Projeto mecânico

No desenvolvimento de produtos eletrônicos, muitas vezes o impulso remete os desenvolvedores a focar no circuito eletrônico e PCI (Placa de Circuito Impresso), deixando de lado a parte mecânica, ou seja, o gabinete que acomodará a eletrônica e servirá de interface com o usuário. Cabe ressaltar que um prévio levantamento de requisitos do projeto mecânico, trará importantes direcionamentos para o desenvolvimento eletrônico e evitará retrabalhos, principalmente de projeto de layout e fabricação de PCI, que desde a primeira versão contarão com detalhes como: tamanho máximo de placa, altura máxima dos componentes, posição da furação de fixação, posição de conectores externos, etc.

No desenvolvimento deste produto, um dos processos mais demorados e trabalhosos foi justamente a finalização do

projeto mecânico, com a definição do gabinete e do poço (porta-cubeta) que seriam utilizados.

Os espectrofotômetros atuais, normalmente, são de bancada e possuem peso superior a 1 Kg. Como um dos requisitos de projeto era que o produto fosse portátil, foi necessário adequar todo o circuito eletrônico a um gabinete pequeno, porém que possuísse um porta-bateria e que permitisse aos usuários realizarem a troca da bateria sem ter acesso a parte eletrônica e de medição do equipamento.

Após muita pesquisa, optou-se pelo gabinete TN23-B, da empresa TEKCO. Este gabinete tem como grande vantagem um compartimento para baterias, separado do compartimento principal, além de ser produzido em material emborrachado, dando assim a sensação de maior aderência quando este é segurado. Na Figura 34 pode-se observar o resultado final do produto, que ficou com peso de 256 g (302 g com bateria) e dimensões de 34x96x155 mm.



FIGURA 34 – Foto do equipamento desenvolvido

No processo de desenvolvimento do poço, notou-se alguns entraves:

- Necessidade de aletas para se evitar a reflexão da luz ao colidir com a lateral do poço;
- Não era possível o uso dos LEDs posicionados na horizontal devido ao pequeno espaço de área útil da cubeta;
- A quantidade de roscas deveria ser um pouco maior devido ao erro de fabricação, pois este erro impactava diretamente nos encaixes.

Após diversos projetos e testes, chegou-se na versão final do poço, mostrado em detalhes na Figura 35.

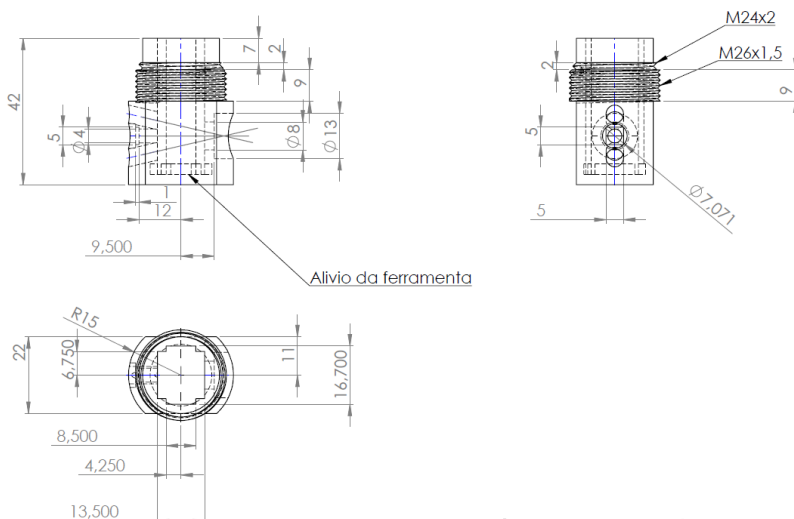


FIGURA 35 – Projeto mecânico do poço

O poço, usinado em Poliacetal⁵, possui encaixe para 3 LEDs na vertical (1 RGB, 1 infravermelho e 1 ultravioleta), todos estrategicamente direcionados para o sensor de intensidade luminosa e com o mínimo de ângulo, para evitar reflexão com o tudo de ensaio que, pelo mesmo motivo, é quadrado ao invés de redondo.

3.1.11 *Layout de placa*

Para o projeto da PCI, foram levantados os seguintes requisitos:

- Todos componentes deveriam ser SMD (*Surface Mounting Devices*), para otimização de espaço;
- Os conectores deveriam ser pequenos;
- A placa deveria ter as partes bem definidas (alimentação, sinal, comunicação e potência) para que ficasse fácil de identificar os problemas;
- A placa não poderia ocupar todo o espaço interno, devido ao espaço necessário para acomodação do poço.

Atendidos os requisitos acima, chegou-se a uma placa bastante compacta, o que facilitou o posicionamento dos furos de fixação do gabinete.

Optou-se por fixar o *display* junto à placa, com o barramento centralizado, pois isto faria com que a placa ficasse centralizada junto ao gabinete. Como o equipamento contém compartimento para baterias, optou-se em colocar o teclado logo abaixo do *display*, ou seja, acima do que seria a área do compartimento de bateria. A Figura 36 mostra a placa de circuito impresso, com a disposição dos componentes e conectores, e na Figura 37 podemos observar a disposição interna da PCI no gabinete.

⁵ Também conhecido como Acetal, é um polímero proveniente do Formaldeído, um plástico bastante resistente que possui absorção de umidade extremamente baixa, proporcionando uma ótima estabilidade dimensional.

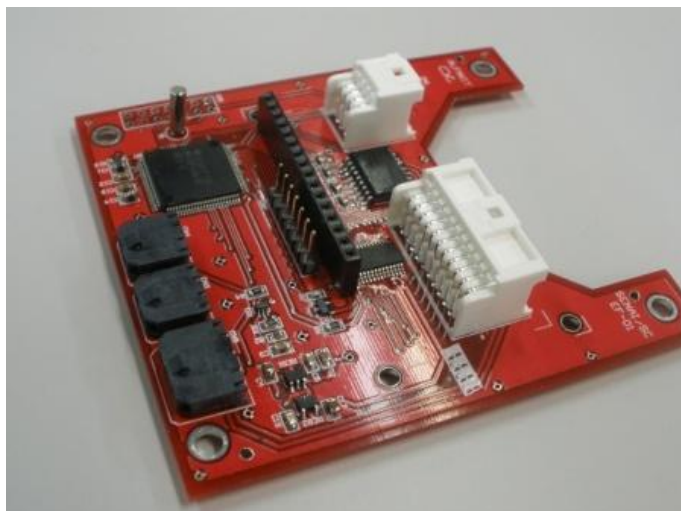


FIGURA 36 – Placa de circuito impresso

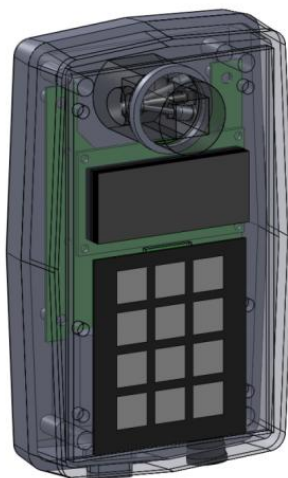


FIGURA 37– Disposição interna da PCI

3.2 DESENVOLVIMENTO DO *FIRMWARE*

O desenvolvimento do *firmware* do equipamento foi dividido em 3 grandes blocos de trabalho: o projeto de interface com o usuário, a definição da ferramenta de programação (*software*) e a estrutura e programação do *firmware*⁶.

3.2.1 Interface com o usuário / navegação

Após o estudo dos equipamentos da Alfakit e de alguns concorrentes, mais a análise das funções e tarefas que o novo equipamento deveria executar, adotaram-se as boas práticas em projeto de produto, para desenvolvimento da interface com o usuário.

É de suma importância no projeto de interfaces de produtos eletrônicos o uso de navegação (menus), pois estes servirão de guia para a programação do *firmware* de interface com o usuário. Como entrada para o desenvolvimento da interface tem-se: a árvore de funções, os critérios de interação e o *layout* provisório do produto. A árvore de funções mostra os desdobramentos dos menus principais até suas funções e opções de mais baixa hierarquia. Os critérios de interação pontuam os valores que levaram ao conceito do produto, tais como: público alvo, estética, tamanho, peso, custo, mobilidade, etc. O *layout* provisório apresenta os elementos da interface (botões, teclados, mostradores, etc.) sem preocupações iniciais com estética ou ergonomia. As saídas do projeto de interação são os diagramas de modos, que detalham a navegação dos menus e o *layout* revisado. O diagrama de modos deverá ser usado para a programação do *firmware* da interface, e o *layout* revisado fornecerá informações para a elaboração da interface física final do produto (LACERDA, 2010).

Desta forma, é apresentada a seguir a árvore de funções utilizada como entrada no desenvolvimento do projeto de interface:

⁶ Devido a direitos de propriedade industrial, não serão mostradas as linhas de código do *firmware*.

- Mede absorvância
 - Zerar
 - Medir
- Fábrica
 - Escolher curva
- Organizador
 - Selecionar
 - Criar
 - Editar
 - Excluir
- Desligar

A seguir serão detalhados os diagramas de modos e as saídas do projeto de interação. Na Figura 38 segue o diagrama de modos, explicando a navegação do menu principal.

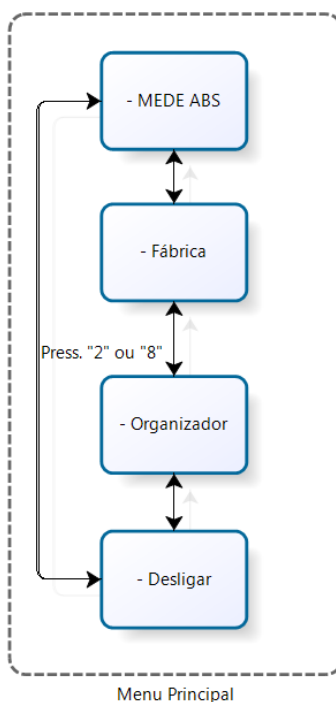


FIGURA 38 – Navegação do menu principal

O primeiro item do menu é o **Mede ABS** (Mede absorvância), detalhado na Figura 39. Este bloco tem como função fazer a medição da absorvância com um determinado comprimento de onda. Este comprimento de onda é fornecido pelo usuário, sendo normalmente usado para fazer o levantamento da curva característica de uma determinada substância que se deseja medir.

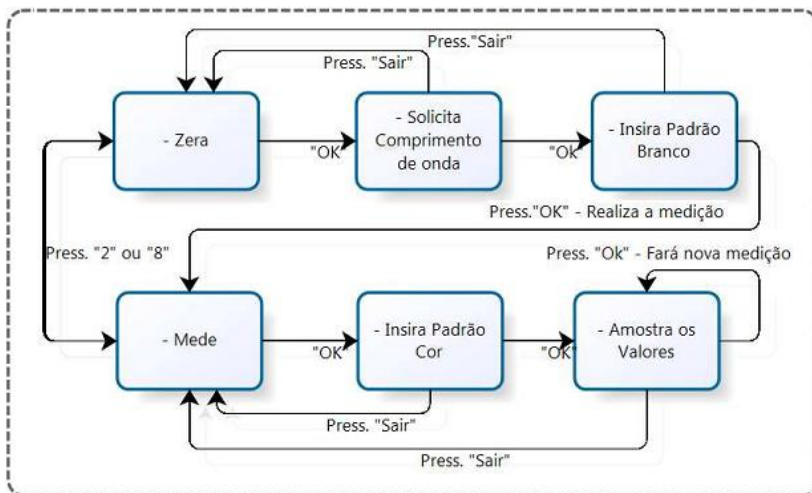


FIGURA 39 – Diagrama de modos do menu Mede ABS

Para utilizar esta opção o usuário deve zerar o aparelho, antes de fazer a medição, pois quando se realiza o zeramento, é informado o comprimento de onda que se deseja realizar a medição e, em seguida, medido o valor de zeramento (intensidade luminosa para o “padrão branco”) que será utilizado no cálculo da absorvância.

O resultado da medição **Mede ABS** é representado pelo bloco "Amostra os Valores", onde é mostrado o valor da absorvância medida, transmitância do zeramento e transmitância do padrão cor; podendo-se navegar entre os resultados, por meio das teclas de navegação (teclas 2 e 8).

Na Figura 40 temos o diagrama de modo do menu **Fábrica**. Neste menu são acessadas todas as curvas que foram gravadas pelo fabricante (Alfakit).

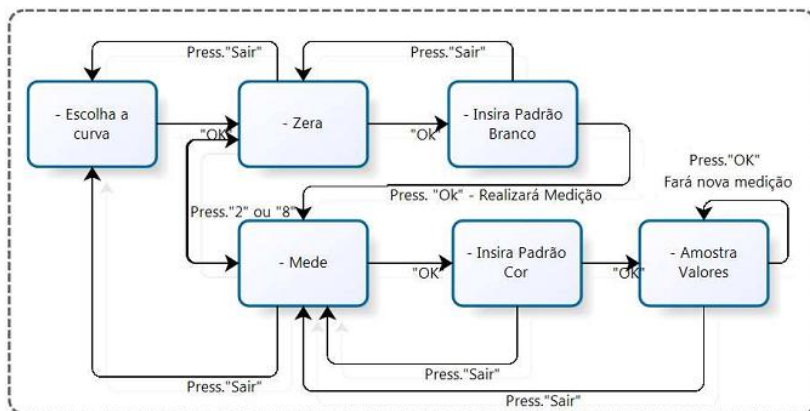


FIGURA 40 – Diagrama de modos no menu Fábrica

O método de realizar uma medição somente após o zeramento da ótica segue também para esta opção. As curvas gravadas pelos técnicos do fabricante visam garantir ao usuário curvas que já foram testadas, ou seja, para as curvas que vierem gravadas de fábrica (substâncias pré-definidas) é garantido o seu funcionamento.

O menu **Organizador** exemplificado na Figura 41, tem como finalidade organizar todas as curvas criadas pelos usuários e salvas na memória do equipamento.

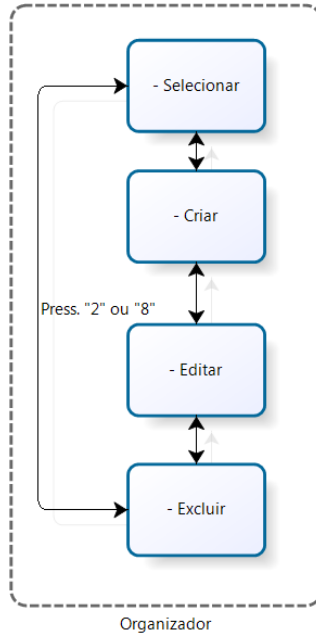


FIGURA 41 – Diagrama de modos do menu Organizador

Será detalhado agora os 4 itens do menu **Organizador**, começando pelo item **Selecionar**, mostrado na Figura 42.

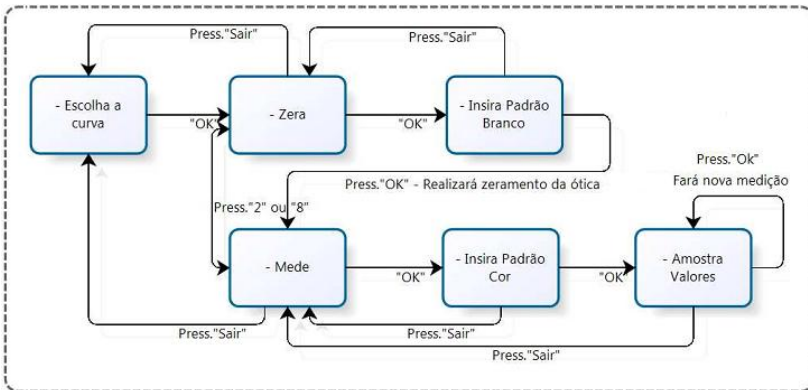


FIGURA 42 – Diagrama de modos do item Selecionar

Este item é praticamente igual a navegação do menu **Fábrica**, com a única diferença que as curvas usadas estão em sessões diferentes da memória, neste caso, é acessado somente as curvas que são salvas pelo usuário através do teclado.

Todas as curvas que se encontram disponíveis no item **Selecionar** são criadas com a opção **Criar**, mostrada na Figura 43.

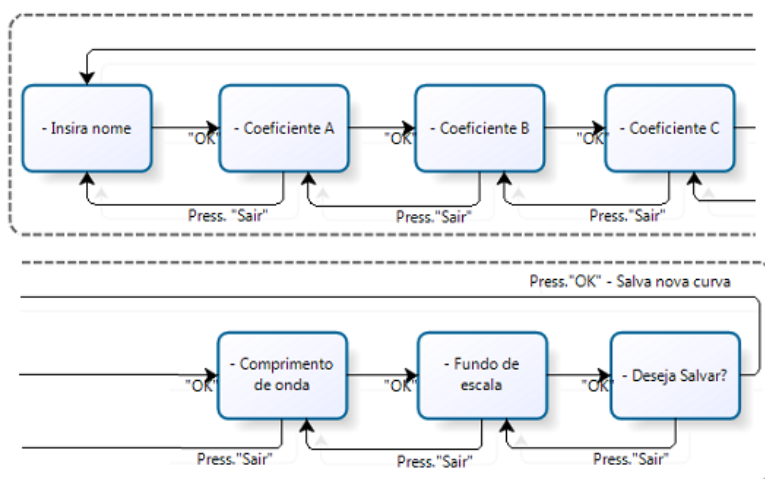


FIGURA 43 – Diagrama de modos do item Criar

Neste item é possível criar curvas para qualquer substância que se deseja medir. Para isto é necessário informar: o nome da substância, os coeficientes da equação característica, o comprimento de onda da substância que se deseja medir e o fundo de escala (que serve como ponto limite de linearidade da leitura de concentração). Leituras de concentração acima do fundo de escala são consideradas fora da faixa de operação.

A próxima opção, o item **Editar**, é usado para editar as curvas criadas pelo usuário. Sua navegação é um pouco mais complexa, como podemos observar na Figura 44.

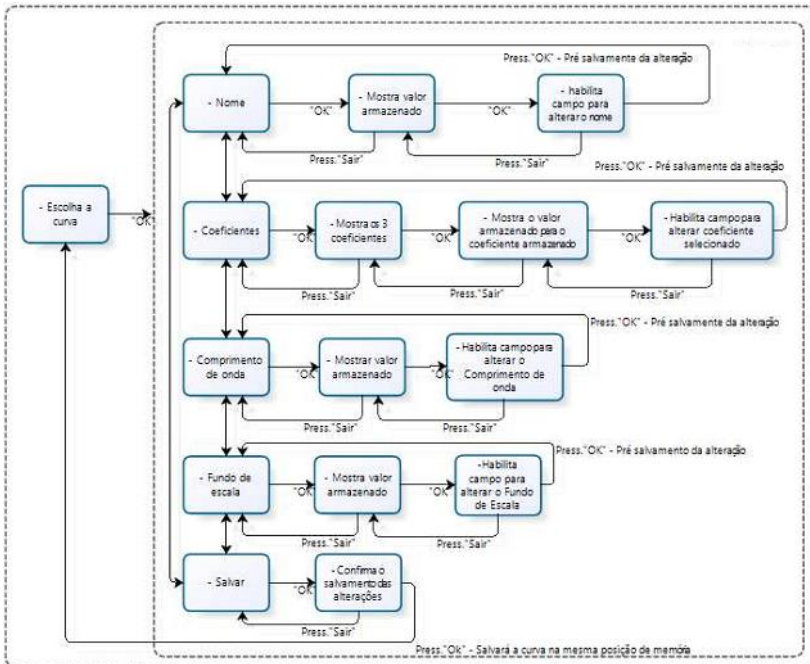


FIGURA 44 – Diagrama de modos do item Editar

A navegação deste item inicia-se escolhendo-se uma das curvas criadas pelo usuário; em seguida escolhe-se um dos itens a ser alterado: nome, coeficientes, comprimento de onda e fundo de escala; após este processo é necessário ir até a opção **Salvar** e realizar o armazenamento das alterações realizadas.

Caso sejam feitas alterações em uma curva e, em seguida, retorna-se para o tópico de escolha de curva, não irá ocorrer o armazenamento da curva, sendo necessário refazer as alterações e salvar.

A última opção do menu **Organizador** é o item **Excluir**; neste item o usuário pode excluir alguma curva que ele tenha criado e não deseja mais utilizar. Na Figura 45 segue o diagrama de modos usado neste item.

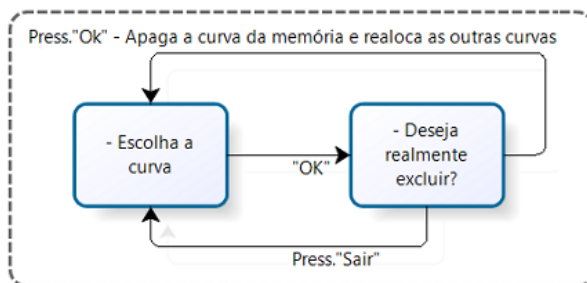


FIGURA 45 – Diagrama de modos do item Excluir

3.2.2 Ferramenta de programação

Os microcontroladores da família MSP430, da *Texas Instruments*, possuem uma boa quantidade de compiladores para a programação dos seus periféricos. Após testar alguns *softwares* de desenvolvimento, dois foram pré-selecionados, o IAR e do CCStudio (Figura 46).

O IAR tem como grande vantagem as funcionalidades, observadas no funcionamento do *software* com o microcontrolador; já o CCStudio possui grande praticidade de se programar, isto devido a plataforma e interface amigável do *Eclipse (Java)*.

Optou-se pelo uso do CCStudio, da *Texas Instruments*, pois a praticidade proporcionada pela plataforma *Java*, fez com que se ganhasse tempo na utilização e configuração do microcontrolador em uso. Além disso, o excelente suporte dado pelos representantes da *Texas Instruments* no Brasil, durante os pedidos de amostra, facilitou as negociações para aquisição da licença do CCStudio.

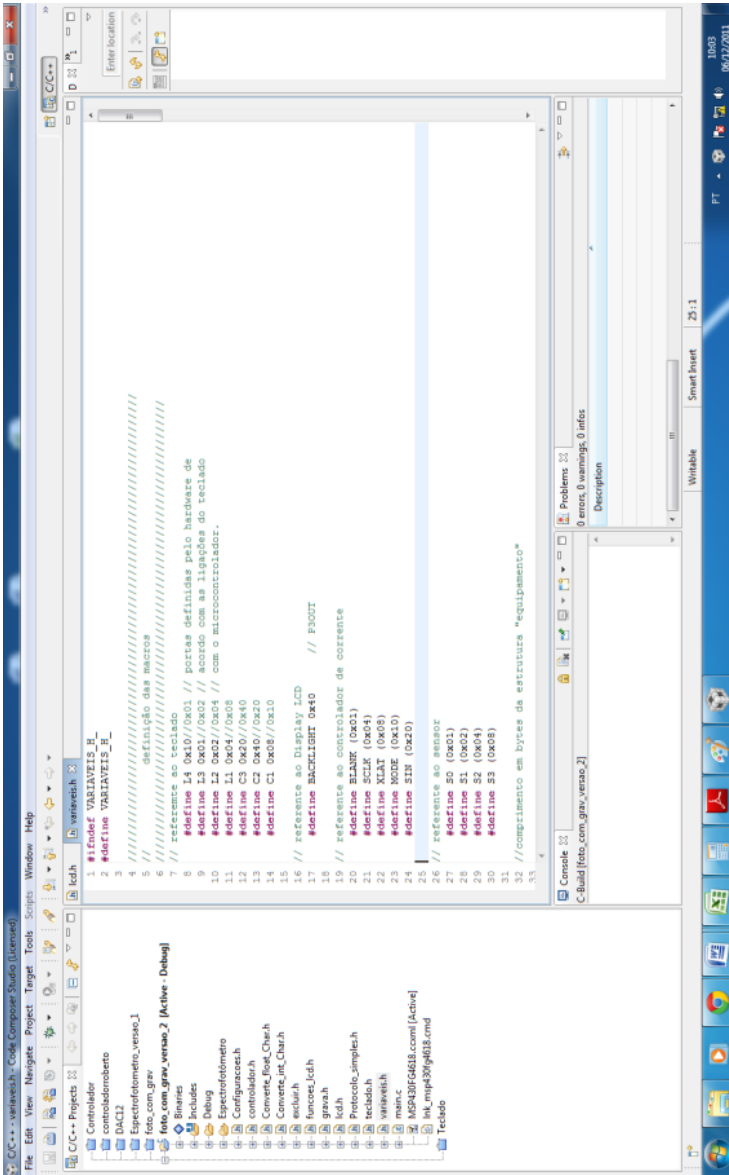


FIGURA 46 – Interface do software CCStudio

3.2.3 Estrutura do *firmware*

Assim que ficaram definidos os diagramas de modos de navegação do equipamento, eles serviram de entrada para o desenvolvimento do *firmware*. Como forma de organização, e já prevendo futuras manutenções de código, dividiu-se o programa nos seguintes blocos:

- Configurações
- Controlador
- Conversor de dados
- Excluir
- Funções LCD
- Grava
- LCD
- Protocolo simples
- Teclado
- Variáveis
- Main

Configurações:

Neste bloco ficam todas as informações de configurações de periféricos do microcontrolador. Inicia-se configurando o uso do oscilador da estrutura (8 MHz), em seguida configuram-se as portas a serem utilizadas e se será nelas usada alguma função em especial (pino com interrupção para leitura de frequência, PWM, etc.). Em seguida são configurados os registradores como: *Timers*, comunicação serial, PWM e interrupção para leitura de frequência; além disso, são inicializados todos os periféricos, deixando estes operando em baixo consumo.

Controlador:

Neste bloco ficam todas as funções que determinam o funcionamento do controlador dos LEDs.

Conversor de dados:

Convencionou-se que os dados recebidos pela comunicação serial deveriam ser tratados como variáveis do tipo *char*, assim, quando se desejava manipular estes dados para alguma operação matemática ou de decisão, usavam-se funções como *atoi* (converte de *char* para *int*) e *atof* (converte de *char* para *float*), para transformar de *char* para valores numéricos.

No entanto, após a manipulação destes resultados em que se desejava pegar este valor numérico e transformá-lo para *char* novamente, ao se tentar usar diretivas de manipulação de dados, percebeu-se que funções como *printf* consumiam muita memória RAM (*Random Access Memory*), com isso criou-se duas funções de conversão de dados, sendo estas: *Converte_float_Char* (converte *float* para *char*) e *Converte_int_Char* (converte *int* para *char*).

Main:

Neste bloco fica a função principal do programa, sendo este trecho responsável pela união de todos os blocos, contendo os tratamentos das interrupções e navegação de todo o menu, com exceção do sub-menu excluir.

Excluir:

Devido a algumas características de manipulação da memória *flash*, que exigia a manipulação de grandes quantidades de informações simultaneamente da memória RAM para a *Flash*, para serem tratadas e depois gravadas; o item **Excluir**, foi o único que gerou maior dificuldade no seu desenvolvimento.

Funções LCD:

Como existia uma grande quantidade de telas a serem mostradas pelo *display*, decidiu-se criar um bloco que tivesse todas as telas que seriam amostradas, isto facilitou a identificação no programa dos erros que aconteciam no funcionamento do *display*.

Grava:

Como este equipamento tem uma grande quantidade de informação a ser armazenada, foi necessário uma função que fizesse a manipulação de dados na memória, sendo composta por 3 funções:

- Escreve na memória
- Apaga memória
- Lê memória

Estas funções foram criadas para facilitar o rastreamento dos problemas encontrados no processo de gravar, apagar e ler da memória.

LCD:

Todas as funções para escrita no *display* se encontram neste bloco.

Protocolo Simples:

Devido à grande quantidade de informações manipulada durante a comunicação serial, optou-se por criar um bloco que ficasse responsável pelo tratamento destas informações, tanto daquelas que eram recebidas pelo computador, quanto das que eram enviadas em resposta aos dados recebidos.

Teclado:

Como se adotou a metodologia de varredura, para se conseguir adquirir as informações do teclado, viu-se a necessidade de criar um bloco que ficasse responsável por todo o tratamento de teclado.

Foram usadas 3 formas diferentes de utilização do teclado, são elas:

- Teclado de navegação (usado para se navegar pelos menus disponíveis);
- Teclado numérico (responsável por toda a inserção de dados que seja somente numérica);
- Teclado Alfanumérico (este tem seu funcionamento igual ao dos teclados de celulares, podendo-se inserir dados do tipo letra ou número).

Variáveis:

Neste bloco estão todas as variáveis globais do programa.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO *SOFTWARE* DE ALTO NÍVEL

Inicialmente não havia sido listado um *software* de alto nível como requisito de projeto, mas pela complexidade que a estrutura ganhou, viu-se a necessidade de desenvolver um *software*, cuja principal função seria a de inserir as curvas características de fábrica, além de configurar a quantidade de memória liberada para o usuário.

A empresa Alfakit já utilizava um *software* padrão para a configuração dos equipamentos da linha colorimétrica. Este mesmo *software* era utilizado pelos usuários finais para inserir novos dados no equipamento, sendo esta uma metodologia que se preferiu evitar. Para tanto, foi adotada uma metodologia em que o usuário poderia inserir dados pelo próprio equipamento, sendo então necessário somente um *software* de configuração, para os técnicos do fabricante.

Optou-se por utilizar o *Java* como plataforma de desenvolvimento deste novo *software*, ao invés do *Visual Basic*, utilizado no *software* antigo da Alfakit; pois o *Java* é um programa mais versátil e que pode ser utilizado em qualquer sistema operacional.

Como padrão de comunicação entre o *software* e o equipamento adotou-se a comunicação serial RS232, isto porque esta comunicação é bem robusta e de fácil manuseio, tanto para a programação em *Java* como para a programação de baixo nível (*firmware*).

Esta comunicação serial tem como finalidade informar ao equipamento seu número de série, quantidade de memória liberada para o usuário inserir curvas, versão do *firmware*, data e hora da configuração, as curvas com os padrões de fábrica; além de informar o nome do técnico responsável pela inserção dos dados.

3.3.1 Telas e funcionamento

A principal função do *software* é permitir que o fabricante faça um gerenciamento das curvas características das substâncias, previamente levantadas em laboratório e armazenadas em um arquivo de dados do aplicativo. A partir deste arquivo, os técnicos do fabricante, podem selecionar quais curvas vão ser gravadas no aparelho (máximo 100) e quanta memória (de 1 a 100 posições) será disponibilizada para que o usuário insira as suas próprias curvas, por meio do equipamento.

A tela principal do *software* é apresentada na Figura 47, onde se pode observar duas caixas de texto, que têm a função de listar as curvas características; a da esquerda, mostra as curvas de fábrica gravadas no banco de dados; e a da direita, mostra as curvas de fábrica inseridas no equipamento.

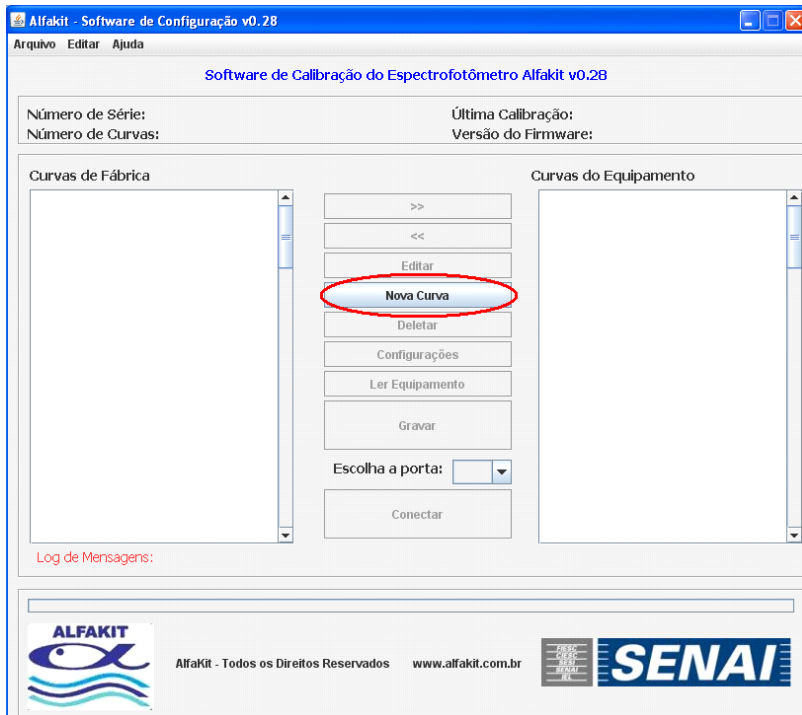


FIGURA 47 – Tela principal do software

Para a criação de uma nova curva de fábrica, uma vez que os parâmetros já tenham sido levantados, basta clicar no botão **Nova Curva** e inserir o nome da curva, os parâmetros A, B e C da função $f(x) = Ax^2 + Bx + C$ (que descreve a curva característica da substância), o comprimento de onda (λ) que será utilizado na medição e o fundo de escala⁷ (concentração em ppm), conforme Figura 48.

Como veremos no Capítulo 4, é característica dos espectrofotômetros, possuírem uma resposta linear $f(x) = Bx + C$, com origem em zero (0, 0), desta forma, A e C costumam ser configurados em zero e a inclinação da curva é dada por B. O modelo de curva quadrática foi mantido neste software, a pedido

⁷ Ponto onde a curva característica da substância deixa de ser linear.

da Alfakit, como forma de padronização com os demais equipamentos e softwares da empresa.

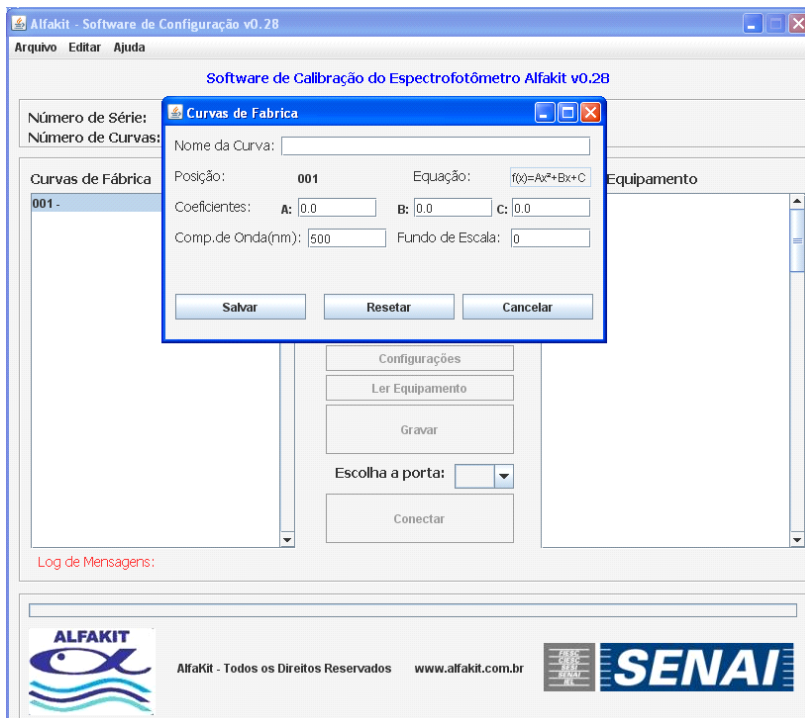


FIGURA 48 – Tela de criação de nova curva

Uma vez criadas as curvas pelo fabricante, elas poderão ser gerenciadas pelos botões >>, <<, **Editar** e **Deletar**. A função destes botões, assim como dos demais, é descrita na TABELA 4.

TABELA 4 – Descrição dos botões do software

Botão	Descrição
>>	Enviar curva do banco de dados para o equipamento.
<<	Enviar curva do equipamento para o banco de dados.
Editar	Editar uma curva.
Nova Curva	Inserir nova curva no banco de dados.
Deletar	Apagar curva selecionada, do equipamento ou banco de dados.
Configurações	Inserir ou alterar as configurações do equipamento que serão gravadas.
Ler Equipamento	Fazer leitura das curvas e dados de configuração que estão na memória do equipamento.
Gravar	Gravar na memória do equipamento a seleção de curvas da caixa de texto da direita, assim como sua configuração.
Conectar	Estabelecer conexão serial entre o computador e o equipamento.

Selecionando-se uma curva de fábrica e clicando-se no botão >>, esta curva é enviada para o equipamento, conforme mostra a Figura 49.

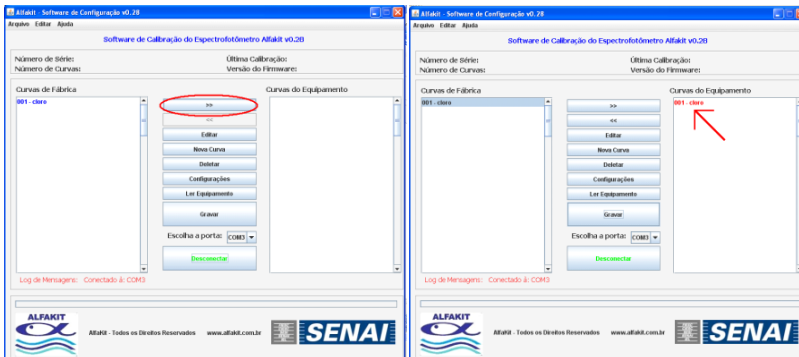


FIGURA 49 – Exemplo de envio de curva para o equipamento

Clicando-se no botão **Configurações**, pode-se checar se os dados de configuração do equipamento estão corretos e editá-los, caso seja necessário. O **Número de Série** permite entrada alfanumérica, o **Nº de Curvas Liberadas** indica a quantidade de curvas o usuário poderá criar e gravar na memória do equipamento. O **Nome do Técnico** completa a janela de configuração, apresentada na Figura 50.

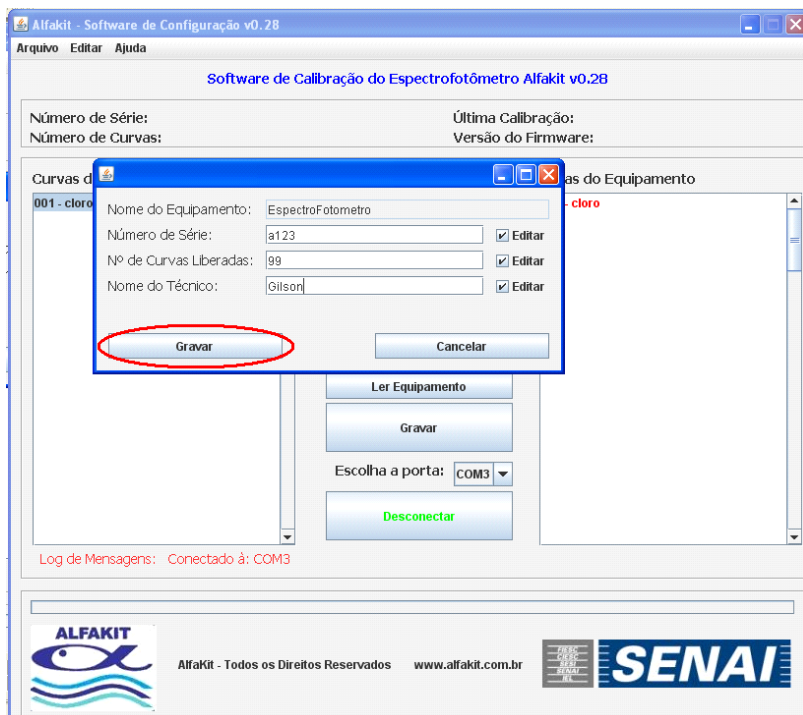


FIGURA 50 – Janela de configuração

3.4 MÉTODOS EMPREGADOS

No desenvolvimento deste trabalho, vários métodos e ensaios foram realizados para validar os conceitos e técnicas empregadas no equipamento. Dentre esses métodos destacam-se a metodologia de medição da concentração, baseada na Lei

de Lambert–Beer; os ensaios de mistura de cor dos LEDs, para produção dos feixes de luz com diversos comprimentos de onda; e o procedimento de calibração do sensor de comprimento de onda, utilizado nos ensaios de mistura de cor.

3.4.1 Métodos de medição

Uma vez levantada a tabela de mistura de cores, para varredura do espectro de 420 nm a 860 nm, deu-se início ao processo de medição da concentração (C), absorvância (A) e transmitância (T).

Conforme visto no Capítulo 2, os cálculos da transmitância e absorvância dependem unicamente da intensidade de luz incidente e transmitida. Já a concentração depende também da distância percorrida pela luz (ℓ) e do coeficiente de absorção (α). Como cada substância possui o seu próprio α , e o ℓ pode mudar de um equipamento para outro, faz-se necessário adotar uma metodologia padrão de medição.

Esta metodologia consiste em utilizar-se no mínimo 2 padrões de concentração conhecidos da mesma substância e, por meio da medição da absorvância desses padrões, calcula-se um fator de correção (K), conforme deduzido nas equações [7] e [8].

$$A = \alpha \cdot \ell \cdot C' \rightarrow \alpha \cdot \ell = \frac{A}{C'} \rightarrow \frac{1}{\alpha \cdot \ell} = \frac{C'}{A}$$

[7]

$$K = \frac{1}{\alpha \cdot \ell} = \frac{C'}{A}$$

[8]

Uma vez determinado o K, calcula-se a concentração da substância utilizando-se a equação [9]:

$$C = K \cdot A$$

[9]

Onde:

A = Absorbância;

C' = Concentração Padrão (mol/L);

C = Concentração Medida (mol/L);

l = Distância percorrida pela luz (cm);

α = Coeficiente de absorção (L/mol.cm);

K = Fator de correção (mol/L).

Para validar esta metodologia, foram realizados diversos ensaios, entre eles, o do Ferro II e o do Cloro DPD.

Para o ensaio do Ferro II, conforme TABELA 2, utiliza-se $\lambda = 480$ nm. Os padrões de concentração utilizados foram: 0,5 ppm, 1 ppm e 2 ppm. Para estes padrões de concentração do Ferro II, primeiro mede-se a transmitância do “padrão branco” (tubo de ensaio com água deionizada, pois esta substância não absorve a luz incidente) e depois a transmitância do “padrão cor” (tubo de ensaio com as concentrações conhecidas). Em seguida, calcula-se a absorbância e, para o fator de correção, utiliza-se uma média aritmética entre dois pontos. Por fim, calcula-se a concentração utilizando K. Os dados deste ensaio são mostrados na TABELA 5.

TABELA 5 – Ensaio do Ferro II, utilizando $\lambda = 480$ nm

<i>Ferro II – $\lambda = 480$ nm</i>						
C – Padrão (ppm)	I0	I1	T	A	K	C (ppm)
0,5	665	598	0,899	0,046	10,738	0,495
1	714	575	0,805	0,094	10,686	1,009
2	691	450	0,651	0,186	10,686	1,990

Da Lei de Lambert–Beer (SKOOG, 2005) sabe-se que para o dobro de concentração da mesma substância, têm-se também o aumento dobrado da absorbância. O que podemos comprovar com o experimento acima.

Com estes valores de concentração (0,5 ppm, 1 ppm e 2 ppm) e suas respectivas medições de absorbância é possível traçar uma curva característica da substância; e desta curva se

tira duas características importantes: **linearidade** e **equação característica**. De acordo com Skoog (2005), idealmente esta linearidade tem de ser igual a 1, no entanto, para as ópticas de hoje em dia, aceita-se um valor de linearidade entre 1 e 0,9.

Para o ensaio do Cloro DPD, utilizou-se o comprimento de onda $\lambda = 515 \text{ nm}$ e, além da medição da concentração, foram realizados testes de repetibilidade, registrando-se os resultados na TABELA 6.

TABELA 6 – Ensaio do Cloro DPD, utilizando $\lambda = 515 \text{ nm}$

<i>Cloro DPD – $\lambda = 515 \text{ nm}$</i>					
Padrão (ppm)	A 1	A 2	A 3	A Média	C (ppm)
0,5	0,043	0,041	0,041	0,042	0,565
1	0,087	0,086	0,085	0,086	1,048
2	0,176	0,175	0,176	0,175	2,000
3	0,249	0,248	0,247	0,248	2,966

Levantados os valores de absorvância média e calculadas as respectivas concentrações, foi então traçada a curva de resposta Concentração x Absorvância. Junto a esta curva foi traçada uma curva de tendência, que representa a **equação característica** para a ótica que esta sendo utilizada. Pode-se também verificar a **linearidade** da reta traçada, conforme visualizado na Figura 51.

$$\text{Equação Característica: } y = 0,0846.x$$

$$\text{Linearidade} = 0,9966$$

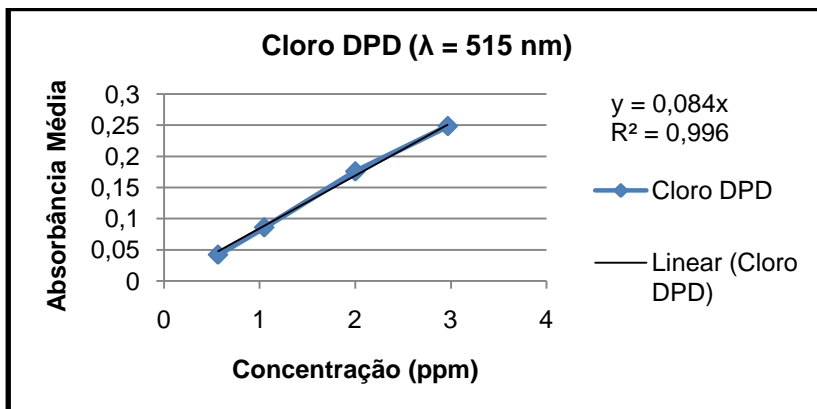


FIGURA 51 – Gráfico Concentração x Absorbância (Cloro DPD)

3.4.2 Ensaios de mistura de cor

Após definida a estrutura de controle e o restante do hardware, foi necessário submeter esta estrutura a uma série de ensaios e testes, a fim de validar o seu funcionamento (precisão, erro e repetibilidade). Estes ensaios tiveram papel importante no entendimento do comportamento da mistura de cor dos LEDs com utilização do controlador.

Foram testados 3 modelos de LEDs com características diferentes (ângulos de saída da luz, formato, dominância entre cor e lumens emitidos por LED). A TABELA 7 mostra as principais diferenças entre os LEDs escolhidos para os ensaios.

TABELA 7 – Comparativo de LEDs

<i>LEDs Testados</i>	<i>AVAGO</i>	<i>Vishay</i>	<i>Bivar</i>
Intensidade (mcd)	620/900/280	140/400/140	600/800/350
Ângulo	120°	60°	140°
Corrente (mA)	30	30	20
Comprimento de onda (nm)	621/528/470	625/525/470	628/528/470

Ao observar esta tabela é possível perceber que existem diferenças entre eles, desde a intensidade luminosa, ao comprimento de onda característico. Após testar os 3 modelos de LEDs, verificou-se que o modelo da Bivar, por possuir um ângulo de abertura maior e uma boa intensidade luminosa, conseguia misturar melhor as cores que os demais, sendo então o selecionado para compor o sistema óptico do equipamento.

Definido o LED RGB, iniciaram-se os testes de funcionamento do controlador para verificar se este conseguiria misturar dois comprimentos de onda, originando um terceiro. Para esta validação utilizou-se o kit desenvolvimento WS-7.56-PCBA2, que realiza a medição do comprimento de onda fornecendo uma resposta em tensão. A estrutura de teste montada para as medições continham também um poço, cuja finalidade era de fazer uma câmara escura para realização das medições, além de suporte e alinhamento do LED.

Nos primeiros ensaios verificou-se que o kit desenvolvimento era sensível às oscilações de alimentação e estas, por sua vez, geravam oscilações também em sua saída. Com isso, houve a necessidade de isolar o kit desenvolvimento da rede elétrica. Foi então elaborada uma alimentação de +18 e - 18 V, usando baterias de 9 V.

Posteriormente, houve a necessidade de usar outro sensor de comprimento de onda, devido à limitação⁸ do sensor que se encontrava no kit desenvolvimento não realizar medições para comprimentos de onda menores que 480 nm. Foi necessário, então, montar uma estrutura similar ao do kit desenvolvimento (Figura 52), com um novo sensor, WS-7.56-TO5, também da *Pacific Silicon Sensor*, idêntico ao anterior, mas com sensibilidade a partir de 350 nm.

⁸ Mesmo com esta limitação, optou-se por utilizar este kit desenvolvimento no início do projeto, para aprender de forma mais rápida como o sensor de comprimento de onda funcionava.

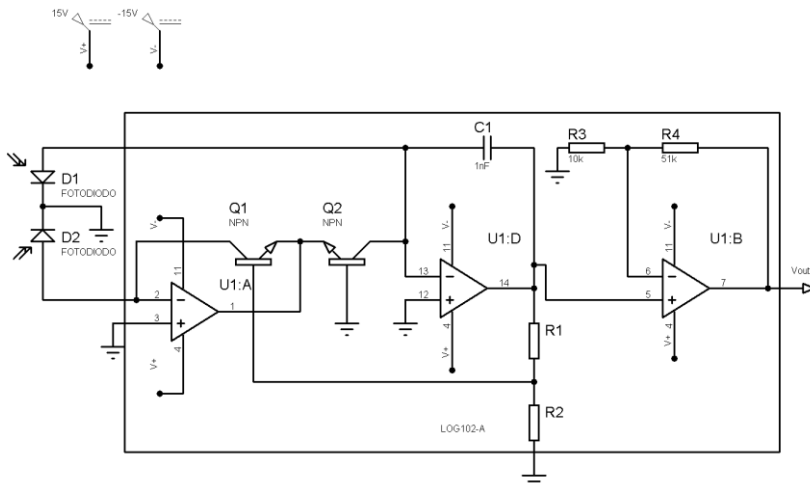


FIGURA 52 – Diagrama elétrico similar ao kit desenvolvimento

Como o LED RGB possui 3 LEDs com comprimentos de onda diferentes, para a realização dos testes, utilizou-se um método heurístico, que consistia na mistura de somente 2 LEDs por vez (azul e verde, verde e vermelho e azul e vermelho). Era mantido um LED ligado enquanto variava-se o outro de 0 % a 100 % e, em seguida, invertia-se a ordem.

Como a aplicação compreendia somente variação de corrente para todos os dados enviados para o registrador do controlador, variava-se apenas o registrador de *dot correction*, mantendo-se em 100 % o registrador de escala de cinza.

Utilizando a metodologia acima, misturou-se as cores duas a duas, com a finalidade de se obter as combinações que permitissem uma variação de comprimento de onda de 420 nm a 860 nm, com resolução 1 nm. Para varrer esta faixa foi necessário acrescentar mais um LED para a faixa infravermelha (870 nm) e outro para a ultravioleta (400 nm), o que acabou ampliando a faixa de operação do equipamento para 400 nm a

870 nm. Um trecho⁹ do resultado deste ensaio é apresentado na TABELA 8.

Como o microcontrolador MSP430FG4618 possui 8 Kb de memória de programa (RAM) e 116 Kb de memória de dados (*Flash*), optou-se então por criar vetores que estariam encarregados de armazenar valores de 0 até 63 (do registrador *dot correction*), representando as combinações de cores seleccionadas após o ensaio.

TABELA 8 – Resposta do sensor de comprimento de onda

Controle do LED 470 nm (Bits)	Controle do LED 528 nm (Bits)	Tensão Sensor (V)	λ medido (nm)	Controle do LED 470 nm (Bits)	Controle do LED 528 nm (Bits)	Tensão Sensor (V)	λ medido (nm)
63	0	6,1	470,47
63	1	5,98	471,77	63	50	4,44	493,00
63	2	5,87	473,00	63	51	4,43	493,17
63	3	5,77	474,15	63	52	4,415	493,42
63	4	5,68	475,22	63	53	4,41	493,51
63	5	5,6	476,19	63	54	4,395	493,76
63	6	5,51	477,31	63	55	4,385	493,93
63	7	5,46	477,95	63	56	4,38	494,02
63	8	5,4	478,72	63	57	4,37	494,19
63	9	5,35	479,38	63	58	4,36	494,36
63	10	5,3	480,04	63	59	4,35	494,53
63	11	5,25	480,71	63	60	4,34	494,70
63	12	5,2	481,40	63	61	4,34	494,70
63	13	5,16	481,95	63	62	4,33	494,88
63	14	5,12	482,51	63	63	4,32	495,05
63	15	5,08	483,08	62	63	4,31	495,22
63	16	5,05	483,50	61	63	4,3	495,40
63	17	5,02	483,94	60	63	4,29	495,57
63	18	4,99	484,37	59	63	4,28	495,75
63	19	4,96	484,81	58	63	4,26	496,10
63	20	4,93	485,25	57	63	4,25	496,28
63	21	4,9	485,70	56	63	4,24	496,45
63	22	4,88	486,00	55	63	4,225	496,72
...

⁹ Em virtude de direitos de propriedade industrial, será apresentada somente uma parte dos resultados.

3.4.3 Métodos de aferição do sensor de comprimento de onda

Definido o sensor de comprimento de onda, antes dos ensaios de mistura de cor, foi necessário calibrar este sensor, pois ao comparar os valores medidos com a curva característica especificada na folha de dados do fabricante, notou-se que os valores medidos eram diferentes dos valores desta curva.

Após detalhado estudo deste componente e feito um contato com a *Pacific Silicon Sensor*, fabricante do sensor, verificou-se que a resposta dele é bastante sensível a questões ambientais, tais como temperatura e umidade do ar. Sendo assim, uma nova curva de resposta deveria ser levantada para as características ambientais do Laboratório de Pesquisa Aplicada do SENAI.

Para o ensaio de levantamento da curva de resposta do sensor, foram utilizados 8 LEDs com λ conhecido, estes compunham 8 pontos diferentes e espaçados da curva de interesse.

Utilizando-se o poço do equipamento como câmara escura, os LEDs foram alinhados, um a um, com o sensor de comprimento de onda, e acionados via controlador com escala de cinza e *dot correction* em 100 %. Os λ dos LEDs utilizados, assim como os valores de resposta em tensão do sensor, foram registrados, dando origem a TABELA 9.

TABELA 9 – Resposta do sensor de comprimento de onda

LED	λ (nm)	Sensor (V)
1	400	12,71
2	470	6,1
3	528	3
4	628	-0,473
5	635	-0,538
6	750	-3,34
7	760	-3,388
8	870	-6,05

Os dados da TABELA 9 foram inseridos em uma planilha, a partir da qual se traçou um gráfico de linha da curva característica. Calcularam-se diversas linhas de tendência para o gráfico plotado, sendo que aquela que melhor representava os pontos foi uma linha polinomial de ordem 4. A Figura 53 mostra o gráfico do ensaio, assim como a sua linha de tendência.

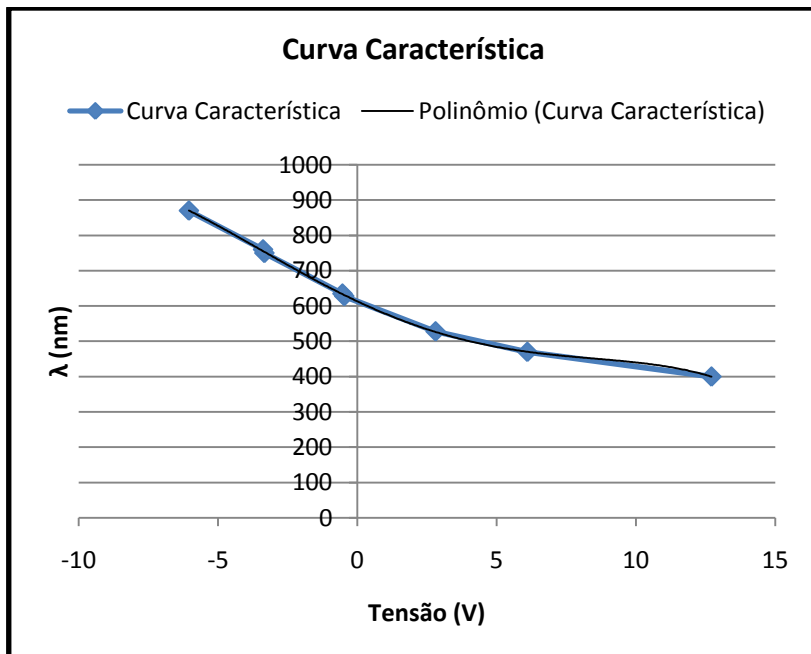


FIGURA 53 – Gráfico da curva de resposta do sensor de comprimento de onda

Da linha de tendência podemos tirar os coeficientes do polinômio e montar a equação [10], que representa a resposta do sensor de comprimento de onda para a luz incidente.

$$y = -0,011x^4 + 0,11x^3 + 1,974x^2 - 37,02x + 613,1$$

[10]

4 RESULTADOS

Para analisar as medições realizadas pelo produto desenvolvido, uma série de ensaios foi realizada, contando com a colaboração de químicos da Alfakit e com o objetivo de comparar as respostas de um espectrofotômetro de LED, com um espectrofotômetro de prisma certificado (ver ANEXO D – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO – DR 2500). Para estes ensaios o equipamento de LED (produto deste trabalho) estava equipado com um arranjo de três LEDs, um ultravioleta ($\lambda = 400$ nm), da Bivar, um RGB ($\lambda = 470$ nm, 528 nm, 628 nm), também da Bivar e um infravermelho ($\lambda = 870$ nm), da Roithner, alinhados na vertical.

Foram utilizados como referências para os dois aparelhos, padrões metrológicos rastreados da *Merck Chemicals* (ver ANEXO C – CERTIFICADO DE AFERIÇÃO DOS PADRÕES DA MERCK) e dois kits de padrões de concentrações de substâncias da Alfakit, um de Sulfeto e outro de Cloro DPD.

Ao todo foram realizados três ensaios, iniciando com o levantamento da absorbância dos padrões rastreados da *Merck*, seguindo com a realização de uma varredura, utilizando os mesmos padrões (somente padrões amarelo e verde) e, por último, a medição dos kits de substâncias da Alfakit.

4.1 ENSAIO COM PADRÕES METROLÓGICOS RASTREADOS

O objetivo principal deste ensaio foi verificar a linearidade de resposta do equipamento desenvolvido e, para isso, foram utilizados os padrões metrológicos rastreados da *Merck*.

Os padrões da *Merck* utilizados nos ensaios possuem quatro concentrações diferentes cada um (1, 2, 3 e 4 ppm). Como cada padrão tem um comprimento de onda diferente como resposta, foi possível analisar os comportamentos dos espectrofotômetros para os seguintes comprimentos de onda: 445 nm (amarelo), 525 nm (rosa), 660 nm (verde).

As primeiras medições foram realizadas com o padrão amarelo e, para compor a luz de $\lambda = 445$ nm, foi realizada uma

combinação dos LEDs de $\lambda = 400$ nm e $\lambda = 470$ nm, onde os resultados são apresentados na TABELA 10.

TABELA 10 – Leituras para o padrão rastreado amarelo

<i>Padrão</i>	λ (nm)	<i>Concentração</i>	<i>Absorbância LED</i>	<i>Absorbância Prisma</i>
Amarelo	445	1	0,2963	0,198
		2	0,71144	0,494
		3	1,9253	1,003
		4	1,4794	1,488

Embora o caminho óptico dos equipamentos seja diferente, resultando assim numa absorbância diferente, o espectro de prisma tem por objetivo servir de referência, facilitando a visualização da Lei de Lambert–Beer.

Com os valores medidos notou-se que, para essa região de medição ($\lambda = 445$ nm), os valores obtidos eram maiores que os lidos pelo espectrofotômetro de prisma. Além deste fator, foi possível observar uma anomalia na terceira medição, em que o valor de absorbância lido é de 1,9253, modificando a linearidade que deveria ser próxima de 1 para 0,696. Na Figura 54, segue o gráfico contendo as curvas características medidas para este padrão.

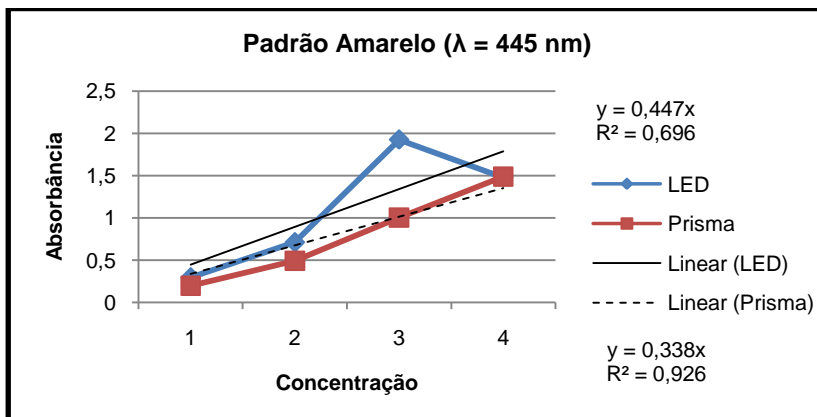


FIGURA 54 – Curva Concentração x Absorbância (padrão amarelo)

Depois de levantados os valores de absorbância para este padrão (amarelo), percebeu-se a necessidade de realizar alguns ajustes quanto à intensidade do LED ultravioleta ($\lambda = 400 \text{ nm}$), com a finalidade de corrigir o ponto fora da curva, buscando deixar mais linear a resposta do equipamento nesta faixa de emissão, porém, em virtude do prazo de finalização do projeto, este ajuste ficou para trabalhos futuros.

Analizadas as medições com o padrão amarelo, partiu-se para os testes com o padrão rosa ($\lambda = 525 \text{ nm}$), onde foi utilizada uma combinação dos LEDs de $\lambda = 470 \text{ nm}$ e $\lambda = 528 \text{ nm}$. Os resultados podem ser observados na TABELA 11.

TABELA 11 – Leituras para o padrão rastreado rosa

Padrão	λ (nm)	Concentração	Absorbância LED	Absorbância Prisma
Rosa	525	1	0,15097	0,209
		2	0,31962	0,495
		3	0,61573	0,997
		4	0,89531	1,48

Diferentemente da resposta na região de $\lambda = 445$ nm, nota-se que nesta região de comprimento de onda ($\lambda = 525$ nm), o sistema com LED possui linearidade de 0,9487, melhor até que os 0,93 de linearidade do espectro de prisma.

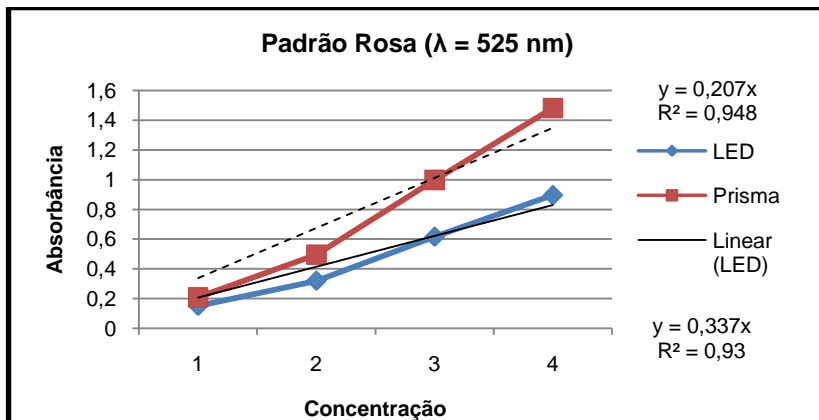


FIGURA 55 – Curva Concentração x Absorbância (padrão rosa)

Por fim, iniciaram-se os testes com o padrão verde ($\lambda = 660$ nm), onde foi utilizada uma combinação dos LEDs de $\lambda = 628$ nm e $\lambda = 870$ nm. Os resultados podem ser observados na TABELA 12.

TABELA 12 – Leituras para o padrão rastreado verde

Padrão	λ (nm)	Concentração	Absorbância LED	Absorbância Prisma
Verde	660	1	0,07589	0,085
		2	0,17838	0,226
		3	0,36533	0,444
		4	0,46779	0,654

Analisando-se os dados da TABELA 12, pode-se notar uma diferença entre os equipamentos em torno de 30 %, devido à diferença de caminho óptico que cada um possui. Na Figura 56

tem-se o gráfico da medição do padrão verde que mostra novamente que o espectro de LED possui nesta faixa, uma linearidade melhor que a do espectro de prisma, 0,9514 contra 0,9323, respectivamente.

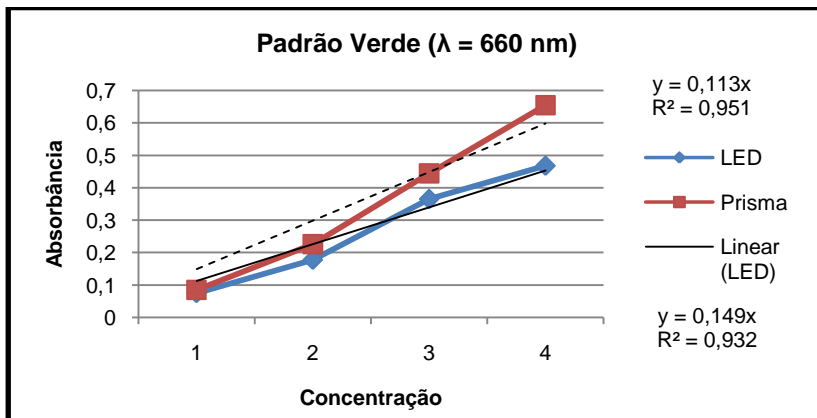


FIGURA 56 – Curva Concentração x Absorbância (padrão verde)

Ao final deste ensaio verificou-se que, com exceção da faixa do ultravioleta, o espectrofotômetro de LED desenvolvido apresentou uma melhor resposta (quanto a linearidade) quando comparado um espectrofotômetro de prisma (DR 2500 da Hach).

4.2 ENSAIO DE VARREDURA

Ao contrário do ensaio anterior que visava a linearidade de resposta do equipamento, este ensaio teve como objetivo verificar o comportamento do sistema óptico com LED, utilizando o procedimento da varredura do espectro de luz de 400 a 800 nm e a medição da absorbância para os padrões da Merck, amarelo e verde, na concentração 3.

TABELA 13 – Resultados da absorvância para varredura de espectro

λ (nm)	<i>Padrão Amarelo</i>	<i>Padrão Verde</i>
400	1,3698	1,635
420	0,3912	0,07361
440	1,9008	1,522
460	0,75631	0,41613
480	0,39317	0,0868
500	0,23205	0,07022
520	0,07457	0,03923
540	0,03195	0,04483
560	0,04642	0,09273
580	0,01301	0,14664
600	0,01414	0,25514
620	0	0,44104
640	0,00046	0,41896
660	0,00046	0,34586
680	0,00046	0,29578
700	0,00046	0,27325
720	0,00046	0,25466
740	0,00046	0,2363
760	0,00046	0,21972
780	0,00046	0,21
800	0,00046	0,2095

Para um melhor entendimento dos dados que se encontram na

TABELA 13, foram levantadas duas curvas conforme o gráfico da Figura 57, que representam o comportamento do sistema óptico utilizado para estes padrões.

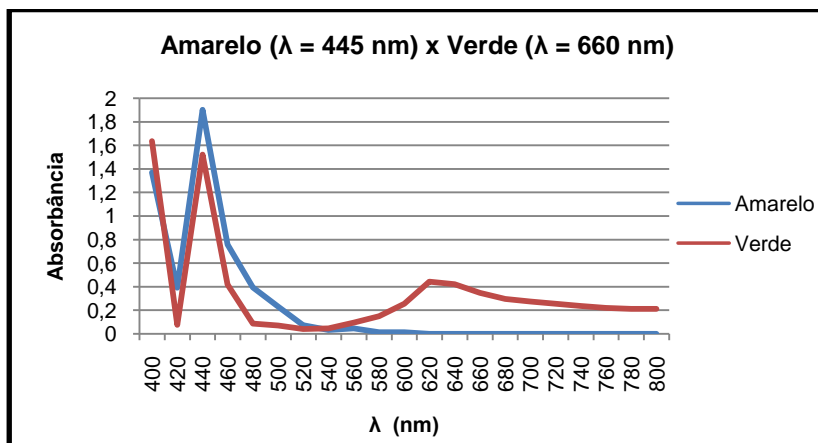


FIGURA 57 – Resposta característica do sistema óptico a LED

No gráfico da Figura 57 é possível observar uma anomalia no comportamento do sistema óptico na região entre 400 nm e 470 nm para ambos os padrões (amarelo e verde), justamente onde deveria haver somente um pico de absorbância do padrão amarelo ($\lambda = 445$ nm). Como já comentado anteriormente, o equipamento requer alguns ajustes no sistema óptico nesta faixa, mais precisamente um acerto na intensidade dos LEDs que permita uma melhora na resposta do sistema. Já na faixa de 600 nm a 680 nm, o comportamento do equipamento ficou dentro do esperado, pois apresentou um pico de absorbância para o padrão verde ($\lambda = 660$ nm).

Para complementar os ensaios, um levantamento do espectro de emissão dos LEDs foi realizado, conforme mostrado na Figura 58, demonstrando que o equipamento não possui nenhuma faixa do espectro de interesse, sem intensidade luminosa suficiente para realização das medições.

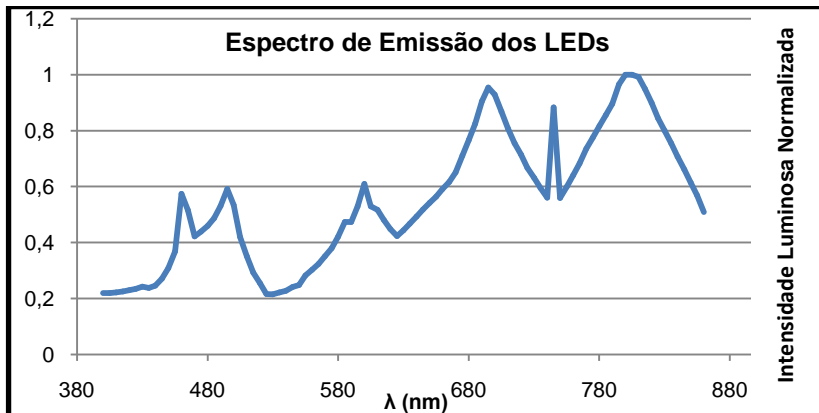


FIGURA 58 – Espectro de emissão dos LEDs do equipamento desenvolvido

4.3 ENSAIO COM PADRÕES DA ALFAKIT

Devido à importância da linearidade de resposta do equipamento para a medição dos parâmetros de absorvância e concentração, novos ensaios foram feitos, agora utilizando os padrões de Cloro DPD e Sulfeto, ambos produzidos e fornecidos pela empresa Alfacit, e aferidos por um espectrofotômetro de prisma. Conforme TABELA 2, o Cloro DPD tem resposta ao comprimento de onda de 515 nm, e o Sulfeto a $\lambda = 660$ nm.

Os padrões de Cloro DPD, foram produzidos nas seguintes concentrações: 0,25, 0,5, 1, 2 e 3 ppm. Na TABELA 14 pode-se observar os valores medidos de absorvância e concentração com o espectrofotômetro de LED.

TABELA 14 – Leituras para o padrão de Cloro DPD

Substância	λ (nm)	Concentração Padrão	Absorvância LED	Concentração LED
Cloro DPD	515	0,25	0,00961	0,1165693
		0,5	0,03161	0,3834293
		1	0,07951	0,9644563
		2	0,16735	2,0299555
		3	0,24814	3,0099382

É importante lembrar, que o cálculo da concentração medida, depende da equação que é tirada do gráfico (Absorbância LED x Concentração Padrão).

Observa-se que os valores de concentração medidos no início da escala são menores que os especificados pelo padrão, no entanto, mesmo com esta diferença, a linearidade para esta curva é de 0,9942. A Figura 59 representa graficamente os dados levantados com o padrão Cloro DPD.

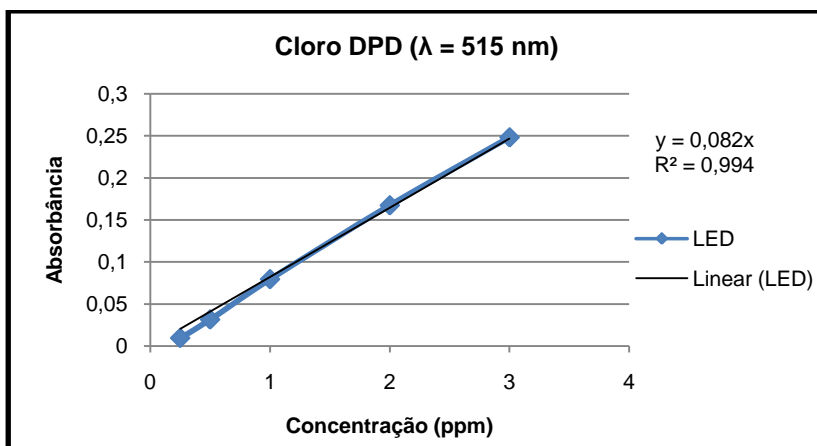


FIGURA 59 – Curva característica do padrão de Cloro DPD

Para a segunda medição, utilizou-se o padrão de Sulfeto ($\lambda = 660 \text{ nm}$), nas concentrações 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8 ppm, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 15 e Figura 60.

TABELA 15 – Leituras para o padrão de Sulfeto

Substância	λ (nm)	Concentração Padrão	Absorbância LED	Concentração LED
Sulfeto	660	0,2	0,08879	0,20998835
		0,4	0,18264	0,4319436
		0,6	0,25287	0,59803755
		0,8	0,33015	0,78080475

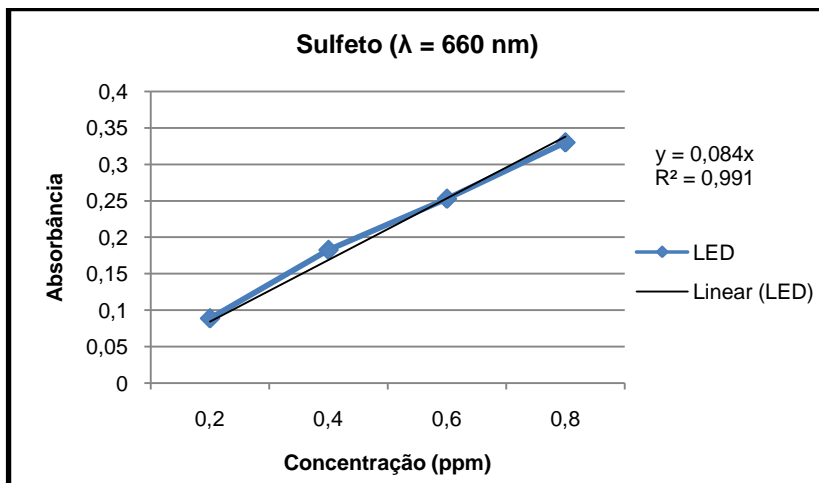


FIGURA 60 – Curva característica do padrão de Sulfeto

Com a equação obtida a partir da curva levantada na Figura 60, foi possível determinar as concentrações medidas. É interessante notar que entre o valor padrão e o valor calculado, houve pouca diferença. Além disso, percebeu-se que a curva manteve uma linearidade de 0,9916.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de um espectrofotômetro portátil de baixo custo, capaz de operar na faixa de comprimento de onda de 420 nm a 860 nm, com linearidade superior a 0,9, utilizando LEDs como fonte de luz.

Como mostra o Capítulo 4, o produto desenvolvido, atingiu os principais objetivos, pois é capaz de operar com uma configuração de LEDs, na faixa de λ de 400 nm a 870 nm, e com linearidade superior a 0,9, com exceção de uma pequena faixa entre 400 e 470 nm. Por não necessitar de sistema mecânico de decomposição da luz através de um prisma, e possuir uma eletrônica simples e compacta, também se atingiram os objetivos de portabilidade e custo baixo.

Além dos objetivos principais, outros objetivos também foram alcançados:

- Desenvolver uma nova tecnologia nacional de análise colorimétrica;
- Preencher uma lacuna de mercado entre fotômetros e espectrofotômetros;
- Desenvolver um analisador químico e biológico, capaz de ser utilizado em análises de campo e/ou laboratório.

Com o desenvolvimento do projeto com tecnologia industrial nacional, a empresa Alfakit, ao colocar este produto no mercado, está fornecendo aos consumidores uma opção intermediária que agrega características de baixo custo, portabilidade dos fotômetros, ampla faixa de espectro e alta precisão dos espectrofotômetros de prisma. Desta forma, ficam contemplados os objetivos específicos mencionados.

Contudo, restam ainda, algumas considerações referentes às seguintes metas de desenvolvimento:

- Eliminar efeitos de descalibração das curvas inseridas no equipamento;
- Reduzir a instabilidade de emissão dos LEDs, quando comparados com fotômetros;

- Permitir o funcionamento com fonte e bateria.

Quanto a estes aspectos, destaca-se que os efeitos de descalibração e instabilidade de emissão dos LEDs, tinham a mesma fonte de problemas: a falta de um dispositivo de controle da tensão e corrente de alimentação dos LEDs. No caso de alimentação por baterias ou pilhas, estas, com o tempo podem degradar a sua capacidade de carga, alterando a tensão e corrente dos LEDs. Este aspecto pode causar instabilidade de leitura e um efeito de descalibração das medições, uma vez que as curvas de respostas foram calculadas para carga plena de alimentação. Quando a alimentação é proveniente de fonte externa, esta não perde com o tempo sua capacidade de carga, mas está à mercê de flutuações da rede de energia e da degradação dos próprios componentes eletrônicos da fonte.

Com a utilização dos controladores TLC5941, conseguiu-se eliminar os efeitos de descalibração e reduzir a instabilidade do sistema óptico, pois as flutuações da alimentação não são transmitidas para dos LEDs, que são acionados sempre com a mesma tensão e corrente programada para cada curva característica.

Não obstante, outras ações também foram implementadas no sentido de garantir os seguintes aspectos:

- Eliminar efeitos de mau ajuste ou centralização do compartimento “porta-cubetas”;
- Diminuir o excessivo custo de calibrações dos equipamentos com sistema óptico.

O projeto do novo poço para acomodação da cubeta priorizou o alinhamento dos LEDs com o sensor receptor de intensidade luminosa, fazendo com que todos os LEDs, ao serem encaixados no poço, apontem perfeitamente para o centro do sensor que se encontra no lado oposto, também posicionado em um encaixe. Com isso, conseguiu-se eliminar os efeitos de mau alinhamento dos LEDs e, conseqüentemente, reduzir os custos de calibração e ajustes do sistema óptico.

De maneira complementar atingiu-se os objetivos de capacidade de memória (100 posições), além de maior tempo de duração da bateria, uma vez que todos os componentes

utilizados possuem características de baixo consumo. A TABELA 16, apresenta um quadro comparativo entre o espectrofotômetro de LED desenvolvido neste trabalho e um Fotocolorímetro comercial (AT 10P da Alfakit).

TABELA 16 – Quadro comparativo de equipamentos

Equipamento	<i>Consumo Normal</i> ¹⁰	<i>Consumo em Análise</i> ¹¹	<i>Tempo de Análise</i> ¹²
Espectro de LED	30 mA	70 mA	2 s
Fotocolorímetro AT 10P ¹³	305 mA	326 mA	10 s

Pode-se verificar que o consumo normal do espectro de LED ficou aproximadamente 10 vezes menor que do fotocolorímetro, assim como o consumo em análise ficou quase 5 vezes menor, somados ao tempo de análise, também 5 vezes mais rápido, dando ao espectrofotômetro de LED uma autonomia de bateria bastante superior.

5.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

A principal vantagem do espectrofotômetro de LED, em comparação com os equipamentos de prisma, é a sua portabilidade e relação custo x benefício, pois no decorrer do presente projeto foi possível desenvolver um produto portátil, com alta autonomia de bateria, com baixo custo e com resposta compatível aos aparelhos de bancada.

Embora tenha uma boa resposta entre os comprimentos de onda de 470 nm a 870 nm, valores de λ inferiores ou superiores a esta faixa não devem ser utilizados, pois fora desta faixa o equipamento ainda não possui resposta linear. Já os

¹⁰ Aparelho ligado, porém sem executar medições.

¹¹ Sistema óptico ligado, executando medições.

¹² Tempo que o sistema óptico fica ligado para executar uma medição.

¹³ Fabricante: Alfakit.

espectrofotômetros de prisma, costumam possuir uma faixa de resposta linear um pouco maior, como é o caso do DR 2500, da Hach (Figura 2), que opera com comprimento de onda de 365 nm a 880 nm.

Outra limitação é quanto ao alinhamento dos LEDs com o sensor de intensidade luminosa. Apesar de serem somente 3 LEDs e possuírem um encaixe no poço, como este poço é usinado, corre-se o risco de não haver precisão em sua fabricação. Desta forma, recomenda-se que seja feita uma matriz para injeção do poço, melhorando assim a qualidade dos encaixes e alinhamentos.

Os espectrofotômetros de prisma costumam possuir também algumas funções de *software* ainda não implementadas neste espectrofotômetro de LED, como varredura automática do espectro de emissão e apresentação de gráficos e tabelas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função da importância que as análises químicas e biológicas têm em nossas vidas, e das inúmeras aplicações onde pode-se utilizar a tecnologia desenvolvida neste trabalho, alguns aspectos ainda podem ser explorados futuramente para aprimoramento das técnicas e refinamento dos resultados. Dentre as possibilidades de continuidade do presente estudo, destacam-se:

Faixa de Operação de 400 nm a 470 nm: Durante os ensaios de funcionamento abordados no Capítulo 4, observou-se uma anomalia no padrão de resposta do equipamento. Para melhorar esta resposta, seriam necessários ensaios adicionais para ajustar melhor a intensidade do LED ultravioleta (400 nm), e também a inserção de um quarto LED entre 400 nm e 470 nm, para homogeneizar a mistura de cor na faixa ultravioleta. Com isso, espera-se ajustar o ponto fora da curva, elevando a linearidade de resposta do equipamento para próximo de 1.

Sensor de Intensidade Luminosa: O sensor TSL230ARD, da TAOS, possui erro máximo de 10 %, que está dentro da média dos demais sensores comerciais, porém

acredita-se que a utilização de um sensor de menor erro traria significativo ganho para a qualidade do equipamento e precisão das respostas. Durante as pesquisas de sensores não se encontrou um sensor comercial com erro menor que o utilizado, porém uma pesquisa mais profunda poderia ser realizada, ou até mesmo o desenvolvimento de um sensor com as características desejadas.

Varredura Automática de Espectro: Incorporar funções de varredura automática de espectro para levantamento do gráfico de absorção x comprimento de onda de soluções desconhecidas. Por meio da análise dos picos de absorção desta varredura é possível determinar as substâncias que compõem esta solução, pois diversas substâncias já possuem catalogados seus picos de absorção (ver TABELA 2). Esta função é de suma importância em análises químicas e biológicas de efluentes industriais, e pode ser incorporada a este produto somente com alterações de firmware, pois o atual hardware já é adequado para a tarefa. A Figura 61 ilustra um gráfico de varredura de absorção.

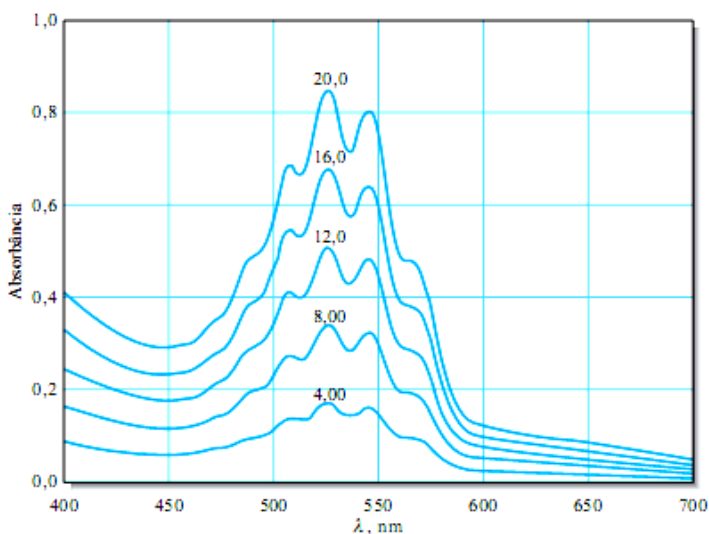


FIGURA 61 – Espectros de absorção típicos do permanganato de potássio a diferentes concentrações

Fonte: (SKOOG et al., 2005)

Modelo Matemático para a Mistura de Cores: Uma das grandes dificuldades deste trabalho foi encontrar a “receita” correta para misturar as cores e obter os comprimentos de onda desejados. Dentre um universo de possibilidades de combinações de 5 LEDs, utilizaram-se somente combinações de dois em dois LEDs, como forma de simplificar os ensaios experimentais de mistura de cores. Porém, com este método é desperdiçada uma importante contribuição que os demais LEDs poderiam dar para compor com precisão o comprimento de onda desejado. Sendo assim, acredita-se que um modelo matemático poderia ser construído, prevendo a utilização simultânea dos 5 LEDs na composição da cor, e ainda priorizar dentre as várias possibilidades, aquela que consome a menor quantidade de energia.

Desenvolvimento de Novos Equipamentos: A plataforma tecnológica desenvolvida neste trabalho, principalmente a de *hardware*, poderá ser utilizada no desenvolvimento de outros equipamentos que utilizam a luz como componente principal de seu funcionamento, como, por exemplo, um Fluorômetro, para determinação de pigmentos fotossintetizantes. Muitas moléculas possuem a propriedade de, quando estimuladas pela energia de uma radiação eletromagnética de comprimento de onda adequado, reemitem parte dessa energia sob a forma de uma radiação visível. Pacotes de energia, conhecidos por fótons, associados a essas radiações, interagem com os níveis de energia moleculares, dando origem ao fenômeno da fluorescência (CATUNDA et al., 2005). Atualmente, o uso da fluorescência tornou-se uma poderosa ferramenta de investigação em diversas áreas. Algumas aplicações em pesquisas envolvem, por exemplo, um incremento no processo de sequenciamento de DNA ou sua quantificação por meio da técnica de Reação em Cadeia pela Polimerase (PCR – *Polymerase Chain Reaction*) em tempo real; detectores fluorescentes para Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC – *High Performance Liquid Chromatography*) usada na identificação, quantificação, separação e purificação de inúmeros compostos; a microscopia de fluorescência usada na detecção de diversas estruturas celulares e estudos sobre expressão gênica por meio de DNA *Microarray*.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca incessante por inovação, atrelada ao desenvolvimento de produtos eletrônicos, sempre foi diretriz propulsora de toda a pesquisa e desenvolvimento deste trabalho.

Inovações Tecnológicas em Produtos e Processos (TPP) compreendem as implantações de produtos e processos tecnologicamente novos e substanciais melhorias tecnológicas em produtos e processos. Uma inovação TPP é considerada implantada se tiver sido introduzida no mercado (inovação de produto) ou usada no processo de produção (inovação de processo). Uma inovação TPP envolve uma série de atividades científicas, tecnológicas, organizacionais, financeiras e comerciais. Uma empresa inovadora em TPP é uma empresa que tenha implantado produtos ou processos tecnologicamente novos ou com substancial melhoria tecnológica durante o período em análise. A exigência mínima é que o produto ou processo deve ser novo (ou substancialmente melhorado) para a empresa (não precisa ser novo no mundo). (Manual de Oslo, 1997)

A definição de inovação tecnológica, do Manual de Oslo (1997), afere ao produto desenvolvido, batizado de Espectrofotômetro AT-900, status de Inovação Tecnológica em Produto, **implantada**, pois de fato entrou para a linha de produção da empresa e serão comercializados a partir de 2012.

REFERÊNCIAS

AGOSTINI JR, Eloi. **Estudo e implementação de uma estrutura para a alimentação de LEDs de potência com controle da cor e da intensidade luminosa**. 2008. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2008.

ALFAKIT. Disponível em: <<http://www.alfakit.com.br>>. Acesso em: 26 out. 2011.

ANDRADE, João Carlos; CUSTODIO, Rogério; KUBOTA, Lauro T. **Lei dos processos de absorção da radiação**. Artigo, Chemkey, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, 2000. Disponível em: <<http://chemkeys.com/br>>. Acesso em: 23 jun. 2011.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. APHA/AWWA/WEF. Washington, USA, 2005.

BALANIS, Constantine A. **Advanced engineering electromagnetics**. Editora Wiley, 1938.

BAXTER, Mike. **Projeto de produto** – guia prático para o design de novos produtos. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1998.

BURR–BROWN from TEXAS INSTRUMENTS. **DMOS: 400mA low-dropout regulator**. REG113–33 – Datasheet, 2001, Revisão 2005.

CAMPBELL, Lewis; GARNETT, William. **The life of James Clerk Maxwell**. Edinburgh: MacMillan, 1882.

CATUNDA, M. G. et al. Efeitos de herbicidas na atividade fotossintética e no crescimento de abacaxi (*Ananas comosus*). **Planta Daninha**, v. 23, n. 1, 2005.

FERREIRA, Golberi S. **Princípios de sistemas de comunicação**. Propagação de ondas eletromagnéticas. IFSC, Florianópolis, 2010.

GAIÃO, Edvaldo da Nóbrega; MEDEIROS, Everaldo Paulo; LYRA, Wellington da Silva; MOREIRA, Pablo Nogueira Teles; VASCONCELOS, Pablo Cavalcante; SILVA, Edvan Cirino; ARAÚJO, Mário César Ugulino. Um fotômetro multi-LED microcontrolado, portátil e de baixo custo. **Nota Técnica**, Departamento de Química, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, v. 28, n.6, p. 1102–1105, 2005.

GONG, Weidong; MOWLEM, Matt; KRAFT, Michael; MORGAN, Hywel. A simple, low-cost double beam spectrophotometer for colorimetric detection of nitrite in seawater. **IEEE. Sensors Journal**, v. 9, n. 7, jul. 2009.

HACH. Disponível em: <<http://www.hach.com/>>. Acesso em: 21 nov. 2011.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. Disponível em: <<http://www.inpi.gov.br>>. Acesso em: 10 dez. 2009 e 11 dez. 2009.

KHAN, Salman. Khan Academy. Disponível em: <<http://www.khanacademy.org>>. Acesso em: 23 jul. 2011.

KUSTERER, J. M. **What wavelength goes with a color?** Atmospheric science data center. Disponível em: <<http://eosweb.larc.nasa.gov>>. Acesso em: 21 ago. 2011.

LACERDA, Joel. **Projeto de produto**. Departamento Acadêmico de Eletrônica, IFSC, Florianópolis, 2010.

LENZ, Guido. **Métodos fotométricos**. Biofísica, UFRGS, 1997.

LÜDKE, Everton. Um espectrofotômetro de baixo custo para laboratórios de ensino: aplicações no ensino da absorção eletrônica e emissão de fluorescência. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 1, p. 1506, 2010.

MANUAL DE OSLO. **Proposta de diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação tecnológica**. OECD, OCDE, FINEP, 1997.

MAXIM. **+3.3V–Powered, EIA/TIA–562 dual transceiver with receivers active in shutdown**. MAX563 – Datasheet, 1993.

MORENO, Ivan.; CONTRERAS, Ulises. Color Distribution From Multicolor LED Arrays. **Optics Express**, v. 15, n. 6, Optical Society of America, 2007.

NEW HEAVEN DISPLAY. **Character liquid crystal display module**. NHD–0216HZ–FSW–FBW–3V3C – Datasheet, 2008.

PACIFIC SILICON SENSOR. **Wavelength sensor and circuit**. WS–7.56–PCBA2 – Datasheet, 2010.

PEDROSA, Israel. **Da cor à cor inexistente**. Rio de Janeiro: Editora Universidade de Brasília, 1982.

ROCHA, João Carlos. Cor luz, cor pigmento e os sistemas RGB e CMY. Artigo. **Revista Belas Artes**, 2010.

RYER, A. **Light measurement handbook**, [S.I.], Editora International Light Inc., 1998.

SKOOG, Douglas A.; WEST, Donald M.; HOLLER, F. James; CROUCH, Stanley R. **Fundamentos de química analítica**. 8. ed. São Paulo: Editora Thomson, 2005.

SWINEHART, D. F. The Beer–Lambert Law. **Journal of Chemical Education**, n. 39, p. 333–335, 1962.

TANG, Yawei; JIANG, Kai; ZHU, Fan; LOU, Kaikai; FU, Xiuquan; TU, Yuewen. **A spectrophotometric analysis device for continuous or on-line measurement of solution concentration.** Artigo IEEE, 2011.

TAOS. **Programmable light-to-frequency converts.** TSL230ARD – Datasheet, 2007.

TEKO. **TN23-B – Datasheet.** Disponível em: <<http://www.teko.it/multimedia/manuali/pdf/TN23-B.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2010.

TEXAS INSTRUMENTS. **Adjustable micropower voltage regulators with shutdown.** LP2951-33 – Datasheet, 2006, Revisão 2009.

TEXAS INSTRUMENTS. **Mixed signal microcontroller.** MSP430xG461x – Datasheet, 2006, Revisão 2011.

TEXAS INSTRUMENTS. **16 – Channel led driver with dot correction and grayscale pwm control.** TLC5941– Datasheet, 2005, Revisão 2008.

VALENTE JR, Wilson. **Aplicação coordenada das técnicas de medição, simulação numérica e otimização, para o mapeamento do ambiente eletromagnético em hospitais.** 2011. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, 2011.

VINADÉ, Maria Elisabeth do Canto; VINADÉ, Elsa Regina do Canto. **Métodos espectroscópicos de análise quantitativa.** Santa Maria: Editora UFSM, 2005.

YEH, Tai-Sheng. TSENG, Shih-Shin. A low cost LED based spectrometer. **Journal of the Chinese Chemical Society**, n. 53, p. 1067-1072, 2006.

ANEXO A – PESQUISA DE PATENTES

INPI INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL


Consulta à Base de Dados do INPI
[Pesquisa Base Marcas | Pesquisa Base Patentes | Pesquisa Base Desenhos | Ajuda?]

RESULTADO DA PESQUISA (10/12/2009 às 14:29:24)
Pesquisa por:
 Todas as palavras: INTERPOLAÇÃO DE LEDS no título \

- Nenhum resultado foi encontrado para a sua pesquisa. Para efetuar outra pesquisa, pressione o botão de VOLTAR.

AVISO: Depois de fazer uma busca no banco de dados do INPI, ainda que os resultados possam parecer satisfatórios, não se deve concluir que a Patente poderá ser concedida. O INPI no momento do exame do pedido de Patente realizará nova busca que será submetida ao exame técnico que decidirá a respeito da concessão da Patente.

Dados atualizados até 08/12/2009 - Nº de Revista: 2031

voltar 

INPI INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL


Consulta à Base de Dados do INPI
[Pesquisa Base Marcas | Pesquisa Base Patentes | Pesquisa Base Desenhos | Ajuda?]

RESULTADO DA PESQUISA (11/12/2009 às 09:41:39)
Pesquisa por:
 Todas as palavras: ESPECTROFOTOMETRO INTERPOLAÇÃO DE LEDS no título \

- Nenhum resultado foi encontrado para a sua pesquisa. Para efetuar outra pesquisa, pressione o botão de VOLTAR.

AVISO: Depois de fazer uma busca no banco de dados do INPI, ainda que os resultados possam parecer satisfatórios, não se deve concluir que a Patente poderá ser concedida. O INPI no momento do exame do pedido de Patente realizará nova busca que será submetida ao exame técnico que decidirá a respeito da concessão da Patente.

Dados atualizados até 08/12/2009 - Nº de Revista: 2031

voltar 

INPI INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL


Consulta à Base de Patentes - Resultado da Pesquisa
[Pesquisa Base Marcas | Pesquisa Base Desenhos | Ajuda?]

» Consultar por: Base Patentes | Finalizar Sessão

RESULTADO DA PESQUISA (10/12/2009 às 14:20:26)
Pesquisa por:
 Todas as palavras: FOTOCOLORIMETRO no título \ Foram encontrados 1 processos que satisfazem à pesquisa. Mostrando página 1 de 1.

Processo	Depósito	Título
PIB703163-9	23/06/1997	FOTOCOLORIMETRO DE DUPLO FEIXE COM FIBRAS ÓTICAS E VARIAÇÃO SIMULTANEA DOS DOIS CAMINHOS ÓTICOS

Páginas de Resultados:
1

voltar 

INPI INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL


Consulta à Base de Dados do INPI
[Pesquisa Base Marcas | Pesquisa Base Patentes | Pesquisa Base Desenhos | Ajuda?]

RESULTADO DA PESQUISA (11/12/2009 às 09:35:24)
Pesquisa por:
 Todas as palavras: ESPECTROFOTOMETRO COM MULTIPLOS LEDS no título \

- Nenhum resultado foi encontrado para a sua pesquisa. Para efetuar outra pesquisa, pressione o botão de VOLTAR.

AVISO: Depois de fazer uma busca no banco de dados do INPI, ainda que os resultados possam parecer satisfatórios, não se deve concluir que a Patente poderá ser concedida. O INPI no momento do exame do pedido de Patente realizará nova busca que será submetida ao exame técnico que decidirá a respeito da concessão da Patente.

Dados atualizados até 08/12/2009 - Nº de Revista: 2031

voltar 

ANEXO B – DATASHEETS



TLC5941

SLV5589D–JULY 2005–REVISED JANUARY 2008

16-CHANNEL LED DRIVER WITH DOT CORRECTION AND GRAYSCALE PWM CONTROL

FEATURES

- 16 Channels
- 12-Bit (4096 Steps) Grayscale PWM Control
- Dot Correction
 - 6 Bit (64 Steps)
- Drive Capability (Constant-Current Sink)
 - 0 mA to 80 mA
- LED Power Supply Voltage up to 17 V
- $V_{CC} = 3.0\text{ V}$ to 5.5 V
- Serial Data Interface
- Controlled In-Rush Current
- 30-MHz Data Transfer Rate
- CMOS Level I/O
- Error Information
 - LOD: LED Open Detection
 - TEF: Thermal Error Flag

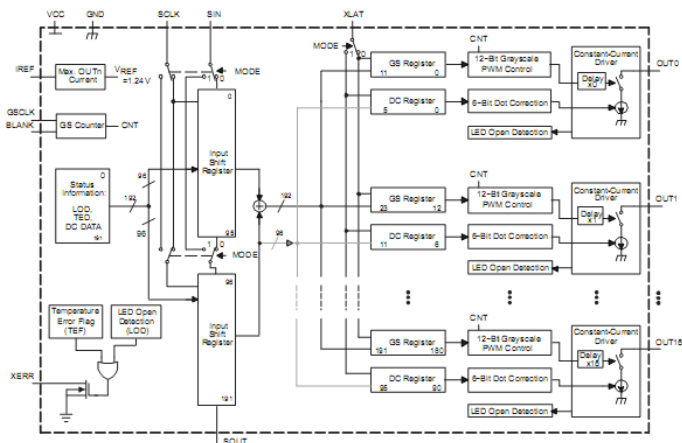
APPLICATIONS

- Monocolor, Multicolor, Full-Color LED Displays
- LED Signboards
- Display Back-Lighting

DESCRIPTION

The TLC5941 is a 16-channel, constant-current sink, LED driver. Each channel has an individually adjustable 4096-step grayscale PWM brightness control and a 64-step constant-current sink (dot correction). The dot correction adjusts the brightness variations between LED channels and other LED drivers. Both grayscale control and dot correction are accessible via a serial interface. A single external resistor sets the maximum current value of all 16 channels.

The TLC5941 features two error information circuits. The LED open detection (LOD) indicates a broken or disconnected LED at an output terminal. The thermal error flag (TEF) indicates an overtemperature condition.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet. PowerPAD is a trademark of Texas Instruments.

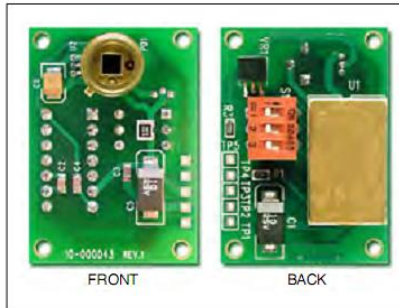
PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 2005–2008, Texas Instruments Incorporated

DATA SHEET**WS-7.56-PCBA2****PRELIMINARY DATA
WAVELENGTH SENSOR AND CIRCUIT WS-7.56-PCBA2**

The PSS-WS-7.56-PCBA is a unique wavelength sensor based on silicon photodiode technology. The sensor is constructed monolithically by superimposing two photodiodes vertically. The active area is 7.56mm^2 ($2.7\text{mm} \times 2.7\text{mm}$). This device is most useful for wavelength determination of monochromatic light sources such as lasers and LED's. More information on the sensor is available on this web site under "Wavelength Sensitive Photodiodes".

The sensor is mounted on a PCB as shown with all the necessary circuitry to convert incident wavelength to an output voltage. The voltage is proportional to wavelength in the range of 450nm to 900nm. The output is independent of intensity. The circuit provides switched gain controls to accommodate various output requirements. As an example a typical output is 1.7 volts for a wavelength of 670nm, with a gain setting of 5. The data in this sheet provides typical information. The actual output must be calibrated against known sources for accuracy. Resolution of 0.01nm is possible. The circuit requires ± 15 volts and consists of two logarithmic amplifiers and a ratio calculator. The sensor is mounted on a temperature monitor for reference. Applications include laser monitoring, matching of LED's and other light sources.



CIRCUIT REQUIREMENTS						
SUPPLY VOLTAGE			SUPPLY CURRENT	TEMPERATURE CURRENT	INPUT DYNAMIC RANGE	OPERATING TEMPERATURE
Minimum	Typical	Maximum	Typical = +20MA	Output Current Limit 10MA	10 μ w to 3MW	-20° to +55°C
$\pm 12.0\text{V}$	$\pm 15.0\text{V}$	$\pm 18.0\text{V}$				

Page 1 of 4



5700 Corsa Avenue, #105 • Westlake Village, CA 91362
Tel: (818) 706-3400 • Fax (818) 889-7053
Email: sales@pacific-sensor.com • www.pacific-sensor.com

DATA SHEET

WS-7.56-T05

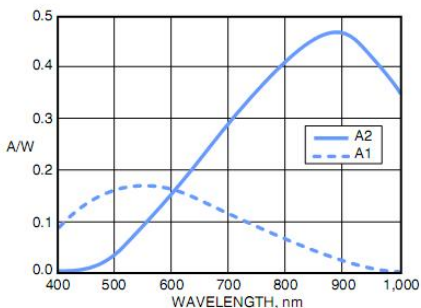
WAVELENGTH SENSOR WS-7.56-T05

SPECIAL CHARACTERISTICS

- Two p-n junctions constructed vertically
- Operating range: 450 - 900 nm
- Spectral resolution: 0.01 nm
- Specially for monochromatic light

PARAMETERS

Part No.	WS-7.56-T05
Active Area	7.56 mm ² 2.75 x 2.75 mm
Operating Range	450 - 900 nm
Spectral Resolution	0.01 nm
Bias Voltage U_R	Max. 5V
Saturation Level	Max. 150 μ W (0V) Max. 3 mW (5V)
Dark Current I_{RD} @ $E = 0lx$, $U_R = 5V$	Max. 100 nA Typ. 10 nA
Spectral Responsivity Diode 1 @ 550 nm	Typ. 0.2 A/W
Spectral Responsivity Diode 2 @ 890 nm	Typ. 0.45 A/W
Junction Capacitance C_j Diode 1 @ 0V	Typ. 1 nF
Junction Capacitance C_j Diode 2 @ 0V	Typ. 0.1 nF
Rise Time t_r Diode 1 @ 0V, 1k Ω	Typ. 10 μ s
Rise Time t_r Diode 2 @ 0V, 1k Ω	Typ. 1 μ s
Quotient Q Depending on U_{Bias} @ $\lambda = 635$ nm	In case of short circuit typ. 5 nm/V
Temperature Coefficient of Quotient Q @ $\lambda = 635$ nm, 0V	In case of short circuit typ. 1 nm/K
Operating Temperature	-20 ... +55°C
Storage Temperature	-40 ... +100°C
Shunt Resistance @ 22°C @ $U_R = 10$ mV Diode 1	Typ. 2 G Ω
Diode 2	Typ. 100 M Ω



SPECTRAL RESPONSIVITY (A/W)

Page 1 of 2



NHD-0216HZ-FSW-FBW-3V3C

Character Liquid Crystal Display Module

NHD-	Newhaven Display
0216-	2 lines x 16 characters
HZ-	Model
F-	Transflective
SW-	Side White LED Backlight
F-	FSTN (+)
B-	6:00 view
W-	Wide Temperature (-20°C~+70°C)
3V3-	3.0 VDD, 3 Volt Backlight
C-	Temperature Compensation Circuit
	RoHS Compliant

Newhaven Display International, Inc.

2511 Technology Drive, Suite 101

Elgin IL, 60124

Ph: 847-844-8795

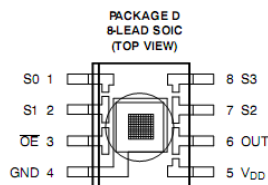
Fax: 847-844-8796

www.newhavendisplay.com

nhtech@newhavendisplay.com

nhsales@newhavendisplay.com

- High-Resolution Conversion of Light Intensity to Frequency With No External Components
- Programmable Sensitivity and Full-Scale Output Frequency
- Communicates Directly With a Microcontroller
- High Irradiance Responsivity . . . 790 Hz/($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) Typical at 640 nm
- Single-Supply Operation . . . 2.7 V to 5.5 V
- Power-Down Feature . . . 5 μA Typical
- Nonlinearity Error Typically 0.2% at 100 kHz
- Stable 200 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ Temperature Coefficient
- Low-Profile Lead (Pb) Free and RoHS Compliant Surface-Mount Package

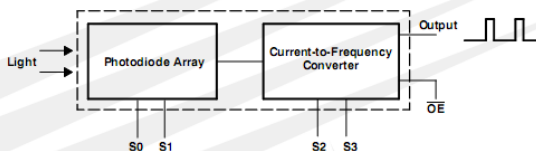


Description

The TSL230RD, TSL230ARD, and TSL230BRD programmable light-to-frequency converters combine a configurable silicon photodiode and a current-to-frequency converter on single monolithic CMOS integrated circuit. The output can be either a pulse train or a square wave (50% duty cycle) with frequency directly proportional to light intensity. Device sensitivity is selectable in three ranges, providing two decades of adjustment. The full-scale output frequency can be scaled by one of four preset values. All inputs and the output are TTL compatible, allowing direct two-way communication with a microcontroller for programming and output interface. The output enable ($\overline{\text{OE}}$) places the output in the high-impedance state for multiple-unit sharing of a microcontroller input line.

The devices are available with absolute output frequency tolerances of $\pm 10\%$ (TSL230BRD), $\pm 15\%$ (TSL230ARD), and $\pm 20\%$ (TSL230RD). They have been temperature compensated for the ultraviolet-to-visible light range of 320 nm to 700 nm and respond over the light range of 320 nm to 1050 nm. The devices are characterized over the temperature range of -25°C to 70°C .

Functional Block Diagram





SBVS031D – MARCH 2001 – REVISED SEPTEMBER 2005

DMOS

400mA Low-Dropout Regulator

FEATURES

- CAP-FREE DMOS TOPOLOGY:
Ultra Low Dropout Voltage:
250mV typ at 400mA
Output Capacitor *not* Required for Stability
- UP TO 500mA PEAK, TYPICAL
- FAST TRANSIENT RESPONSE
- VERY LOW NOISE: 28 μ Vrms
- HIGH ACCURACY: $\pm 1.5\%$ max
- HIGH EFFICIENCY:
 $I_{GND} = 850\mu A$ at $I_{OUT} = 400mA$
Not Enabled: $I_{GND} = 0.01\mu A$
- 2.5V, 2.85V, 3.0V, 3.3V, AND 5.0V OUTPUT VERSIONS
- OTHER OUTPUT VOLTAGES AVAILABLE UPON REQUEST
- FOLDBACK CURRENT LIMIT
- THERMAL PROTECTION
- SMALL SURFACE-MOUNT PACKAGES:
SOT23-5 and MSOP-8

APPLICATIONS

- PORTABLE COMMUNICATION DEVICES
- BATTERY-POWERED EQUIPMENT
- PERSONAL DIGITAL ASSISTANTS
- MODEMS
- BAR-CODE SCANNERS
- BACKUP POWER SUPPLIES

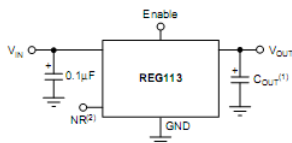
DESCRIPTION

The REG113 is a family of low-noise, low-dropout linear regulators with low ground pin current. Its new DMOS topology provides significant improvement over previous designs, including low-dropout voltage (only 250mV typ at full load), and better transient performance. In addition, no output capacitor is required for stability, unlike conventional low-dropout regulators that are difficult to compensate and require expensive low ESR capacitors greater than 1 μ F.

Typical ground pin current is only 850 μ A (at $I_{OUT} = 400mA$) and drops to 10nA when not enabled. Unlike regulators with PNP pass devices, quiescent current remains relatively constant over load variations and under dropout conditions.

The REG113 has very low output noise (typically 28 μ Vrms for $V_{OUT} = 3.3V$ with $C_{NR} = 0.01\mu F$), making it ideal for use in portable communications equipment. Accuracy is maintained over temperature, line, and load variations. Key parameters are tested over the specified temperature range ($-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$).

The REG113 is well protected—internal circuitry provides a current limit which protects the load from damage, furthermore, thermal protection circuitry keeps the chip from being damaged by excessive temperature. The REG113 is available in SOT23-5 and MSOP-8 packages.



NOTES: (1) Optional. (2) NR = Noise Reduction.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

TEXAS
INSTRUMENTS
www.ti.com

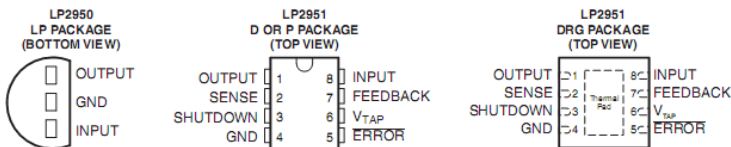
Copyright © 2001-2005, Texas Instruments Incorporated

ADJUSTABLE MICROPOWER VOLTAGE REGULATORS WITH SHUTDOWN

Check for Samples: [LP2950](#), [LP2951](#)

FEATURES

- Wide Input Range: Up to 30 V
- Rated Output Current of 100 mA
- Low Dropout: 380 mV (Typ) at 100 mA
- Low Quiescent Current: 75 μ A (Typ)
- Tight Line Regulation: 0.03% (Typ)
- Tight Load Regulation: 0.04% (Typ)
- High V_O Accuracy
 - 1.4% at 25°C
 - 2% Over Temperature
- Can Be Used as a Regulator or Reference
- Stable With Low ESR (>12 m Ω) Capacitors
- Current- and Thermal-Limiting Features
- LP2950 Only (3-Pin Package)
 - Fixed-Output Voltages of 5 V, 3.3 V, and 3 V
- LP2951 Only (8-Pin Package)
 - Fixed- or Adjustable-Output Voltages: 5 V/ADJ, 3.3 V/ADJ, and 3 V/ADJ
 - Low-Voltage Error Signal on Falling Output
 - Shutdown Capability
 - Remote Sense Capability for Optimal Output Regulation and Accuracy



DESCRIPTION/ORDERING INFORMATION

The LP2950 and LP2951 devices are bipolar, low-dropout voltage regulators that can accommodate a wide input supply-voltage range of up to 30 V. The easy-to-use, 3-pin LP2950 is available in fixed-output voltages of 5 V, 3.3 V, and 3 V. However, the 8-pin LP2951 is able to output either a fixed or adjustable output from the same device. By tying the OUTPUT and SENSE pins together, and the FEEDBACK and V_{TAP} pins together, the LP2951 outputs a fixed 5 V, 3.3 V, or 3 V (depending on the version). Alternatively, by leaving the SENSE and V_{TAP} pins open and connecting FEEDBACK to an external resistor divider, the output can be set to any value between 1.235 V to 30 V.

The 8-pin LP2951 also offers additional functionality that makes it particularly suitable for battery-powered applications. For example, a logic-compatible shutdown feature allows the regulator to be put in standby mode for power savings. In addition, there is a built-in supervisor reset function in which the ERROR output goes low when V_{OUT} drops by 6% of its nominal value for whatever reasons – due to a drop in V_{IN} , current limiting, or thermal shutdown.

The LP2950 and LP2951 are designed to minimize all error contributions to the output voltage. With a tight output tolerance (0.5% at 25°C), a very low output voltage temperature coefficient (20 ppm typical), extremely good line and load regulation (0.3% and 0.4% typical), and remote sensing capability, the parts can be used as either low-power voltage references or 100-mA regulators.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.



+3.3V-Powered, EIA/TIA-562 Dual Transceiver with Receivers Active in Shutdown

MAX563

General Description

The MAX563 is a +3.3V-powered EIA/TIA-562 transceiver with two transmitters and two receivers. Because it implements the EIA/TIA-562 standard, the MAX563 communicates with RS-232 transceivers, yet consumes far less power; this makes it ideal for battery-powered, hand-held computers. And, the MAX563 guarantees a 116kbps data rate while maintaining $\pm 3.7V$ EIA/TIA-562 signal levels, which makes it compatible with LapLink™ software.

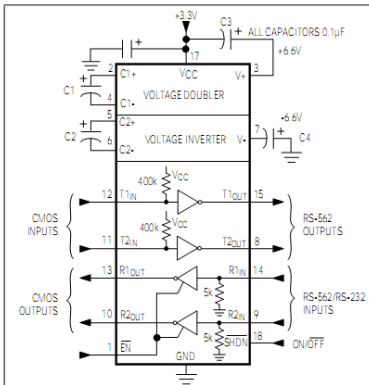
An on-board charge pump converts the +3.3V supply to the $\pm 6.6V$ needed to produce the EIA/TIA-562 output voltage levels. Four 0.1 μF charge-pump capacitors and a bypass capacitor of similar size are the only external components required.

When the MAX563's charge pumps and transmitters are shut down to save power, the receivers remain active to continuously monitor signals from external devices (for example, ring indicator from modems). The two receivers' outputs can be enabled and disabled independently of the shutdown function to allow two ports—generally of different types—to be wire-OR connected at the UART.

Applications

- Handterminals
- Battery-Powered Equipment
- Bar-Code Readers
- Notebook and Palmtop Computers

Typical Operating Circuit



™ LapLink is a registered trademark of Traveling Software, Inc.

Features

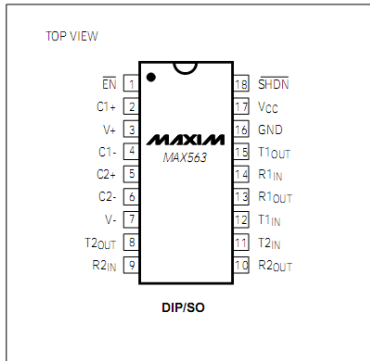
- ♦ Guaranteed Interoperability with RS-232
- ♦ Operates from a Single +3.0V to +3.6V Supply
- ♦ 2 Drivers, 2 Receivers
- ♦ Receivers Active in Shutdown Mode
- ♦ Low-Power Shutdown: 10 μA Max
- ♦ Small Package—18-Pin Wide SO
- ♦ Three-State TTL/CMOS Receiver Outputs
- ♦ 116kbps Guaranteed Data Rate

Ordering Information

PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE
MAX563CPN	0°C to +70°C	18 Plastic DIP
MAX563CWN	0°C to +70°C	18 Wide SO
MAX563C/D	0°C to +70°C	Dice *

* Dice are specified at T_A = +25°C.

Pin Configuration



Maxim Integrated Products 1

Call toll free 1-800-998-8800 for free samples or literature.

MSP430xG461x MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER

SLAS508I – APRIL 2008 – REVISED MARCH 2011

- Low Supply-Voltage Range: 1.8 V to 3.6 V
- Ultralow-Power Consumption:
 - Active Mode: 400 μ A at 1 MHz, 2.2 V
 - Standby Mode: 1.3 μ A
 - Off Mode (RAM Retention): 0.22 μ A
- Five Power-Saving Modes
- Wake-Up From Standby Mode in Less Than 6 μ s
- 16-Bit RISC Architecture, Extended Memory, 125-ns Instruction Cycle Time
- Three Channel Internal DMA
- 12-Bit A/D Converter With Internal Reference, Sample-and-Hold, and Autoscan Feature
- Three Configurable Operational Amplifiers
- Dual 12-Bit Digital-to-Analog (D/A) Converters With Synchronization
- 16-Bit Timer_A With Three Capture/Compare Registers
- 16-Bit Timer_B With Seven Capture/Compare-With-Shadow Registers
- On-Chip Comparator
- Supply Voltage Supervisor/Monitor With Programmable Level Detection
- Serial Communication Interface (USART1), Select Asynchronous UART or Synchronous SPI by Software
- Universal Serial Communication Interface
 - Enhanced UART Supporting Auto-Baudrate Detection
 - IrDA Encoder and Decoder
 - Synchronous SPI
 - I2C™
- Serial Onboard Programming, Programmable Code Protection by Security Fuse
- Brownout Detector
- Basic Timer With Real Time Clock Feature
- Integrated LCD Driver up to 160 Segments With Regulated Charge Pump
- Family Members Include:
 - MSP430xG4616: 92KB+256B Flash or ROM Memory, 4KB RAM
 - MSP430xG4617: 92KB+256B Flash or ROM Memory, 8KB RAM
 - MSP430xG4618: 116KB+256B Flash or ROM Memory, 8KB RAM
 - MSP430xG4619: 120KB+256B Flash or ROM Memory, 4KB RAM
- For Complete Module Descriptions, See the *MSP430x4xx Family User's Guide* (literature number SLAU056)

description

The Texas Instruments MSP430 family of ultralow-power microcontrollers consists of several devices featuring different sets of peripherals targeted for various applications. The architecture, combined with five low-power modes, is optimized to achieve extended battery life in portable measurement applications. The device features a powerful 16-bit RISC CPU, 16-bit registers, and constant generators that contribute to maximum code efficiency. The digitally controlled oscillator (DCO) allows wake-up from low-power modes to active mode in less than 6 μ s.

The MSP430xG461x series are microcontroller configurations with two 16-bit timers, a high-performance 12-bit A/D converter, dual 12-bit D/A converters, three configurable operational amplifiers, one universal serial communication interface (USCI), one universal synchronous/asynchronous communication interface (USART), DMA, 80 I/O pins, and a liquid crystal display (LCD) driver with regulated charge pump.

Typical applications for this device include portable medical applications and e-meter applications.



This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage. ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications. These devices have limited built-in ESD protection.



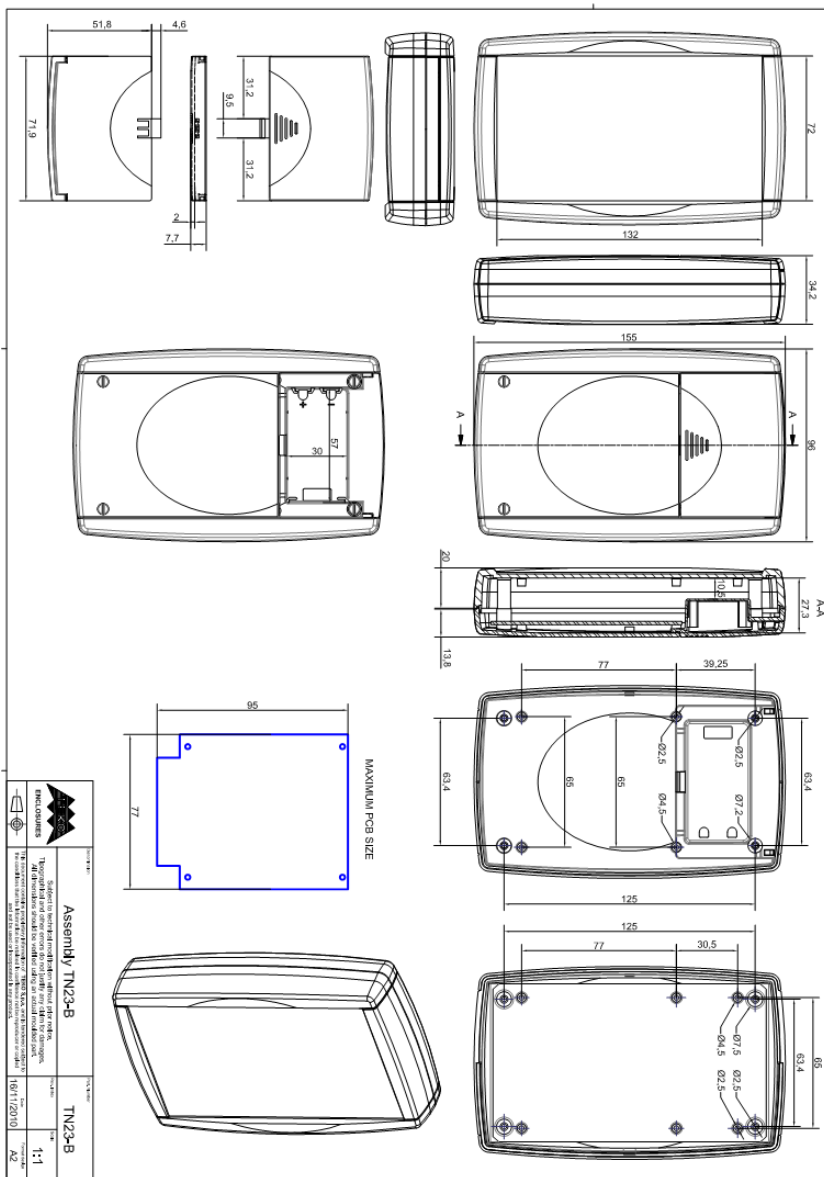
Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

 **TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2011, Texas Instruments Incorporated



ANEXO C – CERTIFICADO DE AFERIÇÃO DOS PADRÕES DA MERCK



Chargenzertifikat

Lot Certificate / Certificado del lote

Spectroquant® PhotoCheck

Spectroquant® PhotoCheck / Spectroquant® PhotoCheck

Art.Nr. / Cat.No. / Art. Nro.	1.14693.0001
Charge-Nr. / Lot no. / Lote nro.	HC109710
Verwendbarkeit / Expiry date / Fecha de caducidad	03/14
Photometer / Photometer / Fotómetro	Referenz / Reference / Referencia
Prüfer / Tester / Verificador	Fr. Brandner
Datum / Date / Fecha	31.03.2011
Datel / File / Fichero	114693_HC109710

Meßgerät: Referenzspektralphotometer Varian Cary 500; Ser. Nr. EL 96073498 geprüft und kalibriert mit Graugläsern NIST SRM 1930 sowie Holmiumoxid Lösung Merck Referenzmaterial Art. Nr. 108166 [1].

Instrument: Reference Spectrophotometer Varian Cary 500; Lot EL 96073498 checked and calibrated using NIST-grey glass filters SRM 1930 and Holmiumoxide Solution Merck reference material Cat. No. 108166 [1].

Instrumento: Espectrofotómetro de referencia Varian Cary 500; Núm. serie EL 96073498 probado y calibrado con filtros de vidrio gris NIST SRM 1930 así como solución de óxido de holmio de Merck material de referencia N° Art. 108166 [1].

Prüflösung für / Check Solution for / Solución de control para:

445 / 446 nm

Lösung / Solution / Solución	Extinktion 10-mm Küvette / Absorbance 10-mm cell / Absorbancia cubeta de 10 mm	Messwert Extinktion* Rundküvette / Result absorbance* round cell / Resultado absorbancia* cubeta redonda	Toleranz / Tolerance / Tolerancia	Minimum / Mínimo	Maximum / Máximo
445/1	0,146	0,198	± 0.020	0,178	0,218
445/2	0,371	0,501	± 0.030	0,471	0,531
445/3	0,744	1,005	± 0.040	0,965	1,045
445/4	1,109	1,496	± 0.050	1,446	1,546

Prüflösung für / Check Solution for / Solución de control para:

520 / 525 nm

Lösung / Solution / Solución	Extinktion 10-mm Küvette / Absorbance 10-mm cell / Absorbancia cubeta de 10 mm	Messwert Extinktion* Rundküvette / Result absorbance* round cell / Resultado absorbancia* cubeta redonda	Toleranz / Tolerance / Tolerancia	Minimum / Mínimo	Maximum / Máximo
525/1	0,148	0,200	± 0.020	0,180	0,220
525/2	0,368	0,496	± 0.030	0,466	0,526
525/3	0,741	1,000	± 0.040	0,960	1,040
525/4	1,108	1,496	± 0.050	1,446	1,546

Prüflösung für / Check Solution for / Solución de control para:

690 nm

Lösung / Solution / Solución	Extinktion 10-mm Küvette / Absorbance 10-mm cell / Absorbancia cubeta de 10 mm	Messwert Extinktion* Rundküvette / Result absorbance* round cell / Resultado absorbancia* cubeta redonda	Toleranz / Tolerance / Tolerancia	Minimum / Mínimo	Maximum / Máximo
690/1	0,147	0,198	± 0.020	0,178	0,218
690/2	0,367	0,496	± 0.030	0,466	0,526
690/3	0,738	0,997	± 0.040	0,957	1,037
690/4	1,104	1,490	± 0.050	1,440	1,540

* Dieser Wert wird aus der Extinktion der 1 cm Küvette über die Schichtdicke der Rundküvette berechnet und ist als Sollwert Extinktion einzutragen.

* This value has been calculated from the absorbance of the 1 cm cell using the path length of the round cell and is entered as the desired.

* Este valor ha sido calculado sobre la base de la absorbancia de la cubeta de 1 cm a través del espesor de la cubeta redonda y ha de ser indicado como valor teórico de absorbancia.

** ± 0,075 zulässige Toleranz für / allowed tolerance for / tolerancia permisible para / Spectroquant® NOVA 400

[1] J. C. Travis et al., J. Phys. Chem. Ref. Data (2005), 34(1), 43-56.

Merck KGaA

Dr. S. Freu

Qualitätskontrolle /
Quality control / Control de calidad

Laborleiter / Head of Lab. / Jefe
de laboratorio

Vorgenannte Ware wurde innerhalb der EU produziert (Deutschland) / Preceding indicated goods were produced within the European Community (Germany) / Mercancia precitada fue producida en la Union Europea (Alemania)

ANEXO D – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO – DR 2500

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO: EVO-0714 / 2010						
INFORMAÇÕES DA CONTRATANTE						
CONTRATANTE:		ALFAKIT LTDA.				
ENDEREÇO:		CÔNEGO BERNARDO, 327 A – TRINIDADE – FLORIANÓPOLIS – SC				
INFORMAÇÕES DO CLIENTE						
CLIENTE:		O mesmo				
DADOS DO INSTRUMENTO						
INSTRUMENTO CALIBRADO:		ESPECTROFOTOMETRO DIGITAL VIS				
Nº IDENTIFICAÇÃO:		LAB022				
MARCA:		HACH				
MODELO:		DR2500				
CAPACIDADE EM nm:		365 à 880 nm			RESOLUÇÃO: 1 nm	
FENDA ESPECTRAL:		1 nm				
NÚMERO DE SÉRIE:		020700003423				
TIPO DE FEIXE:		Feixe simples				
LOCAL DE CALIBRAÇÃO:		LABORATORIO DE QUIMICA – EVQ				
ORDEM DE SERVIÇO:		0714				
DATA DA CALIBRAÇÃO:		08/03/2010		DATA DA EMISSÃO:		08/03/2010
CONDIÇÕES AMBIENTAIS:						
TEMPERATURA:		23 °C ± 3 °C		UMIDADE:		50% UR ± 20%UR
PADRÕES UTILIZADOS						
CÓDIGO	PADRÃO	CERTIFICADO	LABORATÓRIO	RASTREADO	CALIBRAÇÃO	VALIDADE
10421	COMPRIMENTO DE ONDA	DIMCI2500/2009	INMETRO	INMETRO	08/09/2009	Set-11
10168	ABSORBÂNCIA VIS	DIMCI2501/2009	INMETRO	INMETRO	31/08/2009	Set-11
TH-H-EVO	HIGRÔMETRO AMBIENTE	LV 10196/09	VISOMES	RBC	16/03/2009	Mar-11
TH-T-EVO	TERMÔMETRO AMBIENTE	LV 10196/09	VISOMES	RBC	16/03/2009	Mar-11
PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO						
Identificação: PO – 5.4-101 Revisão: 02						
A calibração foi realizada, comparando os valores dos padrões com os valores lidos no instrumento em calibração. Os resultados expressos são a média de três leituras. Para a elaboração dos procedimentos foram utilizadas como referência Normas ASTM.						
PAGINA 1/3						

